

На правах рукописи



БАХУРИН Сергей Алексеевич

**ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА
ФИНИТНЫХ ВО ВРЕМЕНИ СИГНАЛОВ В
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань, 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

- Научный руководитель - заслуженный работник ВШ РФ, доктор технических наук, профессор Кириллов Сергей Николаевич
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Кузнецов Альберт Андреевич
кандидат технических наук Гусев Игорь Андреевич
- Ведущая организация - ОАО «Корпорация Фазотрон-НИИР» - НИИ «Рассвет»

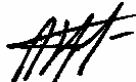
Защита состоится «16» мая 2007 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «РГРТУ».

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат технических наук



А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС) позволяют получить потенциально-возможные характеристики устройств обработки сигналов в радиотехнических устройствах. Большой вклад в развитие теории ЦОС детерминированных сигналов и случайных процессов (СП) внесли отечественные и зарубежные ученые В.А. Котельников, А.Ж. Хинчин, В.С. Пугачев, А. Шустер, Г.У. Юл, Н. Винер, Р.Б. Блекман, Ж.В. Тьюки, Ж.П. Бург, Г. Дженкинс, Д. Ватс, С.Л. Марпл-мл. и др. При этом теория ЦОС разрабатывалась на основе теоремы В.А. Котельникова, в соответствии с которой однозначное восстановление исходного сигнала, бесконечного по времени, посредством дискретных отсчетов возможно только для сигналов с ограниченным спектром, при физически нереализуемом устройстве обработки. При практическом использовании теоремы В.А. Котельникова возникают ошибки усечения и наложения, связанные с финитностью во времени реализаций СП и проанализированные в работах А. Дж. Джерри, Я.И. Хургина, В.П. Яковлева и др. Кроме того, потенциально-возможные характеристики устройств ЦОС, полученные применением сложных алгоритмов обработки сигналов, могут быть ослаблены на этапе цифроаналогового преобразования из-за ошибок восстановления сигнала. Для уменьшения влияния этих ошибок разработана теория восстановления сигналов на основе полиномиальной и сплайн-интерполяции, а также атомарных функций, изложенная в работах В.А. Василенко, В.Ф. Кравченко, В.А. Рвачева и др. В рамках этой теории недостаточно рассмотрены вопросы построения устройств восстановления сигналов в виде физически реализуемых фильтров нижних частот (ФНЧ), кроме того, предложенные методы восстановления разработаны без учета свойств этих сигналов.

При решении задачи интерполяции наиболее широкое распространение получил критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО), не учитывающий, что ошибки при восстановлении ограниченных во времени реализаций СП распределены неравномерно на интервале обработки, причем максимальные ошибки обычно сосредоточены в начале и конце интервала.

Наиболее часто используемыми при решении практических задач восстановления являются аналоговые ФНЧ высокого порядка, а также каскадное соединение нерекурсивного цифрового и аналогового ФНЧ. При этом не рассмотрены вопросы синтеза цифровых рекурсивных восстанавливающих ФНЧ, с учетом априорных сведений о восстанавливаемом сигнале.

В настоящее время при обработке нестационарных СП большое распространение получила теория вейвлет-анализа (ВА), разработанная в работах А. Хаара, С. Маллата, И. Мейера, И. Добеши, К. Чуи, а также в работах отечественных ученых В.И. Воробьева, В.Г. Грибунина, А.П. Петухова, Л.В. Новикова, В.П. Дьяконова и др. Основное достоинство алгоритмов ВА заключается в локализации базисных функций как по времени, так и по частоте. Благодаря этому алгоритмы ВА нашли широкое применение при решении задач сжатия речевой и видеoinформации, а также восстановления и интерполяции сигналов.

Известно большое количество классов вейвлет-функций, однако практические рекомендации по выбору базиса для обработки заданного типа сигналов содержатся в очень ограниченном объеме работ. В связи с этим наибольшее распространение при решении практических задач получили ортогональные вейвлеты Добеши, обеспечивающие минимальную длительность при фиксированном числе нулевых моментов и имеющие конечную область определения. На основе базисных систем

Добеши построены стандарты сжатия изображений JPEG-2000, а также стандарт сжатия видеoinформации MPEG4.

При разложении СП наиболее эффективным по критерию минимума СКО является разложение Карунена-Лоэва, рассмотренное в работах Л. Фрэнкса, Г. Ван Триса, В.И. Тихонова и др. Однако разложение Карунена-Лоэва не имеет быстрых алгоритмов, в отличие от алгоритмов вейвлет- и Фурье-анализа, поскольку синтез базисных систем производится на основе априорных сведений о корреляционных свойствах СП. На практике часто априорные сведения о корреляционной функции СП отсутствуют, а свойства сигнала меняются. Это затрудняет применение разложения Карунена-Лоэва в алгоритмах ЦОС ввиду необходимости синтеза базисных систем разложения в реальном режиме времени.

Основным блоком ряда радиотехнических устройств ЦОС, определяющим его быстродействие, является блок корреляционной обработки. Реализация блока корреляционной обработки возможна как во временной, так и в частотной области. В последнем случае это приводит к экономии вычислительных ресурсов. Основной вклад в теорию быстрых спектральных преобразований внесли Р. Блэйхут, Э. Опенгейм, Г. Дженкинс, Д. Ваттс, И.С. Гоноровский, А.М. Трахтман, В.А. Трахтман и др. Обычно построение устройств корреляционной обработки осуществляется на основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), требующего использования операции комплексного умножения. Известно, что реализация вейвлет-преобразования в базисе Хаара требует только операций сложения, что существенно уменьшает вычислительные затраты. При этом неизвестны структуры устройств корреляционной обработки в базисе Хаара ввиду инвариантности данного преобразования к временному сдвигу сигнала.

Цель работы. Основной целью диссертационной работы является разработка оптимальных интерполирующих функций и вейвлет-базисов, обеспечивающих снижение ошибок восстановления финитных во времени реализаций непрерывных СП, а также эффективных по вычислительным затратам алгоритмов корреляционной обработки сложных сигналов.

Поставленная цель работы включает решение следующих задач.

1. Синтез интерполирующих функций с учетом ограничений на реализуемость устройств обработки, оптимальных для заданного класса непрерывных финитных сигналов, уменьшающих эффекты наложения и усечения.
2. Разработка структуры восстанавливающих фильтров на основе решения обратной задачи методом регуляризации А.Н. Тихонова, обеспечивающих минимум ошибки восстановления сигнала.
3. Анализ реализации рекурсивных восстанавливающих фильтров, позволяющих уменьшить требования к аналоговому фильтру нижних частот без увеличения его порядка.
4. Разработка алгоритма синтеза вейвлет-базисов на основе синтезирующих функций с заданными характеристиками.
5. Синтез компактных вейвлет-базисов по критерию минимума произведения эффективной длительности на эффективную полосу частот скейлинг-функции.
6. Разработка базисных систем на основе разложения Карунена-Лоэва, обеспечивающих минимальную ошибку восстановления СП при заданном коэффициенте сжатия. Разработка алгоритма вейвлет-пакетного разложения с адаптацией базиса на каждом уровне разложения для обеспечения минимальной ошибки восстановления СП.

7. Разработка алгоритмов корреляционной обработки сложных сигналов на основе одноуровневого, а также двухуровневого вейвлет-пакетного разложения (ВПР).

8. Обоснование алгоритма корреляционной обработки сложных дискретных сигналов на основе ВПР с потерями, обеспечивающего снижение требуемого быстродействия.

Методы проведения исследований. В работе использовались методы статистической радиотехники и математической статистики, вариационного и матричного исчисления, вычислительной математики, решения некорректных задач, а также новейшие достижения в области вейвлет-анализа речевых сигналов и цифровой обработки информации. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями и результатами имитационного моделирования.

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

1. Разработаны синтезирующие функции позволяющие уменьшить ошибки восстановления непрерывных финитных во времени сигналов по сравнению с ранее известными, учитывающие априорные сведения о корреляционных свойствах исходного непрерывного финитного во времени сигнала.

2. Предложена аппроксимация весового множителя синтезирующей функции в дробно-рациональном виде, позволяющем оптимизировать коэффициенты при отсутствии априорных сведений о восстанавливаемом сигнале.

3. Проанализирована структура рекурсивного восстанавливающего фильтра, позволяющая уменьшить порядок аналогового фильтра при заданной точности восстановления сигнала.

4. Обоснован алгоритм синтеза вейвлет-базисов на основе восстанавливающей функции-прототипа с заданными характеристиками.

5. Произведен синтез максимально-компактных по критерию минимума произведения эффективной длительности на эффективную полосу частот скейлинг и вейвлет-функций, обеспечивающих уменьшение ошибки восстановления при сжатии речевых сигналов.

6. Разработан алгоритм синтеза вейвлет-базисов на основе разложения Карунена-Лоэва с использованием априорных сведений о корреляционных свойствах обрабатываемого сигнала.

7. Предложен алгоритм ВПР с адаптацией базиса на каждом уровне разложения, позволяющий построить алгоритмы сжатия речевых сигналов для передачи на скорости менее 4 кбит/с.

8. Предложены алгоритмы корреляционной обработки с потерями на основе преобразования Хаара, позволяющие снизить требования к быстродействию устройства обработки до двух раз, по сравнению с алгоритмами на основе быстрого преобразования Фурье.

Достоверность. Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается качественным и количественным сопоставлением результатов численных экспериментов с известными положениями теории ЦОС.

Практическая ценность. Представленные в работе алгоритмы восстановления СП на основе предложенных синтезирующих функций, а также алгоритмы вейвлет-анализа с синтезированными базисами могут быть эффективно использованы в таких радиотехнических устройствах, как системы передачи и устройства хранения

информации, системы радиотелеметрии и т.п. Кроме того, в работе предложены методы построения устройств корреляционной обработки, которые могут быть использованы в устройствах обнаружения сигналов спутниковых систем передачи информации. Результаты диссертационной работы нашли применение в действующей аппаратуре ФГУП «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения» и ООО «Конструкторское бюро «КрасГязьМаш», что подтверждено соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Синтезирующие функции, оптимальные по критерию минимума СКО для одноканальных и двухканальных устройств обработки, позволяющие снизить ошибки восстановления финитных во времени сигналов в 2...3 раза по сравнению с ранее известными алгоритмами на основе функции $\text{sinc}(t)$, сплайн-интерполяции и атомарных функций при частоте дискретизации, близкой к частоте В.А. Котельникова.

2. Алгоритм ВПР на основе интерполирующих функций-прототипов с адаптацией базиса на каждом уровне разложения с использованием представления Карунена-Лозва, обеспечивающий требуемое качество восстановления речевых сигналов при скорости передачи менее 4 кбит/с.

3. Алгоритмы корреляционной обработки на основе преобразования Хаара, обеспечивающие снижение количества требуемых вычислительных операций в 2 раза по сравнению с алгоритмами на основе быстрого преобразования Фурье, с уменьшением вероятности правильного обнаружения менее чем на 1 % при отношении сигнал-шум более -20 дБ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих научно-технических конференциях (НТК), семинарах и сессиях.

1. Научная сессия МИФИ -2004 г., г. Москва
2. МНТК «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А. Котельникова». 2003 г., г. Москва.
3. 10-я МНТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». 2004 г., г. Москва.
4. 8-я, 9-я всероссийская НТК студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании». 2002, 2004 гг., г. Рязань.
5. 6-я, 7-я, 8-я международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение». 2004, 2005, 2006 гг., г. Москва.
6. МНТК «Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов». 2004, 2006 гг., г. Москва.
7. 11-я, 13-я, 14-я МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». 2002, 2004, 2005 гг., г. Рязань.
8. Всероссийский научно-практический семинар «Сети и системы связи». 2005 г., г. Рязань.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ. Из них 4 статьи в центральной печати, 5 статей в научно-технических журналах и межвузовских сборниках трудов, 16 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 149 наименований и 2-х приложений. Диссертация содержит 130 страниц основного текста и 50 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены вопросы интерполяции непрерывных финитных во времени сигналов в устройствах ЦОС по комбинированному критерию минимума СКО:

$$J_1^2 = M \left\{ \int_0^T \left[(1-\alpha) \cdot \varepsilon^2(t) + \alpha \cdot \left(\frac{d}{dt} \varepsilon(t) \right)^2 \right] dt \right\} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $M\{\bullet\}$ - оператор математического ожидания, T - интервал обработки сигнала, α - постоянный параметр, изменяется в пределах от 0 до 1 при учете требований к практической реализации восстанавливающих фильтров в виде

$$M \left\{ \int_0^T w(t) \cdot \varepsilon^2(t) dt \right\} = const, \quad (2)$$

где $w(t)$ - весовая функция, учитывающая накладываемые ограничения. При $w(t) = k \cdot t + p \cdot t^2$ первое слагаемое вводит ограничение на «среднюю задержку», а второе – «степень сосредоточения» восстановленного сигнала относительно исходного; k, p - коэффициенты, учитывают вес первого и второго слагаемых.

Решена задача интерполяции для одноканальных устройств восстановления с использованием отсчетов сигнала, а также двухканальных устройств с дополнительным применением отсчетов первой производной при ограничении на реализуемость устройств обработки (2). Показано, что данная задача относится к классу изопериметрических задач вариационного исчисления и в результате ее решения получены синтезирующие функции $x(t)$ для одноканального устройства восстановления, а также синтезирующие функции $y(t)$ и $z(t)$ для канала сигнала и производной двухканального устройства восстановления:

$$x(t) = \frac{\text{sinc}(t)}{1 + \lambda \cdot w(t)}, \quad y(t) = \frac{\text{sinc}^2(t)}{1 + \lambda \cdot w(t)}, \quad z(t) = \frac{t \cdot \text{sinc}^2(t)}{1 + \lambda \cdot w(t)}, \quad (3)$$

где λ - множитель Лагранжа.

Показано, что расчет синтезирующих функций для финитных во времени реализаций СП возможен путем аппроксимации спектральной плотности мощности (СПМ) восстанавливаемого СП. Получены синтезирующие функции для восстановления финитных реализаций СП вида:

$$x(t) = \Gamma_G(t) \cdot \text{sinc}(t), \quad y(t) = \Gamma_G(t) \cdot \text{sinc}^2(t), \quad z(t) = \Gamma_G(t) \cdot \text{sinc}^2(t) \cdot t, \quad (4)$$

где $\Gamma_G(t)$ - корреляционная функция СП $g(t)$, которая является весовым множителем синтезирующих функций для одно- и двухканальных устройств восстановления непрерывных финитных во времени сигналов.

Предложено в случае отсутствия априорных сведений о корреляционных свойствах восстанавливаемого сигнала вести расчет синтезирующих функций на основе аппроксимации весового множителя в виде дробно-рациональной функции:

$$\Gamma_G(t) = P_n(t)/P_m(t), \quad m > n, \quad t \in T, \quad (5)$$

где $P_n(t) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot t^{2i}$, $P_m(t) = 1 + \sum_{i=1}^m b_i \cdot t^{2i}$. Показано, что параметры синтезирующей функции в этом случае можно выбирать путем оптимизации коэффициентов полиномов весового множителя. Вид синтезирующих функций $x(t)$ одноканального устройства восстановления СП, а также АЧХ восстанавливающих фильтров $|X(\omega)|$ при различном порядке полиномов весового множителя представлены на рис. 1.

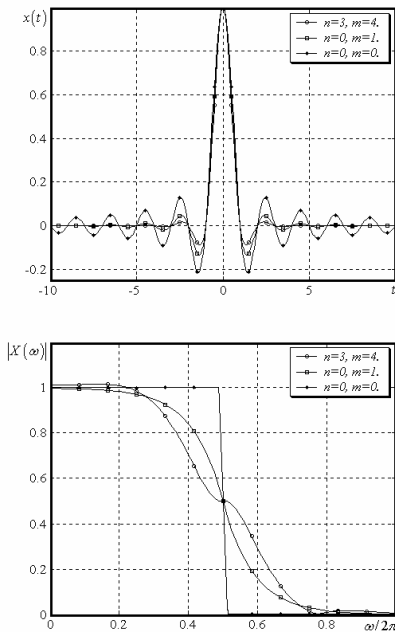


Рис. 1

устройства восстановления. Исследования проводились для реализаций СП в виде

полигармонического исходного сигнала $u(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot t + \varphi_i)$, где A_i –

амплитуды гармоник, равномерно распределены на интервале $[0, 1]$, f_i – частоты

гармоник, равномерно распределены на интервале $[0, 0.5]$ Гц, φ_i – начальная фаза

гармоники, равномерно распределена на интервале $[0, 2\pi]$ рад, $N = 10$ –

количество гармоник сигнала в эксперименте. Такая модель исходного сигнала является наиболее общей, поскольку охватывает весь заданный диапазон частот и

Как следует из анализа рис. 1, уровень боковых лепестков полученных синтезирующих функции меньше на 3...4 дБ, чем у функции вида $\text{sinc}(t)$,

рекомендованных теоремой В.А. Котельникова для

одноканальных устройств

восстановления. Это позволит в

случае использования разработанных

синтезирующих функций снизить

ошибки наложения и усечения при

восстановлении финитных во

времени реализаций СП. При этом

восстанавливающие фильтры могут

быть реализованы на основе

аналоговых фильтров относительно

низкого порядка, в отличие от

нереализуемого идеального ФНЧ.

Проведены экспериментальные

исследования алгоритмов

интерполяции с помощью

рассмотренных выше

синтезирующих функций в случае

одноканального и двухканального

амплитуд спектральных составляющих сигнала. В качестве синтезирующих функций были выбраны: 1) синтезирующие функции, оптимальные для заданного класса сигналов; 2) квазиоптимальные функции, полученные в результате аппроксимации оптимального весового множителя дробно-рациональной функцией; 3) сплайн порядка 3 дефекта 2; 4) атомарная функция $up(t)$. Порядок полиномов аппроксимации весового множителя выбирался исходя из требуемой точности восстановления: $n=3$, $m=4$, при этом была произведена предварительная оптимизация коэффициентов a_i , $i=1...n$ и b_j , $j=1...m$ при усреднении по ансамблю из 50 000 реализаций СП.

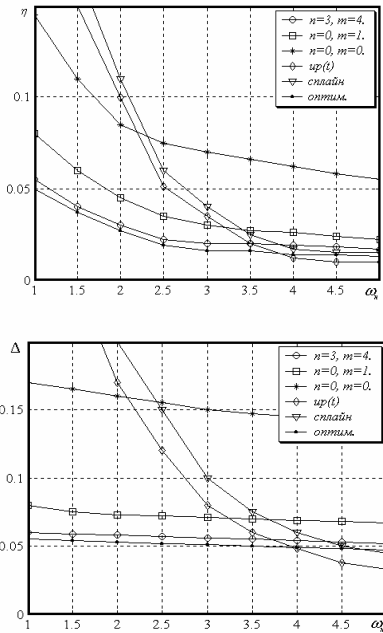


Рис. 2

требования к аналоговой части устройства. При этом для увеличения коэффициента экспандирования частоты дискретизации предложена структурная схема рекурсивного цифрового восстанавливающего фильтра, представленная на рис. 3.

Получены зависимости значения порядка аналогового фильтра P от коэффициента экспандирования цифрового рекурсивного фильтра K_e при коэффициенте подавления в полосе заграждения 60 дБ и коэффициенте неравномерности в полосе пропускания 0.1 дБ (см. таблицу).

K_e	1	2	4	8	16	32
P	27	4	3	2	2	2

На рис. 2 показаны усредненные по ансамблю реализаций СП зависимости нормированной к энергии сигнала средне-квадратической ошибки восстановления η и нормированной к максимальной по модулю ошибки (ММО) $\Delta = \Delta_{max}/\sqrt{E}$, E – энергия сигнала, от нормированной частоты дискретизации конечного во времени сигнала $\omega_n = \omega_d/\omega_K$, где ω_d – частота дискретизации, $\omega_K = 2\omega_e$ – частота В.А. Котельникова. Предварительно для заданного класса сигналов методом регуляризации были получены оптимальные синтезирующие функции.

При воспроизведении аудиозаписей с цифровых носителей применение цифрового нерекурсивного восстанавливающего фильтра перед аналоговым позволяет существенно снизить

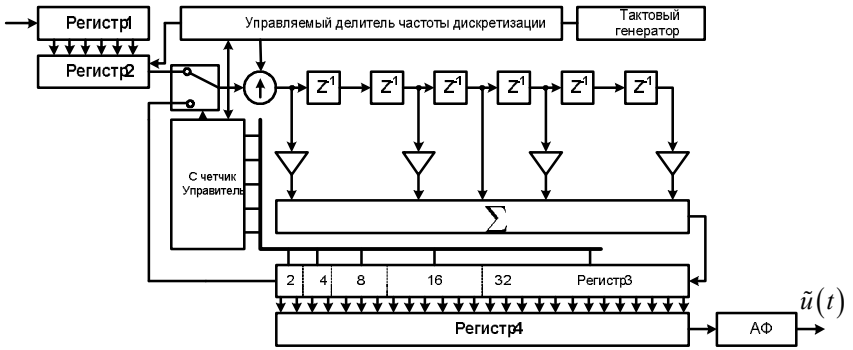


Рис. 3

Показано, что в случае отсутствия цифрового фильтра требуется аналоговый фильтр 27-го порядка, в то время как использование простейшего нерекурсивного цифрового фильтра при $K_e = 2$ позволяет уменьшить порядок аналогового фильтра до четырех, а использование рекурсивного цифрового фильтра при коэффициенте экспандирования $K_e \geq 8$ дает возможность максимального сокращения порядка аналогового фильтра до двух.

Во второй главе рассмотрены вопросы синтеза ортогональных, компактных по времени и частоте вейвлет-базисов. Алгоритмы вейвлет-анализа более приспособлены для обработки нестационарных СП в радиотехнических устройствах, чем алгоритмы на основе Фурье-анализа, поскольку при вейвлет-разложении сохраняется информация как о временных, так и о частотных свойствах сигнала. При этом задача синтеза вейвлет-базисов остается актуальной при отсутствии практических рекомендаций по выбору базисной системы для решения задачи сжатия речевых сигналов в радиотехнических устройствах.

Предложен алгоритм расчета ортогональных вейвлет-базисов на основе синтезирующей функции прототипа с заданными характеристиками для устройств ЦОС. Произведен расчет коэффициентов фильтра H -ветви разложения по формуле

$$h_n^0 = \int_{-\pi}^{\pi} M_0(\omega) \exp(j\omega n \Delta t) d\omega, \quad n \in Z, \quad (6)$$

где $M_0(\omega) = \sqrt{X_0(2\omega)/2}$, $X_0(\omega)$ - спектр синтезирующей функции прототипа $x(t)$, дискретизированной с шагом $\Delta t = 0,5$, h_n^0 , $n \in Z$ - коэффициенты вейвлет-фильтра H -ветви разложения, учитывающие сдвиги с шагом 0,5, из которых необходимо выделить коэффициенты соответствующие целочисленным сдвигам $h_n = h_{2n}^0$, $n \in Z$. Рассчитаны базисные функции согласно масштабирующему уравнению для скейлинг-функции $\varphi(t)$

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_{n \in Z} h_n \varphi(2t - n) \quad (7)$$

через их бесконечную свертку с коэффициентами вейвлет-фильтра H -ветви разложения.

Предложено для синтеза максимально-компактных базисных систем использовать критерий минимума произведения эффективной длительности $T_{эф}^2$ на эффективную полосу частот $\omega_{эф}^2$ скейлинг-функции $\varphi(t)$:

$$T_{эф}^2 \cdot \omega_{эф}^2 \rightarrow \min, T_{эф}^2 = (2\pi)^2 \int_{-\infty}^{\infty} t^2 \cdot |\varphi(t)|^2 dt / 2E, \omega_{эф}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 \cdot |\vartheta(\omega)|^2 d\omega / 4\pi E, \quad (8)$$

$\vartheta(\omega)$ - Фурье-спектр скейлинг-функции $\varphi(t)$, E - энергия $\varphi(t)$.

На рис. 4 представлен вид максимально-компактной по критерию минимума произведения эффективной длительности на эффективную полосу частот скейлинг-функции $\varphi(t)$, вейвлет-функции $\psi(t)$, также их Фурье-спектров $\vartheta(\omega)$ и $\Psi(\omega)$ соответственно при эффективной длительности $T_{эф}^2 = 4$.

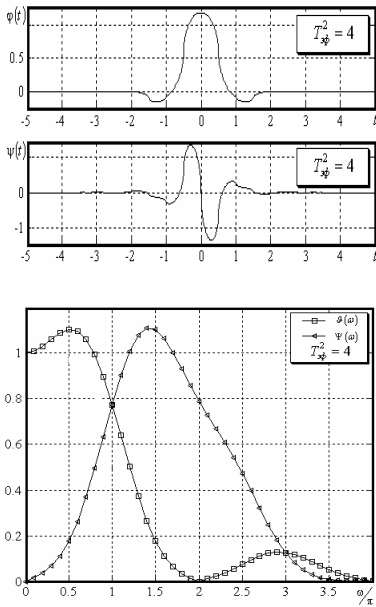


Рис. 4

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование разработанных максимально-компактных базисных систем для задач сжатия речевых сигналов позволило снизить ошибки восстановления при отбрасывании высокочастотной G-ветви разложения на 10...15 % по сравнению с базисными системами Добеши той же длительности.

Широкое распространение получили алгоритмы сжатия сигналов на основе ВПР. При этом рекомендации по выбору базисной системы для реализации алгоритма сжатия часто отсутствуют. Для этой цели возможно использование разложения Карунена-Лоэва, которое обеспечивает минимум ошибки восстановления при заданном количестве коэффициентов разложения. На практике применение разложения Карунена-Лоэва затруднено ввиду отсутствия быстрых

алгоритмов, а также необходимости использования априорных сведений о корреляционных свойствах СП. В связи с этим, предложено произвести синтез оптимальных алгоритмов ВПР по критерию минимума ошибки восстановления сигналов на основе разложения Карунена-Лоэва. Произведен расчет вейвлет-базиса на основе дискретизированной синтезирующей функции прототипа. Получено выражение для оптимальной синтезирующей функции прототипа, обеспечивающей минимум СКО восстановления при отбрасывании G-ветви ВПР на заданном уровне разложения:

$$X_o(\omega + 2\pi) = 2 \cdot \left(\exp\left(\frac{-j\omega}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{|U(\omega)|^2 + \beta \cdot Q(\omega)} \right)^2, \quad (9)$$

где $|U(\omega)|^2$ - спектральная плотность мощности обрабатываемого СП $u(t)$, $Q(\omega)$ - стабилизатор для исключения нулей в знаменателе, β - коэффициент при стабилизаторе, λ - множитель Лагранжа при решении вариационной задачи. Как следует из выражения (9), для расчета синтезирующей функции прототипа необходимы априорные сведения о корреляционных свойствах исходного СП $u(t)$.

При отсутствии априорных сведений о корреляционных свойствах исходного СП предложено использовать в качестве синтезирующей функции прототипа функции вида (4) при аппроксимации весового множителя дробно-рациональной функцией (5). При этом подбор коэффициентов полиномов аппроксимации (5) предложено вести по минимуму энергии G-ветви разложения. На рис. 5 представлена структурная схема адаптивного устройства сжатия сигналов на основе ВПР.

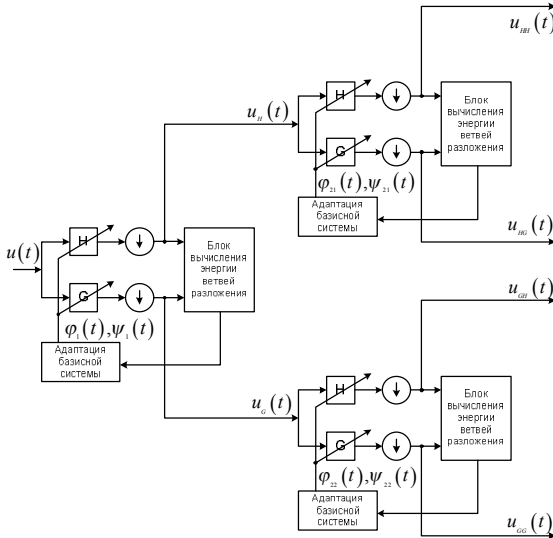


Рис. 5

ется наличие коэффициентов, синтезированных в процессе адаптации фильтров разложения.

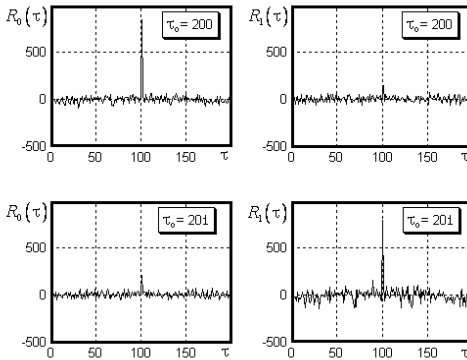
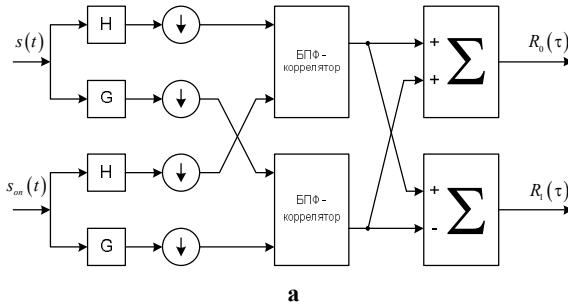
В третьей главе были рассмотрены вопросы снижения вычислительных затрат при корреляционной обработке сложных сигналов в устройствах ЦОС, а также вопросы кодирования речевых сигналов при адаптации базисных систем ВПР на каждом уровне разложения.

Разработаны структурные схемы оптимальных устройств корреляционной обработки сложных сигналов, а также устройств корреляционной обработки с потерями на основе ВПР в базисе Хаара, обеспечивающие снижение требуемого количества вычислительных операций в 2 раза по сравнению с алгоритмами на основе быстрого преобразования Фурье. Обоснована необходимость использования каналов четного и нечетного сдвигов в устройстве обработки. На рис. 6,а приведена

В каждой ветви разложения по критерию минимума энергии на выходе G-ветви производится адаптация базисной системы. Адаптация заключается в оптимизации коэффициентов полиномов аппроксимации весового множителя синтезирующей функции прототипа, с последующим синтезом коэффициентов H и G фильтров разложения. Такая процедура не требует априорных сведений о корреляционных свойствах СП $u(t)$, но для восстановления сигнала требуется

структурная схема устройства корреляционной обработки с потерями на основе суммарно-разностного выделения задержки принятого сигнала относительно опорного, а также результаты компьютерного моделирования его работы (рис. 6,б).

Принятый и опорный сигналы $s(t)$ и $s_{on}(t)$ подвергаются одноуровневому ВПР в базисе Хаара, на выходе каждой ветви которого количество отсчетов сигнала уменьшается в 2 раза. После осуществляется свертка соответствующих ветвей разложения принятого и опорного сигналов на основе БПФ-алгоритма. Таким образом, получаются взаимные корреляционные функции H- и G-ветвей разложения принятого и опорного сигналов, при этом их сумма составляет функцию четных сдвигов $R_0(\tau)$, а разность - функцию нечетных сдвигов $R_1(\tau)$.



б
Рис. 6

обработки на основе алгоритма БПФ за счет выполнения двух более коротких свертки вместо одной длинной. В работе также обоснованы структурные схемы устройств корреляционной обработки с потерями, обеспечивающие снижение требуемого количества вычислительных затрат в 2 раза по сравнению с алгоритмами на основе алгоритма БПФ для сложных фазоманипулированных сигналов.

Зависимости вероятности правильного обнаружения сигналов P_D от отношения сигнал-шум q при фиксированной вероятности ложной тревоги, равной 0,001, сигналов командно-измерительной системы группировки космических

На рис. 6,б показан вид взаимных корреляционных функций четных и нечетных сдвигов при $\tau_0 = 200$ и $\tau_0 = 201$. Как следует из анализа рис. 6,б, при $\tau_0 = 200$ в канале четных сдвигов проявляется пик при $\tau = 100$, такой же пик проявляется и в канале нечетных сдвигов при $\tau_0 = 201$. Представленный алгоритм обладает потерями, обусловленными возрастанием уровня боковых лепестков в канале нечетных сдвигов. Использование данного алгоритма позволяет снизить количество требуемых вычислительных операций на 25 % по сравнению с применением устройства корреляционной

спутников и комплекса управления космическими аппаратами «Kazsat» представлены на рис. 7. Как следует из анализа рис. 7, использование одноуровневого ВПР приводит к проигрышу по вероятности правильного обнаружения менее 0,5 %, а использование двухуровневого ВПР приводит к проигрышу менее 1 % при отношении сигнал-шум более -20 дБ.

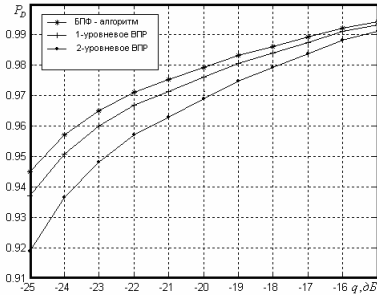


Рис. 7

На основе ВПР с адаптацией базиса на разных уровнях разложения, разработан алгоритм сжатия речевых сигналов, обеспечивающий качество восстановления не ниже, чем в системах IP-телефонии при скорости передачи равной, 3,78 кбит/с.

Структурная схема устройства сжатия речевых сигналов для передачи в системах IP-телефонии представлена на рис. 8. Отсчеты входного сигнала подаются на блок ВПР с адаптацией базиса в каждой ветви разложения, представленной на рис. 5.

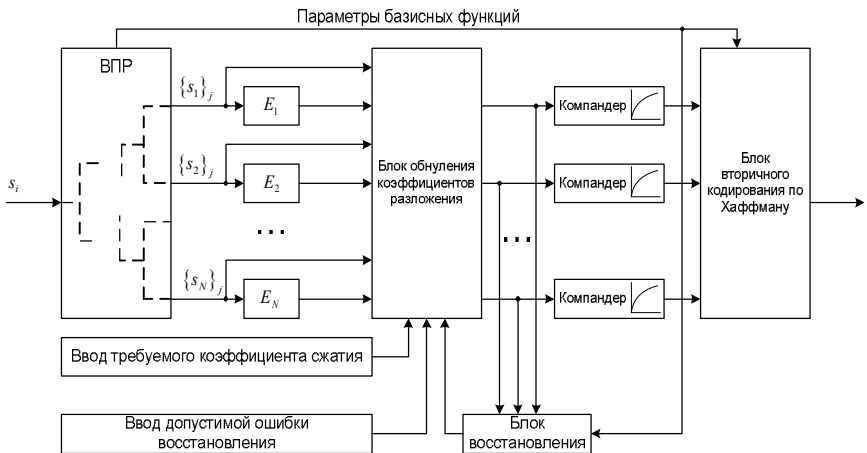


Рис. 8

При заданном коэффициенте сжатия обнуляются коэффициенты разложения в ветвях с меньшей энергией сигнала. Оставшиеся отсчеты, отличные от нуля, подвергаются компандированию и кодированию по Хаффману. Если требуется передать информацию с заданной точностью, то обнуляются только ветви разложения, обеспечивающие ошибку восстановления не более заданной величины. При этом вторичному кодированию по Хаффману подвергаются дополнительно параметры базисных функций, полученные в результате адаптации в каждой ветви разложения. Блок восстановления необходим для расчета ошибки после обнуления коэффициентов разложения в заданных ветвях.

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

1. В результате решения задачи интерполяции получены синтезирующие функции, оптимальные по критерию минимума СКО, для одноканальной и двухканальной систем восстановления при ограничении на реализуемость устройств обработки, позволяющие снизить ошибки восстановления финитных во времени сигналов в 2...3 раза по сравнению с ранее известными алгоритмами на основе функции $\text{sinc}(t)$, сплайн-интерполяции и атомарных функций при частоте дискретизации, близкой к частоте В.А. Котельникова.

2. При использовании метода регуляризации А.Н. Тихонова получены оптимальные синтезирующие функции, обеспечивающие в среднем на порядок меньшие ошибки восстановления, чем ранее известные синтезирующие функции, при изменении спектрального состава сигнала.

3. Предложены квазиоптимальные синтезирующие функции в виде дробно-рациональной функции. Показано, что использование порядков полиномов квазиоптимальных синтезирующих функций $n > 3$, $m > 4$ обеспечивает проигрыш по сравнению с оптимальной синтезирующей функцией при восстановлении сигнала менее чем на 0.5 % по СКО и менее чем на 0.4 % по ММО. Использование квазиоптимальных синтезирующих функций при аппроксимации весового множителя оптимальной синтезирующей функции позволило производить параметрическую адаптацию восстанавливающих фильтров при отсутствии априорных сведений о корреляционных свойствах сигнала путем оптимизации коэффициентов полиномов весового множителя.

4. Произведен анализ реализации восстанавливающих фильтров на основе цифровых рекурсивных фильтров, позволяющих снизить порядок аналогового восстанавливающего фильтра с 29 до 2 без ухудшения качества восстановления сигнала, а также снизить порядок рекурсивного восстанавливающего фильтра по сравнению с нерекурсивным с 208 до 13 при той же точности восстановления.

5. Показано, что применение предложенных компактных базисных функций позволяет снизить СКО восстановления на 10...15 % по сравнению с базисами Добеши.

6. Произведен синтез базисных систем ВПР на основе представления Карунена-Лоэва, адаптированных для обработки заданного типа СП, позволяющих получить минимально-возможную ошибку восстановления.

7. Разработан алгоритм ВПР с адаптацией базиса на каждом уровне на основе разложения Карунена-Лоэва, обеспечивающий минимально возможную СКО восстановления.

8. Разработан алгоритм корреляционной обработки с потерями на основе одноуровневого ВПР в базисе Хаара в N-ветви разложения, позволяющий снизить количество требуемых вычислительных операций в 2 раза по сравнению с использованием БПФ-алгоритма. При этом проигрыш по вероятности правильного обнаружения составляет менее 1 % для узкополосных сигналов КИС ГПКС и комплекса управления НКУ КА «Kazsat» и менее 2 % для UQPSK сигналов системы «Клен-Р» при одном и том же отношении сигнал-шум.

9. Разработан алгоритм корреляционной обработки с потерями на основе двухуровневого ВПР в базисе Хаара в N-ветви разложения, позволяющий дополнительно снизить количество требуемых вычислительных операций на 10 % по сравнению с алгоритмом корреляционной обработки с потерями на основе

одноуровневого ВПР. При этом проигрыш по вероятности правильного обнаружения составляет менее 2 % для сигналов КИС ГПКС и комплекса управления НКУ КА «Kazsat» и менее 4 % для UQPSK сигналов системы «Клен-Р» при одном и том же отношении сигнал-шум.

10. Разработан алгоритм сжатия речевых сигналов на основе ВПР с адаптацией базиса на разных уровнях разложения, обеспечивающий качество восстановления не хуже чем в системах IP-телефонии при скорости передачи, равной 3,78 кбит/с.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н., Бахурин С.А. Алгоритм снижения динамического диапазона ошибки интерполяции при восстановлении сигналов по дискретным выборкам в системах многоканальной связи // 11-я международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2002. С. 24.

2. Бахурин С.А. Восстановление финитных сигналов с использованием ограничений на синтезирующую функцию // 8-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТА, 2002. С. 56-58.

3. Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Интерполяция сигналов с учетом реализуемости восстанавливающих фильтров // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах. Рязань: РГРТА, 2003. С.19-22.

4. Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н., Дмитриев В.Т., Бахурин С.А. Практические аспекты реализации алгоритмов обработки при дискретизации с использованием отсчетов функции и ее производной // Международная научно-техническая конференция «Современная радиоэлектроника в ретроспективе идей В.А. Котельникова». М.: МЭИ, 2003. С. 24-25.

5. Дмитриев В.Т., Бахурин С.А. Исследование точности алгоритмов оценки отсчетов производной в радиотехнических устройствах // Вестник РГРТА. Выпуск 13, 2003. С. 32-35.

6. Бахурин С.А. Алгоритмы восстановления финитных во времени сигналов в телекоммуникациях // IX всероссийская научно-техническая конференция студентов молодых ученых и специалистов НИТ-2004. Рязань: РГРТА, 2004. С.65.

7. Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Уменьшение ошибок усечения при интерполяции функций в пространстве Соболева // Научная сессия МИФИ – 2004. Сборник научных трудов. Т. 12. С.143.

8. Бахурин С.А. Использование распараллеливания вычислительных операций в цифровых радиотехнических устройствах на основе программируемых логических интегральных схем // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2004. С.29-31.

9. Бахурин С.А. Восстановление функций на основе алгоритмов в пространстве С.Л. Соболева // Тезисы докладов 10-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: МЭИ, 2004. Т.1. С.89.

10. Дмитриев В.Т., Бахурин С.А. Точность формирования производной при восстановлении сигнала на основе алгоритма Хургина-Яковлева // Тезисы докладов

10-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: МЭИ, 2004. Т.1. С.18-19.

11.Кириллов С.Н., Зорин С.В., Бахурин С.А. Синтез оптимальных скейлинг и интерполирующих функций при ограничении на реализуемость устройств обработки // Доклады 6-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2004. Т.1. С. 30-32.

12.Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т., Бахурин С.А. Применение алгоритма Хургина-Яковлева в системах речевой подписи, скремблирования и реставрации фонограмм // Сборник трудов 8-й международной научной конференции «Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов». Москва, 2004. С.387-390.

13.Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Слесарев А.С. Быстрые алгоритмы поиска и слежения за спутниковыми навигационными радиосигналами в программно реализованном приемнике // Доклады 7-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва, 2005. Т.1. С. 271-274.

14.Бахурин С.А. Анализ практической реализации интерполирующих функций при восстановлении финитных во времени сигналов // Методы и устройства формирования и обработки сигналов в радиотехнических системах. Рязань, 2004 г. С.19-22.

15.Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Алгоритм синтеза вейвлет-базисов заданной длительности на основе интерполирующей функции // Доклады 7-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2005. Т.1. С. 98-101.

16.Круглов А.В., Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Алгоритм управления космическим аппаратом на основе комбинированного критерия минимума среднего квадрата ошибки в условиях действия нестационарных помех // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. Вып.1. 2005. С. 69-78.

17.Бахурин С.А., Слесарев А.С.Быстрые алгоритмы корреляционной обработки сигналов спутниковых систем передачи информации // Тезисы докладов всероссийского научно-практического семинара «Сети и системы связи». Рязань, 2005. С. 278-279.

18.Бахурин С.А. Алгоритм синтеза вейвлет-базисов заданной длительности на основе интерполирующих функций // Вестник РГРТА. Вып.15, 2005. С.117-120.

19.Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Исследование каскадного соединения цифрового и аналогового восстанавливающих фильтров при интерполяции непрерывных сигналов // Тезисы докладов 14-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2005 . С.60-61.

20.Круглов А.В., Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Слесарев А.С., Ватугин В.М. Быстрые алгоритмы обработки фазоманипулированных сигналов в системах передачи информации радиолиний управления и телеметрии космических аппаратов // Электромагнитные волны и электронные системы. № 10. 2005. С.57-65.

21.Круглов А.В., Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Дмитриев А.С., Ватугин В.М. Эффективная обработка сигналов радиолиний управления и телеметрии на основе алгоритма Хургина-Яковлева // Электромагнитные волны и электронные системы. № 11-12. 2005. С.83-89.

22.Бахурин С.А., Цыплаков А.А. Синтез кодовых последовательностей с минимальным уровнем боковых лепестков на основе вейвлет-пакетного разложения //

Материалы 31-й Межвузовской научно-практической конференции. Рязань, 2006 г. С.155.

23.Леонов М.С., Круглов А.В., Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Слесарев А.С., Ватугин В.М., Смирнов С.В. Быстрые алгоритмы корреляционной обработки сигналов радиолиний передачи информационно-управляющих потоков // Тезисы докладов научно-технической конференции ФГУП «РНИИ КП», посвященной 60-летию предприятия. С.158.

24.Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Интерполяция финитных во времени сигналов с учетом реализуемости восстанавливающих фильтров // Автометрия. №6, 2006. С. 3-13.

25.Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Алгоритм интерполяции финитных во времени сигналов на основе регуляризованных по А.Н. Тихонову восстанавливающих функций // Вестник РГРТА. Выпуск 17, 2006. С. 3-7.

Соискатель _____



/ С.А. Бахурин /

Бахурин Сергей Алексеевич

**Оптимальные алгоритмы восстановления и вейвлет-анализа
финитных во времени сигналов в радиотехнических
устройствах**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

Отпечатано в ГНУ ВНИМС,
Рязань, Щорса 38/1
Формат бумаги 60×84 1/16.
Печатных листов 1.
Заказ № 24. Тираж 100 экз.
«26» марта 2007 г.