

А. А. Ерохин, Ю. П. Саломатов, Е. Р. Гафаров

**ЦИФРОВЫЕ ФАЗИРОВАННЫЕ
АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ**

Красноярск
2025

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

А. А. Ерохин, Ю. П. Саломатов, Е. Р. Гафаров

ЦИФРОВЫЕ ФАЗИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ

Красноярск

2025

Издается в рамках государственного задания ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (FSRZ–2023–008)

Рецензенты:

В. И. Джиган, доктор технических наук, проф., профессор Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва, г. Зеленоград

С. В. Кривальцевич, кандидат физико-математических наук, доц., заместитель генерального директора по науке Акционерного общества Омский научно-исследовательский институт, г. Омск

Ерохин А. А.

Цифровые фазированные антенные решетки: монография / А. А. Ерохин, Ю. П. Саломатов, Е. Р. Гафаров. 2025. – 217 с.

Монография посвящена актуальным вопросам теории цифровых фазированных антенных решеток (ЦФАР), которые получают широкое распространение в современных телекоммуникационных, радиолокационных и навигационных системах благодаря своим широким функциональным возможностям. Основное внимание уделено задачам широкополосного цифрового диаграммоформирования, что обусловлено растущими требованиями к обработке широкополосных сигналов в сложной сигнально-помеховой обстановке.

554364



Рассмотрены принципы построения ЦФАР, алгоритмы адаптивного управления весовыми коэффициентами, методы пеленгации сигналов, а также методы синтеза диаграмм направленности, в том числе с нулями в заданных направлениях. В работе описаны методы формирования частотно-независимых ДН, проанализированы структурные схемы ЦФАР с временной (TDL) и пространственной (SDL) задержкой сигналов, а также рассмотрены алгоритмы синтеза нулей ДН в широкой полосе частот.

Проведенное исследование подтверждает высокий потенциал ЦФАР для создания перспективных систем, требующих высокой помехозащищенности и способных эффективно функционировать в условиях широкополосных сигналов и помех.

Книга представляет интерес для научных работников, инженеров и аспирантов, специализирующихся в области антенной техники и цифровой обработки сигналов, а также для студентов направлений «Радиотехника» (11.03.01 и 11.04.01), изучающих такие дисциплины как «Цифровые фазированные антенные решетки», «Цифровая обработка сигналов», «Антенны и устройства СВЧ».

ISBN 978-5-6055003-1-5

© Ерохин А. А., Саломатов Ю. П.,
Гафаров Е. Р.

Все права защищены

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	7
Введение	8
1 Антенная решетка	12
1.1 ДН АР произвольной формы	13
1.2 Узкополосное диаграммоформирование в ЦФАР	15
1.2.1 Управление ДН линейной ЦФАР	17
2 Адаптивное управление ДН ЦФАР	20
2.1 Общие положения	20
2.1.1 Широкополосный случай	22
2.1.2 Целевая функция при адаптивной фильтрации	28
2.2 Винеровская фильтрация	31
2.3 Винеровская фильтрация с линейными ограничениями	34
3 Адаптивные алгоритмы	36
3.1 Непосредственное обращение выборочной КМ	36
3.2 Синтез нулей	36
3.2.1 ДН адаптивной АР	36
3.2.2 Подавление помех с помощью компенсационной ДН	39
3.2.3 Синтез нулей в ДН АР	43
3.2.4 Численное решение системы уравнений синтеза ДН	49
3.2.5 Фазовый центр АР при синтезе «нулей»	50
3.3 Градиентные алгоритмы	53
3.3.1 Алгоритм наискорейшего спуска	54
3.3.2 Алгоритм наименьших квадратов	56
3.4 Рекурсивная адаптивная фильтрация	61
4 Пеленгация сигналов в ЦФАР	67
4.1 Сканирование пространства ДН (алгоритм Бартлетта)	68
4.2 Алгоритм Кейпона	70
4.3 Алгоритм MUSIC	72

4.4 Сравнение алгоритмов	73
5 Синтез АР с произвольной диаграммой направленности	77
5.1 Метод наименьших квадратов	78
5.2 Метод парциальных диаграмм	79
5.3 Другие методы синтеза	80
5.4 Разреженные антенные решетки	82
6 Широкополосное диаграммоформирование	89
6.1 ЦФАР с временной задержкой сигналов	91
6.2 ЦФАР с пространственной задержкой сигналов	95
6.3 Управление ДН широкополосной ЦФАР	97
7 Алгоритмы стационарного широкополосного ЦФД	99
7.1 Частотно-независимое ЦДФ с использованием временных задержек	99
7.1.1 ЦДФ с применением минимизации целевой функции	99
7.1.2 ЦДФ на основе преобразования Фурье	105
7.1.2.1 Порядок синтеза	108
7.1.3 ЦДФ без использования методов минимизации	111
7.1.3.1 Сканирование ДН с помощью КИХ-фильтров с управляемой задержкой	111
7.1.3.2 Сканирование частотно-независимой ДН	115
7.1.3.3 Влияние порядка КИХ-фильтра на параметры ДН	118
7.1.3.4 Количество антенных элементов ЦФАР	123
7.1.4 Моделирование алгоритмов	125
7.2 Частотно-независимое ЦДФ с использованием пространственных задержек	127
7.2.1 Использование ЛПАР в кольцевых АР	129
7.2.2 Выбор размеров дуговой АР	136
7.2.3 Коррекция фазового распределения в дуговой АР из ЛПАР	140
7.2.4 Амплитудное сканирование	141

7.2.5 Результаты моделирования	145
8 Алгоритмы синтеза нулей в ДН широкополосной ЦФАР	151
8.1 Прямой метод синтеза	152
8.2 Метод синтеза с использованием преобразования Фурье	153
8.3 Метод в пространстве лучей	154
8.4 Многочастотный метод	155
8.5 Моделирование методов	156
9 Влияние характеристик аналоговой и цифровой частей тракта на ДН ЦФАР	160
9.1 Стационарное широкополосное ЦДФ	166
Заключение	170
Приложение А . Основные используемые математические понятия	171
А.1 Комплексные числа	171
А.2 Вектор	174
А.2.1 Операции над векторами	175
А.3 Матрица	175
А.3.1 Операции над матрицами	179
А.3.2 Собственные числа и векторы матрицы	180
А.4 Сферическая система координат	181
А.5 Преобразование Фурье	182
Приложение Б . Коэффициенты усиления приёмных аналоговой и цифровой ФАР	183
Б.1 Введение	183
Б.2 Аналоговая ФАР	185
Б.3 Цифровая ФАР	189
Б.4 Коэффициент усиления ЦФАР	194
Б.5 Частотная зависимость коэффициента усиления ЦФАР	196
Б.6 Учёт сигналов преднамеренных помех	197
Список литературы	201

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ААР	–	Адаптивная антенная решетка
АР	–	Антенная решетка
АФР	–	Амплитудно-фазовое распределение
АЦП	–	Аналого-цифровой преобразователь
АЧХ	–	Амплитудно-частотная характеристика
АЭ	–	Антенный элемент
ВК	–	Весовые коэффициенты
ДН	–	Диаграмма направленности
ДОС	–	Диаграммообразующая схема
КИХ-фильтр	–	Фильтр с конечной импульсной характеристикой
КМ	–	Корреляционная матрица
КНД	–	Коэффициент направленного действия
ЛПАР	–	Логопериодическая антенная решетка
МШУ	–	Маломощный усилитель
СКО	–	Среднеквадратичное отклонение
УБЛ	–	Уровень бокового лепестка
ФАР	–	Фазированная антенная решетка
ФЛ	–	Фидерная линия
ФЦ	–	Фазовый центр
ФЧХ	–	Фазо-частотная характеристика
ЦДФ	–	Цифровое диаграммоформирование
ЦФАР	–	Цифровая фазированная антенная решетка
ЧХ	–	Частотная характеристика
ЩДН	–	Ширина диаграммы направленности
TDL	–	tapped delay line
SDL	–	sensor delay line

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве антенных систем всё чаще применяют фазированные антенные решетки (АР), как аналоговые, так и цифровые, вследствие их больших функциональных возможностей относительно «традиционных» антенных систем, в частности апертурных.

Построение антенной решетки по аналоговой схеме с управляемой формой диаграммы направленности (ДН) требует наличия фазовращателей и аттенуаторов [1, 2] в ее составе. Такая схема может применяться для формирования ДН произвольной формы и осуществления сканирования главным лепестком ДН. Известны, также, схемы аналоговых АР с использованием диэлектрических линз [3] или метаповерхностей [4] в качестве фокусирующего слоя, но данные схемы в основном предназначены для осуществления сканирования главным лепестком ДН. Также для сканирования главного лепестка могут применяться схемы с механоэлектрическим сканированием [5].

Наличие множества аналоговых элементов приводит к необходимости создания громоздкой диаграммообразующей схемы и устройства управления амплитудами и фазами элементов АР. Более удобным способом является использование АР с формированием ДН в цифровом виде [6], цифровые фазированные АР (ЦФАР). Использование цифровой обработки сигналов в АР позволяет реализовать цифровое формирование ДН различных форм, осуществлять их пространственное сканирование. Поэтому ЦФАР получают в настоящее время все более широкое применение в телекоммуникационных, навигационных и радиолокационных системах, а также в системах радиомониторинга, как в режиме передачи, так и в режиме приема.

Для формирования ДН нужной формы в цифровом виде возможны два способа. В первом случае весовые коэффициенты для формирования ДН вычисляются непосредственно в цифровой диаграммообразующей схеме, что позволяет формировать ДН в зависимости от условий сигнально-помеховой

обстановки, но такой подход требует наличия больших вычислительных ресурсов для обеспечения высокого уровня быстродействия системы (т. н. адаптивное цифровое диаграммоформирование [7]). Второй способ заключается в загрузке заранее сохраненного набора весовых коэффициентов из запоминающего устройства. Преимуществом данного способа является быстродействие, но при этом невозможно сформировать ДН под конкретную сигнально-помеховую обстановку (стационарное цифровое диаграммоформирование [7]).

Одной из областей исследований при обработке сигналов в ЦФАР является выделение полезных сигналов, которые могут приходиться с известных или неизвестных направлений, на фоне шумов и преднамеренных или непреднамеренных помех. Цифровое диаграммоформирование (ЦДФ) позволяет эффективно решать данную задачу. В зависимости от ширины полосы диапазона рабочих частот ЦДФ может быть разделено на задачи узкополосного и широкополосного ЦДФ, методы решения которых существенно различаются.

В задачах широкополосного ЦДФ можно выделить класс ЦФАР с частотно-независимыми ДН в некоторой широкой полосе частот. Частотно-независимой считают ДН, форма которой не изменяется в широкой полосе частот (с коэффициентом перекрытия более двух). Форма главного лепестка ДН, а также уровень боковых лепестков (УБЛ) такой ЦФАР постоянны в заданной широкой полосе частот.

Таким образом, исследование путей решения задач широкополосного диаграммоформирования при помощи ЦФАР в настоящее время является актуальным.

Настоящая книга содержит результаты исследований ЦФАР, проведенных авторами. Книга состоит из 9 глав и одного приложения.

В главе 1 приводятся общие сведения об антенных решетках, получено выражение, описывающее диаграмму направленности АР.

В главе 2 рассмотрены общие вопросы адаптивного управления весовыми коэффициентами в адаптивных ЦФАР. Рассмотрен случай приема адаптивной АР широкополосного сигнала, показано, что широкополосный сигнал эквивалентен монохроматическому сигналу, создаваемому протяженным источником.

В главе 3 дано описание наиболее распространенных алгоритмов адаптации в АР. Получено выражение для ДН адаптивной АР. Показано, что ДН адаптивной АР может быть представлена в виде взвешенной суммы парциальных ДН АР.

В главе 4 рассмотрено несколько алгоритмов пеленгации сигналов в ЦФАР. Проведено моделирование рассмотренных алгоритмов.

В главе 5 рассмотрены вопросы синтеза АР с произвольной формой ДН. Рассмотрены способы получения амплитудно-фазового распределения для наилучшего повторения эталонной ДН в среднеквадратическом смысле, описан метод парциальных диаграмм и итерационный метод. Проведен обзор методов синтеза разреженных АР.

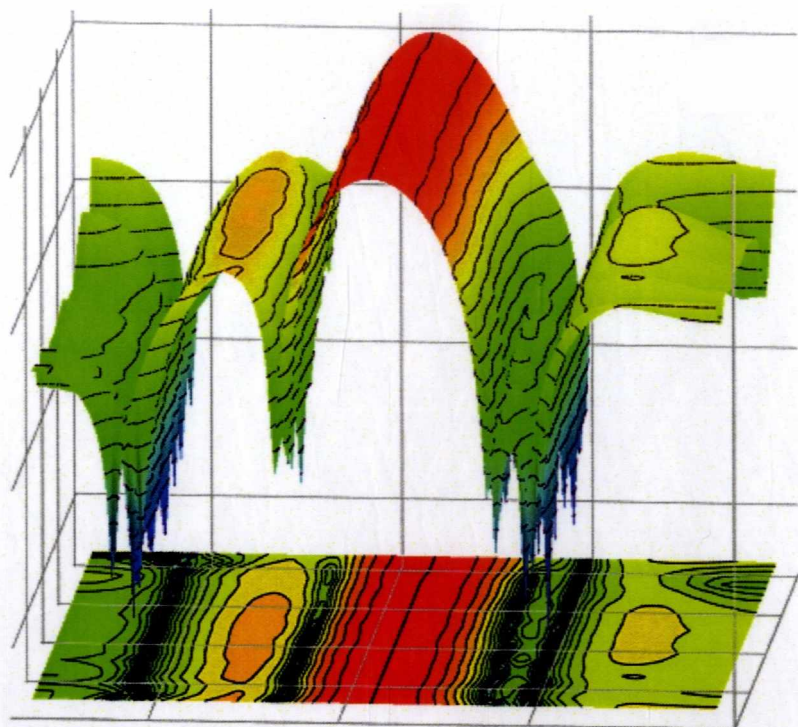
В главе 6 рассмотрены методы широкополосного ЦДФ, показано, что методы узкополосного диаграммоформирования не применимы в условиях широкой полосы сигналов. Показаны структурные схемы ЦФАР с применением линий задержки с ответвлениями (tapped delay line или TDL), и с применением дополнительных элементов АР (sensor delay line или SDL).

В главе 7 приводится описание алгоритмов стационарного ЦДФ как для ЦФАР с временной (TDL), так и с пространственной задержкой сигналов (SDL). Показано, что постановка задачи создания частотно-независимой ДН требует проведения минимизации многомерной целевой функции.

Глава 8 посвящена алгоритмам синтеза нулей в ДН широкополосных ЦФАР. Приведены результаты численного моделирования рассмотренных алгоритмов на примере линейной ЦФАР.

В главе 9 статистическая теория антенн применяется к ЦФАР. Получено выражение для средней по мощности ДН ЦФАР с учетом флуктуаций амплитудно-фазового распределения и ошибок позиционирования элементов в апертуре АР. Приведено выражение для оценки снижения коэффициента направленного действия. Проведено моделирование ЦФАР.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Джигану Виктору Ивановичу за разрешение на использование материалов его книги «Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы» в третьей главе настоящей книги.



ISBN 978-5-6055003-1-5



Подписано в печать 17.11.2025 г.

Тираж 40 экз.

Отпечатано в типографии

ИП Дворядкина И.Д.

г. Красноярск, Академгородок 50, стр. 28, оф. 138

тел. 290-72-32, 8 963 180 99 76

e-mail: boris-and-k@yandex.ru