

На правах рукописи

Кузнецов Евгений Петрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МНОГОСКОРОСТНОЙ АДАПТИВНОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ
ЭХО-КОМПЕНСАЦИИ**

Специальность 05.13.01 –
“Системный анализ, управление и обработка информации
(технические системы)”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2008

Работа выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Витязев Владимир Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, главный научный сотрудник ГУП НПЦ «ЭЛВИС»,
г. Москва, Зеленоград
Джиган Виктор Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры
АИТУ РГРТУ
Бабаян Павел Варганович

Ведущая организация: **ФГУП «НИИ Автоматики»**, г. Москва

Защита состоится «24» декабря 2008 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан «19» ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.01
канд. техн. наук, доцент



Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие цифровых инфотелекоммуникационных технологий на современном этапе идет по двум направлениям, первое из которых ориентировано на разработку и внедрение новых решений и технологий, а второе — на повышение эффективности функционирования и улучшение качества предоставляемых услуг в уже существующих системах обработки и передачи информации. Наличие паразитных эхо-сигналов в таких технических приложениях как модемная передача данных, сейсмология, проводная и беспроводная телефония, цифровая акустика, сотовая и спутниковая связь, радиолокация, системы видео и телеконференций отрицательно сказывается на качестве передаваемого сигнала и часто является серьезной помехой, мешающей передаче информации и принятию оперативного решения в системах управления и связи. Таким образом, возникает задача устранения паразитного эхо-сигнала.

Наиболее эффективным методом устранения паразитного эхо-сигнала является адаптивная эхо-компенсация, предполагающая использование теории адаптивной обработки сигналов. Значительный вклад в развитие этой теории внесли многие отечественные и зарубежные ученые: Я.З. Цыпкин, В.В. Шахгильдян, Г.П. Тартаковский, Е.П. Чураков, Ю.М. Коршунов, Б. Уидроу, С. Стирнз, К.Ф.Н. Коуэн, П.М. Грант, С. Хайкин и другие. В рамках теории адаптивной обработки сигналов задача адаптивной эхо-компенсации формулируется как задача прямого моделирования (идентификации) динамической системы и состоит в адаптивном поиске параметров модели максимально соответствующей параметрам идентифицируемой динамической системы. Проблемами эффективной эхо-компенсации являются обеспечение быстрой и точной настройки при наличии внешних мешающих факторов (шумов, помех, искажений, динамических изменений характеристик идентифицируемой системы) и ограничений, накладываемых реализационным базисом.

Несмотря на то, что идея адаптивной эхо-компенсации была предложена в середине 60-х годов прошлого века, она продолжает развиваться и в настоящее время, о чем свидетельствует большое число публикаций, посвященных данной проблематике в отечественных и зарубежных изданиях. При этом основное внимание в последние годы уделяется разработке и исследованию методов и алгоритмов адаптивной компенсации акустических эхо-сигналов. В этом случае модель идентифицируемой системы (эхо-тракта) имеет значительный порядок в смысле эквивалентного КИХ-фильтра, поиск коэффициентов которого осуществляется при настройке адаптивного фильтра, входящего в состав эхо-компенсатора. В первую очередь, это затрагивает такие технические приложения как беспроводная и мобильная связь, цифровая акустика, технологии пакетной передачи данных и речи, xDSL технологии, а также системы видео и телеконференций. Основной трудностью при этом является обеспечение возможности эффективной практической реализации, что предусматривает снижение вычислительных затрат без потерь в качестве работы алгоритма.

Удачным решением в этом случае является использование теории много-скоростной обработки сигналов, которая позволяет существенно снизить вы-

числительные затраты на реализацию требуемого адаптивного фильтра. Симбиоз теории многоскоростной обработки сигналов и субполосной адаптивной фильтрации, — многоскоростная адаптивная фильтрация, — отлично зарекомендовала себя в задачах сжатия речи и изображений, эквалайзинга и адаптивного диаграммообразования. Огромный вклад в развитие теории многоскоростной обработки сигналов и субполосной адаптивной фильтрации внесли как отечественные, так и зарубежные ученые: Р. Крошьер, Л.Р. Рабинер, М. Белланже, В.В. Витязев, П.П. Вайдьянатхан, М. Веттерли, З. Светкович, Р.В. Стюарт, М. Хартенек, К. Энеман, М. Мунен, Д. Марелли, М. Фу и ряд других.

Большое число степеней свободы, которые дает совместное использование теорий многоскоростной и адаптивной обработки сигналов, позволяет создавать эффективные структуры адаптивных фильтров с использованием банков фильтров с различными свойствами и характеристиками, что обеспечивает гибкость решения задачи адаптивной эхо-компенсации. Тем не менее, при этом остаются открытыми вопросы, касающиеся выбора структуры и характеристик банка фильтров и алгоритма адаптации для оптимальной реализации адаптивного эхо-компенсатора.

Таким образом, тема диссертационной работы, направленная на решение научной задачи, заключающейся в исследовании и разработке эффективных методов и алгоритмов многоскоростной адаптивной идентификации динамических систем в задачах эхо-компенсации, является актуальной в рамках обозначенной проблематики.

Цель и задачи работы. Целью исследований, проводимых в работе, является разработка методов и алгоритмов многоскоростной адаптивной идентификации динамических систем в задачах эхо-компенсации, направленных на уменьшение вычислительных затрат и улучшение точностных и динамических характеристик устройства.

Достижение поставленной цели включает в себя решение таких задач как:

- синтез структуры адаптивного эхо-компенсатора с использованием теории многоскоростной обработки сигналов;
- сравнительный анализ точностных и динамических характеристик многоскоростного адаптивного эхо-компенсатора при работе с различными алгоритмами адаптации и различными входными сигналами;
- оценка выигрыша в минимизации вычислительных затрат при использовании многоскоростной обработки сигналов для построения адаптивного эхо-компенсатора;
- разработка и исследование эффективных методов построения адаптивного многоскоростного эхо-компенсатора на базе различных структурно-алгоритмических реализаций;
- проектирование моделирующей среды и аппаратно-программных средств для проведения экспериментальных исследований;
- разработка методики оптимального проектирования многоскоростных адаптивных эхо-компенсаторов.

Методы проведения исследований. В ходе исследований использовались методы компьютерного моделирования, математического анализа и статистики, матричного исчисления, цифровой и адаптивной обработки сигналов. А также другие методы, которые в совокупности с проведенными экспериментами позволили получить общую картину оценки эффективности применения многоскоростной обработки сигналов в задаче адаптивной эхо-компенсации. Моделирование и тестирование предлагаемых походок проводилось с использованием таких программных пакетов как MATLAB, Code Composer Studio и VisualDSP++.

Научная новизна работы. Новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем.

1. Предложен критерий оценки эффективности работы адаптивного эхо-компенсатора и проведены исследования, показывающие преимущества использования методов многоскоростной обработки сигналов по сравнению с классическими аналогами.
2. Формализована задача оптимизации параметров структуры адаптивного эхо-компенсатора, использующего многоскоростную обработку сигналов, и проведены экспериментальные исследования ее решения с применением различных алгоритмов адаптации и банков фильтров с максимальной и не максимальной децимацией.
3. Предложен новый метод построения субполосного адаптивного эхо-компенсатора на основе неравномерных банков фильтров с не максимальной децимацией и комбинированного алгоритма адаптации, позволяющего добиться экономии вычислительных затрат без существенного снижения качества работы устройства.
4. Предложена модификация структурной схемы и алгоритма функционирования многоскоростного адаптивного эхо-компенсатора, дающая возможность целесообразно использовать энергоресурс устройства.
5. Разработана методика оптимального проектирования адаптивных эхо-компенсаторов, использующих многоскоростную обработку сигналов.

Практическая значимость работы. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем цифровой акустики, видео и телеконференцсвязи, мобильных приложений, высокоскоростных широкополосных систем передачи данных, а также систем обработки и передачи информации, использующих модуляцию с субполосным мультиплексированием. Разработанные методы, алгоритмы и программное обеспечение использованы при выполнении госбюджетных научно-исследовательских работ, проводимых в ГОУВ-ПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по заказу Министерства образования и науки РФ (НИР № 5-04Г, НИР № 3-05Г, НИР № 8-06Г), а также в учебном процессе. Основные результаты работы использованы в проектно-конструкторской деятельности ОАО «Рязанский радиозавод», г. Рязань, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследований эффективности применения методов многоскоростной адаптивной идентификации динамических систем, демонстрирующие достижимый выигрыш по отношению к классическим методам решения задачи эхо-компенсации.
2. Рекомендации по выбору типа и характеристик банка фильтров и методика решения задачи оптимизации параметров структуры многоскоростного адаптивного эхо-компенсатора.
3. Новый метод построения многоскоростного адаптивного эхо-компенсатора с пониженной вычислительной сложностью на основе комбинированного алгоритма адаптации.
4. Методика оптимального проектирования многоскоростных адаптивных эхо-компенсаторов, позволяющая минимизировать затраты на реализацию.

Достоверность. Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием математического аппарата и программных средств моделирования и проектирования.

Апробация работы. Научные результаты, полученные в работе, докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и межрегиональных научно-технических конференциях:

- «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2004, 2005, 2008);
- «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2005);
- «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2006, 2008);
- «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» (Саранск, 2005);
- «Современные проблемы информатизации в моделировании и программировании» (Воронеж, 2006, 2007, 2008);
- «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2006, 2008).

Личный вклад. Все результаты, сформулированные в основных положениях, выносимых на защиту, получены автором лично.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 141 наименования и 3 приложений. Общий объем диссертационной работы вместе с приложениями составляет 178 страниц, в том числе 160 страниц основного текста, 7 таблиц, 67 рисунков.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 17 работ. Из них 5 статей в журналах центральной печати из перечня ВАК и 12 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение раскрывает вопросы актуальности выбранной темы и определяет цели и задачи предстоящих исследований. Рассматриваются вопросы научной новизны и практической значимости результатов, полученных в работе.

Первая глава посвящена постановке, математической формализации и решению задачи прямого моделирования (идентификации) динамической системы, одним из практических применений которой является адаптивная эхо-компенсация.

Электрическое эхо возникает, в частности, в проводных системах связи, где из-за неидеальности развязки двух и четырехпроводных трактов часть передающегося сигнала в виде задержанной и искаженной копии поступает обратно к источнику информации, мешая ведению связи. Причиной акустического эхо-сигнала является отражение звуковой волны от близлежащих объектов и возвращение обратно к источнику колебаний. В системах телекоммуникаций это происходит обычно, когда звуковой сигнал абонента попадает в микрофонную цепь из-за плохой акустической развязки приемного и передающего трактов аппаратуры обработки и передачи информации. Паразитный эхо-сигнал также присутствует в таких приложениях как системы неразрушающего контроля, сейсмология, гидро- и радиолокация, морская геология.

В настоящее время среди существующих методов борьбы с паразитными эхо-сигналами наиболее эффективным методом является адаптивная эхо-компенсация.

С момента появления в 1966 году первой, классической схемы эхо-компенсатора (ЭК), использующей адаптивный КИХ-фильтр и алгоритм метода наименьших квадратов (МНК), до наших дней прошло более чем четыре десятилетия. За это время было предложено множество оригинальных идей, позволяющих улучшить качество работы классической схемы. Разработаны новые подходы, превосходящие классическую схему ЭК в эффективности и производительности. Последнее касается задачи акустической эхо-компенсации, где импульсная характеристика (ИХ) эхо-тракта имеет значительную протяженность, что приводит к необходимости реализации адаптивного цифрового фильтра (АЦФ) крайне высокого порядка (в классе КИХ-цепей), и не всегда возможно на практике.

Чтобы однозначно сформулировать задачу прямого моделирования (идентификации) динамической системы примем, что система является одномерной и в процессе ее нормального функционирования синхронно измеряются входной $x(t)$ и выходной $y(t)$ сигналы. По результатам измерения $x(t)$ и $y(t)$ необходимо определить хотя бы приближенное значение оператора, ставящего в однозначное соответствие выходной и входной сигналы. В данной работе рассматривается случай, когда система является цифровой и все сигналы в ней изменяются дискретно. Если моделью системы S является оператор Φ , такой, что $y(n) = \Phi\{x(n)\}$, то задача прямого моделирования (идентификации) будет

заключаться в нахождении оценки $\hat{\Phi}$ истинного оператора системы Φ по реализациям случайных процессов $x(n)$ и $y(n)$.

Адаптивная эхо-компенсация является одним из практических примеров задачи прямого моделирования (идентификации) и состоит в нахождении коэффициентов $w_k(n)$ АЦФ по реализациям входного и обучающего сигналов $x(n)$ и $y(n)$ таких, что $J[w_k(n)] = \|y(n) - \hat{y}(n)\| \rightarrow \min_{w_k(n)}$, где $J[w_k(n)]$ – оптимизируемый функционал, а $\hat{y}(n)$ – сигнал на выходе АЦФ (рис. 1).

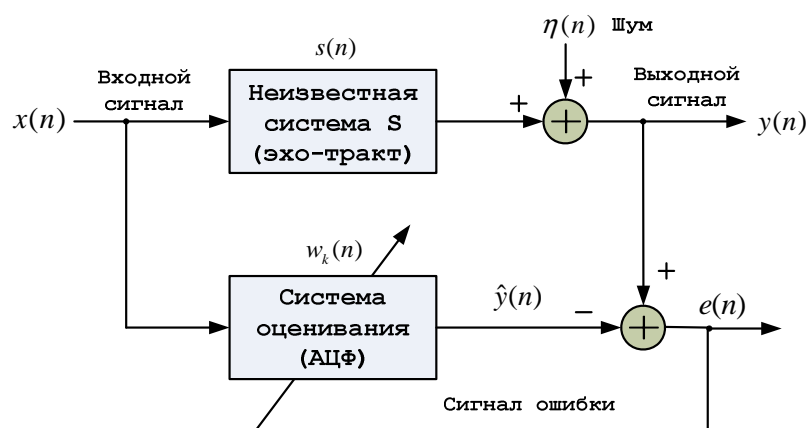


Рис. 1 — Задача прямого моделирования (идентификации) динамической системы

Данная задача в классе КИХ-цепей сводится к решению известного уравнения Винера-Хопфа, имеющего единственный корень для набора оптимальных коэффициентов АЦФ. Однако, найти такое оптимальное решение удастся не всегда, и на практике применяют различные градиентные методы поиска экстремума.

Проведенный в данной главе обзор показывает, что наиболее перспективными методами адаптивной эхо-компенсации в последние годы являются методы, использующие многоскоростную обработку сигналов в комбинации с адаптивной фильтрацией. Однако, эффективная реализация многоскоростного адаптивного ЭК сопряжена с решением ряда вопросов, среди которых открытыми остаются вопросы целесообразности использования конкретных типов банков фильтров (БФ) в сочетании с конкретными алгоритмами адаптации, а также вопросы разработки методики оптимального проектирования ЭК на цифровых процессорах обработки сигналов (ЦПОС) для реальных технических приложений.

Вторая глава ставит своей целью разработку и исследование методов адаптивной многоскоростной обработки сигналов в задачах эхо-компенсации.

Идея многоскоростной обработки сигналов заключается в последовательном изменении скорости обрабатываемого сигнала, то есть понижении/повышении его частоты дискретизации. Принято совместно рассматривать методы многоскоростной и субполосной обработки сигналов, предполагающей предварительное разбиение спектра обрабатываемого сигнала на небольшие частотные диапазоны – субполосы. Использование многоскоростной обработки сигналов в задачах адаптивной эхо-компенсации предусматривает последова-

тельное выполнение следующих операций (рис. 2): разбиение спектров входного и обучающего сигналов на субполосы и понижение исходной частоты дискретизации с помощью БФ анализа; адаптивную обработку сигнала в каждой субполосе на новой, более низкой частоте дискретизации; повышение текущей частоты дискретизации до исходной и восстановление субполосных составляющих сигнала ошибки с помощью БФ синтеза; объединение субполосных каналов.

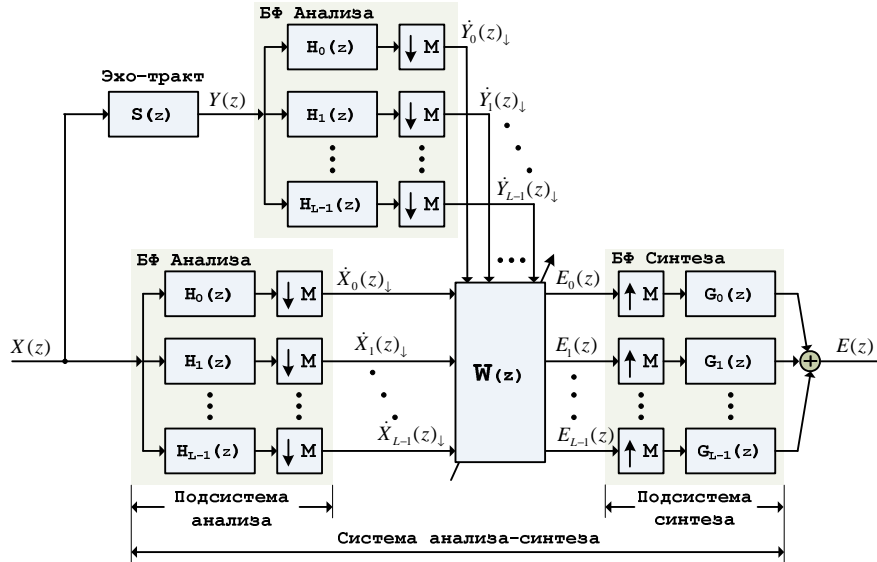


Рис. 2 — Общая структурная схема многоскоростного адаптивного ЭК

Такой подход позволяет получить большую эффективность по сравнению с классической схемой реализации ЭК. Это выражается в снижении вычислительных затрат на реализацию, увеличении точности и скорости настройки АЦФ и дополнительных возможностях, которые дает распределенная адаптивная обработка в каждой из субполос.

В общем случае любая практическая реализация адаптивного ЭК может быть описана некоторым набором показателей качества $\mathbf{q} = (Q_1, Q_2, \dots, Q_k) \in R^k$, где R^k — k -мерное пространство показателей качества системы. Реализация одного из конкретных вариантов ЭК связана с выбором: определенной структуры \mathbf{str} , согласно которой может быть построен ЭК; алгоритма адаптации \mathbf{alg} , который определяет логику работы АЦФ; аппаратно-программного базиса \mathbf{hrd} , то есть набора технических и программных средств реализации конкретного ЭК. В качестве координат векторов \mathbf{str} , \mathbf{alg} и \mathbf{hrd} могут выступать как формализуемые переменные, так и количественные показатели. Таким образом, конкретный вариант реализации ЭК задается тройкой $(\mathbf{str}, \mathbf{alg}, \mathbf{hrd})$ и характеризуется показателями качества $\mathbf{q} = \varphi(\mathbf{str}, \mathbf{alg}, \mathbf{hrd})$, где $\varphi(*)$ — вектор-функция взаимосвязи показателей \mathbf{q} и определяющих факторов.

Данная работа ставит своей целью исследование области значений вектора показателей качества \mathbf{q} для различных структур и алгоритмов адаптации, реализующих ЭК при фиксированном аппаратно-программном базисе, а также поиск наилучшей структурной и алгоритмической реализации ЭК в плане оптимизации некоторой функции $\theta(\mathbf{q})$.

В качестве составляющих вектора показателей качества используются следующие величины: относительный уровень ослабления эхо-сигнала в дБ – $ERLE$; время сходимости алгоритма адаптации – $T_{СХОД}$; вычислительные затраты на реализацию ЭК по выбранной структуре на основе выбранного алгоритма адаптации – $C_{ВЫЧ}$; $M_{ТРЕБ}$ – требуемый ресурсов памяти. Таким образом, вектор показателей качества имеет вид: $\mathbf{q} = [ERLE \quad T_{СХОД} \quad C_{ВЫЧ} \quad M_{ТРЕБ}]^T$.

Задача синтеза структуры адаптивного ЭК может быть формализована следующим образом. Найти такую форму структурной реализации \mathbf{str} и алгоритм адаптации \mathbf{alg} , которые позволят достичь оптимального значения вектора качества \mathbf{q} при условии, что ЭК будет реализован на базе заранее выбранного ЦПОС \mathbf{hrd}_{DSP} , то есть:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{q} = C_{ВЫЧ}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \rightarrow \underset{\mathbf{str}, \mathbf{alg}}{opt}; \\ ERLE \geq \xi_{ДОП}; \\ T_{СХОД} \leq t_{ДОП}; \\ M_{ТРЕБ} < M_{ЦПОС}; \\ \mathbf{hrd} = \mathbf{hrd}_{DSP}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Поиск решения задачи синтеза структуры адаптивного ЭК в виде (1) предполагает проведение процедуры многокритериальной оптимизации, что представляет известную сложность. Поставленную задачу можно несколько упростить, сузив область значений векторов \mathbf{str} и \mathbf{alg} .

На базе классической схемы адаптивного ЭК в ходе экспериментальных исследований проанализированы его точностные и динамические характеристики для электрического и акустического эхо-трактов при использовании двадцати двух алгоритмов адаптации с различными параметрами и трех видов входных воздействий: белого, окрашенного шума и речевого сигнала (рис. 3).

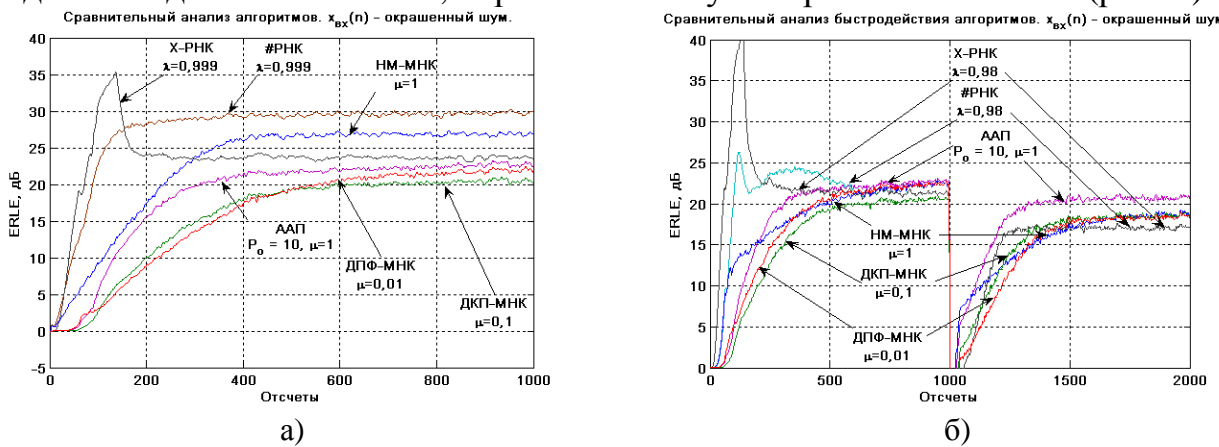


Рис. 3 — Результаты сравнительного анализа точностных (а) и динамических (б) характеристик адаптивного ЭК при использовании различных алгоритмов адаптации

Наиболее эффективными алгоритмами по скорости и точности настройки оказались МНК с нормализацией по мощности (НМ-МНК), рекурсивный метод наименьших квадратов с преобразованием Хаусхолдера (Х-РНК), алгоритм аффинных проекций (ААП) и решетчатый РНК (#РНК). Среди алгоритмов адаптации работающих в частотной области наиболее эффективными оказались алгоритмы МНК на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ-МНК) и дискретного косинус-преобразования (ДКП-МНК).

Для удобства введено понятие коэффициента эффективности $\psi = ERLE / C_{ВЫЧ}$, оценивающего отношение уровня подавления эхо-сигнала, достигаемого за определенное время настройки, к вычислительным затратам на реализацию адаптивного ЭК. Применяя выбранные алгоритмы адаптации, проведено сравнение различных субполосных и классической схемы адаптивного ЭК на основе введенного показателя ψ и показан выигрыш, получаемый при использовании многоскоростной адаптивной обработки сигналов (рис. 4, 5). Наиболее эффективными по данному показателю алгоритмами оказались Х-РНК, ААП и #РНК.

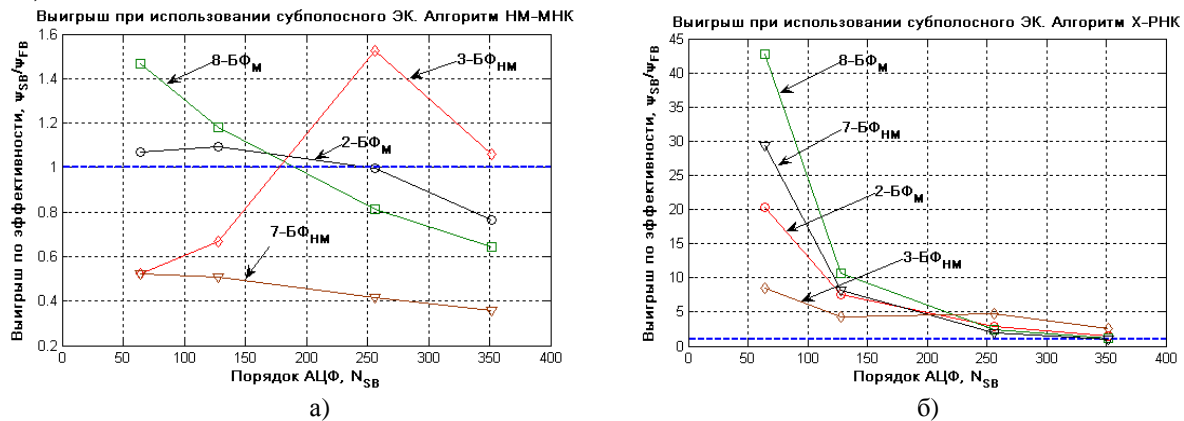


Рис. 4 — Выигрыш субполосной схемы ЭК для различных типов БФ: а) — при использовании НМ-МНК; б) — при использовании Х-РНК

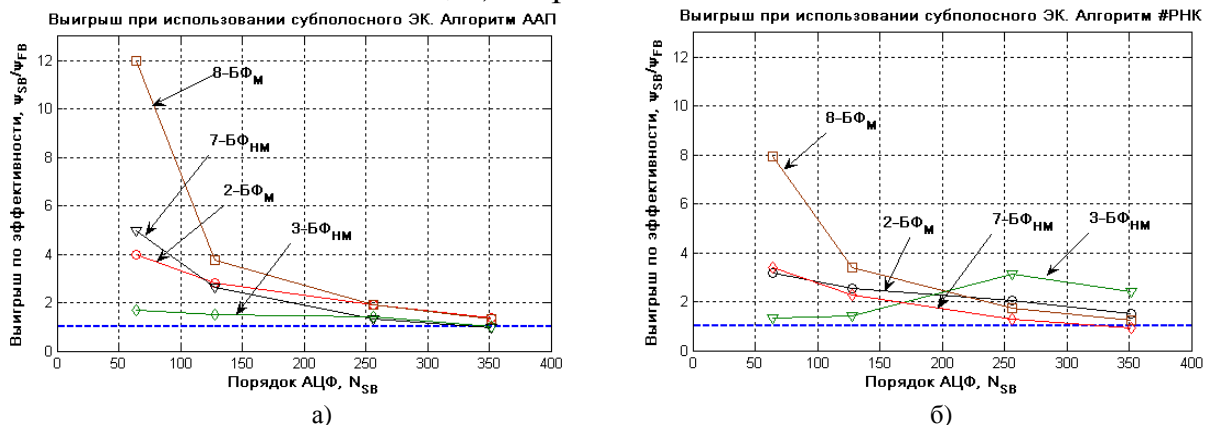


Рис. 5 — Выигрыш субполосной схемы ЭК для различных типов БФ: а) — при использовании ААП; б) — при использовании #РНК

Третья глава рассматривает вопросы разработки и исследования методов построения многоскоростных адаптивных эхо-компенсаторов.

Опираясь на результаты экспериментальных исследований, проведенных в главе 2, и, принимая во внимание (1), задачу синтеза структуры многоскоростного адаптивного ЭК можно переформулировать следующим образом (2). Най-

ти такую форму структурной реализации $\widetilde{\mathbf{str}}$ в классе функций FB , $FB \in F^{MR}$, которая в сочетании с одним из алгоритмов $\widetilde{\mathbf{alg}}$ позволят достичь оптимального значения вектора качества \mathbf{q} при условии, что ЭК будет реализован на базе заранее выбранного ЦПОС \mathbf{hrd}_{DSP} , то есть:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{q} = C_{\text{ВЫЧ}}(\widetilde{\mathbf{str}}, \widetilde{\mathbf{alg}}) \rightarrow \underset{\widetilde{\mathbf{str}}, \widetilde{\mathbf{alg}}}{opt}; \\ \widetilde{\mathbf{str}} = [FB], FB = \vartheta(N_\pi, L, \mathbf{m}) \in F^{MR}; \\ \widetilde{\mathbf{alg}} = [X\text{-РНК} \quad \#РНК \quad \text{ААП}]^T; \\ ERLE \geq \xi_{\text{ДОП}}; \\ T_{\text{СХОД}} \leq t_{\text{ДОП}}; \\ M_{\text{ТРЕБ}} < M_{\text{ЦПОС}}; \\ \mathbf{hrd} = \mathbf{hrd}_{\text{DSP}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь $FB = \vartheta(N_\pi, L, \mathbf{m})$ – функция, определяющая свойства БФ, аргументами которой являются следующие параметры: $N_\pi = \alpha\beta L(\varepsilon_{1\text{ДОП}}, \varepsilon_{2\text{ДОП}})$ – порядок низкочастотного фильтра-прототипа, зависящий от показателя прямоугольности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $\alpha = \omega_{c1}/(\omega_{c2} - \omega_{c1})$, показателя узкополосности фильтра $\beta = 2\pi/\omega_{c1}$ и логарифмического показателя частотной избирательности $L(\varepsilon_{1\text{ДОП}}, \varepsilon_{2\text{ДОП}})$; L – число субполосных каналов; $\mathbf{m} = [M_0, M_1, \dots, M_{L-1}]^T$ – вектор коэффициентов децимации БФ.

Решение задачи оптимизации параметров структуры адаптивного многоскоростного ЭК (2) связано с нахождением некоторого множества функций $FB \in F^{MR}$ (фактически класса БФ), в рамках которого вектор показателей качества \mathbf{q} примет оптимальное значение для одного из заранее выбранных алгоритмов адаптации.

В качестве исследуемых классов БФ в работе выступали равномерные банки фильтров с максимальной децимацией (БФ_М) и неравномерные банки фильтров с немаксимальной децимацией (БФ_{НМ}) с различными характеристиками. Проведенные эксперименты показали, что БФ_М являются более эффективными с позиции минимизации вычислительных затрат на реализацию. Однако, для получения высокого уровня подавления требуется обеспечивать хорошую частотную независимость соседних субполосных каналов для снижения элайзинга, что является дополнительной трудностью. БФ_{НМ} несколько уступают БФ_М в значении коэффициента эффективности ψ , но, тем не менее, являются наиболее удачным решением для использования в задаче адаптивной эхокомпенсации, так как практически лишены эффекта элайзинга, а неравномерное

разбиение на каналы дает дополнительные возможности для использования распределенной адаптивной обработки в субполосах.

На основе проведенного эмпирического анализа разработан новый метод эффективной реализации субполосного адаптивного ЭК с пониженной вычислительной сложностью, использующий распределенную адаптивную обработку в субполосах. В разработанном методе используется 6-канальный БФ_{НМ}, работающий по комбинированному алгоритму адаптации X-РНК + НМ-МНК. Данный метод практически не уступает в точности и скорости настройки субполосной схеме адаптивного ЭК, где в каждом из каналов используются одинаковые алгоритмы адаптации, но при этом позволяет снизить вычислительные затраты на реализацию на величину порядка 40% (табл. 1).

Таблица 1. Результаты сравнения эффективности различных структурно-алгоритмических схем реализации адаптивного ЭК

Схема эхо-компенсатора	Уровень ERLE, дБ	Вычислительные затраты, операции умножения с накоплением
Классическая X-РНК	45,4	$1,8365 \times 10^6$
Субполосная X-РНК	47,1	$1,0692 \times 10^6$
Субполосная X-РНК + НМ-МНК	40,4	$6,3489 \times 10^5$

Предложена модификация структурной схемы и алгоритма функционирования многоскоростного адаптивного ЭК, дающая возможность целесообразно использовать энергоресурс устройства при работе в приложениях реального времени (рис. 6).

Четвертая глава посвящена разработке моделирующей среды и аппаратно-программных средств для проведения экспериментальных исследований и оптимального проектирования адаптивных эхо-компенсаторов.

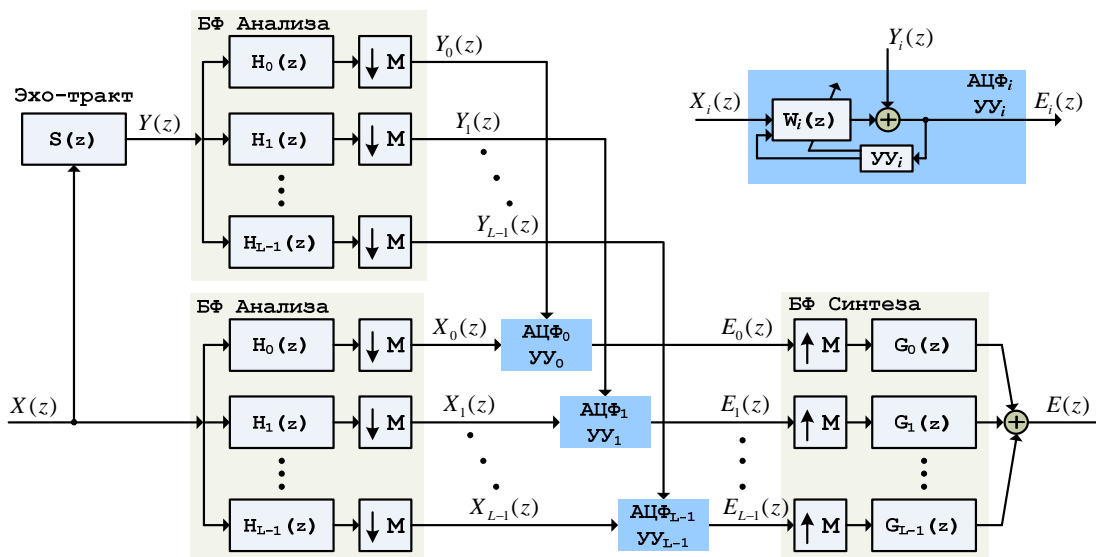


Рис. 6 — Эффективная реализация субполосного ЭК на основе нового алгоритма управления работой канального АЦФ

В работе разработаны два MATLAB-приложения, моделирующих работу классического и субполосного адаптивного ЭК при различных условиях функ-

ционирования. Разработанная среда названа ESMoDE (Echo Cancellation Modelling Environment), что буквально переводится как «среда моделирования и исследования характеристик адаптивного эхо-компенсатора». Для универсальности созданы русская и английская версии. Хотя ESMoDE нельзя назвать многофункциональной моделирующей средой, тем не менее, предоставляемого набора возможностей вполне достаточно для использования этого продукта в обучающих или ознакомительных целях (рис. 7). При необходимости функциональность ESMoDE несложно «нарастить» в соответствии с требованиями конкретной задачи.

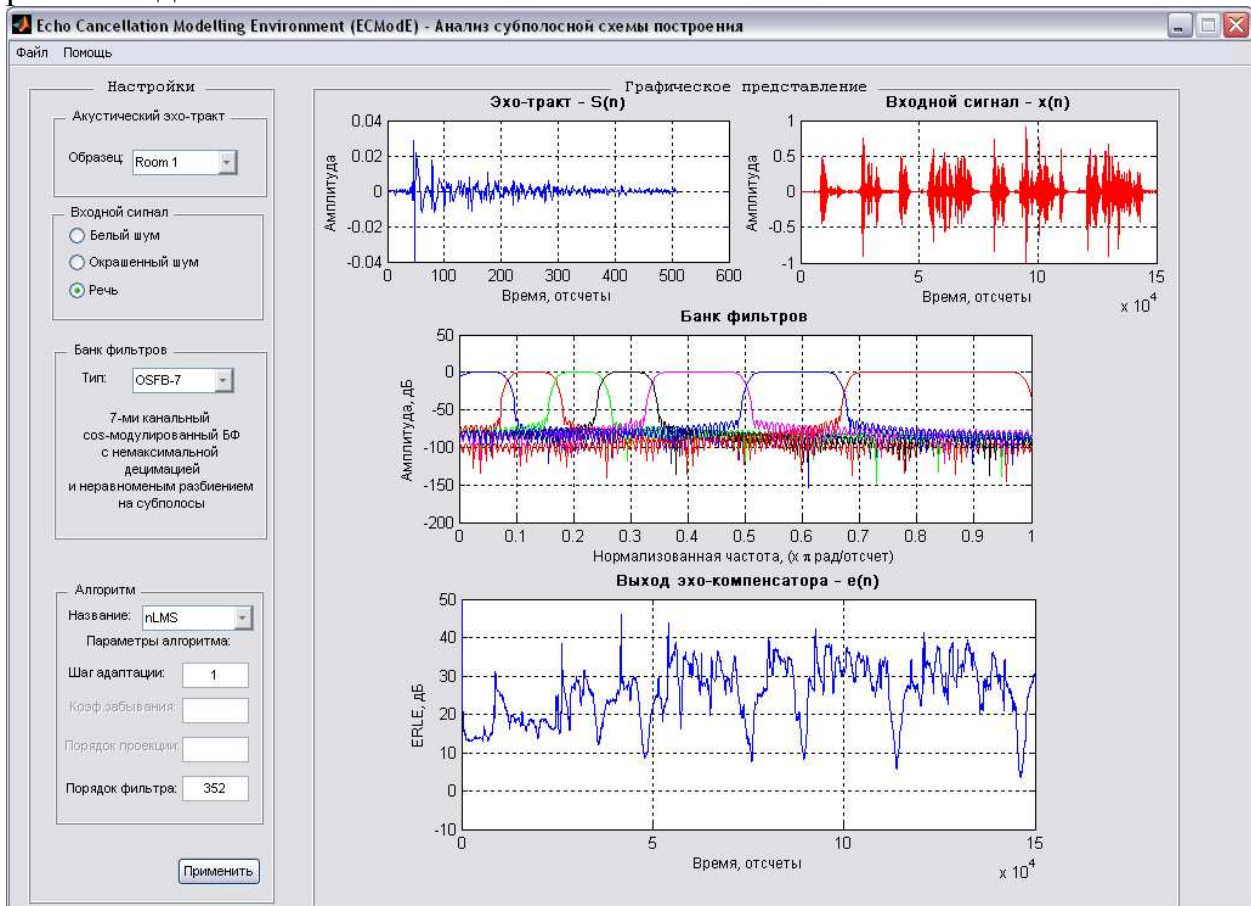


Рис. 7 — Снимок экрана ESMoDE при анализе субполосного ЭК

В дополнение к ESMoDE предложены варианты построения моделирующей среды с использованием MATLAB Simulink, которые дают возможность оценить эффективность и протестировать работу адаптивного ЭК для систем реального времени на базе ЦПОС или персонального компьютера (ПК).

Разработка методики оптимального проектирования адаптивных ЭК связана с постановкой и решением так называемых прямой и обратной задач. Прямая задача оптимального проектирования адаптивного ЭК может быть сформулирована следующим образом (3). Найти такую форму структурно-алгоритмической реализации адаптивного ЭК $\varphi(\mathbf{str}, \mathbf{alg})$, которая минимизирует максимальное отклонение выходного сигнала АЦФ $\hat{y}(n)$ от обучающего сигнала $y(n)$ на выходе идентифицируемого эхо-тракта, при условии, что АЦФ имеет конечный порядок N . При этом время настройки адаптивного ЭК

$T_{\text{СХОД}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg})$ ограничено сверху величиной $t_{\text{ДОП}}$, затраты на память данных и программ $M_{\text{ТРЕБ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg})$ не должны превышать ресурсов памяти выбранного ЦПОС $M_{\text{ЦПОС}}$, а вычислительные затраты $C_{\text{ВЫЧ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg})$ должны обеспечивать возможность работы ЭК в реальном времени, не превосходя вычислительную мощность ЦПОС $MAC_{\text{ЦПОС}}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) = \min_{\mathbf{str}, \mathbf{alg}} \left\{ \max_{0 \leq n \leq N-1} \|y(n) - \hat{y}(n)\| \right\}; \\ T_{\text{СХОД}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \leq t_{\text{ДОП}}; \\ M_{\text{ТРЕБ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \leq M_{\text{ЦПОС}}; \\ C_{\text{ВЫЧ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \leq MAC_{\text{ЦПОС}}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Обратную задачу оптимального проектирования адаптивного ЭК сформулируем в виде (4). Она заключается в нахождении такой формы структурно-алгоритмической реализации адаптивного ЭК $\varphi(\mathbf{str}, \mathbf{alg})$, которая минимизирует вычислительные затраты $C_{\text{ВЫЧ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg})$ при условии, что максимальное отклонение выходного сигнала $\hat{y}(n)$ АЦФ N -го порядка от обучающего сигнала $y(n)$ не будет превышать порогового значения e_{min} , достигаемого за время настройки $T_{\text{СХОД}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \leq t_{\text{ДОП}}$ и ограничениях на объем оперативной памяти $M_{\text{ТРЕБ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \leq M_{\text{ПК}}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) = \min_{\mathbf{str}, \mathbf{alg}} \{C_{\text{ВЫЧ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg})\}; \\ \max_{0 \leq n \leq N-1} \|y(n) - \hat{y}(n)\| \leq e_{\text{min}}; \\ T_{\text{СХОД}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \leq t_{\text{ДОП}}; \\ M_{\text{ТРЕБ}}(\mathbf{str}, \mathbf{alg}) \leq M_{\text{ПК}}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Выбор той или другой задачи определяется особенностями аппаратной платформы для реализации адаптивного ЭК. В работе предлагаются возможные алгоритмы решения прямой и обратной задач оптимального проектирования адаптивных многоскоростных ЭК.

В завершении главы проведены тестовые испытания, показывающие соответствие характеристик субполосного адаптивного ЭК требованиям рекомендаций Международного союза электросвязи. Исследованы особенности работы адаптивного ЭК при наличии шумов, подтверждающие эффективность применения комбинированных алгоритмов адаптации и распределенной адаптивной обработки в субполосах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных исследований решена научная задача разработки эффективных методов и алгоритмов многоскоростной адаптивной идентификации динамических систем в задачах эхо-компенсации, направленных на уменьшение вычислительных затрат и улучшение точностных и динамических характеристик устройства. К основным научным и практическим результатам диссертационной работы относятся:

1. Сравнительный анализ алгоритмов адаптации, наиболее часто используемых в задачах адаптивной компенсации электрического и акустического эхо-сигналов.
2. Сравнительный анализ точностных и динамических характеристик адаптивного эхо-компенсатора, построенного на основе классической и субполосной схем реализации.
3. Демонстрация выигрыша субполосной схемы реализации адаптивного эхо-компенсатора над классической на основе предложенного критерия при использовании равномерных и неравномерных банков фильтров с максимальной и немаксимальной децимацией и выбранных алгоритмов адаптации.
4. Оценка влияния числа каналов и способа разбиения на субполосы на эффективность работы субполосного адаптивного ЭК, реализованного на основе банков фильтров с максимальной и немаксимальной децимацией с использованием выбранных алгоритмов адаптации.
5. Разработка нового метода построения субполосного адаптивного эхо-компенсатора, работающего на основе неравномерного банка фильтров с немаксимальной децимацией и комбинированного алгоритма адаптации.
6. Создание моделирующей среды в системе MATLAB для экспериментальных исследований свойств и характеристик адаптивного эхо-компенсатора.
7. Разработка методики оптимального проектирования адаптивных эхо-компенсаторов на ЦПОС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов Е.П. Системы и устройства эхо-компенсации // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Матер. 13-й междунар. науч.-техн. конф. Рязань, 2004. – С. 77-78.
2. Кузнецов Е.П. Применение многоскоростной субполосной адаптивной фильтрации в задачах эхо-компенсации // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Матер. 14-й междунар. науч.-техн. конф. Рязань, 2005. – С. 87.
3. Кузнецов Е.П. Эхо-компенсация в системах телекоммуникаций // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Матер. 11-й международной науч.-техн. конф. Москва, 2005. – Т.1. – С. 139.

4. Кузнецов Е.П. Эхо-компенсация в современных системах связи // Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение: Сб. трудов 4-ой межрегион. молодежной науч. шк. Саранск, 2005. – С. 172.
5. Кузнецов Е.П. Многоскоростная адаптивная фильтрация в задачах эхо-компенсации // Современные проблемы информатизации в моделировании и программировании: Сб. трудов 11-й междунар. открытой науч. конф. Воронеж, 2006. – С. 185-186.
6. Зайцев А.А., Кузнецов Е.П. Задачи прямого и обратного моделирования в системах связи, использующих модуляцию с субполосным мультиплексированием // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Матер. 7-й междунар. науч.-техн. конф. Москва, 2006. – С. 206-207.
7. Кузнецов Е.П., Витязев В.В. Цифровая обработка сигналов в задачах эхо-компенсации: тематический обзор (часть 1) // Цифровая обработка сигналов. – 2006. №3. – С. 8-19.
8. Кузнецов Е.П. Применение субполосной адаптивной фильтрации в задачах прямого моделирования динамических систем // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2006»: Матер. междунар. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 2006. – С. 184.
9. Кузнецов Е.П., Витязев В.В. Цифровая обработка сигналов в задачах эхо-компенсации: тематический обзор (часть 2) // Цифровая обработка сигналов. – 2006. №4. – С. 20-28.
10. Кузнецов Е.П. Банки фильтров с максимальной и не максимальной децимацией в задачах эхо-компенсации // Современные проблемы информатизации в моделировании сложных систем: Сб. трудов 12-й междунар. открытой науч. конф. Воронеж, 2007. – С. 183-184.
11. Кузнецов Е.П. Методы и алгоритмы адаптивной эхо-компенсации: сравнительный анализ эффективности применения // Цифровая обработка сигналов. – 2007. №2. – С. 26-34.
12. Кузнецов Е.П. Об эффективности многоскоростной адаптивной обработки сигналов в задаче акустической эхо-компенсации // Современные проблемы информатизации в проектировании и информационных системах: Сб. трудов 13-й междунар. открытой науч. конф. Воронеж, 2008. – С. 419-421.
13. Кузнецов Е.П. Эффективность многоскоростной обработки сигналов в задаче акустической эхо-компенсации // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2008. №1. – С. 27-34.
14. Кузнецов Е.П. Выбор банка фильтров для построения многоскоростного адаптивного эхо-компенсатора // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Матер. 15-й междунар. науч.-техн. конф. Рязань, 2008. – С. 94.
15. Кузнецов Е.П. Эффективная реализация субполосного адаптивного эхо-компенсатора // Современные проблемы радиотехники и телекоммуника-

- ций «РТ-2008»: Матер. междунар. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и ученых. Севастополь, 2008. – С. 244.
16. Кузнецов Е.П. Новый метод эффективной реализации субполосного адаптивного эхо-компенсатора // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Матер. 10-й междунар. научн.-техн. конф. Москва, 2008. – С. 269-271.
 17. Кузнецов Е.П. Многоскоростной адаптивный эхо-компенсатор с комбинированным алгоритмом адаптации // Вестник РГРТУ. – 2008. №2. Вып. 24. – С. 25-27.

Кузнецов Евгений Петрович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МНОГОСКОРОСТНОЙ АДАПТИВНОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ
ЭХО-КОМПЕНСАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 17.11.2008. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 175.

ООО Типография «Сервис»
390000, г. Рязань, ул. Интернациональная, д.1 г.