

На правах рукописи



ЗИМИНА Светлана Валерьевна

**Флуктуации в адаптивных
антенных системах.
Анализ эффективности**

01.04.03 – радиофизика

26 АПР 2017

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



006655503

Нижний Новгород – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор
Бляхман Александр Борисович,

Официальные оппоненты:

Громов Евгений Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики –
Нижний Новгород, заведующий кафедрой математики, г. Нижний Новгород

Шорохова Елена Анатольевна,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно - производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», ведущий научный сотрудник, г. Нижний Новгород

Разиньков Сергей Николаевич,
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского испытательного института (радиоэлектронной борьбы), г. Воронеж

Ведущая организация:

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Москва.

Защита состоится

« 11 » октября 2017 г. в 15:00

на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте:

<https://diss.unn.ru/665>

Автореферат разослан « 13 » апреля 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук



Клюев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Диссертация посвящена исследованию флуктуаций, шумов и случайных процессов в стохастических системах (статистическая радиофизика). Разрабатываются новые методы анализа и статистической обработки сигналов в условиях помех. В диссертации представлены результаты, совокупность которых может быть классифицирована как научное достижение.

Актуальность темы.

В современной статистической радиофизике активно развивается научное направление, связанное со статистическим анализом адаптивных антенных систем – адаптивных антенных решёток (ААР) и искусственных нейронных сетей (ИНС) – разновидности адаптивных систем, используемой для пространственной фильтрации сигналов в изменяющейся помеховой обстановке. 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 антенн были систематически изложены в ряде монографий [1 - 5].

Под статистическим анализом адаптивных систем в данной работе мы будем понимать анализ их характеристик с учётом флуктуаций адаптируемых (автоматически настраиваемых) параметров [6]. Статистический анализ позволяет корректно определять предельную точность настройки адаптивных систем и количественно оценивать искажения полезного сигнала, возникающие из-за флуктуаций адаптируемых параметров.

Адаптивные антенные системы позволяют эффективно бороться с помехами в радиолокации и радиосвязи путём автоматического подавления помех, приходящих с различных направлений. Изучение влияния флуктуаций весового вектора на скорость и точность настройки адаптивных антенных систем даёт разработчикам возможность реализовывать антенные системы с наилучшим балансом характеристик скорость – точность настройки, а пользователям – оптимизировать работу адаптивных систем с целью наилучшего выполнения предлагаемой системе задачи.

Несмотря на очевидную актуальность решения такого типа задач, статистическая теория адаптивных антенных систем в настоящее время далека от своего завершения. Это связано с тем, что процесс настройки адаптируемых весовых коэффициентов описывается стохастическими дифференциальными (или разностными для дискретных алгоритмов) уравнениями, которые в качестве коэффициентов содержат некоторые функции от входных сигналов, помех и внутренних шумов системы. Сложность анализа таких систем уравнений с флуктуирующими случайными коэффициентами анализировалась в работах [7 - 9]. Общепринятые приближения «белого шума» и гауссовости флуктуаций оказываются недостаточно обоснованными и приводят в ряде случаев даже к появлению

нию результатов, противоречащих реальным экспериментальным данным.

Проведённое изучение литературы по вопросам анализа влияния флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов на адаптивные системы различных классов выявил недостаточность решения указанной проблемы. Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что статистический анализ влияния флуктуаций на характеристики систем велся в основном в предположении статистической независимости вектора входных сигналов и весового вектора. Однако в практических задачах такая зависимость имеется, и необходимо учитывать зависимости этих двух векторов. Кроме того, предположение о статистической независимости входных сигналов и весовых коэффициентов приводит к неверным результатам, свидетельствующим об увеличении мощности на выходе адаптивных систем под влиянием флуктуаций весовых коэффициентов по сравнению с мощностью, найденной при постоянном стационарном весовом векторе. Практика показывает, что флуктуации могут приводить к уменьшению мощности на выходе адаптивной системы и искажению выходного сигнала.

Следующее, на что хотелось бы обратить внимание после анализа литературных данных – это недостаточная разработанность вопроса влияния флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики искусственных нейронных сетей. Если анализ с учётом флуктуаций весовых коэффициентов характеристик адаптивных антенных решёток и адаптивных фильтров проводился, то искусственные нейронные сети внимание исследователей практически обошло стороной. Тем не менее, искусственные нейронные сети в последние годы приобретают все большую значимость, поскольку способны решать большой класс различных задач. Однако флуктуации весовых коэффициентов способны существенно исказить характеристики искусственных нейронных сетей и ухудшать 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 своим функционированием может исказить работу системы в целом. По этой причине вопрос об анализе статистических характеристик искусственных нейронных сетей с учётом флуктуаций весовых коэффициентов является достаточно актуальным.

Необходимо отметить недостаточность анализа характеристик адаптивных систем с учётом флуктуаций настраиваемых параметров. большей частью авторы описывают какую-нибудь одну характеристику, на примере которой видно влияние флуктуаций (например, коэффициент рассогласования, корреляционную матрицу флуктуаций весовых коэффициентов и пр.) или даже просто методом компьютерного моделирования показывают, что предлагаемая ими новая адаптивная система или улучшенный адаптивный алгоритм имеют меньшие флуктуации настраиваемых параметров. Тем не менее, представляется более актуальным

проводить комплексный анализ влияния флуктуаций весовых коэффициентов на различные статистические характеристики адаптивных систем (выходную мощность, спектральную плотность мощности выходного сигнала, для адаптивных антенных решеток – на диаграмму направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент полезного действия) различной структуры в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором, поскольку это позволило бы выявить все возможные эффекты, привносимые флуктуациями в функционирование данных систем, и дало бы возможность оптимальным образом организовать их работу.

Цель работы. В соответствии с рассмотренным состоянием проблемы в диссертации была поставлена следующая цель:

Разработать методы анализа статистических характеристик с учетом флуктуаций весовых коэффициентов адаптивных антенных систем различной структуры в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором.

Задачи исследования:

1. Разработать методы анализа статистических характеристик с учетом флуктуаций весовых коэффициентов узкополосных адаптивных антенных решёток, не содержащих нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи, настраивающихся по дискретному градиентному, быстрому рекуррентному алгоритмам и алгоритму Хэбба, в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором.
2. Разработать методы анализа статистических характеристик с учетом флуктуаций весовых коэффициентов узкополосных адаптивных антенных решёток, содержащих нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи, настраивающихся по дискретному градиентному, быстрому рекуррентному алгоритмам и алгоритму Хэбба, в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором.
3. Разработать методы анализа статистических характеристик с учетом флуктуаций весовых коэффициентов искусственных нейронных сетей, настраивающихся по дискретному градиентному, быстрому рекуррентному алгоритмам и алгоритму Хэбба, в наиболее общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором.

Методы исследований.

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, теории адаптивных систем управления, теории матриц. Для компьютерного моделирования использовалось программирование на языке Visual Basic 3.0 и программирование в среде MatLab 4.0 – 7.0.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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 решеток, не содержащих нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи, и настраивающихся по быстрому рекуррентному алгоритму и алгоритму Хэбба.
2. 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 решеток, содержащих нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи, и настраивающихся по дискретному градиентному, быстрому рекуррентному алгоритмам и алгоритму Хэбба.
3. 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 полностью связанных искусственных нейронных сетей, настраивающихся по дискретному градиентному, быстрому рекуррентному алгоритмам и алгоритму Хэбба.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Развитые в диссертации методы анализа статистических характеристик адаптивных антенных решёток и искусственных нейронных сетей расширяют возможности оптимизации качества их функционирования. 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.

Использование искусственных нейронных сетей в задачах обработки сигналов, настраивающихся по дискретному градиентному и быстрому рекуррентному антенным алгоритмам, адаптированных к работе в искусственной нейронной сети, позволит более качественно выделять полезный сигнал на фоне сложной помеховой обстановки.

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 РАН (ЦОНТ РАН, г. Москва) и научный центр нейрокомпьютеров (НЦН, г. Москва).

Положения, выносимые на защиту.

1. Корреляционный статистический анализ адаптивных систем в присутствии флуктуаций весовых коэффициентов связан с обязательным учетом негауссовской статистической зависимости весового вектора и вектора входных сигналов.
2. Расчёт статистических характеристик в реально работающих адаптивных системах целесообразно проводить методами теории возмущений. Первое, так называемое «борновское», приближение позволяет достаточно точно учесть эффекты, возникающие из-за флуктуаций весового вектора в процессе настройки ААР и ИНС. Величина слагаемых второго приближения меньше на 3-6 порядков, чем величина слагаемых первого приближения, что позволяет не учитывать второе приближение при статистическом анализе.
3. Эффективность работы адаптивной антенной системы ухудшается вследствие флуктуаций весовых коэффициентов. В случае равных скоростей сходимости алгоритмов минимальные потери в выходном отношении сигнал / шум наблюдаются в ААР без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму, а максимальные в ААР с алгоритмом Хэбба.

Апробация результатов.

Результаты диссертационной работы докладывались: 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 «Информаци-

онные системы и технологии» (Нижний Новгород, 2014, 2015), Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Нижний Новгород, 2014; Казань, 2015).

Публикации и личный вклад автора.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 31 статье в журналах, включенных в Список ведущих научных журналов и изданий, утвержденный ВАК РФ [1]-[31], 2 статей опубликованных в журналах, зарегистрированных в РИНЦ, а также в 32 тезисах и трудах конференций. 39 работ (в том числе 19 статей) из 65 выполнены без соавторов. Автору принадлежит предложенная в диссертационной работе методика анализа работы адаптивных антенных решеток с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи и искусственных нейронных сетей с учетом флуктуаций весовых коэффициентов, выполнение аналитических расчетов и компьютерного моделирования, а также непосредственное участие в постановке задач, обсуждении и интерпретации полученных результатов.

В работах [1-3] задача сформулирована и решена Мальцевым А.А. Зиминой С.В. принимала участие в обсуждении результатов и оформлении результатов работы. В статьях [4-6] задача сформулирована Мальцевым А.А. Зиминой С.В. разрабатывала методику анализа, выполняла аналитическое и численное решение поставленных задач. В работах [13-18] задача была сформулирована Литвиновым О.С. Он также участвовал в обсуждении результатов. Зиминой С.В. разрабатывала методику анализа, выполняла аналитическое и численное решение поставленных задач. Остальные статьи Зиминой С.В. выполнены без соавторов.

Мальцев А.А., Литвинов О.С. являлись коллегами по совместной работе в ННГУ им. Н.И. Лобачевского и в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В совместных с ними трудах изложены частные технические решения конкретных задач, базирующихся на методологических основах анализа эффективности функционирования адаптивных антенных систем, развитых соискателем.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем работы составляет 293 страницы, включая 264 страницы основного текста, 41 рисунок и список цитируемой литературы из 164 наименований (15 страниц).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

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, настраивающихся 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, настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму с ограничениями на диаграмму направленности. Дискретный градиентный алгоритм с ограничениями описывается уравнением:

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

где $\vec{W}(k)$ - настраиваемый весовой вектор в момент времени k , \vec{X} - вектор входных сигналов, μ - коэффициент усиления в цепи корреляционной обратной связи, \vec{W}_q - вектор комплексных весовых коэффициентов, соответствующий "желаемой" диаграмме направленности (ДН) покая (при отсутствии внешних помех), \mathbf{P} - проекционная матрица (матричный фильтр в контуре управления ААР), обеспечивающая введение многократных линейных ограничений на пространственные характеристики ААР.

Усредняя (1), найдём точное уравнение для $\langle \vec{W} \rangle$:

$$\langle \vec{W}(k+1) \rangle = \mathbf{P}\{\langle \vec{W}(k) \rangle - \mu \mathbf{R}_{xx} \langle \vec{W}(k) \rangle - \mu \vec{\Delta}_w\} + \vec{W}_q, \quad (2)$$

где $\vec{\Delta}_w \equiv \langle \vec{\Phi} \vec{W} \rangle$ - вектор кумулянтных функций третьего порядка, учитывающих статистическую зависимость флуктуаций весовых коэффициентов \vec{W} и входных сигналов $\vec{X}(k)$. В общем случае негауссовской статистической зависимости между вектором входных сигналов и весовым вектором данный вектор не равен нулю, и его необходимо учитывать при статистическом анализе.

Для определения статистических характеристик ААР воспользуемся методом возмущений по параметру μ , который будем полагать малым ($\mu \ll 1$). В качестве нулевого приближения возьмём среднее значение вектора весовых коэффициентов, получающееся из усреднения уравнения (1) в приближении "прямого размывания" всех смешанных моментов (в этом приближении $\vec{\Delta}_w \equiv \langle \vec{\Phi} \vec{W} \rangle = \langle \vec{\Phi} \rangle \langle \vec{W} \rangle = \vec{0}$, так как средние значения «флуктуационных» частей корреляционной матрицы входных сигналов и весового вектора предполагаются равными нулю):

$$\vec{W}_0(k+1) = \mathbf{P}\{\vec{W}_0(k) - \mu \mathbf{R}_{xx} \vec{W}_0(k)\} + \vec{W}_q. \quad (3)$$

Методами теории возмущений стационарный весовой вектор для дискретного градиентного алгоритма был представлен в виде суммы весового вектора, найденного в нулевом приближении, и бесконечного числа поправок, представленных в виде многомерных бесконечных рядов.

$$\vec{W}_n(k) = \vec{W}_{n1}(k) + \vec{W}_{n2}(k) + \vec{W}_{n3}(k) + \dots \quad (4)$$

В разделе также приведена формула корреляционной матрицы входных сигналов узкополосной ААР, которая представляет произведение пространственной и временной частей:

$$\mathbf{R}_{xx}(k, k+n) \equiv \langle \bar{X}^*(k) \bar{X}^T(k+n) \rangle = \mathbf{R}_{xx} \mathcal{R}^{|n|}, \quad (5)$$

где \mathcal{R} - коэффициент корреляции между соседними отсчетами входных сигналов.

Используя выражения для поправок в первом борновском приближении, можно получить различные статистические характеристики узкополосных адаптивных антенных решёток с учётом флуктуаций весового вектора, что и сделано в следующих разделах.

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 μ , а также от значений коэффициентов автокорреляции между отсчетами полезного сигнала и помехи r_s, r_ξ соответственно. Ниже приведено выражение выходной мощности ААР, найденное с учетом флуктуаций весового вектора:

$$\langle |Z|^2 \rangle_{cr} = \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_\xi^2}{1-r_\xi^2} Sp(\mathbf{P}\mathbf{R}_{\xi\xi}) \right\} \langle |Z|^2 \rangle_\xi + \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_s r_\xi}{1-r_s r_\xi} Sp(\mathbf{P}\mathbf{R}_{\xi\xi}) \right\} \langle |Z|^2 \rangle_s \quad (6)$$

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). Какой именно эффект будет наблюдаться, зависит от величины коэффициентов автокорреляции между отсчетами полезного 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. Найденные в результате компьютерного эксперимента значения выходной мощности и спектральной плотности мощности выходного сигнала ААР совпадают со значениями, полученными на основе

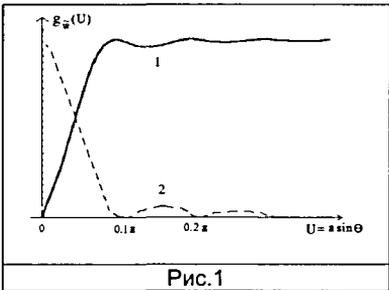


Рис.1

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 «жестких» (не флуктуирующих) ограничений (рис.1, кривая 1). Для ААР с однократным ограничением наличие флуктуаций приводит к исчезновению нулей средней диаграммы направленности и замена их на малые ненулевые значения.

На рисунке 2 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 потерь при рабочих значениях коэффициента адаптации (до 0.005) сравнительно мала.

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

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:

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

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

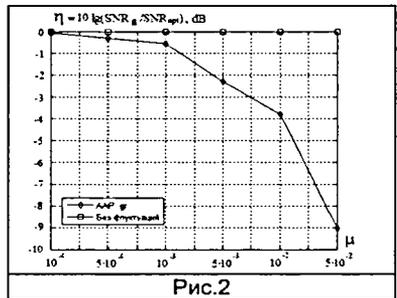


Рис.2

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.

В § 2.3. - 2.5. в первом, так называемом «борновском», приближении 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:

$$\begin{aligned} \langle |Z|^2 \rangle_{CT} = & \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_\xi^2}{1-r_\xi^2} Sp((\mathbf{PR}_{xx}\mathbf{P})^* \mathbf{PR}_{\xi\xi}^*) \right\} \langle |Z|^2 \rangle_\xi + \\ & + \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{1-3r_\xi r_\xi}{1-r_\xi r_\xi} Sp((\mathbf{PR}_{xx}\mathbf{P})^* \mathbf{PR}_{\xi\xi}^*) \right\} \langle |Z|^2 \rangle_s \end{aligned} \quad (8)$$

Формула (8) аналогична формуле (6) 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 рисунке 3 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.

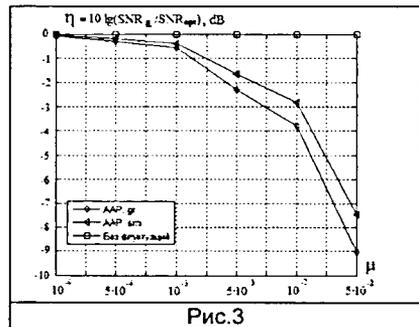


Рис.3

На рисунке 4 показана флюктуационная диаграмма направленности ААР с однократным линейным ограничением, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму. Из рисунка видно, что для ААР с однократным ограничением в направлении ограничений флюктуации отсутствуют и минимальны в направлении помехи (рис.4).

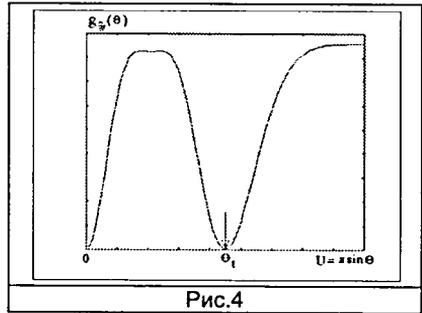


Рис.4

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

В § 2.8. размещены выводы к изложенному во второй главе.

В третьей главе приведен 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:

$$\vec{W}(k+1) = \vec{W}(k) + \mu \cdot (\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k)) \cdot [\vec{X}^*(k) - (\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k))^* \cdot \vec{W}(k)]. \quad (9)$$

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).

В § 3.2. – 3.4. приведены найденные с учётом флюктуаций весового вектора характеристики выходного сигнала ААР, настраивающейся по алгоритму Хэбба – корреляционная функция, спектральная плотность мощности и мощность на выходе адаптивной антенны. Представлены также результаты компьютерного моделирования. Показано, что данные выражения содержат три составляющие, которые можно условно назвать сигнальной, помеховой и смешанной, т.е. обусловленной по причине флюктуаций 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 флюктуациями, причем смешанная составляющая имеет второй порядок малости по данному коэффициенту. В ААР с

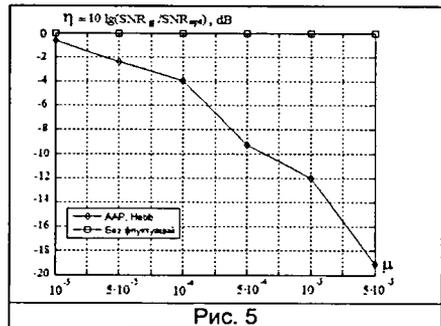


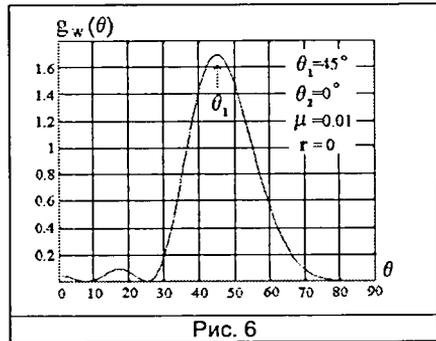
Рис. 5

алгоритмом Хэбба также могут наблюдаться эффекты рассогласования и перекompенсации.

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 рисунке 5 приведены потери, возникающие в выходном отношении сигнал/шум за счёт флуктуаций весового вектора в зависимости от величины коэффициента адаптации. Из рисунков 3 и 5 видно, что потери в ААР с алгоритмом Хэбба значительно больше, чем в ААР с градиентными алгоритмами.

На рисунке 6 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.



В § 3.6. размещены выводы к материалу третьей главы.

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

$$\vec{W}(k+1) = P \{ \vec{W}(k) - \mu \cdot \vec{X}^*(k) \cdot F [\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k)] \} + \vec{W}_q. \quad (10)$$

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

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).

В § 4.2. – 4.3. приведены с учетом флуктуаций весового вектора 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:

$$K_{\bar{w}} = \mu^2 \frac{1-r+r^2}{(1-r)^2} Sp(\bar{Y}_{CT}^* \bar{Y}_{CT}^T R_{AA}) \cdot (PR_{XX}P)^* \quad (11)$$

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 рисунке 7 приведены потери, возникающие в выходном отношении сигнал/шум за счёт флук-

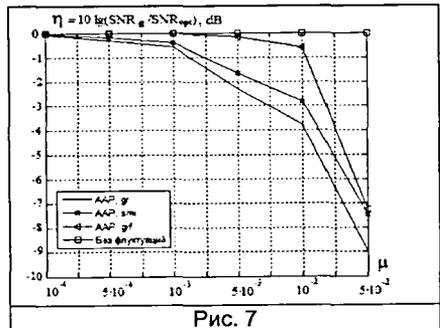
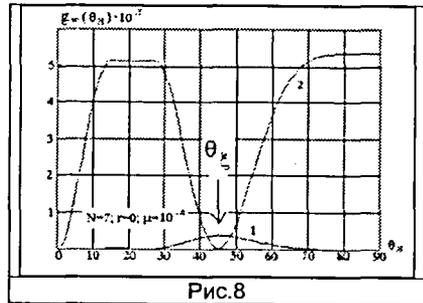


Рис. 7

туаций 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, настраивающейся 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.

На рисунке 8 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.8).



В § 4.5. приведены выводы к материалу, изложенному в четвертой главе.

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:

$$\vec{W}(k+1) = P[\vec{W}(k) - \mu \cdot (\mathbf{P}\hat{\mathbf{R}}_k \mathbf{P})^* \mathbf{P} \cdot \vec{X}^*(k+1) \cdot F[\vec{X}^T(k) \cdot \vec{W}(k)]] + \vec{W}_q. \quad (12)$$

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).

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, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму. Ниже приведена формула матрица ковариации флуктуаций весового вектора:

$$\mathbf{K}_{\vec{w}} = \mu^2 \frac{1-r+r^2}{(1-r)^2} Sp(\vec{Y}_{CT} \vec{Y}_{CT}^T \mathbf{R}_{AA}) \cdot [(\mathbf{P}\mathbf{R}_{XX}\mathbf{P})^*] \quad (13)$$

Из формулы (13) следует, что флуктуации весового вектора антенной решётки с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму, равны нулю в направлении ограничений, минимальны в направлении помех, а во всех остальных направлениях имеют максимальную величину, пропорциональную значению $1/\text{мощность собственного шума ААР}$.

В ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся 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 рисунке 9 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, настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму, и минимальны в ААР с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по быстрому рекуррентному алгоритму.

В § 5.5. размещены выводы к материалу пятой главы.

В шестой главе проводится статистический анализ с учетом флуктуаций настраиваемых весовых коэффициентов характеристик искусственных нейронных сетей, настраивающихся по исследуемым в диссер-

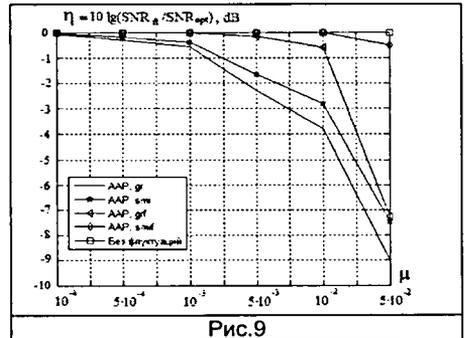
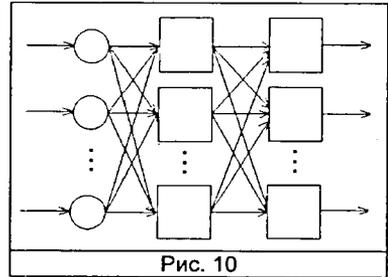


Рис.9

тации алгоритмам. На рисунке 10 представлена наиболее общая схема полностью связной 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.

В § 6.1. – 6.2. представлены с учетом флуктуаций весовых коэффициентов статистические характеристики (корреляционные функции и мощности выходных сигналов различных слоев сети) узкополосной многослойной полностью связной 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.



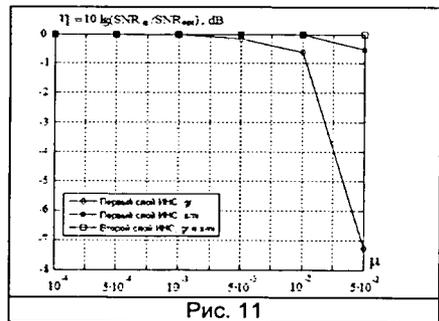
Уравнения данных алгоритмов могут быть записаны в виде:

$$\vec{W}_{jp}(k+1) = \mathbf{P}\{\vec{W}_{jp}(k) - \mu \cdot \mathbf{A} \cdot \vec{Z}_{p-1}^*(k) \cdot Z_{jp}(k)\} + \vec{W}_q. \quad (14)$$

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 рисунке 11 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»).

В § 6.3. даны результаты статистического анализа с учетом флуктуаций весовых коэффициентов характеристик многослойной полносвязной искусственной нейронной сети, настраиваемой по алгоритму Хэбба. Алгоритм Хэбба для ИНС может быть записан в виде:

$$\bar{W}_{jp}(k+1) = \bar{W}_{jp}(k) + \mu \cdot Z_{jp}(k) [Z_{p-1}^*(k) - Z_{jp}^*(k) \cdot \bar{W}_{jp}(k)], \quad (15)$$

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.

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 перекompенсации). Искажения 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.

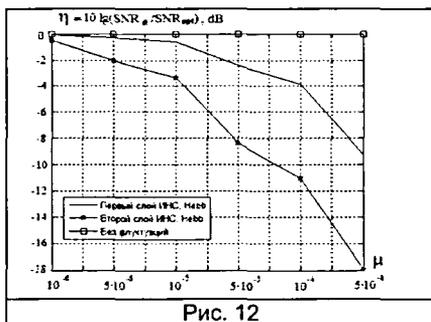


Рис. 12

На рисунке 12 показаны потери в выходном отношении сигнал/шум двухслойной ИНС, настраиваемой по алгоритму Хэбба. Из рисунка видно, что потери больше во втором слое данной сети.

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. 11-12).

В § 6.5. представлены выводы к главе 6.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации:

1. Разработан и успешно применён математический аппарат отыскания статистических характеристик узкополосных адаптивных антенных решёток, содержащих и не содержащих нелинейную функцию в цепи корреляционной обратной связи, и искусственных нейронных сетей в присутствии флуктуаций весовых коэффициентов, использующий методы теории возмущений.

2. Исследованы статистические характеристики адаптивных систем при учёте флуктуаций весовых коэффициентов с учётом негауссовской статистической зависимости весового вектора и вектора входных сигналов.

3. Проведен расчет статистических характеристик для линейных адаптивных антенных решёток в «борновском» приближении теории возмущений, позволяющем учесть эффекты, возникающие из-за флуктуаций весового вектора в процессе настройки ААР. Показано, что поправки в расчёте статистических характеристик во втором приближении имеют второй порядок малости и могут не учитываться при статистическом анализе.

4. Исследована зависимость выходной мощности сигнала (для дискретного градиентного алгоритма с ограничениями, быстрого рекуррентного алгоритма и алгоритма Хэбба) в части возникновения эффектов рассогласования и перекомпенсации.

Мощность выходного сигнала узкополосных ААР и ИНС, 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.

5. 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 при наличии нелинейности в цепи обратной связи флуктуации весового вектора неизотропны в пространстве ограничений: максимальны в направлении 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 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, обратно пропорциональную значению мощности собственного шума ААР.

6. Минимальные потери за счет флуктуаций весового вектора в выходном отношении сигнал/шум адаптивных антенных решеток при равных скоростях сходимости алгоритмов наблюдаются в ААР без нелинейной функции в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по дискретному градиентному алгоритму, а максимальные - в ААР с алгоритмом Хэбба.

7. Учёт флуктуаций весовых коэффициентов в ИНС приводит к тому, что выходная мощность искусственной нейронной сети в общем случае может быть как больше, так и меньше мощности, полученной при постоянном стационарном весовом векторе - может иметь место как эффект рас-

согласования, так и эффект «перекомпенсации». В ИНС с алгоритмом Хэбба увеличение числа слоев сети увеличивает искажения, вносимые флуктуациями в работу искусственной нейронной сети.

8. Потери за счет флуктуаций весовых коэффициентов в выходном отношении сигнал/шум искусственных нейронных сетей, настраивающихся по дискретному градиентному и быстрому рекуррентному алгоритмам, есть только в первых слоях данных ИНС, а в остальных слоях этих сетей потери отсутствуют. В искусственной нейронной сети, настраивающейся по алгоритму Хэбба потери за счет флуктуаций возрастают с каждым последующим слоем ИНС.

Перечень печатных работ, опубликованных в реферируемых научных журналах из перечня ВАК:

1. Мальцев А.А., Зими́на С.В. Некоторые точные результаты статистического анализа многоканальных адаптивных систем с непрерывными градиентными алгоритмами // Известия вузов. Радиофизика, 1999. т. 42. №9. с. 914 - 920.
2. Мальцев А.А., Зими́на С.В. Статистические характеристики адаптивных антенных решёток // Известия вузов. Радиофизика, 1999. т. 42. №10. с. 1013 - 1024.
3. Мальцев А.А., Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на характеристики адаптивных антенных решёток // Известия вузов. Радиофизика, 2000. т. 43. №1. с. 83 - 92.
4. Мальцев А.А., Зими́на С.В. Спектрально-корреляционные характеристики выходного сигнала адаптивных антенных решёток с учётом флуктуаций весового вектора // Радиотехника и электроника, 2001. т.46. №11. с.1350– 1355.
5. Мальцев А.А., Зими́на С.В. Анализ влияния флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивной антенной решётки с линейными ограничениями //Антенны, 2000. №2. с. 60 - 65.
6. 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.
7. 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.
8. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора в адаптивных антенных решётках // Антенны, 2004. №6. с. 27 -35.
9. 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.
10. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора в адаптивных антенных решётках с нелинейной функцией в цепи обратной связи, настраиваю-

- щихся по алгоритму рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов // Известия вузов. Радиофизика, 2006. т.49. N2. - с. 164 - 173.
11. Зими́на С.В. Статистические характеристики искусственной нейронной сети с дискретным градиентным алгоритмом настройки с учётом флуктуаций весовых коэффициентов // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2006. N10. – с. 9 - 15.
 12. 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. N5. - с. 3 – 7.
 13. Литви́нов О.С., Зими́на С.В. Исследование характеристик алгоритма Хэбба в задачах обработки радиосигналов // Успехи современной радиоэлектроники, 2006. N6. - с. 23 - 27.
 14. Литви́нов О.С., Зими́на С.В. Статистический анализ адаптивных антенных решёток, настраивающихся по алгоритму Хэбба // Успехи современной радиоэлектроники, 2007. N8. - с. 57 – 66.
 15. Литви́нов 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. N4. с. 423 – 432.
 16. Литви́нов О.С., Зими́на С.В. Статистический анализ флуктуаций весовых коэффициентов искусственной нейронной сети, настраивающейся по алгоритму Хэбба // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2009. N3. с.33 – 43.
 17. Литви́нов О.С., Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на спектральные характеристики и диаграмму направленности адаптивной антенной решётки, настраивающейся по алгоритму Хэбба // Антенны, 2008. N4. - с. 27 - 33.
 18. Литви́нов 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.
 19. Зими́на С.В. Спектрально – корреляционные характеристики адаптивной антенной решетки, настраивающейся по алгоритму Хэбба, с учётом флуктуаций весовых коэффициентов // Известия вузов. Радиофизика, 2009. т.52. N10. с. 822 - 832.
 20. 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.
 21. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на статистические характеристики искусственной нейронной сети, настраивающейся по алгоритму Хэбба и принимающей широкополосные сигналы // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2010. N4. с. 12 – 19.

22. Зими́на С.В. Статистические характеристики многослойных полносвязных искусственных нейронных сетей, принимающих широкополосные сигналы и настраивающихся по градиентным алгоритмам // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2011. N5. с. 3 – 12.
23. 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.
24. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весового вектора на коэффициент направленного действия адаптивных антенных решёток // Радиотехника, 2011. N3. с. 52 – 61.
25. Зими́на С.В. Влияние флуктуаций весовых коэффициентов на коэффициент направленного действия и коэффициент усиления адаптивных антенных решеток, настраиваемых по быстрому рекуррентному алгоритму и алгоритму Хэбба // Антенны, 2010. N1. с. 15 – 21.
26. Зими́на С.В. Флуктуации весовых коэффициентов в искусственной нейронной сети с алгоритмом Хэбба // Нейрокомпьютеры: разработка и применение, 2013. N4. с. 3 – 8.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. Зими́на С.В. Флуктуации весового вектора – от «линейной» адаптивной антенны к искусственной нейронной сети // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. N8. с. 62 – 70.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. - М.: Наука, 1968.
2. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем. - М.: Наука, 1970.
3. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решётки: Пер. с англ. - Под ред. В. А. Лексаченко. - М.: Радио и связь, 1986.

4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. - М.: Радио и связь, 1989.
5. Hudson J. E. Adaptive array principles. - IEE, 1991.
6. Уидроу Б. и др. Стационарные и нестационарные характеристики обучения адаптивных фильтров, использующих критерий минимума СКО // ТИИЭР, 1976. т. 64. №8. С. 37 - 51.
7. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. - М.: Наука, 1978.
8. Кляцкин В. И. Стохастические уравнения и волны в случайно-неоднородных средах. - М.: Наука, 1980.
9. Кляцкин В. И. Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами. - М.: Наука, 1975.
10. Мальцев А. А. Статистический анализ и синтез адаптивных радиоэлектронных систем // Диссертация на соискание учёной степени доктора физико - математических наук. Горький, 1989.
11. Игнатенко С. В., Мальцев А. А. Статистические характеристики адаптивных антенных решёток при обработке дискретных сигналов с коррелированными отсчётами // Известия вузов. Радиофизика, 1994. т. 37. №12. С. 1532 - 1545.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Введение.

Глава 1. Влияние флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивных антенных решёток с градиентными алгоритмами настройки.

1.1. Постановка задачи пространственной обработки сигналов в адаптивной антенной решётке с ограничениями.

1.2. Использование методов теории возмущений для статистического анализа характеристик ААР.

1.3. Корреляционные характеристики выходного сигнала ААР с учётом флуктуаций весового вектора.

1.4. Нахождение корреляционной функции флуктуаций весового вектора. Теоретическое и модельное исследование одномоментных статистических характеристик ААР.

1.5. Теоретическое и модельное исследование спектральных характеристик выходного сигнала ААР.

1.6. Анализ влияния флуктуаций весового вектора на характеристики эффективности работы ААР - диаграмму направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, потери в выходном отношении сигнал / шум.

1.7. Выводы.

Глава 2. Анализ статистических характеристик адаптивных антенных решёток с быстрыми алгоритмами настройки на основе обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов.

2.1. Вывод итеративного алгоритма обращения выборочной оценки корреляционной матрицы для ААР с многократными линейными ограничениями.

2.2. Статистический анализ характеристик ААР с быстрым итеративным алгоритмом настройки.

2.3. Корреляционные характеристики выходного сигнала ААР.

2.4. Теоретическое и модельное исследование одномоментных статистических характеристик ААР.

2.5. Анализ спектральных характеристик ААР.

2.6. Характеристики эффективности работы ААР с учетом флуктуаций весового вектора - диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, потери в выходном отношении сигнал / шум.

2.7. Исследование ААР, использующей алгоритм прямого обращения выборочной корреляционной матрицы.

2.8. Выводы.

Глава 3. Статистический анализ адаптивной антенной решётки, настраиваемой по алгоритму Хэбба, с учетом флуктуаций весового вектора.

3.1. Использование методов теории возмущений для анализа статистических характеристик адаптивной антенны с алгоритмом Хэбба.

3.2. Корреляционные характеристики выходного сигнала ААР при учёте флуктуаций весового вектора.

3.3. Теоретическое и модельное исследование одномоментных характеристик ААР.

3.4. Спектральные характеристики выходного сигнала ААР.

3.5. Влияние флуктуаций весового вектора на характеристики эффективности работы ААР, настраиваемой по алгоритму Хэбба - диаграмму направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, потери в выходном отношении сигнал / шум.

3.6. Выводы.

Глава 4. Анализ влияния флуктуаций весового вектора на статистические характеристики адаптивной антенной решетки с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи с градиентными алгоритмами настройки.

4.1. Статистический анализ характеристик «нелинейной» ААР с градиентными алгоритмами настройки.

4.2. Корреляционные характеристики выходного сигнала ААР.

4.3. Сравнение теоретического исследования и результатов численного моделирования одномоментных статистических характеристик ААР.

4.4. Характеристики эффективности работы ААР с учетом флуктуаций весового вектора - диаграмма направленности, коэффициент направлен-

ного действия, коэффициент усиления, потери в выходном отношении сигнал / шум.

4.5. Выводы.

Глава 5. Анализ статистических характеристик с учётом флуктуаций весового вектора адаптивной антенной решетки с нелинейной функцией в цепи корреляционной обратной связи, настраивающейся по алгоритму рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов.

5.1. Использование методов теории возмущений для статистического анализа характеристик ААР.

5.2. Теоретическое и модельное исследование влияния флуктуаций весового вектора на корреляционные характеристики и мощность выходного сигнала ААР.

5.3. Матрица ковариации вектора весовых коэффициентов.

5.4. Характеристики эффективности работы ААР с учетом флуктуаций весового вектора - диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, потери в выходном отношении сигнал / шум.

5.5. Выводы.

Глава 6. Статистический анализ влияния флуктуаций весовых коэффициентов на характеристики искусственных нейронных сетей.

6.1. Искусственная нейронная сеть с дискретным градиентным алгоритмом настройки.

6.2. Искусственная нейронная сеть с алгоритмом рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов.

6.3. Искусственная нейронная сеть с алгоритмом Хэбба.

6.4. Характеристики эффективности работы искусственных нейронных сетей с учетом флуктуаций весового вектора - потери в выходном отношении сигнал / шум.

6.5. Выводы.

Заключение.

Литература.

Приложение 1. Основные свойства проекционных матриц.

Приложение 2. Некоторые матричные соотношения для псевдообратных матриц.

Приложение 3. Алгоритмы обращения выборочной ковариационной матрицы при различных способах построения оценок.

Приложение 4. Обобщение дискретного градиентного алгоритма на искусственную нейронную сеть.

Приложение 5. Обобщение алгоритма рекуррентного обращения выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов на искусственную нейронную сеть.

Подписано в печать 30.03.2017. Формат 60 x 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,75. Тираж 100 экз. Заказ 147.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.