

На правах рукописи



Лоцманов Алексей Александрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ
НЕЛИНЕЙНЫХ И РЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
РАЗЛИЧНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Специальность: 05.12.04 -
«Радиотехника, в том числе системы
и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2004

Работа выполнена в ГОУВПО
«Рязанская государственная радиотехническая академия»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Кириллов Сергей Николаевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Еремеев Виктор Владимирович

- кандидат технических наук
Франк Евгений Борисович

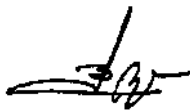
Ведущая организация - ОАО «Корпорация «ФАЗОТРОН - НИИР»
(г.Москва)

Защита состоится «17» декабря 2004 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в Рязанской государственной радиотехнической академии по адресу 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО РГРТА.

Автореферат разослан « 1 » 11 _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



В.И. Жулёв

2005-4
18633

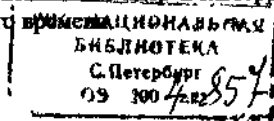
903939

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. Качество и эффективность функционирования различных радиотехнических устройств (РТУ) в значительной степени определяется близостью их характеристик к теоретическим заданным, полученным при известных моделях сигналов и воздействующих шумов. В процессе функционирования системы по различным причинам может наблюдаться изменение сигнально-помеховой обстановки, что приводит к значительному снижению показателей качества (ПК) всей радиотехнической системы (РТС). В связи с этим при разработке современных устройств формирования и обработки цифровых сигналов целесообразно применять адаптацию алгоритма функционирования к изменяющимся свойствам входных сигналов и шумов. Весомый вклад в области разработки адаптивных алгоритмов функционирования РТУ внесли как отечественные ученые - Цыпкин Я.З., Стратонович Р.Л., Пугачев В.С., Шахильдян В.В., Райбман Н.С., Репин В.Г., Тартаковский Г.Г., Фомин В.Н., Фельдбаум А.Л., Медведев Г.А., Медведев А.З., Брикман М.С. Григорьев В.А. и др.; так и зарубежные: Аоки М., Эйкхофф П., Острема К., Уидроу Б., Стирнз С.Д., Коуэн К. Ф. Н., Грант П. М. и др.

Известно, что большинство усилителей, генераторов, фильтров и др., которые используются в системах радиолокации, радионавигации, телевидении и других системах передачи информации являются нелинейными и инерционными, а также могут содержать рекурсивные связи, причем свойства нелинейности и инерционности часто неразделимы. В этом случае линейные адаптивные не рекурсивные фильтры не могут обеспечить получение требуемых характеристик преобразования входных сигналов в выходные с заданной точностью. Такое преобразование может быть осуществлено только нелинейными и рекурсивными цифровыми фильтрами. Сложность оптимизации характеристик нелинейных и рекурсивных цифровых фильтров заключается в том, что их алгоритмы адаптации (АА) в основном оказываются неустойчивыми.

Структура нелинейных цифровых фильтров (ЦФ) определяется моделью преобразования входных сигналов в выходные, в качестве которой могут быть использованы различные нелинейные инерционные математические модели (ММ). Предложено большое количество ММ нелинейных инерционных преобразований, что требует их систематизации с целью определения преимуществ каждой в различных радиотехнических приложениях. Известно, что каждое нелинейное динамическое РТУ может быть описано с использованием аппарата рядов Вольтерра, ортогонализированных по Винеру. Однако, при решении задачи указанным методом возникают значительные технические трудности, связанные, во-первых, с отсутствием аттестованных генераторов шума с нормальным законом распределения и равномерным энергетическим спектром, а во-вторых, ММ нелинейного инерционного преобразования оказывается многомерной и требует значительных вычислительных ресурсов. В частности, для современного неспециализированного компьютера Pentium IV с тактовой частотой 2 ГГц задача получения **первых 10 симметризованных ядер Вольтерра с погрешностью 1 %** требует **около года машинного времени**



Таким образом, решение задачи определения по экспериментальным данным в близком к реальному масштабу времени параметров нелинейных ЦФ может быть выполнено только с использованием алгоритмов в пространстве с ограниченной размерностью. В связи с этим актуальна разработка устойчивых и эффективных по вычислительным затратам и скорости сходимости структур адаптивных систем нелинейных и рекурсивных ЦФ, а также методики предварительной оценки порядка нелинейности и инерционности РТУ.

Так как наиболее общие модели в силу «тупика многомерности» не могут быть практически использованы, то, исходя из преимуществ и недостатков набора моделей нелинейных инерционных РТУ, следует обоснованно выбрать структуры адаптивных нелинейных ЦФ.

Ввиду большого числа определяющих ММ параметров алгоритм оптимизации нелинейных ЦФ должен обладать относительно невысокими вычислительными затратами, необходимыми на одну итерацию адаптации. Такому требованию удовлетворяет АА на основе метода наименьших квадратов (МНК), т. к. необходимые вычислительные затраты в этом случае пропорциональны количеству оптимизируемых параметров, тогда как при использовании АА, обеспечивающих более высокую скорость сходимости, например, рекуррентный алгоритм наименьших квадратов, вычислительные затраты пропорциональны квадрату количества оптимизируемых параметров. Поэтому при значительном количестве адаптивных параметров МНК можно реализовать в реальном масштабе времени, что будет затруднительно для рекуррентного алгоритма наименьших квадратов и др. более сложных АА.

Практическая реализация нелинейных цифровых фильтров должна осуществляться на основе высокопроизводительных микропроцессоров (МП). В связи с широким выбором МП, обеспечивающими требования быстродействия, производительности, объема запоминающих устройств и др., выбор последних должен осуществляться по набору технико-экономических ПК и рассматриваться как многокритериальная задача

Таким образом, актуальной задачей является разработка структур адаптивных систем нелинейных и рекурсивных цифровых фильтров с использованием эффективных по вычислительным затратам и скорости адаптации процедур и алгоритмов с целью повышения качества функционирования РТС.

Цель и задачи работы. Основной целью работы является разработка и обоснование эффективных по вычислительным затратам и скорости адаптации структур адаптивных систем нелинейных и рекурсивных ЦФ для повышения ПК различных РТС.

Поставленная цель работы включает решение следующих задач:

- систематизации наиболее известных математических моделей нелинейных цифровых фильтров;
- разработки структур систем идентификации нелинейных и рекурсивных ЦФ;
- разработки методики уменьшения размерности вектора оптимизируемых параметров моделей нелинейных ЦФ;

- обоснования структур адаптивных систем нелинейных ЦФ для различных РТУ.

Методы проведения исследований. В работе использовались методы статистической радиотехники, математической статистики, матричного исчисления, численные методы вычислительной математики. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования.

Научная новизна. В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана структура системы идентификации рекурсивных цифровых фильтров, обеспечивающая высокую точность оценки АЧХ и ФЧХ цифровых рекурсивных фильтров.
2. Разработаны эффективные по скорости адаптации структуры системы идентификации нелинейных нерекурсивных ЦФ с разделенными нелинейными и инерционными свойствами на основе адаптивных порогов линейности.
3. Получена эффективная по скорости структура системы идентификации нелинейных ЦФ при использовании критерия минимума неквадратичной ошибки оценки вектора градиента рабочей функции АА в случае негауссовских входных сигналов.
4. Разработана процедура адаптации нелинейного полиномиального ЦФ, позволяющая уменьшить необходимые вычислительные затраты на АА при заданной точности аппроксимации характеристик фильтра.
5. Разработана структура АА фильтра нелинейных инерционных предсказаний сигнала, обеспечивающая линейризацию проходной амплитудной характеристики (ПАХ) выходного аналогового усилителя мощности (УМ).
6. Разработаны эффективные по вычислительным затратам структуры адаптивных систем цифровых фильтров и фильтров-компенсаторов подавления комплекса аддитивных узкополосных (УП), импульсных (ИП) и широкополосных гауссовских помех (Б III).

Практическая ценность работы. Представленные в работе эффективные по скорости адаптации и вычислительным затратам структуры адаптивных систем нелинейных и рекурсивных ЦФ могут быть использованы в помехоустойчивых, адаптивных системах радиолокации, радионавигации, телевидения, а также других устойчивых к искажениям систем передачи информации. Реализация результатов исследований позволит повысить технические характеристики устройств формирования и обработки сигналов, что обеспечит улучшение показателей качества РТС.

Результаты диссертационной работы нашли применение в разработках ОАО «Телекоммуникационной компании «Ринфотелс» г.Рязань, а также внедрены в учебный процесс Рязанской государственной радиотехнической академии, что подтверждено ахпетствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Структура адаптивной системы рекурсивных фильтров на основе независимого прямого и обратного моделирования нерекурсивной и рекурсивной

частей передаточной функции, обеспечивающая в 18 раз более высокую точность аппроксимации АЧХ и ФЧХ фильтра по сравнению с алгоритмами на основе адаптации по общей ошибке.

2. Оценка вектора градиента рабочей функции алгоритма адаптации по критерию минимума неквадратической ошибки для нелинейных нерекурсивных цифровых фильтров при воздействии негауссовских сигналов, обеспечивающая снижение среднеквадратической ошибки или увеличение скорости адаптации на 30...35% от аналогичных, полученных с использованием квадратичной формы оценки вектора градиента.
3. Структура адаптивной системы нелинейного цифрового фильтра предсказаний сигнала, позволяющая в 6...17 раз снизить нелинейные инерционные искажения ПАХ усилительного тракта при одновременном повышении его КПД в 1,6..2 раза в зависимости от разрядности представления операндов в вычислительном устройстве.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 7-й всероссийской НТК студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании" (Рязань, 2002), 11-й МНТК "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций" (Рязань, 2002), The 5th International Conference and Exhibition on "Digital Signal Processing and its Application" (Moscow, 2003), 8-й всероссийской НТК студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании" (Рязань, 2003), 12-й МНТК "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций" (Рязань, 2004), 10-й МНТК студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, 2004), научной сессии МИФИ-2004: конференции "Молодежь и наука" (Москва, 2004), 6-й международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2004), ХШ международной научной конференции «Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов» (Москва, 2004), Международной конференции «Теория и практика речевой коммуникации» (Москва, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 работ. Из них 4 статьи в центральной печати, 1 учебное пособие, 6 статей в межвузовских сборниках трудов, 16 тезисов докладов на конференциях и 2 отчета по НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 163 наименований и 4-х приложений. Диссертация содержит 182 с, в том числе 147 с. основного текста, 10 таблиц и 46 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и решаемые в работе задачи. Изложены новые научные результаты, полученные в работе, показаны ее практическая ценность и апробация. Сформулированы основные положения, **вносимые на защиту**.

В первой главе систематизированы наиболее известные модели нелиней-

ных ЦФ, а также разработаны структуры систем идентификации нелинейных инерционных и рекурсивных ЦФ, позволяющие повысить основные ПК процесса адаптации.

В качестве полной динамической характеристики нелинейного нерекурсивного ЦФ принимался оператор $y_k = \mathfrak{S}_{k,q}[x_q]$, устанавливающий соответствие между выходной y_k и входной x_q функциями. В общем случае $\mathfrak{S}_{k,q}$ - векторный стохастический оператор, а y_k и x_q - векторные случайные функции, но в работе предполагается, что y_k - скаляр.

Систематизированы по вычислительным затратам наиболее известные скалярные обобщенные и упрощенные ММ, а также определены частные ММ для получения заданной точности аппроксимации характеристик РТУ. К практически применимым в РТУ отнесены следующие ММ нелинейных цифровых фильтров:

1. Модель Гаммешптейна и ее частные случаи:

$$y_k = \sum_{i=0}^M f_i(x_{k-i}), y_k = \sum_{n=0}^N \left(\sum_{i=0}^M \alpha_{n,i} x_{k-i}^n \right), y_k = \sum_{i=0}^M \alpha_i f(x_{k-i}), y_k = f \left(\sum_{i=0}^M \alpha_i x_{k-i} \right). \quad (1)$$

2. Модель Вольтерра при ограниченном порядке нелинейности $n = \overline{0, N}$ и инерционности $M_n \forall n = \overline{0, N}$:

$$y_k = \sum_{n=0}^N \left(\sum_{i_0=0}^{M_0} \sum_{i_1=0}^{M_1} \dots \sum_{i_n=0}^{M_n} \alpha_{i_0, i_1, \dots, i_n} \prod_{r=0}^n x_{k-i_r} \right). \quad (2)$$

3. Частный случай модели Винера в виде факторизуемой системы:

$$y_k = \prod_{n=0}^N \left(\sum_{i=0}^M \omega_{i,n} x_{k-i} \right), \quad (3)$$

4. Обобщенное радиотехническое звено (обобщение частных моделей Винера и Гаммерштейна) и типовое радиотехническое звено (полосовая нелинейная цепь) в виде:

$$y_k = \sum_{n=0}^N \sum_{i_2=0}^{M_2} \omega_{2,i_2,n} \alpha_n \left(\sum_{i_1=0}^{M_1} \omega_{1,i_1,n} x_{k-i_1-i_2} \right)^n, y_k = \sum_{n=0}^N \sum_{i_2=0}^{M_2} \omega_{2,i_2} \alpha_n \left(\sum_{i_1=0}^{M_1} \omega_{1,i_1} x_{k-i_1-i_2} \right)^n \quad (4)$$

Другие ММ являются более общими, имеют вектор параметрического и (или) функционального описания значительной размерности даже при небольших порядках нелинейности и инерционности ЦФ, вследствие чего требуют существенных вычислительных затрат, что не позволяет реализовать их в близком к реальному режиму времени в РТУ.

Во многих РТУ находят применение цифровые адаптивные БИХ-фильтры, которые по сравнению с КИХ-фильтрами обеспечивают лучшее качество фильтрации при одинаковых порядках. Существуют два основных метода проектирования таких фильтров: метод адаптивной фильтрации и метод авто-регрессии — скользящего среднего. Эти методы являются простыми и эффек-

тивными в вычислительном отношении, но им свойственны недостатки, связанные с низкой скоростью сходимости и невысокой точностью оценок параметров. Это связано с тем, что в известных методах адаптации параметров БИХ-фильтров существует зависимость процессов оптимизации нерекурсивной и рекурсивной частей фильтра от общей ошибки. Повышение скорости адаптации возможно при использовании комбинированного МНК. Однако при порядках рекурсивной части фильтра более 2-го процесс адаптации БИХ-фильтра часто становится неустойчивым. В интересах обеспечения устойчивости и повышения точности оценки параметров БИХ-фильтров в работе предложена структура АА по двум ошибкам на основе прямого и обратного моделирования (рис. 1).

Предложенная структура системы оценки параметров моделирующего фильтра (МФ) является априорно устойчивой при правильном выборе параметров сходимости, т. к. не содержит рекурсивных связей в адаптивных фильтрах (АФ). Оптимизация параметров обеспечивается алгоритмами адаптации (АА1, АА2) и алгоритмами пересчета параметров фильтров (А1, А2).

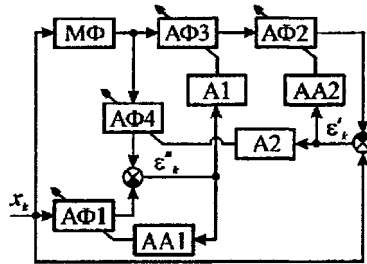


Рис. 1.

Результаты исследований показали, что предложенная структура алгоритма параметрической идентификации обеспечивает в 18 раз более высокую точность аппроксимации АЧХ и ФЧХ фильтра при одинаковой длительности процесса адаптации по сравнению с алгоритмами на основе оптимизации по общей ошибке.

В ряде случаев является целесообразным на начальном этапе идентифицировать нелинейный фильтр одномерными параллельными ММ типа частных моделей Гаммерштейна (1) с разделенными нелинейными безынерционными и линейными инерционными свойствами и при необходимости осуществить пересчет параметров полученной одномерной модели в начальное приближение для обобщенной модели высокого порядка и провести дальнейшую адаптацию. Для этого необходимо определить структуру системы идентификации нелинейных динамических ММ в виде системы с разделенными нелинейными и инерционными свойствами эффективную по скорости адаптации. Адаптивные фильтры в рассматриваемом случае имеют вид последовательного соединения цифровых КИХ-фильтра и нелинейного безынерционного элемента (НЭ). Экспериментальные исследования показали, что интервал сходимости процесса адаптации нелинейного МФ резко возрастает по сравнению с адаптацией линейного фильтра. Для уменьшения интервала сходимости предложено использовать пороги линейности (ПЛ), ограничивающие интервал значений выходного сигнала с линейной части АФ, для которых с заданной ошибкой НЭ можно заменить линейным усилителем (ЛУ). Исходя из априорной информации о виде нелинейного преобразования, ПЛ могут быть как постоянными, так и адаптивными, вычисляемыми на основе оценки функции НЭ в АФ. В случае введенных

адаптивных ПЛ структура адаптивной системы имеет вид, представленный на рис. 2, где: ВПЛ - вычислитель порогов линейности; КУ — коммутационное устройство.

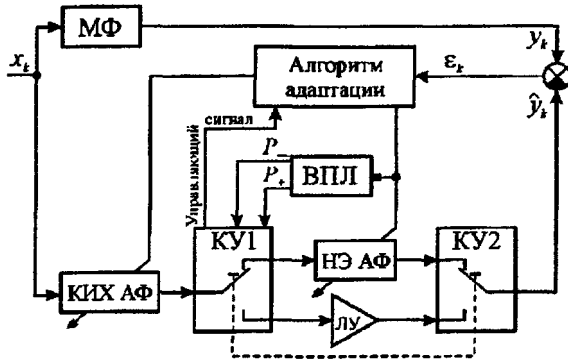


Рис 2.

Предложенная структура адаптивной системы нелинейных ЦФ с разделенными нелинейными безынерционными и линейными инерционными свойствами при введении адаптивных ПЛ позволяет более чем в 10 раз уменьшить время адаптации по сравнению с алгоритмами, не учитывающими линейные свойства фильтра при малом входном сигнале.

В частном случае, когда нелинейное преобразование в МФ рис. 2 допускает обращение по выходной переменной, можно использовать структуру системы идентификации, приведенную на рис. 3, которая при введении адаптивных ПЛ позволяет дополнительно в 1,6 раз уменьшить время адаптации по сравнению со структурой идентификации рис. 2.

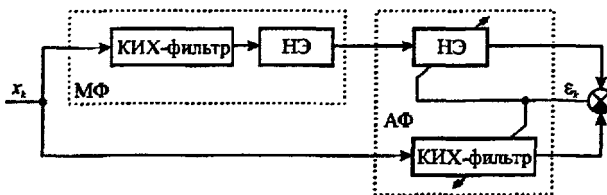


Рис3.

В предыдущих параграфах в качестве входного сигнала использовался БГШ. Однако такие РТУ, как УМ систем передачи информации, приемные устройства (ПУ), детекторы и др. работают с негауссовскими сигналами. При этом МНК с квадратичной формой оценки вектора градиента рабочей функции является малоэффективным. В работе предложен критерий оптимизации по МНК в виде:

$$|\epsilon_k|^{2\theta} \rightarrow \min \forall k=0,1,2,\dots, \quad (5)$$

где ϵ_k — ошибка адаптации; A - вектор параметров адаптивной ММ; θ — оптимизируемый параметр; 2θ — степень функционала минимизации. Показано, что в зависимости от степени отличия функции плотности вероятности входного сигнала от гауссовской при $\theta = 0,75$ можно получить выигрыши по СКО или скорости адаптации до 30..35%.

Существует ряд РТУ, функционирование которых невозможно с заданным уровнем точности описать линейными и нерекурсивными ММ цифровых фильтров. В этом случае возможна адаптация параметров нелинейных рекурсивных ЦФ в пространстве состояний по вероятностному критерию при непостоянных определяющих модель параметрах. Полученное численное решение интегральной системы уравнений имеет размерность, которая квадратично растет с увеличением количества параметров ММ идентифицируемого фильтра. В связи с этим к недостаткам данного АА следует отнести значительные вычислительные затраты, что затрудняет их использование в реальном масштабе времени в силу ограниченного быстродействия цифровых устройств. В работе исследован алгоритм идентификации нелинейных рекурсивных ЦФ в пространстве состояний на основе эффективного с вычислительной точки зрения МНК. Показано, что при решении дискретного дифференциального уравнения Абеля первого рода, достаточно точно описывающего характеристики ряда РТУ, использующихся в подвижных объектах, применяя предложенный метод оценки неизвестных непостоянных параметров, при которых максимальная относительная ошибка адаптации по сигналу:

$$\Delta_{\max} = \max_k \{ |\epsilon_k| / |y_k| \} \cdot 100\%, \quad (6)$$

при $k > 100$ не превышала 10 %, тогда как эта ошибка, полученная в результате блочной оценки неизвестных параметров того же РТУ на основе обобщенного вероятностного критерия, составила 18 %. При этом обеспечивается выигрыш с точки зрения вычислительных затрат предложенного АА более, чем в 10 раз.

Во второй главе разработана методика предварительной оценки порядков нелинейности и инерционности нелинейных ЦФ на основе степенных моделей, а также обоснованы структуры адаптивных систем нелинейных ЦФ для предсказания сигналов, подавления аддитивного комплекса распределенных по времени и частоте помех, а также цифрового фильтра-синтезатора (ФС) вокализированных звуков речи.

Точность, которую обеспечивают нелинейные ЦФ определяется его порядком нелинейности, инерционностью и структурой оператора преобразования входного сигнала. В случае, когда структура оператора, определяющего ММ нелинейного ЦФ, достаточно универсальна, а параметры модели оптимизируются корректно в соответствии с выбранным алгоритмом и критерием, точность аппроксимации в основном определяется порядком нелинейности и инерционности фильтра.

Оценка инерционности M нелинейного нерекурсивного фильтра осуществлялась по длительности его импульсной характеристики. Однако в ряде слу-

чаев длительность реакции нелинейного нерекурсивного фильтра на импульсное воздействие может быть неадекватна величине его памяти. Такой эффект можно легко наблюдать для нелинейных нерекурсивных ЦФ на основе факторизуемой модели (3). Поэтому для более универсального способа определения порядка инерционности нелинейного нерекурсивного ЦФ предложено на его вход подавать случайный шумовой сигнал, например БГШ, а длительность реакции измерять с момента отключения воздействия до достижения мощности реакции заданного уровня δ_H по критерию:

$$M = \min_M \left[y_{M+k} < \delta_H = \frac{1}{\beta_H} \sqrt{\frac{1}{K_1+1} \sum_{i=-K_1}^0 y_i^2} \quad \forall i \in \mathbb{K} \right], \quad (7)$$

где $k \in [-K_1, 0]$ - временной интервал воздействия входного сигнала на нелинейный ЦФ; β_H - числовой параметр, определяющий требования к точности оценивания порядка инерционности.

Для оценки порядка нелинейности N цифрового нерекурсивного фильтра на основе ММ в виде степенных рядов типа (1) — (4) в качестве входного использовался синусоидальный тестовый сигнал с частотой ω . После окончания переходного процесса вычислялись спектральные характеристики реакции. Известно, что в случае степенного преобразования синусоидального сигнала в амплитудном спектре выходного сигнала S_y будут составляющие только на частотах, кратных частоте входного сигнала S_x . Тогда в первом приближении с заданной точностью δ_H можно определить порядок нелинейности N по формуле:

$$N = \min_N \left[A_{N+k} < \delta_H = \frac{1}{\beta_H} \sqrt{\sum_{i=0}^N A_i^2} \quad \forall i \in \mathbb{K} \right], \quad (8)$$

где A_i — амплитуды гармонических составляющих в спектре выходного сигнала S_y нелинейного объекта исследования; β_H - числовой параметр, определяющий требования к точности оценивания порядка нелинейности.

В системах передачи информации, радиолокационных и радионавигационных системах используются УМ, имеющие КПД порядка 20...30 %. Для повышения эффективности работы УМ возможно использование устройств предсказаний сигнала. Введение фильтра предсказаний сигнала перед основным устройством его преобразования позволяет улучшить такие ПК, как линейность ПАХ, уровень внеполосного излучения, КПД, групповое время запаздывания, интермодуляционные искажения и др. Однако необходимое для этого точное обращение как линейных так и нелинейных инерционных преобразований часто затруднено вследствие неустойчивости обратной модели, а также значительной сложности численного метода обращения. Для получения сходящегося устойчивого АА предложена структура адаптивной системы рис.4, включающая два контура адаптации, один из которых позволяет осуществить идентификацию параметров УМ, информация о которых, в целях обеспечения сходимости, используется в контуре адаптации нелинейного фильтра предсказаний сигнала (НФП).

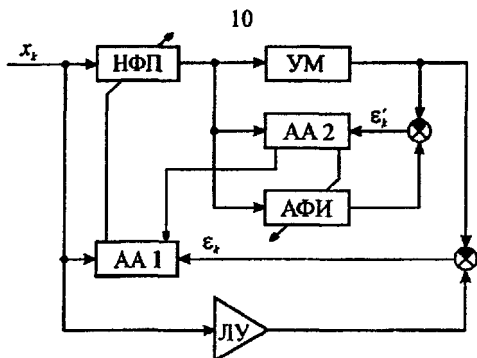


Рис. 4.

Здесь АФИ - адаптивный нелинейный фильтр-идентификатор; АА 1 — градиентный АА нелинейного фильтра предсказаний по неквадратичному критерию, описанный выше; АА 2 - градиентный алгоритм идентификации нелинейного инерционного УМ по неквадратичному критерию, в качестве которого в зависимости от используемой модели АФИ может выступать какой-либо из рассмотренных в первой главе АА нелинейных ЦФ.

Для уменьшения размера параметрического описания НФП в процессе функционирования АА 1 использовалось правило исключения неинформативных параметров, которое заключалось в следующем:

$$\alpha_{n,i_0,i_1,\dots,i_n} = \begin{cases} 0, & \text{при } |\alpha_{n,i_0,i_1,\dots,i_n}| \leq P_{\pm}, \\ \alpha_{n,i_0,i_1,\dots,i_n}, & \text{при } |\alpha_{n,i_0,i_1,\dots,i_n}| > P_{\pm}; \end{cases} \quad \forall \begin{cases} n = \overline{0, N} \\ i_n = \overline{0, M_n} \end{cases}, \quad (9)$$

где пороги информативности P_{\pm} определялись суммарной шумовой составляющей, которая зависела от уровня шумов квантования адаптивных коэффициентов, округления результатов вычислительных операций, а также шума АА и т. п. Использование данного критерия информативности параметров НФП позволило сократить объем параметрического описания в 5...20 раз. При этом применение предложенной структуры адаптивной системы НФП для линеаризации УМ уменьшило в 6...17 раз нелинейные инерционные искажения ПАХ усилительного тракта при одновременном повышении его КПД примерно в 2 раза в случае отсутствия ограничения на разрядность представления операндов в вычислительном устройстве.

Другим применением нелинейных ЦФ являются устройства фильтрации и нелинейной компенсации комплекса распределенных по времени и частоте помех. При воздействии только одного класса помех известны эффективные методы их подавления на основе инерционных режекторных фильтрах для УП и устройств с разделенными нелинейными и инерционными свойствами для ИП. В случае одновременного воздействия УП, ИП и БГШ устройства с разделенными нелинейными и инерционными свойствами являются менее эффективными, чем с неразделенными. В случае одноканального ПУ обоснована структура модели нелинейного инерционного фильтра подавления комплекса УП, ИП и

БГШ в виде частной модели Гаммерштейна с неразделенными нелинейными и инерционными свойствами при одинаковых нелинейных функционалах (10а), а также в случае многоканального ПУ с 1-й направленной и ряда ненаправленных антенн - структура нелинейного фильтра-компенсатора модели Гаммерштейна с базовыми функциями (10б):

$$f(s) = K_{\gamma} s \exp\left[-(s/P)^2\right], \quad (10a) \quad f_i(s) = \sum_{m=0}^M \alpha_m i \cdot s^{(1+2m)}. \quad (10b)$$

Показана эффективность предложенных нелинейных ЦФ с точки зрения требуемых вычислительных затрат, при обеспечении подавления комплекса аддитивных сосредоточенных по времени и по частоте помех на выходе адаптивного фильтра для одноканальной РТС не менее чем на 15...20дБ, для двухканальной - на 20...25 дБ, для трехканальной - на 25...30 дБ. При этом обеспечивается выигрыш по сравнению с фильтрами с разделенными нелинейными и инерционными свойствами до 5 дБ при одинаковых вычислительных затратах, а при некоторых дополнительных вычислительных затратах устройства с неразделенными нелинейными и инерционными свойствами обеспечивают дополнительный выигрыш порядка 10... 15 дБ.

Обосновано применение нелинейного адаптивного цифрового ФС в устройствах сжатия и передачи речевого сигнала (РС) с точки зрения качества, а также скорости передачи. Предложенная модель нелинейного адаптивного цифрового ФС имеет вид:

$$y_k = \sum_{m=0}^{M_n} \sum_{n=0}^{N_n} \mathbf{M}_{m,n} S_{zn}^n(k-m) \cdot S_{yup}(k), \quad (И)$$

где y_k - отсчеты синтезированного РС; $m = \overline{0, M_m}$, $n = \overline{0, N_n}$ - определяют степень инерционности и нелинейности системы; S_{zn} - сигнал возбуждения речевого тракта; \hat{S}_{yup} - модулирующий сигнал, сформированный из исходного РС низкочастотным фильтром с полосой пропускания $f_{om}/2$, f_{om} - частота основного тона РС; \mathbf{M} - матрица параметров. В целях получения унимодальной рабочей функции алгоритма оптимизации предложен критерий близости исходного и синтезированного РС, основанный на разности их автокорреляционных функций (АКФ):

$$d = \sum_{i=1}^L \gamma_i \left[R_{yca}(i) - R_{cymn}(i) \right], \quad (12)$$

где R_{yca} , R_{cymn} - АКФ исходного и синтезированного РС; γ_i - числовые параметры.

Экспериментальное исследование нелинейного восстанавливающего ФС проводилось в соответствии с ГОСТ Р 50840-95 методом имитационного моделирования для различных вокализованных звуков и дифонов русской речи, при этом показана возможность получения качества синтезированных вокализованных звуков более 4,0 баллов при скоростях передачи 4...4,5 кбит/с.

В третьей главе рассмотрены практические аспекты применения адаптивных нелинейных фильтров в различных РТУ и проведен анализ возможности практической реализации устройства линеаризации высокочастотного усилителя мощности сигналов CDMA систем передачи информации.

Обоснована возможность использования в качестве фильтра-предсказателя (ФП) в кодеке АДИКМ с обратной адаптацией нелинейного не-рекурсивного цифрового АФ модели Гаммерштейна (1) с нелинейными функционалами на основе ортогональных степенных многочленов. Для повышения скорости сходимости параметров ФП использовалась система идентификации с применением адаптивных ПЛ. Проведенные в соответствии с ГОСТ Р 50840-95 экспериментальные исследования показали возможность использования нелинейного полиномиального адаптивного ФП в схемах кодеков АДИКМ речевых сигналов. В этом случае достигалось снижение скорости передачи информации на 5...7 кбит/с при том же качестве речи по сравнению с кодеком, использующим кратковременный и долговременный адаптивные линейные ФП, при одновременном снижении размерности вектора параметров и вычислительных затрат в 2...3 раза.

Проанализирована практическая возможность применения предложенного во второй главе метода линеаризации ПАХ высокочастотного УМ в основной полосе частот с использованием адаптивного НФП. Получена зависимость среднеквадратического отклонения ПАХ линеаризованного усилительного тракта передатчика от линейной при различной разрядности вычислительных операций (рис. 5).

Обоснована возможность реализации устройства линеаризации выходного УМ системы WLL-связи «СТС ИСТОК CDMA 3/5.0» в основной полосе частот на МП Л1879ВМ2 производства научно-технического центра «Модуль». При этом, исходя из требований к характеристикам используемых сигналов на промежуточной частоте, разработанное устройство осуществляло параметрическую адаптацию НФП за Юме. Показано, что увеличение КПД линеаризованного УМ системы фиксированного радиодоступа CDMA при разрядности вычислений $R_q = 14$ составляет около 1,6 раза.

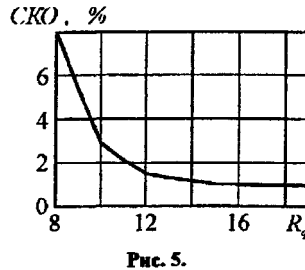


Рис. 5.

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1. Систематизированы наиболее известные нелинейные инерционные ММ нелинейных ЦФ в типовых РТУ. Определены вычислительные затраты в виде количества требуемых функционалов и параметров, необходимые для функционирования каждой из приведенных ММ нелинейных ЦФ.
2. Предложена структура адаптивной системы рекурсивных ЦФ на основе независимого прямого и обратного моделирования нерекурсивной и рекурсивной частей ПФ, обеспечивающая в 18 раз более высокую точность аппроксимации

АЧХ и ФЧХ фильтра по сравнению с алгоритмами на основе адаптации по общей ошибке.

3. Предложены структуры системы идентификации нелинейных нерекурсивных фильтров с разделенными нелинейными и инерционными свойствами на основе адаптивных ПЛ, позволяющими более чем в 10 раз уменьшить время адаптации по сравнению с алгоритмами, не учитывающими линейные свойства фильтра при малом входном сигнале.

4. Предложен неквадратичный критерий оптимизации параметров нелинейных цифровых фильтров при негауссовских входных сигналах, а также проведена численная оптимизация степени функционала минимизации ошибки адаптации, что позволило уменьшить СКО или период адаптации на 30..35 % от аналогичных при квадратичной форме оценки вектора градиента.

5. Исследовано применение МНК для адаптации нелинейных рекурсивных ММ в пространстве состояний по критерию минимума СКО. Показана возможность уменьшения максимальной относительной ошибки адаптации по сигналу до 2-х раз при одновременном выигрыше с точки зрения вычислительных затрат в 10 раз по сравнению с блоковыми алгоритмами оценки неизвестных параметров по обобщенному вероятностному критерию.

6. Предложена методика предварительной оценки порядка нелинейности и инерционности нелинейного ЦФ на основе степенной модели с целью уменьшения параметрического описания характеристик РТУ с заданной точностью.

7. Обоснована структура АА и предложена процедура параметрической идентификации нелинейных цифровых нерекурсивных полиномиальных фильтров предсказания сигнала, позволяющая уменьшить необходимые вычислительные затраты на АА в 5...20 раз. При этом показана возможность в 6...17 раз снизить нелинейные инерционные искажения ПАХ усилительного тракта при одновременном повышении его КПД в 1,6...2 раза в зависимости от разрядности представления операндов в вычислительном устройстве.

8. Обосновано применение адаптивного нелинейного фильтра по упрощенной модели Гаммерштейна в качестве фильтра подавления комплекса аддитивных сосредоточенных по времени и по частоте помех не менее чем на 15...20 дБ, а также показана эффективность предложенной модели с точки зрения требуемых вычислительных затрат.

9. Показана целесообразность использования статической нелинейной модели Гаммерштейна в качестве многовходового адаптивного нелинейного фильтра-компенсатора комплекса УП, ИП и широкополосных гауссовских помех. При этом возможно увеличение отношения сигнал-шум на выходе адаптивного фильтра-компенсатора по сравнению с входным на 20...25 дБ при использовании одного и на 25...30 дБ при использовании двух дополнительных разнесенных приемных устройств.

10. Показано, что использование нелинейных цифровых ФС при формировании вокализованных звуков позволяет при скоростях передачи 4...4,5 кбит/с получить качество синтезированной речи более 4,0 баллов, а применение нелинейного ФП в кодеках АДИКМ речевых сигналов обеспечивает при таком же

качестве речи снижение скорости передачи на 5...7кбит/с по сравнению линейным ФП.

11. Обоснована возможность реализации устройства линеаризации выходного УМ системы WLL-связи «СТС ИСТОК CDMA 3/5.0» на микропроцессоре L1879VM2 производства научно-технического центра «Модуль».

В приложениях приведены список аббревиатур и условных обозначений, обоснование применимости МНК для адаптации нелинейных ЦФ, исходный текст программы функционирования устройства введения нелинейных инерционных предсказаний сигнала, а также документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кирилловен., ВиноградовО.Л., ЛоцмановА.А. Процедура идентификации рекурсивных фильтров на основе независимой адаптации коэффициентов // Вестник РГРТА. Вып. 8.2001. С. 21-25.
2. Лоцманов АА. Алгоритмы идентификации фильтров с бесконечной импульсной характеристикой на основе метода наименьших квадратов // 7-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании". Тез. докладов. Рязань. 2002. С. 73-74.
3. Кириллов С.Н., Лоцманов А. А. Алгоритм идентификации нелинейных нерекурсивных цифровых фильтров // 11-я международная научно-техническая конференция "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". Тез. докладов. Рязань, РГРТА. 2002. С. 107-109.
4. Лоцманов А.А., Бузыкканов С.Н. Алгоритм фильтрации сигналов при сигналоподобной помехе // 7-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании". Тез. докладов. Рязань. 2002. С. 62-63.
5. Инструментальные средства интерактивного естественно-языкового взаимодействия для лиц со специальными нуждами и ограниченными возможностями здоровья в системе открытого образования: Отчет по НИР. / РГРТА; Науч. Рук. Кириллов С.Н. - Тема № 33-01Г; № ГР 01200109236. Рязань, 2002. 60 с. Список лит. С. 57-60 (30 назв.). Отв. исп.: Дмитриев В.Т. Соисп.: Лоцманов АА.
6. Разработка алгоритмов синтеза и обработки широкополосных сигналов с адаптацией к мешающим факторам: Отчет по НИР. / РГРТА; Научн. рук. Кириллов ОН. Тема № 3-03; № ГР 03012014001. Рязань, 2003. 91 с. Список лит. С. 87-91 (54 назв.). Отв. исп.: Дмитриев В.Т. Соисп: Лоцманов А.А.
7. Кириллов С.Н., Лоцманов А.А. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция с нелинейным адаптивным фильтром-предсказателем // 5-я международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Тез. докладов. Т. 1. Москва. 2003. С. 28-29.
8. Кириллов СЛ., Лоцманов А.А. Реализация нелинейного нерекурсивного адаптивного фильтра на основе ортогональных многочленов // Межвузовский

сборник научных трудов «Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах». Вып. 2. Рязань, РГРТА. 2003. С. 23-25.

9. Лоцманов АА. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция с нелинейным адаптивным фильтром-предсказателем на основе ортогональных многочленов // 8-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании". Тез. докладов. Рязань. 2003. С. 58-60.

10. Kirillov S., Lotsmanov A. Differential Pulse Code Modulation with a Nonlinear Adaptive Filter-Predictor // The 5th International Conference and Exhibition on "Digital Signal Processing and its Application". Vol. 1. Moscow. 2003. P. 29.

11. Кириллов С.Н., Лоцманов АА. Устойчивый квазиоптимальный алгоритм адаптации цифровых фильтров с бесконечной импульсной характеристикой // Радиотехника. 2003. № 12. С. 31-35.

12. Кириллов С.Н., Виноградов О.Л., Лоцманов АА. Алгоритмы адаптации цифровых фильтров в радиотехнических устройствах // Учеб. пособие. Рязань: РГРТА, 2004. 80 с.

13. Кириллов С.Н., Лоцманов А.А. Алгоритм адаптации нелинейных рекурсивных фильтров на основе метода наименьших квадратов // Радиотехника. 2004. № 4. С. 25-27.

14. Лоцманов АА. Метод адаптивного управления параметрами нелинейного объекта на основе метода наименьших квадратов // Конференция "Молодежь и наука". Научная сессия МИФИ-2004. Сборник научных трудов. Т. 14. Москва. 2004. С. 98-99.

15. Лоцманов АА. Идентификация нелинейных фильтров на основе отдельной адаптации нелинейной и линейной частей с использованием обратных моделей // Вестник РГРТА. Вып. 14. 2004. С. 126-129.

16. Лоцманов АА. Алгоритм адаптации нелинейных рекурсивных фильтров по критерию минимума неквадратичной ошибки // Вестник РГРТА. Вып. 13. 2004. С. 117-120.

17. Кириллов С.Н., Лоцманов АА. Алгоритм адаптивного управления параметрами нелинейного объекта по неквадратичному критерию // Научная сессия МИФИ-2004. Сборник научных трудов. Т. 12. Москва, 2004. С. 140-141.

18. Лоцманов АА. Алгоритм адаптации нелинейных рекурсивных фильтров в пространстве состояний // Межвузовский сборник научных трудов «Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах». Рязань: РГРТА. 2004. С. 63-66.

19. Кириллов С.Н., Лоцманов АА. Адаптивный дифференциальный импульсно-кодовый модулятор с нелинейным фильтром-предсказателем // Электросвязь. 2004. № 5. С. 36-38.

20. Кириллов С.Н., Лоцманов АА. Адаптивная линеаризация проходной амплитудной характеристики усилителя мощности CDMA // 6-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Тез. докладов. Т. 1. Москва. 2004. С. 123-125.

21. Лоцманов А. А. Линеаризации проходной амплитудной характеристики

широкополосного усилителя мощности CDMA // 12-я международная научно-техническая конференция "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". Тез. докладов. Рязань, РГРТА. 2004. С. 37-39.

22. Лоцманов АА. Адаптивный нелинейный инерционный фильтр предскажений в широкополосном усилителе мощности CDMA // 10-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". Тез. докладов. Т. 1. Москва, МЭИ. 2004. С. 22-23.

23. КирилловСЛ., Лоцманов А.А. Адаптивный нелинейный инерционный фильтр подавления импульсных и узкополосных помех // Вестник РГРТА. Вып. 14.2004. С. 40-43.

24. Мамушев Д.Ю., Лоцманов А.А. Нелинейная модель синтеза вокализованных звуков сигналов голосового источника // 10-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". Тез. докладов. Т. 1. Москва, МЭИ. 2004. С. 23-24.

25. Кириллов С.Н., Мамушев Д.Ю., Лоцманов АЛ. Нелинейная модель синтеза вокализованных звуков речи на основе модуляции последовательности импульсов голосового источника // 6-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Тез. докладов. Т. 1 Москва, 2004. С. 110-111.

26. Кириллов СЛ., Мамушев Д.Ю., Лоцманов АА. Нелинейная параметрическая модель речевых сигналов в задаче идентификации голоса диктора // Сборник трудов XIII Международной научной конференции «Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов». Тез. докладов. Москва, Академия управления МВД России. 2004. С. 394-397.

27. Kinilov S., Mamushev D. Lotsmanov A. Nonlinear Model of Voiced Sounds of Speech Synthesis on the Base of Modulation of Vocal Source Pulses Sequence // The 6th International Conference and Exhibition on "Digital Signal Processing and its Application". Vol. 1. Moscow, 2004. P. 125-126.

28. Кириллов СЛ., Лоцманов А.А. Линеаризация проходной амплитудной характеристики широкополосного усилителя мощности CDMA с использованием адаптивного нелинейного инерционного фильтра предскажений // Электросвязь, (в печати)

29. Кириллов СЛ., Мамушев Д.Ю., Лоцманов А.А. Нелинейная параметрическая модель анализа и синтеза речевого сигнала // Международная конференция «Теория и практика речевой коммуникации». Тез. докладов. Москва, 2004. С. 53-58.

Соискатель



/АЛ. Лоцманов/

Лощманов Алексей Александрович

Разработка и исследование структур адаптивных систем
нелинейных и рекурсивных цифровых фильтров
на основе метода наименьших квадратов
для повышения показателей качества
различных радиотехнических устройств

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 23 октября 2004 г.

Формат бумаги А4 80 г/м².

Тираж 100 экз. Заказ № 540.

Отпечатано ООО "ОРГТЕХЦЕНТР".
390013, г. Рязань, Первомайский проспект, 37/1.
Центр рекламы и печати.

№ 2 1 4 1 8

РНБ Русский фонд

2005-4

18633