



**ЗИМИНА Светлана Валерьевна**

**Флуктуации в многоканальных  
адаптивных системах**

**01.04.03 – радиофизика**

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**доктора физико-математических наук**

Работа выполнена в АО «Федеральный научно-производственный центр  
«Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»

Научный консультант: **Бляхман Александр Борисович**

доктор технических наук

Официальные оппоненты:

**Леухин Анатолий Николаевич,**

доктор физико-математических наук,  
ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», проректор по научной работе и инновационной деятельности – директор программы развития опорного университета

**Козлов Анатолий Иванович,**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет гражданской авиации», профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта

**Неровный Валерий Владимирович,**

доктор технических наук, доцент,  
Акционерное общество научно-внедренческое предприятие «ПРОТЕК», ведущий научный сотрудник отдела перспективных технологий и разработок

Ведущая организация:

Публичное акционерное общество «Радиофизика» (ПАО «Радиофизика»).

**Защита состоится**

**« 26 » ноября 2021 г. в 10-00.**

на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Zimina/index.html>

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



Кузьмин Лев  
Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию флуктуаций, шумов и случайных процессов в стохастических системах (адаптивных антенных решётках и искусственных нейронных сетях) по специальности радиофизика. Решена проблема повышения эффективности и устойчивости работы адаптивных антенных систем в условиях сложной помеховой обстановки. Разработаны новые методы анализа и статистической обработки сигналов в условиях воздействия помех. Диссертация представляется как научно-квалификационная работа, содержащая разработанные на основании выполненных автором исследований теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

### Актуальность темы

В современной статистической радиофизике активно развивается научное направление, связанное со статистическим анализом адаптивных антенных систем различных типов – адаптивных антенных решёток (ААР) и искусственных нейронных сетей (ИНС).

Отличительная особенность адаптивных систем состоит в том, что в процессе работы они могут автоматически изменять свои параметры (или даже структуру) “приспосабливаясь” к априори неизвестным или изменяющимся условиям функционирования. Некоторые результаты по общей теории адаптивных систем были изложены в ряде монографий [2-3]. Современными направлениями исследований в области адаптивных систем является фильтрация сигналов в каналах связи [4], вторичная обработка радиолокационной информации [5], глубокое обучение ИНС [6].

Многоканальные адаптивные системы позволяют эффективно бороться с помехами в радиолокации и радиосвязи путём автоматического подавления помех, приходящих с различных направлений. Необходимо отметить, что при настройке адаптивных систем имеют место флуктуации настраиваемых весовых коэффициентов, которые приводят к искажениям выделяемого адаптивной системой полезного сигнала. Особенно это актуально при решении адаптивными антенными системами задач пространственной фильтрации.

Изучение влияния флуктуаций весового вектора на скорость и точность настройки адаптивных антенных систем даёт разработчикам возможность реализовывать антенные системы с наилучшим соотношением характеристик скорость – точность настройки, а операторам – оптимизировать работу адаптивных систем для наиболее эффективного выполнения задачи, возлагаемой на систему.

Искусственные нейронные сети по своей структуре являются обобщением адаптивных антенных решёток. Они состоят из искусственных нейронов, соединённых различным образом. Схема искусственного нейрона является схемой адаптивной антенной решётки с нелинейной

(или линейной) функцией в цепи корреляционной обратной связи [1]. Таким образом, искусственная нейронная сеть, согласно своей схеме, состоит из наборов адаптивных антенных решеток, и по этой причине может быть использована для решения задач пространственной фильтрации сигналов в изменяющейся помеховой обстановке.

Под статистическим анализом адаптивных систем в данной работе мы будем понимать анализ их характеристик с учётом флуктуаций адаптируемых (автоматически настраиваемых) весовых коэффициентов.

Несмотря на очевидную актуальность решения такого типа задач, статистическая теория многоканальных адаптивных систем в настоящее время далека от своего завершения. Это связано с тем, что процесс настройки весовых коэффициентов в дискретных итеративных алгоритмах описывается разностными уравнениями, некоторые коэффициенты которых функционально зависят от входных сигналов, помех и внутренних шумов системы.

Первоначально исследования влияния флуктуаций весового вектора проводились для адаптивных антенных решёток и были связаны с использованием градиентных алгоритмов. Шум, возникающий при оценке градиента, приводил к искажениям выделяемого адаптивной антенной сигнала. В одной из первых подобных работ при рассмотрении антенной решётки, минимизирующей средний квадрат ошибки, в предположении статистической независимости флуктуаций весовых коэффициентов и входных сигналов был сделан вывод об увеличении мощности выходного сигнала ААР из-за флуктуаций весовых коэффициентов, названный автором **эфффе́ктом рассогласования системы** (misadjustment). Именно из-за этого результата аналогичные выводы в работах других авторов воспринимались как правильные и “физически понятные”.

Постепенно стали появляться экспериментальные и теоретические результаты, в которых наряду с избыточным шумом на выходе, был обнаружен в адаптивных антенных решётках эффект подавления полезного сигнала на выходе в присутствии внешних мощных квазигармонических помех – **эфффе́кт «перекомпенсации»**.

Анализ литературных данных показал, что в последние годы интерес исследователей сместился от ААР к изучению с учётом флуктуаций весовых коэффициентов адаптивных фильтров и искусственных нейронных сетей [7-8]. Необходимо отметить, что искусственные нейронные сети приобретают все большую значимость, поскольку могут быть использованы при решении большого класса различных задач [1,6]. Однако флуктуации весовых коэффициентов существенно искажают характеристики ИНС и ухудшают качество их работы. Особую актуальность этот вопрос приобретает в связи с большим размером искусственных нейронных сетей (большим числом слоев и большим количеством нейронов в каждом слое) и тем самым, большим количеством весовых коэффициентов, каждый из которых может исказить работу сети в целом. По этой причине вопрос анализа статистических характеристик ИНС с учётом флуктуаций весовых коэффициентов является достаточно актуальным.

В последние годы начало привлекать внимание ученых исследование с учётом флуктуаций весовых коэффициентов статистических характеристик адаптивных систем, обрабатывающих нестационарные сигналы [9-10].

Все вышеперечисленные работы в качестве упрощения предполагают статистическую независимость вектора входных сигналов и весового вектора, определяющего коэффициенты усиления в приемных каналах адаптивных систем. Тем не менее, в реальных условиях такая зависимость имеется, поэтому необходимо учитывать статистическую зависимость этих двух векторов, что и было сделано в некоторых работах для адаптивных антенных решёток с непрерывным градиентным алгоритмом и частным случаем дискретного градиентного алгоритма [11-12].

Следует также отметить, что предположение о статистической независимости входных сигналов и весовых коэффициентов приводит к неверным результатам, свидетельствующим об увеличении мощности сигнала на выходе адаптивных систем под влиянием флуктуаций весовых коэффициентов по сравнению с мощностью выходного сигнала, найденной при постоянном стационарном весовом векторе. Практика показывает, что флуктуации могут также приводить к уменьшению мощности на выходе адаптивной системы и искажению полезного выходного сигнала.

Исходя из рассмотренного состояния вопроса, можно сделать вывод о том, что отсутствует единая система методов анализа адаптивных систем различных типов, позволяющая с учётом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов находить их статистические характеристики и давать рекомендации по практическому использованию данных систем.

С учетом этого актуальным является создание методов анализа влияния флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики адаптивных систем (мощность и спектральную плотность мощности выходного сигнала, диаграмму направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент полезного действия) различной структуры в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором. Данные методы позволят выявить все возможные эффекты, возникающие за счёт флуктуаций в функционировании многоканальных адаптивных систем, и дадут возможность оптимальным образом настроить их параметры. Это определяет актуальность разработки методов анализа многоканальных адаптивных систем с учётом флуктуаций весовых коэффициентов.

## **Цель работы**

1. Разработка методов анализа статистических характеристик адаптивных антенных систем различной структуры при учёте флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором.

2. Повышение качества функционирования адаптивных антенных систем с учётом флуктуаций весовых коэффициентов в различных условиях помеховой обстановки.

### **Задачи исследования**

1. Разработка методов анализа статистических характеристик с учетом флуктуаций весовых коэффициентов узкополосных адаптивных антенных решёток, исключающих возможность нелинейной функциональной зависимости входного и выходного сигналов в цепи корреляционной обратной связи, и настраиваемых по быстрому рекуррентному алгоритму и алгоритму Хэбба, в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором.
2. Статистический анализ характеристик узкополосных ААР, содержащих нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи, с учётом флуктуаций настраиваемого весового вектора в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и вектором весовых коэффициентов. Для разработки методов были выбраны дискретный градиентный, быстрый рекуррентный алгоритм и алгоритм Хэбба.
3. Анализ с учетом флуктуаций весовых коэффициентов статистических характеристик искусственных нейронных сетей в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между весовым вектором и вектором входных сигналов. Для разработки методов анализа были выбраны дискретный градиентный, быстрый рекуррентный алгоритмы и алгоритм Хэбба.

### **Методы исследований**

При решении частных задач исследования использовались методы статистической радиофизики, теории адаптивных систем управления, линейной алгебры и теории матриц. Математическое моделирование адаптивных антенных систем проводилось на языке Visual Basic 3.0 и в среде программирования MatLab 4.0 – 7.0, 2015.

### **Научная новизна**

1. Впервые разработаны методы анализа с учётом флуктуаций весового вектора в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором статистических характеристик узкополосных адаптивных антенных решёток, исключающих возможность нелинейной функциональной зависимости входного и выходного сигналов в цепи корреляционной обратной связи, и настраиваемых по быстрому рекуррентному алгоритму и алгоритму Хэбба. Данные методы основаны на использовании тео-

- рии возмущений в предположении малости коэффициента адаптации, используемого для настройки адаптивных систем.
2. Для узкополосных ААР, содержащих нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи, впервые разработаны методы статистического анализа их характеристик с учётом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между весовым вектором и вектором входных сигналов. Методы были разработаны для дискретного градиентного, быстрого рекуррентного алгоритмов и алгоритма Хэбба. Данные методы предполагают, помимо использования теории возмущений, также разложение в ряд Вольтерра нелинейной функции, содержащейся в цепи корреляционной обратной связи адаптивных систем.
  3. В наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между весовым вектором и вектором входных сигналов впервые разработаны методы анализа статистических характеристик многослойных полносвязных искусственных нейронных сетей с учётом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов. Методы были разработаны для дискретного градиентного, быстрого рекуррентного алгоритмов и алгоритма Хэбба. Данные методы предполагают на основе имеющихся статистических характеристик отдельного искусственного нейрона получение рекуррентных соотношений этих же характеристик для каждого слоя искусственной нейронной сети. Дискретный градиентный и быстрый рекуррентный алгоритмы для настройки искусственных нейронных сетей также были использованы впервые.

### **Научная значимость**

1. Разработка методов анализа статистических характеристик адаптивных антенных решёток различной структуры и многослойных полносвязных искусственных нейронных сетей с учётом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов.
2. Получение аналитических результатов, описывающих специфику работы адаптивных антенных решёток и искусственных нейронных сетей при учёте флуктуаций весового вектора для классических алгоритмов настройки ААР (дискретного градиентного и быстрого рекуррентного) и классического алгоритма настройки ИНС (алгоритма Хэбба);
3. Использование дискретного градиентного и быстрого рекуррентного алгоритмов – классических алгоритмов, используемых для работы адаптивных антенных решёток, для настройки искусственных нейронных сетей.

### **Практическая ценность**

Практическая ценность результатов диссертационного исследования состоит в том, что разработанные в диссертации методы анализа

статистических характеристик адаптивных антенных решёток и искусственных нейронных сетей позволяют повысить эффективность их функционирования в условиях сложной помеховой обстановки, поскольку оптимальное управление параметрами функционирования указанных адаптивных систем позволяет снизить уровень искажения выходного сигнала и добиться повышения отношения сигнал / шум на выходе адаптивных антенных решеток и искусственных нейронных сетей.

Полученные в диссертации экспериментальные и теоретические результаты представляют интерес для ряда научно – исследовательских учреждений, занимающихся разработкой радио- и гидроакустических адаптивных антенных решёток и искусственных нейронных сетей, а также в организациях, связанных с практическим использованием и разработкой подобных систем, таких как институт прикладной физики РАН (ИПФРАН, г. Нижний Новгород), Нижегородский институт радиотехники (ННИИРТ, г. Нижний Новгород), научно – производственное объединение “Полёт” (НПО “Полёт”, г. Нижний Новгород), Московский физико-технический институт (МФТИ, г. Москва), центр оптико – нейронных технологий НИИСИ РАН (ЦОНТ НИИСИ РАН, г. Москва) и научный центр нейрокомпьютеров (НЦН, г. Москва).

#### **Достоверность результатов обеспечивается:**

1. Обоснованными допущениями и корректным выбором ограничений и исходных данных из практики разработки адаптивных антенных систем и построения искусственных нейронных сетей.
2. Сравнимостью аналитических результатов, описывающих на основе набора предположений ряд частных случаев, с общими результатами, полученными методами компьютерного моделирования.
3. Большой выборкой полученных данных (несколько миллионов выборочных точек), используемой для усреднения, при получении каждой точки на графиках статистических характеристик многоканальных адаптивных систем. Использование большой выборки данных привело к сходимости полученных результатов.
4. Совпадением результатов, полученных прямым вычислением по аналитическим формулам, и путём создания компьютерной имитационной модели реальных адаптивных антенных решёток и искусственных нейронных сетей, работающих в дискретном времени.

#### **Публикации и личный вклад**

Основные результаты диссертационной работы изложены в 1 коллективной монографии, 30 статьях в журналах, включенных в Список ведущих научных журналов и изданий, утвержденный ВАК РФ, в том числе

9 публикаций в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science [1-31].

### **Вклад автора**

Все материалы и результаты, вошедшие в данную диссертационную работу, подготовлены либо лично автором, либо совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

### **Апробация основных результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: на 4 – ой Нижегородской сессии молодых учёных (г. Нижний Новгород, 1999), 6 – ом Санкт – Петербургском симпозиуме по теории адаптивных систем (Санкт – Петербург, 1999), 3 – ей Международной конференции “Antenna Theory and Techniques” (Севастополь, Украина, 1999), 3 - ей Международной конференции и выставке “ Цифровая обработка сигналов и её применение” (Москва, 2000, 2004), на научных конференциях по радиофизике ННГУ (г. Нижний Новгород, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005), Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула, 2003, 2004, 2005, 2007, 2009), Всероссийской научно-технической конференции «Современные методы и средства обработки пространственно – временных сигналов» (Пенза, 2004), XLI Всероссийской конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, 2005, 2006), VII международной конференции «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Курск, 2005), Всероссийской конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (Суздаль, 2007, 2009), XIV Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2012», Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород, 2014, 2015), Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Нижний Новгород, 2014; Казань, 2015), XXIII Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь» (Воронеж, 2017), Всероссийская научно-техническая конференция «Радиоэлектронная борьба в XXI веке» (Воронеж, 2018).

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методы статистического анализа узкополосных адаптивных антенных решёток, имеющих алгоритм настройки нелинейный по весовому вектору (алгоритм Хэбба, весовой вектор рассчитывается, исходя из решения уравнения третьей степени) с учётом флуктуаций весовых коэффициентов.

2. Методы статистического анализа узкополосных адаптивных антенных решёток, содержащих нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи, с учётом флуктуаций весового вектора. Статистический анализ флуктуаций весовых коэффициентов в адаптивных антенных решётках с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи принципиально связан с дифференцируемостью указанных нелинейных функций.
3. Методы статистического анализа полносвязных искусственных нейронных сетей с учетом флуктуаций весовых коэффициентов с нелинейным по весовому вектору алгоритмом настройки (алгоритмом Хэбба).
4. Методы статистического анализа полносвязных искусственных нейронных сетей с учетом флуктуаций весовых коэффициентов, каждый искусственный нейрон которых имеет нелинейную функциональную зависимость между входным и выходным сигналами в цепи корреляционной обратной связи.
5. Сравнительный анализ потерь, возникающих вследствие флуктуаций весовых коэффициентов в многоканальных адаптивных системах. В случае равных скоростей сходимости алгоритмов минимальные потери в выходном отношении сигнал / шум наблюдаются в линейных ААР, настраиваемой по дискретному градиентному алгоритму, а максимальные - в ААР с алгоритмом Хэбба.
6. Использование для настройки искусственных нейронных сетей дискретного градиентного и быстрого рекуррентного алгоритмов, применяемых в известной литературе для настройки адаптивных антенных решеток. Разработанный подход позволяет решать задачи выделения нейронной сетью полезного сигнала на фоне помех и получить преимущество в смысле меньшего уровня флуктуаций по сравнению с нейросетевыми алгоритмами (алгоритмом Хэбба).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация объемом 307 страниц, включая 300 страниц основного текста, состоит из введения, шести глав и заключения, включает 38 рисунков, 14 таблиц и список цитируемой литературы из 180 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** освещается современное состояние проблемы, даётся краткий обзор работ по методам статистического анализа влияния флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивных антенных решёток, обосновывается актуальность темы диссертации, определяется цель работы и кратко излагается содержание работы.

**В первой** главе проводится статистический анализ адаптивных антенных решёток с ограничениями, настраиваемых по градиентным алгоритмам, с учётом флуктуаций весового вектора.

В § 1.1 отыскивается оптимальный весовой вектор для ААР с ограничениями.

В § 1.2 приведена методика анализа статистических характеристик узкополосной адаптивной антенной решетки с учетом флуктуаций формируемого весового вектора  $\vec{W}(k)$ , настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму с ограничениями на диаграмму направленности [12]:

$$\vec{W}(k+1) = \mathbf{P}\{\vec{W}(k) - \mu \vec{X}^*(k) \vec{X}^T(k) \vec{W}(k)\} + \vec{W}_q, \quad (1)$$

где  $\vec{W}(k)$  - настраиваемый весовой вектор в момент времени  $k$ ,  $\vec{X}$  - вектор входных сигналов,  $\mu$  - коэффициент усиления в цепи корреляционной обратной связи,  $\vec{W}_q$  - вектор комплексных весовых коэффициентов, соответствующий диаграмме направленности (ДН) антенны при отсутствии внешних помех.  $\mathbf{P}$  - проекционная матрица, обеспечивающая введение и выполнение уравнений ограничений на пространственные характеристики адаптивных антенных решёток. Для случая ААР с однократным линейным ограничением проекционная матрица обеспечивает отсутствие подавления сигнала, приходящего с направления ограничений.

Для определения статистических характеристик ААР был использован метод возмущений по коэффициенту адаптации  $\mu$ , который полагался малым ( $\mu \ll 1$ ). Предполагалось, что имеет место негауссовская статистическая зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором, при которой смешанная кумулянтная функция третьего порядка между флуктуационными частями стохастической матрицы входных сигналов и весового вектора не равна нулю:  $\bar{\Delta}_w \equiv \langle \tilde{\Phi} \vec{W} \rangle \neq \vec{0}$  [11-12].

Для получения статистических характеристик ААР с учётом флуктуаций весового вектора был осуществлён переход в  $\mathbf{Q}$  - матричное представление, диагонализующее корреляционную матрицу входных сигналов в подпространстве ограничений  $\mathbf{P}\mathbf{R}_{xx}\mathbf{P}$  [11-12]. В этом представлении было решено уравнение настройки адаптивной антенной решетки относительно вектора поправок к весовому вектору  $\vec{Y}(k)$ , и был получен набор поправок в виде рядов с бесконечным числом слагаемых.

Дальнейший статистический анализ проводился в предположении, что адаптивная антенная решётка является узкополосной. В этом случае формула корреляционной матрицы входных сигналов ААР представляет произведение пространственной и временной частей [11-12]:

$$\mathbf{R}_{xx}(k, k+n) \equiv \langle \vec{X}^*(k) \vec{X}^T(k+n) \rangle = \mathbf{R}_{xx} \mathfrak{R}^{|n|}, \quad (2)$$

где  $\mathfrak{R}$  - коэффициент корреляции между соседними отсчётами входных сигналов,  $\mathbf{R}_{xx}$  - пространственная часть корреляционной матрицы входных сигналов. Предполагалось, что полезный сигнал и помехи на входе адаптивной антенной решётки имеют корреляционную функцию вида (2) только коэффициенты автокорреляции и пространственные части корреляционной матрицы у полезного сигнала и помех будут различными.

Далее выражения для поправок к весовому вектору, записанные в  $\mathbf{Q}$  - матричном представлении  $\vec{Y}(k)$ , и представление корреляционной функции вида (2) подставляются в формулы статистических характеристик ААР. Это дает возможность получить данные характеристики с учётом флуктуаций весового вектора и негауссовской статистической зависимости между весовым вектором и вектором входных сигналов. Это сделано в следующих разделах.

Необходимо отметить, что в процессе вычисления средних значений, в которые входят кратные суммы, использовалось предположение о малости времени корреляции входных сигналов по сравнению со временем релаксации системы [11-12]. Запишем данное условие в несколько видоизмененной форме [12]:

$$\mu \lambda_n \frac{r^2}{1-r^2} < \mu \sum_{n=1}^{N-L} \lambda_n \frac{r^2}{1-r^2} = \mu \frac{r^2}{1-r^2} Sp(\mathbf{PR}_{xx}) \ll 1$$

Приведенное выше выражение представляет собой достаточное условие применимости методов теории возмущений для анализа влияния флуктуаций на статистические характеристики ААР с дискретным градиентным алгоритмом настройки. Оно накладывает ограничения на величину параметров  $\mu, r$ .

В § 1.3 - 1.5 в первом, так называемом «борновском», приближении рассматривается влияние флуктуаций весовых коэффициентов на корреляционные и спектральные характеристики антенных решёток, настраивающихся по дискретному градиентному алгоритму с многократными линейными ограничениями на диаграмму направленности, а также на мощность выходного сигнала антенны. Показано, что флуктуации весового вектора приводят к появлению дополнительных слагаемых в формулах данных статистических характеристик, величина которых зависит от значения коэффициента адаптации дискретного градиентного алгоритма  $\mu$ , а также от значений коэффициентов автокорреляции между отсчетами полезного сигнала и помехи  $r_s, r_\xi$  соответственно. Ниже приведено выражение выходной мощности ААР, найденное с учетом флуктуаций весового вектора:

$$\langle |Z|^2 \rangle_{CT} = \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_\xi^2}{1-r_\xi^2} Sp(\mathbf{PR}_{\xi\xi}) \right\} \langle |Z|^2 \rangle_\xi + \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_s r_\xi}{1-r_s r_\xi} Sp(\mathbf{PR}_{\xi\xi}) \right\} \langle |Z|^2 \rangle_s. \quad (3)$$

Из формулы видно, что может наблюдаться как эффект рассогласования (выходная мощность ААР при учёте флуктуаций весового вектора больше мощности, найденной при постоянном стационарном весовом векторе), так и эффект «перекомпенсации» (выходная мощность при учёте флуктуаций меньше мощности, найденной при постоянном стационарном весовом векторе) [11-12].

Появление эффекта «перекомпенсации» обусловлено учетом негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором. Какой именно эффект будет наблюдаться, зависит от величины коэффициентов автокорреляции между отсчетами по-

лезного сигнала и помех. Те же эффекты имеют место и в спектральной области.

Также приведены результаты компьютерного моделирования адаптивной антенной решётки с однократным линейным ограничением на диаграмму направленности с дискретным градиентным алгоритмом настройки. Моделировалась  $N$  - элементная узкополосная адаптивная антенная решётка ( $N=7$ ). Расстояние между элементами адаптивной антенной решётки было равно половине длины волны входных сигналов.

Предполагалось, что на адаптивную антенну поступают статистически независимые полезный сигнал и одна помеха с равными коэффициентами корреляции между отсчётами. Углы прихода полезного сигнала и помехи были равны соответственно  $\Theta_S=0^\circ$ ,  $\Theta_\xi=45^\circ$ . Мощность помехи была в 100 раз (на 20 dB) больше мощности полезного сигнала. В адаптивной антенной решётке присутствовал также собственный шум. Мощность собственного шума ААР составляла 0.1 (-10 dB) мощности полезного сигнала.

Экспериментальное определение мощности выходного сигнала адаптивной антенной решётки велось путём усреднения по времени реализации выходного случайного процесса (2 миллиона выборочных данных).

Стартовым весовым вектором служил  $\vec{w}_{CT}$ , который находили путём численного итеративного решения (с точностью  $\varepsilon=10^{-10}$ ) стационарного теоретического уравнения.

Найденные в результате компьютерного эксперимента значения выходной мощности и спектральной плотности мощности выходного сигнала ААР совпадают со значениями, полученными на основе теоретического анализа.

В § 1.6 приведён расчёт характеристик эффективности работы ААР - диаграммы направленности, коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента усиления (КУ) и потерь в выходном отношении сигнал / шум при учёте флуктуаций весового вектора. Учет флуктуаций весового вектора приводит к появлению дополнительных слагаемых в данных характеристиках – «флуктуационной» ДН, КНД, КУ. В общем случае «флуктуационная» диаграмма направленности не является изотропной. «Флуктуационная» ДН ААР с однократным линейным ограничением также не является изотропной и в направлении полезного сигнала она становится равной нулю из-за «жёстких» (не флуктуирующих) ограничений. Для ААР с однократным ограничением наличие флуктуаций приводит к исчезновению нулей средней диаграммы направленности и замена их на малые ненулевые значения.

На Рис.1 приведены потери в выходном отношении сигнал/шум ААР за счёт флуктуаций весового вектора в зависимости от величины коэффициента адаптации градиентного алгоритма. Из рисунка видно, что по мере увеличения значений коэффициента адаптации растут и потери, связанные с флуктуациями весового вектора. Однако величина этих по-

терь при рабочих значениях коэффициента адаптации (до 0.005) сравнительно мала.

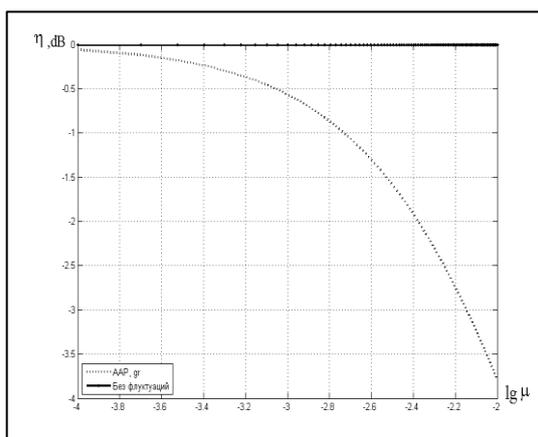


Рис.1. Потери  $\eta$  в выходном отношении сигнал / шум в зависимости от величины коэффициента адаптации  $\mu$ . ААР с дискретным градиентным алгоритмом настройки.

В § 1.7 размещены выводы к материалу, изложенному в первой главе:

- Статистический анализ влияния флуктуаций настраиваемого весового вектора на характеристики «линейных» адаптивных антенных решёток (без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи) с дискретным градиентным алгоритмом настройки и различными коэффициентами автокорреляции между отсчётами входных сигналов необходимо проводить методами теории возмущений. Данные методы позволяют учесть негауссовскую статистическую зависимость между весовым вектором и вектором входных сигналов.
- Учет негауссовской статистической зависимости между весовым вектором и вектором входных сигналов позволяет теоретически описать явления как рассогласования, так и «перекомпенсации» [11-12] в статистических характеристиках выходного сигнала ААР с дискретным временем, наблюдающиеся при работе адаптивных антенных решёток.

**Во второй** главе анализируется влияние флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивных антенных решёток с «быстрыми» алгоритмами настройки (алгоритмами непосредственного и итеративного обращения выборочной оценки ковариационной матрицы).

В § 2.1 приведён способ нахождения оптимального весового вектора для ААР с ограничениями в случае представления весового вектора в виде двух взаимно ортогональных компонент, одна из которых принадлежит подпространству ограничений, а другая к дополнительному (относительно подпространства ограничений) подпространству, а также вывод итеративного алгоритма обращения выборочной оценки ковариационной матрицы.

Алгоритм рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов имеет вид:

$$\vec{W}(k+1) = P\{\vec{W}(k) - \mu \cdot (\mathbf{PR}_k \mathbf{P})^+ \cdot \mathbf{P} \cdot \vec{X}^*(k+1) \vec{X}^T(k+1) \vec{W}(k)\} + \vec{W}_q. \quad (4)$$

Здесь  $(\mathbf{PR}_k \mathbf{P})^+$  оценка псевдообратной матрицы входных сигналов в момент времени  $k$  в подпространстве ограничений.

В § 2.2 методами теории возмущений стационарный весовой вектор для итеративного алгоритма обращения выборочной оценки ковариационной матрицы был представлен в виде суммы весового вектора, найденного в нулевом приближении, и бесконечного числа поправок, представленных в виде многомерных бесконечных рядов.

Достаточное условие применимости методов теории возмущений для анализа влияния флуктуаций на статистические характеристики ААР с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки имеет вид:

$$\mu \lambda_n \frac{r^2}{1-r^2} < \mu \sum_{n=1}^{N-L} \lambda_n \frac{r^2}{1-r^2} = \mu \frac{r^2}{1-r^2} Sp((\mathbf{PR}_{xx} \mathbf{P})^+ \mathbf{PR}_{xx}) \ll 1.$$

В § 2.3 - 2.5 в первом, так называемом «борновском», приближении и предположении негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором рассматривается влияние флуктуаций весовых коэффициентов на корреляционные и спектральные характеристики антенных решёток, а также на мощность выходного сигнала антенны. Показано, что в ААР, настраивающихся по быстрому рекуррентному алгоритму, также имеют место эффекты рассогласования и «перекомпенсации» во временной и спектральной области. Ниже приведена формула выходной мощности ААР с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки, найденная при учёте флуктуаций весового вектора:

$$\begin{aligned} <|Z|^2>_{CT} = \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_\xi^2}{1-r_\xi^2} Sp((\mathbf{PR}_{xx} \mathbf{P})^+ \mathbf{PR}_{\xi\xi}) \right\} <|Z|^2>_\xi + \\ + \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_s r_\xi}{1-r_s r_\xi} Sp((\mathbf{PR}_{xx} \mathbf{P})^+ \mathbf{PR}_{\xi\xi}) \right\} <|Z|^2>_s \end{aligned} \quad (5)$$

Формула (5) аналогична формуле (3) ААР с дискретным градиентным алгоритмом настройки. Отличия алгоритмов заключаются в конкретной величине эффектов рассогласования и перекомпенсации при заданном значении коэффициента адаптации. В параграфах также приведены результаты компьютерного моделирования адаптивной антенной решётки с однократным линейным ограничением на диаграмму направленности с алгоритмом итеративного обращения выборочной оценки ковариационной матрицы.

В § 2.6 приведён расчёт характеристик эффективности работы ААР - диаграммы направленности, коэффициента направленного действия, коэффициента усиления, потерь в выходном отношении сигнал / шум, вызванных флуктуациями весового вектора, а также вид диаграммы направленности, найденной в результате компьютерного моделирования.

На Рис.2 приведены потери в выходном отношении сигнал/шум ААР за счёт флуктуаций весового вектора в зависимости от величины коэффициента адаптации. Из рисунка видно, что потери, обусловленные флуктуациями, больше в дискретном градиентном алгоритме.

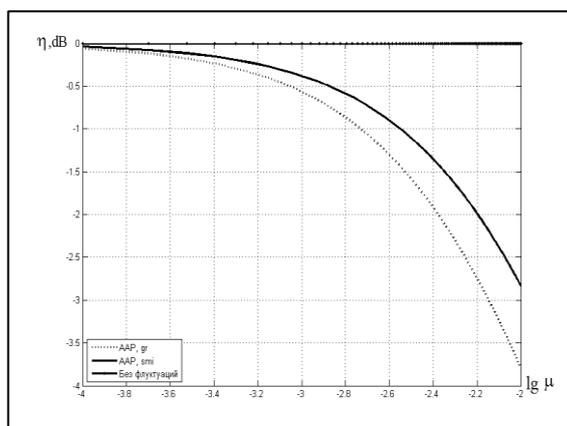


Рис.2. Потери  $\eta$  в выходном отношении сигнал / шум в зависимости от величины коэффициента адаптации  $\mu$ . ААР с быстрым рекуррентным и дискретным градиентным алгоритмом настройки.

На Рис.3 показана «флуктуационная» диаграмма направленности ААР с однократным линейным ограничением, настраиваемой по быстрому рекуррентному алгоритму. Из рисунка видно, что для ААР с однократным ограничением в направлении ограничений флуктуации отсутствуют и минимальны в направлении помехи.

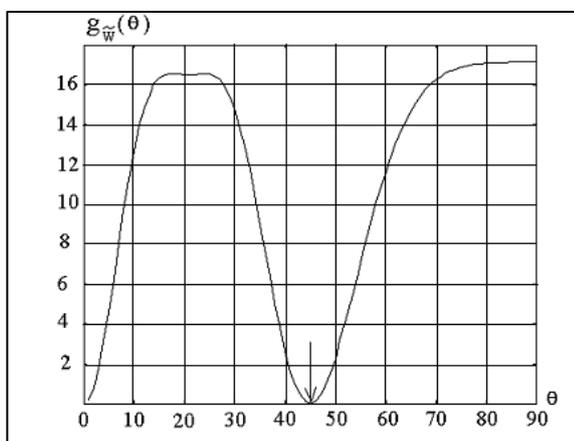


Рис.3. Флуктуационная диаграмма направленности ААР с однократным линейным ограничением, настраиваемой по быстрому рекуррентному алгоритму, в зависимости от угла прихода пробного сигнала  $\theta$ . Стрелкой указано направление, с которого поступает помеха.

В § 2.7 проводится статистический анализ алгоритма непосредственного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов и результаты компьютерного моделирования ААР, настраиваемой по данному алгоритму.

В § 2.8 размещены выводы к изложенному во второй главе:

- Статистический анализ влияния флуктуаций весовых коэффициентов на характеристики адаптивных антенных решёток без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки и различными коэффициентами автокорреляции между отсчётами входных сигналов необходимо проводить методами теории возмущений. Данные методы позволяют учесть негауссовскую статистическую зависимость между весовым вектором и вектором входных сигналов.
- Анализ статистических характеристик ААР, настраивающихся по быстрым алгоритмам, показал, что флуктуации вектора весовых коэффициентов приводят к искажениям выходного сигнала адаптивных антенных решёток, его мощности и спектра. Данные искажения определяются величиной коэффициентов автокорреляции между отсчётами полезного сигнала и помехи. Статистический анализ позволил показать, что в адаптивных антенных решетках с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки, также как и в ААР с дискретным градиентным алгоритмом, могут иметь место из-за флуктуаций весового вектора как эффект рассогласования, так и эффект «перекомпенсации» [11-12].

**В третьей** главе проведен статистический анализ характеристик адаптивной антенной решётки, настраивающейся по классическому алгоритму настройки искусственных нейронных сетей – алгоритму Хэбба, применённому для целей пространственной обработки сигналов в адаптивной антенне. Алгоритм Хэбба может быть записан в виде [1]:

$$\vec{W}(k+1) = \vec{W}(k) + \mu \cdot (\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k)) \cdot [\vec{X}^*(k) - (\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k))^* \cdot \vec{W}(k)]. \quad (6)$$

В § 3.1 методами теории возмущений стационарный весовой вектор для алгоритма Хэбба был представлен в виде суммы вектора, найденного в нулевом приближении, и бесконечного числа поправок, представленных в виде многомерных бесконечных рядов (методика описана в главе 1).

Условие применимости методов теории возмущений для анализа влияния флуктуаций на статистические характеристики адаптивной антенной решетки, настраивающейся по алгоритму Хэбба:

$$\begin{aligned} & \mu \frac{1}{1-r^2} Sp(\vec{W}_{CT} \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{XX}) + \mu \frac{r^2}{1-r^2} Sp(\vec{W}_{CT} \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{XX}) = \\ & = \mu \frac{1+r^2}{1-r^2} Sp(\vec{W}_{CT} \vec{W}_{CT}^H \mathbf{R}_{XX}) \ll 1 \end{aligned}$$

В § 3.2 – 3.4 приведены найденные с учётом флуктуаций весового вектора и негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором характеристики выходного сигнала ААР, настраивающейся по алгоритму Хэбба – корреляционная функция, спектральная плотность мощности и мощность на выходе адаптивной антенны.

Представлены также результаты компьютерного моделирования. Моделировалась N - элементная полуволновая линейная узкополосная адаптивная антенная решётка (N=7), работающая по алгоритму Хэбба (6).

Предполагалось, что на ААР поступают статистически независимые два входных сигнала с одинаковыми коэффициентами корреляции между отсчётами  $r_S = r_\xi = 0$ . Углы прихода первого и второго сигналов были соответственно равны  $\Theta_S=45^\circ$  и  $\Theta_\xi=0^\circ$ . Мощность первого сигнала была в 100 раз больше мощности второго сигнала. В ААР присутствовал также собственный шум, мощность которого составляла 0.1 (-10 dB) мощности второго сигнала. Нормирование значений мощностей входных сигналов было осуществлено относительно мощности собственного шума ААР, которая была приведена к единице. Определение мощности выходного сигнала ААР при компьютерном моделировании велось путём усреднения по ансамблю 20000 реализаций выходного случайного процесса. Длина реализации была равна 100 дискретным временным отсчетам. Стартовыми весовыми коэффициентами служили  $\vec{w}_{CT}$ .

Показано, что данные выражения содержат три составляющие, которые можно условно назвать сигнальной, помеховой и смешанной, т.е. обусловленной по причине флуктуаций взаимодействием полезного сигнала и помехи в процессе обработки сигналов в данной антенне. Каждая из данных составляющих содержит слагаемые первого и второго порядка малости по коэффициенту адаптации, обусловленные флуктуациями, причем смешанная составляющая имеет второй порядок малости по данному коэффициенту. В ААР с алгоритмом Хэбба также могут наблюдаться эффекты рассогласования и перекомпенсации.

В § 3.5 рассматриваются с учётом флуктуаций весового вектора характеристики эффективности работы адаптивной антенной решётки, настраиваемой по алгоритму Хэбба – диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент полезного действия и потери в выходном отношении сигнал / шум, возникшие вследствие флуктуаций весового вектора.

На Рис.4 приведены потери, возникающие в выходном отношении сигнал/шум за счёт флуктуаций весового вектора в зависимости от величины коэффициента адаптации. Из рисунков 2 и 4 видно, что потери в ААР с алгоритмом Хэбба значительно больше, чем в ААР с градиентными алгоритмами.

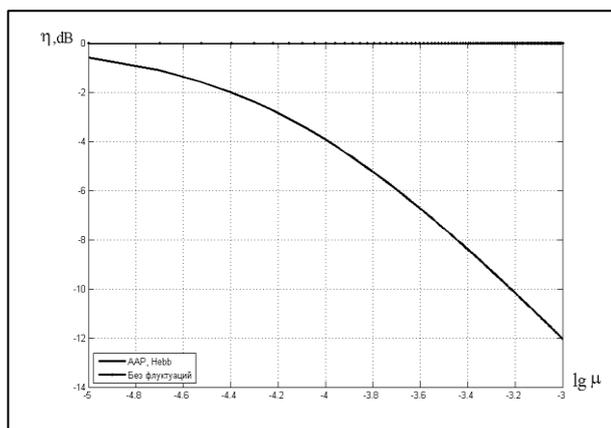


Рис.4. Потери  $\eta$  в выходном отношении сигнал / шум в зависимости от величины коэффициента адаптации  $\mu$ . ААР с алгоритмом Хэбба.

На Рис.5 показана «флуктуационная» диаграмма направленности ААР с алгоритмом Хэбба в случае прихода входных сигналов с некоррелированными отсчетами. Она имеет максимум в направлении полезного сигнала. В случае прихода сигналов с высокоррелированными отсчетами имеет место минимум в этом же направлении. Это приводит к тому, что величина главного максимума средней по мощности диаграммы направленности зависит от вида входных сигналов – увеличивается при сигналах с низкоррелированными отсчетами и уменьшается при входных сигналах с высокоррелированными отсчетами.

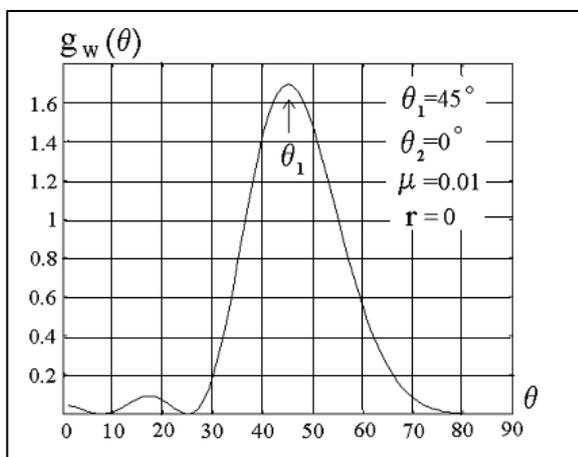


Рис.5. Зависимость «флуктуационной» диаграммы направленности адаптивной антенной решётки от угла прихода пробного сигнала  $\theta$  при некоррелированных отсчётах входных сигналов ( $r = 0$ ). Коэффициент адаптации  $\mu = 0.01$ .

В § 3.6 размещены выводы к материалу третьей главы:

1. Алгоритм Хэбба является существенно нелинейным по весовому вектору алгоритмом адаптации. Весовой вектор входит в него в третьей степени.
2. Учёт флуктуаций весового вектора в адаптивной антенной решётке, настраивающейся по алгоритму Хэбба, позволяет выявить искажения

выходного сигнала ААР, которые вносят флуктуации весовых коэффициентов. Данные искажения выходного сигнала адаптивной антенной решётки математически проявляют себя в появлении в выражениях корреляционной функции, мощности и спектральной плотности мощности выходного сигнала ААР дополнительных слагаемых, обусловленных флуктуациями весового вектора.

3. В составе формул корреляционной функции, мощности и спектральной плотности мощности выходного сигнала ААР, полученных с учетом флуктуаций весовых коэффициентов, имеются «сигнальная» и «помеховая» составляющие, а также составляющая, обусловленная взаимодействием полезного сигнала и помехи в процессе обработки сигналов посредством алгоритма Хэбба в данной антенне и связанная с наличием флуктуаций весового вектора. Такая составляющая взаимодействия полезного сигнала и помех отсутствовала в ААР с дискретным градиентным и быстрым рекуррентным алгоритмами.

**В четвёртой** главе проводится анализ влияния флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивной антенной решетки с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму с многократными линейными ограничениями на диаграмму направленности. Данный алгоритм может быть записан в виде:

$$\vec{W}(k+1) = \mathbf{P}\{\vec{W}(k) - \mu \cdot \vec{X}^*(k) \cdot F[\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k)]\} + \vec{W}_q. \quad (7)$$

Здесь  $F[\cdot]$  - нелинейная  $N$  раз дифференцируемая функция в цепи корреляционной обратной связи.

Необходимо отметить, что основным условием использования нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи в рамках решения данной задачи является дифференцируемость этой функции и ее производных, а также уменьшение численных значений каждой последующей производной по сравнению с предыдущей.

В § 4.1 методами теории возмущений стационарный весовой вектор для дискретного градиентного алгоритма, примененного в адаптивной антенне с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, был представлен в виде суммы весового вектора, полученного в нулевом приближении, и бесконечного ряда поправок, записанных в виде многомерных бесконечных рядов (методика описана в главе 1). Дополнительно производится разложение в ряд Вольтерра выходного сигнала ААР, содержащего нелинейную функцию. И дальнейший статистический анализ проводится с учетом этого разложения.

Достаточное условие применимости методов теории возмущений для анализа влияния флуктуаций на статистические характеристики адаптивной антенной решетки, содержащей нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи и настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму можно записать следующим образом:

$$\mu a_1 \lambda_n \frac{1}{1-r^2} < \mu a_1 \sum_{n=1}^{N-L} \lambda_n \frac{1}{1-r^2} = \mu a_1 \frac{1}{1-r^2} Sp(\mathbf{PR}_{xx}) \ll 1.$$

В § 4.2 – 4.3 приведены с учетом флуктуаций весового вектора и негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором статистические характеристики выходного сигнала ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи (корреляционная функция и мощность на выходе адаптивной антенны), а также корреляционная матрица флуктуаций весовых коэффициентов. Ниже приведена формула корреляционной матрицы флуктуаций весовых коэффициентов:

$$\mathbf{K}_{\vec{w}} = \mu^2 \frac{1-r+r^2}{(1-r)^2} Sp(\vec{Y}_{CT}^* \vec{Y}_{CT}^T \mathbf{R}_{AA}) \cdot (\mathbf{PR}_{xx} \mathbf{P})^* . \quad (8)$$

Из приведённой формулы видно, что флуктуации весового вектора в ААР с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраиваемой по дискретному градиентному алгоритму, равны нулю в направлении ограничений, максимальны в направлении помех, а во всех остальных направлениях имеют минимальную ненулевую величину, определяемую мощностью собственного шума адаптивной антенной решётки.

Флуктуации весового вектора в ААР с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраиваемой по дискретному градиентному алгоритму, неизотропны в пространстве весовых коэффициентов. Они равны нулю в направлении ограничений, максимальны в направлении помех, а во всех остальных направлениях имеют минимальную ненулевую величину, определяемую мощностью собственного шума адаптивной антенной решётки. Заметим, что для линейной ААР с градиентным алгоритмом настройки флуктуации весов изотропны, т.е. являются одинаковыми по величине во всех направлениях подпространства ограничений.

При настройке ААР как с нелинейной функцией в цепи обратной связи, так и без нелинейности может наблюдаться как увеличение выходной мощности, так и её уменьшение по сравнению с постоянным стационарным весовым вектором (эффект рассогласования и эффект перекompенсации) в зависимости от величины коэффициента корреляции входных сигналов  $r$ , только для нелинейной ААР данные эффекты также определяются видом нелинейной функции и ее коэффициентами разложения в ряд Вольтерра.

В § 4.4 приведён расчёт характеристик эффективности ААР - диаграммы направленности, коэффициента направленного действия, коэффициента полезного действия и потерь в выходном отношении сигнал / шум, вызванных наличием флуктуаций весового вектора.

На Рис.6 приведены потери, возникающие в выходном отношении сигнал/шум за счёт флуктуаций весового вектора в зависимости от величины коэффициента адаптации. Из рисунка видно, что максимальные потери за счёт флуктуаций возникают в ААР без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи, настраиваемой по дискретному градиентному алгоритму, а минимальные в ААР с нелинейной функцией

в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по тому же алгоритму. ААР с быстрым рекуррентным алгоритмом без нелинейной функции занимает промежуточное положение.

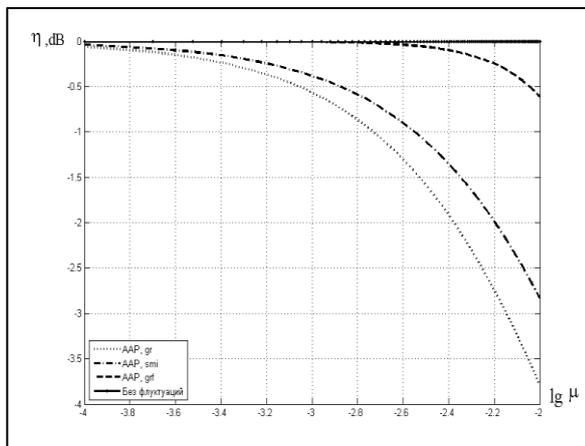


Рис.6. Потери  $\eta$  в выходном отношении сигнал / шум в зависимости от величины коэффициента адаптации  $\mu$ . ААР грф - ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи с дискретным градиентным алгоритмом настройки.

На Рис.7 показана «флуктуационная» диаграмма направленности ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи. Из рисунка видно, что она не является изотропной. Для ААР с однократным линейным ограничением форма «флуктуационной» диаграммы направленности зависит от уровня коррелированности отсчетов входных сигналов. При входных сигналах с некоррелированными отсчетами ( $r=0$ ) в ААР с дискретным градиентным алгоритмом «флуктуационная» ДН имеет максимум в направлении помехи (кривая 1), а в ААР с быстрым рекуррентным алгоритмом – минимум (кривая 2). В направлении ограничений «флуктуационная» ДН равна нулю (рис.7).

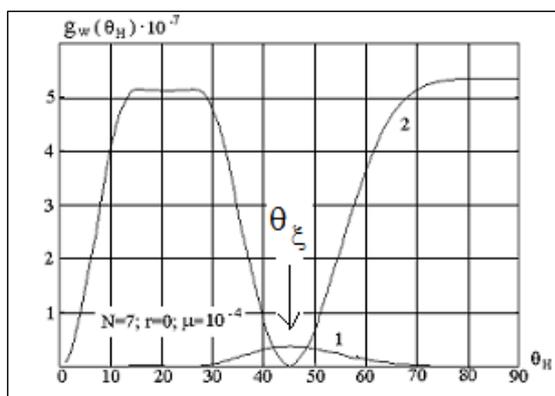


Рис.7. Флуктуационная диаграмма направленности  $g_{\tilde{w}}$  в зависимости от угла прихода пробного сигнала  $\theta_{np}$  в случае поступления на ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи сигналов с некоррелированными отсчетами  $r=0$  (кривая 1 – дискретный градиентный алгоритм, кривая 2 – быстрый рекуррентный алгоритм).

В § 4.5 приведены выводы к материалу, изложенному в четвёртой главе:

1. Для успешного применения методов теории возмущений при статистическом анализе ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи и дискретным градиентным алгоритмом настройки необходимо, чтобы нелинейная функция была  $N$  раз дифференцируемая. Это позволяет применить при статистическом анализе разложение данной функции в ряд Вольтерра.
2. Исследование показало, что флуктуации весового вектора в ААР с линейным дискретным градиентным алгоритмом настройки изотропны во всех направлениях подпространства ограничений. В ААР с нелинейной функцией в цепи обратной связи флуктуации весового вектора не изотропны в пространстве ограничений: максимальны в направлении прихода помехи, а во всех остальных направлениях имеют, как правило, много меньшую величину (пропорциональную значению мощности собственного шума ААР). В направлениях, заданных ограничениями, флуктуации весового вектора отсутствуют.
3. Дисперсия флуктуаций весового вектора для ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи представляет собой вектор, т.е. является различной для каждого весового коэффициента  $W_i$ . Ни в адаптивных антеннах, работающих по критерию МОСШ, как с нелинейной функцией в цепи обратной связи, так и без неё, ни в «линейной» ААР с однократным линейным ограничением, дисперсия не являлась вектором. Все весовые коэффициенты имели одинаковую величину дисперсии флуктуаций. Появление вектора дисперсии свидетельствует о том, что каждый весовой коэффициент флуктуирует, имея собственную величину дисперсии.

**В пятой** главе представлен статистический анализ с учётом флуктуаций весовых коэффициентов характеристик адаптивной антенной решётки с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму. Данный алгоритм описывается следующим уравнением:

$$\vec{W}(k+1) = \mathbf{P}\{\vec{W}(k) - \mu \cdot (\mathbf{P}\hat{\mathbf{R}}_k\mathbf{P})^+ \mathbf{P} \cdot \vec{X}^*(k+1) \cdot F[\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k)]\} + \vec{W}_q. \quad (9)$$

В § 5.1 методами теории возмущений стационарный весовой вектор для алгоритма рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов, примененного в адаптивной антенне с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, был представлен в виде суммы весового вектора, полученного в нулевом приближении, и бесконечного ряда поправок, записанных в виде многомерных бесконечных рядов (методика описана в главе 1). Дополнительно выходной сигнал ААР был разложен в ряд Вольтерра, и с учетом этого проводился статистический анализ.

Достаточное условие применимости методов теории возмущений для анализа влияния флуктуаций на статистические характеристики адаптивной антенной решетки, содержащей нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи и настраиваемой по быстрому рекуррентному алгоритму:

$$\mu a_1 \lambda_n \frac{1}{1-r^2} < \mu a_1 \sum_{n=1}^{N-L} \lambda_n \frac{1}{1-r^2} = \mu a_1 \frac{1}{1-r^2} Sp((\mathbf{PR}_{xx} \mathbf{P})^+ \mathbf{PR}_{xx}) \ll 1.$$

В § 5.2 – 5.3 получены с учетом флуктуаций весового вектора корреляционная функция и мощность выходного сигнала ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, а также матрица ковариации флуктуаций весового вектора. Приведены результаты компьютерного моделирования адаптивной антенной решетки с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраиваемой по быстрому рекуррентному алгоритму. Ниже приведена формула матрицы ковариации флуктуаций весового вектора:

$$\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{w}}} = \mu^2 \frac{1-r+r^2}{(1-r)^2} Sp(\tilde{\mathbf{Y}}_{CT}^* \tilde{\mathbf{Y}}_{CT}^T \mathbf{R}_{AA}) \cdot [(\mathbf{PR}_{xx} \mathbf{P})^+]^*. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что флуктуации весового вектора антенной решетки с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраиваемой по быстрому рекуррентному алгоритму, равны нулю в направлении ограничений, минимальны в направлении помех, а во всех остальных направлениях имеют максимальную величину, пропорциональную значению 1/мощность собственного шума ААР.

В ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраиваемой по быстрому рекуррентному алгоритму, также имеет место как эффект рассогласования, так и эффект перекомпенсации. Сравнение величины эффекта рассогласования в ААР с однократным ограничением, имеющей в корреляционной обратной связи функцию – сигмоид, показало, что до значения коэффициента корреляции между отсчетами входных сигналов  $r=0.7$  эффект рассогласования больше в ААР с дискретным градиентным алгоритмом. При  $r > 0.7$  эффект рассогласования больше в ААР с быстрым рекуррентным алгоритмом.

В § 5.4 приведён расчёт характеристик эффективности работы ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи - диаграммы направленности, коэффициента направленного действия, коэффициента полезного действия, потерь в выходном отношении сигнал / шум, вызванных присутствием флуктуаций весового вектора.

На Рис.8 показаны потери, возникающие в выходном отношении сигнал / шум за счёт флуктуаций весового вектора. Из рисунка видно, что потери максимальны в ААР без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи, настраиваемой по дискретному градиентному алгоритму, и минимальны в ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраиваемой по быстрому рекуррентному алгоритму.

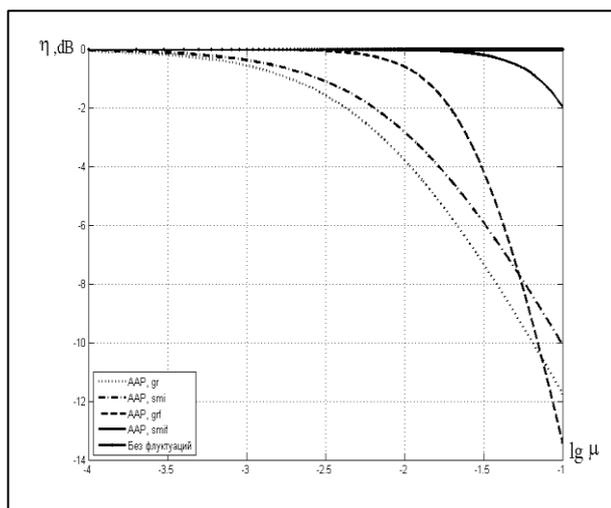


Рис.8. Потери  $\eta$  в выходном отношении сигнал / шум в зависимости от величины коэффициента адаптации  $\mu$ . AAP smif - AAP с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки.

В § 5.5 представлены выводы по материалам пятой главы:

1. Флуктуации весового вектора антенной решётки с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму, неизотропны в пространстве весовых коэффициентов. Они равны нулю в направлении ограничений, минимальны в направлении помех, а во всех остальных направлениях имеют максимальную величину, пропорциональную значению  $1/\text{мощность}$  собственного шума AAP.
2. Имеют место потери из-за флуктуаций весового вектора в выходном отношении сигнал / шум адаптивной антенной решетки с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму. По мере увеличения коэффициента адаптации  $\mu$  растут потери, вызванные наличием флуктуаций весового вектора. Потери имеют наибольшую величину в AAP без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи с дискретным градиентным алгоритмом настройки и наименьшую величину в AAP с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки. Адаптивная антенная решетка с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи, а также AAP с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи с дискретным градиентным алгоритмом настройки занимают промежуточное положение.
3. При равных скоростях сходимости алгоритмов наименьшие потери за счет флуктуаций весовых коэффициентов в выходном отношении сигнал/шум наблюдаются в AAP без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму, а наибольшие – в адаптивной антенне с алгоритмом Хэбба. Потери в «линейной» и «нелинейной» AAP с быстрым ре-

куррентным алгоритмом настройки, а также в «нелинейной» адаптивной антенной решетке с дискретным градиентным алгоритмом занимают промежуточное положение.

**В шестой** главе проводится статистический анализ с учетом флуктуаций весовых коэффициентов характеристик искусственных нейронных сетей, настраивающихся по исследуемым в диссертации алгоритмам. Учет флуктуаций весовых коэффициентов проводится в данной главе путем получения рекуррентных выражений статистических характеристик ИНС от её первого слоя к последнему слою на основе этих же характеристик для отдельных искусственных нейронов, приведённых в главах 3-5 данной диссертации.

На Рис.9 представлена наиболее общая схема полносвязной искусственной нейронной сети. Каждый квадрат и круг на схеме представляет собой искусственный нейрон - по сути адаптивную антенную решётку, а искусственная нейронная сеть в таком случае может рассматриваться как каскад, составленный из ААР. Наиболее общий вид ИНС является также классической схемой искусственной нейронной сети и позволяет обобщить полученные в предыдущих главах результаты наименее трудоемким образом.

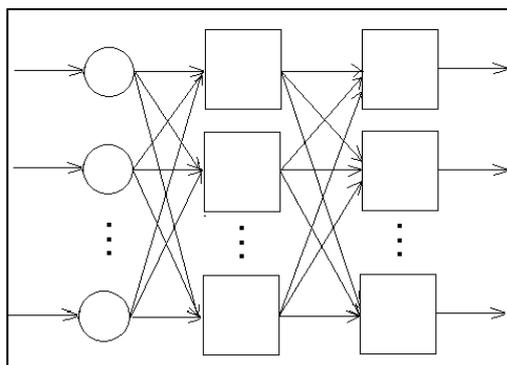


Рис.9. Наиболее общая схема полносвязной прямого распространения искусственной нейронной сети.

В § 6.1 – 6.2 представлены с учетом флуктуаций весовых коэффициентов и негауссовской статистической зависимости между весовыми векторами и векторами входных сигналов каждого искусственного нейрона сети статистические характеристики (корреляционные функции и мощности выходных сигналов различных слоев сети) узкополосной многослойной полносвязной искусственной нейронной сети, настраивающейся соответственно по адаптированным для ИНС дискретному градиентному и быстрому рекуррентному алгоритмам при решении искусственной нейронной сетью задачи выделения полезного сигнала на фоне помех.

Использование для настройки ИНС именно данных алгоритмов обусловлено их способностью решать задачи пространственной фильтрации. Необходимо отметить, что первые два алгоритма являются алгоритмами настройки ААР и ранее не использовались для настройки искус-

ственных нейронных сетей. Уравнения данных алгоритмов могут быть записаны в виде:

$$\vec{W}_{jp}(k+1) = \mathbf{P}\{\vec{W}_{jp}(k) - \mu \cdot \mathbf{A} \cdot \vec{Z}_{p-1}^*(k) \cdot Z_{jp}(k)\} + \vec{W}_q. \quad (11)$$

Здесь  $\vec{W}_{jp}$  - весовой вектор  $j$ -ого нейрона слоя  $p$ ,  $\vec{Z}_{p-1}(k)$  - входной сигнал  $j$ -ого нейрона слоя  $p$ , выходной сигнал  $j$ -ого нейрона слоя  $p$   $Z_{jp}(k)$ . Матрица  $\mathbf{A} = \mathbf{I}$ , если используется дискретный градиентный алгоритм, и  $\mathbf{A} = (\mathbf{PR}_{xx}\mathbf{P})^+$ , если используется быстрый рекуррентный алгоритм.

Получено, что флуктуации весовых коэффициентов вносят искажения в статистические характеристики искусственной нейронной сети, настраивающихся по дискретному градиентному и быстрому рекуррентному алгоритму. При задании одинаковых входных сигналов на все нейроны первого слоя сети искажение флуктуациями весовых коэффициентов наблюдается только для выходного сигнала первого слоя сети, в последующих слоях флуктуации отсутствуют.

На Рис.10 показано выходное отношение сигнал/шум искусственных нейронных сетей, настраивающихся по дискретному градиентному и быстрому рекуррентному алгоритмам. Из рисунка видно, что потери есть только в первых слоях данных ИНС, а во вторых слоях этих сетей потери отсутствуют. Из рисунка также видно, что потери больше в ИНС с дискретным градиентным алгоритмом (кривая «Первый слой ИНС, gr»), чем в искусственной нейронной сети с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки (кривая «Первый слой ИНС, smi»).

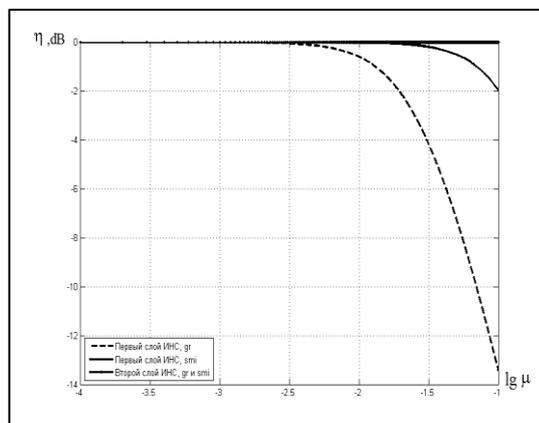


Рис.10. Потери  $\eta$  в выходном отношении сигнал / шум в зависимости от величины коэффициента адаптации  $\mu$ . Искусственная нейронная сеть, настраивающаяся по дискретному градиентному (gr) и быстрому рекуррентному (smi) алгоритму.

Проводилось компьютерное моделирование работы искусственных нейронных сетей, настраивавшихся по дискретному градиентному, быстрому рекуррентному алгоритмам – классическим алгоритмам, используемым для пространственной фильтрации сигналов в адаптивных антенных решётках. Моделировалась в искусственная нейронная сеть с однократ-

ным линейным ограничением на направление прихода полезного сигнала. Искусственная нейронная сеть содержала  $M = 3$  слоя, в каждом из которых было по  $N_1 = 7$  искусственных нейронов. Каждый искусственный нейрон представлял собой адаптивный линейный сумматор с  $N = 7$  входными элементами и нелинейной функцией – сигмоидом на выходе.

На каждый искусственный нейрон входного слоя сети подавалась одна и та же помеховая обстановка – полезный сигнал и одна помеха, представленные в виде плоских волн. Полезный сигнал приходил с направления, нормального к плоскости каждого искусственного нейрона входного слоя ИНС (при моделировании предполагалось, что нейроны каждого и, в частности, первого слоя искусственной нейронной сети расположены так, что их приемные элементы размещены вдоль одной прямой, своей для каждого слоя сети). Помеха приходила с направления, равного  $45^\circ$  относительно нормали, проведенной к плоскости искусственных нейронов входного слоя сети. Мощность помехи была принята равной единице, мощность полезного сигнала составляла 0.1 от мощности помехи. В каждом искусственном нейроне присутствовал также собственный шум, мощность которого была 0.01 относительно мощности помехи.

При моделировании вычислялся коэффициент рассогласования между выходной мощностью, найденной при постоянном стационарном весовом векторе, и «флуктуационной» частью выходной мощности. Моделирование показало, что второй и третий слои сети имеют коэффициент рассогласования, равный нулю, и это подтверждает компьютерное моделирование. Коэффициент рассогласования искусственного нейрона, принадлежащего первому слою сети, нулю не равен и зависит от величины коэффициента адаптации алгоритма.

В § 6.3 даны результаты статистического анализа с учетом флуктуаций весовых коэффициентов характеристик многослойной полносвязной искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба. Алгоритм Хэбба является нейросетевым алгоритмом, и был выбран в силу его способности выделять полезный сигнал на фоне помех в задачах пространственной обработки сигналов. Алгоритм Хэбба для ИНС может быть записан в виде:

$$\vec{W}_{jp}(k+1) = \vec{W}_{jp}(k) + \mu \cdot Z_{jp}(k) [\vec{Z}_{p-1}^*(k) - Z_{jp}^*(k) \cdot \vec{W}_{jp}(k)], \quad (12)$$

Получены выражения для корреляционной функции и мощности выходного сигнала первых трех слоев сети. Приведён общий вид корреляционной функции и мощности произвольного слоя ИНС, показана закономерность возрастания числа коэффициентов, входящих в выражения корреляционной функции и мощности по мере возрастания номера слоя искусственной нейронной сети. Данные формулы не приводятся по причине их большого размера.

Выходная мощность искусственной нейронной сети в общем случае может быть как больше, так и меньше мощности полезного сигнала, соответствующего стационарному весовому вектору (т.е. может наблюдаться как эффект рассогласования, так и эффект перекомпенсации). Ис-

кажения выходных сигналов слоев сети за счет флуктуаций весовых коэффициентов наблюдается от слоя к слою по всем слоям ИНС, причем искажения, вносимые флуктуациями, растут по мере увеличения номера слоя сети.

На Рис.11 показаны потери в выходном отношении сигнал/шум двухслойной ИНС, настраиваемой по алгоритму Хэбба. Из рисунка видно, что потери больше во втором слое данной сети.

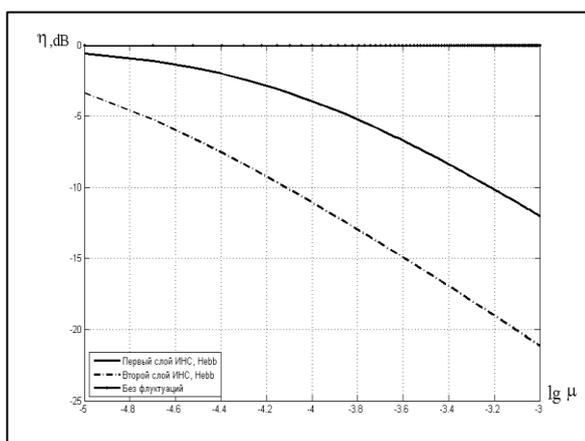


Рис.11. Потери  $\eta$  в выходном отношении сигнал / шум в зависимости от величины коэффициента адаптации  $\mu$ . Искусственная нейронная сеть, настраиваемая по алгоритму Хэбба.

Моделировалась искусственная нейронная сеть, настраиваемая по алгоритму Хэбба – классическому алгоритму, используемому в искусственных нейронных сетях для решения задач распознавания образов. Искусственная нейронная сеть содержала  $M = 3$  слоя, в каждом из которых было по  $N_1 = 7$  искусственных нейронов. Каждый искусственный нейрон представлял собой адаптивный линейный сумматор с  $N = 7$  входными элементами.

На каждый искусственный нейрон входного слоя сети подавалась одна и та же помеховая обстановка – полезный сигнал и две помехи, представленные в виде плоских волн. Наличие в помеховой обстановке двух помех обусловлено спецификой функционирования ИНС с алгоритмом Хэбба – каждый слой выделяет свой сигнал. Первый слой выделяет самый мощный сигнал, второй слой – средний по мощности сигнал и, наконец, третий слой выделяет самый слабый сигнал. Наличие в структуре сети трех слоев было необходимо, чтобы соответствовать структуре сетей с дискретным градиентным и быстрым рекуррентным алгоритмами и определило выбор трех сигналов для ИНС с алгоритмом Хэбба. Сигнал с самой низкой мощностью (0.01 относительно самого мощного сигнала) приходил с направления, нормального к плоскости каждого искусственного нейрона входного слоя ИНС. Средний по мощности сигнал (0.5 относительно самого мощного сигнала) приходил под углом  $60^\circ$  относительно нормали, проведенной к плоскости искусственных нейронов входного слоя сети. Самый мощный сигнал (его мощность была принята равной 1)

приходил с направления, равного  $45^\circ$  относительно нормали, проведенной к плоскости искусственных нейронов входного слоя сети. В каждом искусственном нейроне присутствовал также собственный шум, мощность которого была 0.01 относительно мощности самого мощного сигнала.

При моделировании вычислялся коэффициент рассогласования между выходной мощностью, найденной при постоянном стационарном весовом векторе, и «флуктуационной» частью выходной мощности.

Моделирование показало, что во всех трех слоях искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба, имеют место флуктуации весовых коэффициентов. Согласие между теоретическими результатами и результатами компьютерного моделирования уменьшается по мере роста номера слоя и величины коэффициента адаптации. Алгоритм Хэбба имеет третью степень по весовому вектору, и вычисление флуктуаций для каждого последующего слоя приводит к добавлению новых «флуктуационных» слагаемых. В этих условиях первое борновское приближение от слоя к слою становится все менее корректным. Обращает на себя внимание также факт более быстрого роста коэффициента рассогласования в третьем слое ИНС по мере роста коэффициента адаптации  $\mu$ . Это свидетельствует о том, что при увеличении размера сети (числа ее слоев) вклад флуктуаций в выделяемый сетью сигнал будет быстро нарастать и приводить к его искажению.

Таким образом, флуктуации весовых коэффициентов в искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба – классическому алгоритму настройки искусственных нейронных сетей, приводят к искажениям выходного сигнала сети. Данные искажения тем больше, чем больше слоев в ИНС. Вклад каждого последующего слоя в искажения выделяемого сетью сигнала только увеличивается.

В § 6.4 приведён расчёт характеристики эффективности работы искусственных нейронных сетей – потерь в выходном отношении сигнал / шум, вызванных наличием флуктуаций весовых коэффициентов. Данная характеристика рассчитывается для первых двух слоев ИНС, настраиваемых по дискретному градиентному и быстрому рекуррентному алгоритмам, а также по алгоритму Хэбба (Рис.10-11).

В § 6.5 представлены выводы по результатам главы 6:

1. Дискретный градиентный алгоритм и алгоритм рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов – классические алгоритмы настройки адаптивных антенных решёток, обобщенные для использования при работе искусственных нейронных сетей, показали свою эффективность в компьютерном моделировании ИНС и могут быть применены как алгоритмы настройки искусственных нейронных сетей.
2. Потери в выходном отношении сигнал / шум, связанные с флуктуациями весового вектора, в первом слое искусственной нейронной

сети с дискретным градиентным алгоритмом настройки больше, чем в первом слое ИНС, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму. Во втором и последующих слоях данных искусственных нейронных сетей потери отсутствуют при условии поступления на все искусственные нейроны первого слоя одних и тех же входных сигналов.

3. В искусственной нейронной сети, настраивающейся по алгоритму Хэбба, потери в выходном отношении сигнал / шум, вызванные флуктуациями весового вектора, присутствуют во всех слоях ИНС. В каждом последующем слое потери только нарастают, что приводит к ухудшению качества выделения полезного сигнала на фоне помех искусственной нейронной сетью, настраивающейся по алгоритму Хэбба.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана система методов анализа статистических характеристик узкополосных и широкополосных многоканальных адаптивных систем различной структуры:

- адаптивных антенных решеток без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи,
- адаптивных антенных решеток с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи,
- и многослойных полносвязных искусственных нейронных сетей.

Разработанный в диссертации математический аппарат основан на методах теории возмущений и позволяет получать статистические характеристики адаптивных антенных решёток и искусственных нейронных сетей с учётом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов.

2. Методы анализа разработаны для наиболее общего случая негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором.

3. Методы теории возмущений для статистического анализа адаптивных антенных решёток, предполагающих наличие нелинейной функциональной зависимости входного и выходного сигналов в цепи корреляционной обратной связи, содержат также предположение, что нелинейная функция является  $N$  раз дифференцируемой. По этой причине, помимо использования теории возмущений, при статистическом анализе таких систем также используется разложение в ряд Вольтерра нелинейной функции, содержащейся в цепи корреляционной обратной связи.

4. Для успешного применения методов теории возмущений к анализу искусственных нейронных сетей использован подход, позволяющий на основе имеющихся статистических характеристик отдельного искус-

ственного нейрона, найденных с учётом флуктуаций весового вектора, получить рекуррентные соотношения этих же характеристик для каждого слоя искусственной нейронной сети.

5. Расчет статистических характеристик с учетом флуктуаций весового вектора был проведен в первом «борновском» приближении для адаптивных антенных решёток без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи и искусственных нейронных сетей. В адаптивных антенных решётках с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи при статистическом анализе были рассчитаны также слагаемые второго порядка малости по коэффициенту адаптации, взятые из второго приближения. Полученные результаты показали, что поправки в статистических характеристиках ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи из второго приближения имеют второй порядок малости и могут не учитываться при статистическом анализе.

6. Разработанный математический аппарат был успешно применен для анализа многоканальных адаптивных систем, настраивающихся по:

- классическим алгоритмам настройки адаптивных антенных решёток – дискретному градиентному алгоритму с многократными линейными ограничениями на диаграмму направленности и алгоритму рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов;
- классическому алгоритму настройки искусственных нейронных сетей – алгоритму Хэбба;
- новому адаптивному алгоритму - алгоритму минимизации среднего квадрата ошибки с квадратичным ограничением.

Все указанные алгоритмы были проанализированы и применены для настройки как адаптивных антенных решёток, так и искусственных нейронных сетей. Для этих целей классические антенные алгоритмы и алгоритм минимизации среднего квадрата ошибки с квадратичным ограничением были обобщены для работы в искусственной нейронной сети, а алгоритм Хэбба – для работы в адаптивной антенной решетке.

7. Мощность выходного сигнала узкополосных адаптивных антенных решёток и искусственных нейронных сетей, под влиянием флуктуаций весовых коэффициентов может изменяться, увеличиваясь при некоррелированных входных сигналах (эффект рассогласования), и, уменьшаясь при больших значениях коэффициентов автокорреляции между отсчётами входных сигналов (эффект «перекомпенсации»), по сравнению со значениями, полученными при постоянном стационарном весовом векторе.

Эффект рассогласования выходной мощности свидетельствует о том, что адаптивная система из-за флуктуаций весового вектора не может достигнуть теоретически найденного минимального значения выходной мощности. Появление эффекта «перекомпенсации» означает, что из-

за наличия статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором адаптивная система начинает, помимо помехи, подавлять полезный сигнал.

8. Сравнительный анализ показал, что флуктуации весового вектора в адаптивной антенной решётке с линейным дискретным градиентным алгоритмом настройки изотропны во всех направлениях подпространства ограничений. В ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи и тем же алгоритмом настройки, флуктуации весового вектора неизотропны в пространстве ограничений: максимальны в угловых направлениях прихода помехи, а во всех остальных направлениях имеют, как правило, много меньшую величину (пропорциональную значению мощности собственного шума адаптивной антенной решётки).

Флуктуации весового вектора антенной решётки, предполагающей наличие нелинейной функциональной зависимости входного и выходного сигналов в цепи корреляционной обратной связи, и настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму, неизотропны в пространстве весовых коэффициентов. Они равны нулю в направлении ограничений, минимальны в направлении помех, а во всех остальных направлениях имеют максимальную величину, обратно пропорциональную значению мощности собственного шума ААР.

Это означает, что поскольку в направлении ограничений флуктуации весовых коэффициентов отсутствуют, то в алгоритмах с ограничениями в направлениях ограничений сигнал принимается без искажений адаптивными антенными решётками. В направлениях, не защищённых ограничениями, характер искажений при приёме сигналов определяется флуктуационной диаграммой направленности. Максимум флуктуаций в направлении помехи означает, что помеха, приходящая с данного направления, не будет полностью компенсирована по причине наличия флуктуаций весового вектора. Конкретная величина флуктуаций в данном направлении определяет, как велика будет остаточная мощность помехи на выходе ААР, обусловленная флуктуациями весового вектора.

9. Минимальные потери за счет флуктуаций весового вектора в выходном отношении сигнал/шум адаптивных антенных решеток при равных скоростях сходимости алгоритмов наблюдаются в ААР, исключаящей наличие нелинейной функциональной зависимости входного и выходного сигналов в цепи корреляционной обратной связи, и настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму, а максимальные - в адаптивной антенной решётке с алгоритмом Хэбба. При коэффициенте адаптации  $\mu = 5 \cdot 10^{-3}$  они составляют соответственно  $-3$ дБ и  $-16$ дБ.

Остальные случаи занимают промежуточное положение. ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи и дискретным градиентным алгоритмом настройки, а также ААР с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи по  $-6$ дБ. ААР с нелинейной функцией в цепи кор-

реляционной обратной связи и быстрым рекуррентным алгоритмом настройки –10дБ.

10. Учёт флуктуаций весовых коэффициентов в искусственной нейронной сети приводит к тому, что выходная мощность ИНС в общем случае может быть как больше, так и меньше мощности, полученной при постоянном стационарном весовом векторе, т.е. может иметь место как эффект рассогласования, так и эффект «перекомпенсации». В искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба, увеличение числа слоев сети увеличивает искажения, вносимые флуктуациями в работу ИНС.

Таким образом, в искусственной нейронной сети из-за флуктуаций весовых коэффициентов имеет место как остаточная (нескомпенсированная) мощность помехи на выходе, так и снижение мощности полезного сигнала на выходе (и его искажение) относительно значения его мощности, найденной при оптимальном весовом векторе. Какой именно эффект будет иметь место и его выраженность, определяется уровнем коррелированности отсчетов входных сигналов, числом слоев сети и алгоритмом настройки ИНС.

11. Потери за счет флуктуаций весовых коэффициентов в выходном отношении сигнал/шум искусственных нейронных сетей, настраиваемых по дискретному градиентному и быстрому рекуррентному алгоритмам, есть только в первых слоях ИНС, а в остальных слоях этих сетей потери отсутствуют. Это справедливо для частного случая одинаковых помеховых условий, воздействующих на каждый искусственный нейрон входного слоя искусственной нейронной сети. Для коэффициента адаптации  $\mu = 5 \cdot 10^{-2}$  эти потери в первом слое сети составляют соответственно – 0.5дБ (ИНС с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки) и –7.3дБ (ИНС с дискретным градиентным алгоритмом настройки).

В искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба, потери за счет флуктуаций весовых коэффициентов возрастают с каждым последующим слоем ИНС. Для коэффициента адаптации  $\mu = 5 \cdot 10^{-4}$  эти потери в первом слое сети составляют –9дБ, а во втором –18дБ.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Мальцев А.А., Зимина С.В. Анализ влияния флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивной антенной решётки с линейными ограничениями // Антенны, 2000. N2. С. 60 - 65.
- A2. Мальцев А.А., Зимина С.В. Спектрально-корреляционные характеристики выходного сигнала адаптивных антенных решёток с учётом флуктуаций весового вектора // Радиотехника и электроника, 2001. т.46. N11. С.1350– 1355.

- А3. Мальцев А.А., Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивной антенной решётки с быстрым рекуррентным алгоритмом настройки // Известия вузов. Радиофизика, 2002. т. 45. №8. С. 708 - 721.
- А4. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора в адаптивных антенных решётках // Антенны, 2004. №6. С. 27 -35.
- А5. Зими́на С.В. Анализ статистических характеристик адаптивной антенной решётки с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи // Радиотехника и электроника, 2005. т. 50, №8. С. 952 - 960.
- А6. Зими́на С.В. Статистические характеристики весового вектора и диаграмма направленности адаптивной антенной решётки с нелинейной функцией в цепи обратной связи при учёте флуктуаций весового вектора // Информационно – измерительные и управляющие системы, 2005. №3. С. 47 - 55.
- А7. Зими́на С.В. Статистические характеристики искусственной нейронной сети с дискретным градиентным алгоритмом настройки с учётом флуктуаций весовых коэффициентов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2006. №10. С. 9 - 15.
- А8. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора в адаптивных антенных решётках с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраивающихся по алгоритму рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов // Известия вузов. Радиофизика, 2006. т.49. №2. С. 164 - 173.
- А9. Литвинов О.С., Зими́на С.В. Исследование характеристик алгоритма Хэбба в задачах обработки радиосигналов // Успехи современной радиоэлектроники, 2006. №6. С. 23 - 27.
- А10. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики искусственной нейронной сети с алгоритмом рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2007. №5. С. 3 – 7.
- А11. Литвинов О.С., Зими́на С.В. Статистический анализ адаптивных антенных решёток, настраивающихся по алгоритму Хэбба // Успехи современной радиоэлектроники, 2007. №8. С. 57 – 66.
- А12. Литвинов О.С., Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на спектральные характеристики и диаграмму направленности адаптивной антенной решётки, настраивающейся по алгоритму Хэбба // Антенны, 2008. №4. С. 27 - 33.
- А13. Литвинов О.С., Зими́на С.В. Статистический анализ флуктуаций весовых коэффициентов искусственной нейронной сети, настраивающейся по алгоритму Хэбба // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2009. №3. С. 33 – 43.
- А14. Литвинов О.С., Зими́на С.В. Анализ влияния флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики адаптивной антенной решетки, настраивающейся по алгоритму Хэбба // Радиотехника и электроника, 2009. т.54. №4. С. 423 – 432.

- A15. Литвинов О.С., Зими́на С.В. Статистические характеристики адаптивных антенных решёток в условиях приема широкополосных сигналов // Известия вузов. Радиофизика, 2009. т.52. N5-6. С. 492 – 502.
- A16. Зими́на С.В. Спектрально – корреляционные характеристики адаптивной антенной решетки, настраиваемой по алгоритму Хэбба, с учётом флуктуаций весовых коэффициентов // Известия вузов. Радиофизика, 2009. т.52. N10. С. 822 - 832.
- A17. Зими́на С.В. Анализ влияния флуктуаций весового вектора на коэффициент направленного действия и коэффициент усиления адаптивной антенной решетки, настраиваемой по дискретному градиентному алгоритму // Антенны, 2009. N11. С. 13 – 18.
- A18. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на мощность выходного сигнала адаптивных антенных решёток, принимающих широкополосные сигналы // Радиотехника и электроника, 2009. т. 54. N11. С. 1344 – 1352.
- A19. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба и принимающей широкополосные сигналы // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2010. N4. С. 12 – 19.
- A20. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на коэффициент направленного действия и коэффициент усиления адаптивных антенных решёток, настраиваемых по быстрому рекуррентному алгоритму и алгоритму Хэбба // Антенны, 2010. N1. С. 15 – 21.
- A21. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на коэффициент направленного действия адаптивных антенных решёток // Радиотехника, 2011. N3. С. 52 – 61.
- A22. Зими́на С.В. Статистические характеристики многослойных полносвязных искусственных нейронных сетей, принимающих широкополосные сигналы и настраиваемых по градиентным алгоритмам // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2011. N5. С. 3 – 12.
- A23. Зими́на С.В. Флуктуации весовых коэффициентов в искусственной нейронной сети с алгоритмом Хэбба // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2013. N4. С. 3 – 8.
- A24. Зими́на С.В. Спектральные характеристики и диаграмма направленности адаптивной антенной решётки, настраиваемой по LMS алгоритму с квадратичным ограничением с учётом флуктуаций весового вектора // Антенны, 2014. N9. С. 64 –69.
- A25. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивной антенной решетки с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраиваемой по алгоритму LMS с квадратичным ограничением // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. т.17. N4. С. 26 – 33.
- A26. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора – от «линейной» адаптивной антенны к искусственной нейронной сети // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. N8. С. 62 – 70.

- A27. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора в адаптивных антенных решетках, настраиваемых по алгоритму минимизации среднего квадрата ошибки с квадратичным ограничением // Известия вузов. Радиофизика, 2015. т.58. N1. С. 77 – 84.
- A28. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на характеристики нейронной сети с настройкой по критерию наименьшего среднего квадрата ошибки // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. т.2. С. 26 – 32.
- A29. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора в адаптивных системах // Инженерная физика. 2015. N9. С. 35 - 52.
- A30. Зими́на С.В. Статистический анализ выходной мощности искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму LMS с квадратичным ограничением, с учетом флуктуаций весовых коэффициентов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2015. N12. С. 12 – 18.
- A31. Зими́на С.В. Определение потерь в выходном отношении сигнал/шум адаптивных антенных решёток, вызванных наличием флуктуаций весового вектора // Радиолокация. Результаты теоретических и экспериментальных исследований. Монография. В 2-х книгах. Кн.1. / Под ред. В.Д. Ястребова. М.: Радиотехника, 2018. – 264с. – С. 112 – 118.

#### **ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр.: Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. - 1104с.
2. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. – 528с.
3. Ганзий Д.Д., Русаков П.В., Трошин Г.И. Адаптивные антенные системы. М.: Радиотехника, 2019. – 272с.
4. Карташевский В.Г., Шатилов С.В. Адаптивная фильтрация негауссовских сигналов в каналах связи. Методы, алгоритмы. М.: Радиотехника, 2013. – 176с.
5. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.2. / Под ред. В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2007. – 304с.
6. Николенко С., Каду́рин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2020. –480с.
7. Bershад N. J., Bermudez J.- C. M., Tournéret J. – Y. Stochastic analysis of the LMS algorithm for system identification with subspace inputs // IEEE Trans., 2008. v. SP - 56. N3. P. 1018 - 1027.
8. Zeng X., Yeung D. S. Sensitivity analysis of multilayer perceptron to input and weight perturbations // IEEE Trans., 2001. v. NN - 12. N6. P. 1358 - 1366.
9. Bershад N. J., Eweda Eweda, Bermudez J.- C. M. Stochastic analysis of an adaptive line enhancer / canceler with a cyclostationary input // IEEE Trans., 2016. v. SP - 64. N1. P. 104 - 119.

10. Eweda Eweda, Bershad N. J. Stochastic analysis of the signed LMS algorithms for cyclostationary white gaussian inputs // IEEE Trans., 2017. v. SP - 65. N7. P. 1673 - 1684.
11. Мальцев А. А. Статистический анализ и синтез адаптивных радиоэлектронных систем // Диссертация на соискание учёной степени доктора физико - математических наук. Горький, 1989.
12. Игнатенко С. В., Мальцев А. А. Статистические характеристики адаптивных антенных решёток при обработке дискретных сигналов с коррелированными отсчётами // Известия вузов. Радиофизика, 1994. т. 37. N12. С. 1532 - 1545.