

УДК 621.39

МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Кириллов С.Н., д.т.н., проректор по научной работе Рязанского государственного радиотехнического университета, заведующий кафедрой радиоуправления и связи, e-mail: nich@rsreu.ru
Бузыканов С.Н., к.т.н., доцент Рязанского государственного радиотехнического университета, e-mail: BuzykanovS@mail.ru

Ключевые слова: многокритериальный синтез, цифровая обработка сигналов, синтез радиотехнических устройств, робастные системы обработки, адаптивная обработка сигналов.

Обоснование многокритериального подхода к синтезу алгоритмов и методов цифровой обработки сигналов

Оптимальный синтез алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) является актуальной задачей с момента появления цифровых систем. Постоянное повышение требований к качеству ЦОС приводит к необходимости разработки все новых и новых алгоритмов, обеспечивающих не только решение основной задачи обработки, но и соблюдение различных дополнительных ограничений, существующих в реальных системах. При этом, как показано в [1], использование при синтезе алгоритмов ЦОС только одного критерия часто приводит к резкому ухудшению других свойств или вообще к неприемлемым результатам.

Для разработки современных высокоэффективных алгоритмов ЦОС предложено использовать математический аппарат многокритериального синтеза, что позволяет получать более устойчивые и адекватные алгоритмы ЦОС. К основным преимуществам, которые предоставляет аппарат многокритериального синтеза, можно отнести:

- снижение апертюры выходного сигнала и значения абсолютной величины ошибки, т.е. модуля максимального отклонения от истинного значения сигнала, что особенно важно для цифровых систем обработки;
- повышение устойчивости результатов ЦОС на выходе к неточности задания исходных данных;
- увеличение быстродействия алгоритмов ЦОС;
- обеспечение физической реализуемости полученных решений с учетом ряда ограничений.

Многокритериальный синтез цифровых фильтров обработки сигналов

Цифровые устройства, к которым прежде всего относятся цифровые фильтры (ЦФ), находят широкое применение в различных радиотехнических системах (РТС) [2...27], где осуществляется обработка сигналов, сжатие данных, анализ спектров, адаптивная коррекция каналов связи, моделирование динамических систем и т.п. Основные преимущества использования ЦФ, по сравне-

Рассмотрены методы многокритериального синтеза алгоритмов цифровой обработки сигналов. Показана эффективность использования данного математического аппарата на примере синтеза цифровых фильтров и базисных систем, что позволяет существенно повысить точность и быстродействие цифровой обработки.

нию с аналоговыми, обусловлены большими возможностями практической реализации заданных технических характеристик и созданием на их базе различных адаптивных систем.

Наиболее часто при синтезе ЦФ используется критерий минимума среднеквадратической ошибки (СКО). Критерий минимума СКО позволяет получить структуру алгоритмов ЦОС, а также аналитическое решение в реальном масштабе времени, однако показывает удовлетворительные результаты только в случае стационарных входных сигналов. Воздействие сигнала с изменяющимися характеристиками на вход устройств ЦОС, оптимальных по критерию минимума СКО, приводит к резкому возрастанию ошибки, недопустимому для систем с ограниченной апертурой.

Для синтеза устойчивых ЦФ и алгоритмов ЦОС [3, 5, 6, 9, 12 и др.] предлагается использовать комбинированный критерий минимума СКО

$$\varepsilon = \min \sum^n [(1 - \alpha)e^2(n) + \alpha\Delta e^2(n)], \quad (1)$$

где $0 \leq \alpha < 1$, $e(n)$, $\Delta e(n)$ – ошибка фильтрации и ее производная соответственно. Второе слагаемое в критерии (1) ограничивает дисперсию скорости изменения ошибки и, следовательно, косвенно влияет на величину модуля максимальной ошибки на выходе фильтра, а также повышает точность и устойчивость работы адаптивных предсказателей. При $\alpha = 0$ выражение (1) переходит в известный критерий минимума СКО. Достоинством критерия (1), как и известного критерия СКО, является возможность использования алгоритмов линейной алгебры, позволяющих получать решения в реальном масштабе времени.

При синтезе неадаптивных фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) [2] применение предложенного критерия обеспечивает на 2...28% меньший порядок ЦФ при равной ширине переходной полосы или на 3...30% меньшую ширину переходной полосы при равных порядках КИХ-фильтров. Доказана [4] целесообразность использования предложенного критерия к синтезу весовых фильтров сжатия, устойчивых к влиянию искажений.

Синтезированные фильтры по своим характеристикам превосходят известные весовые фильтры и могут быть эффективно использованы в соответствующих радиотехнических системах.

Эффективным методом преодоления априорной неопределенности при решении задач приема и обработки информации является применение адаптивных систем. Здесь под адаптацией понимается процесс оптимальной перестройки структуры и параметров устройства обработки сигнала в соответствии с заданным критерием качества. В [5...7, 13] показано, что адаптивные системы можно рассматривать как нелинейные системы с изменяющимися во времени параметрами. Простейшим и широко применяемым адаптивным устройством обработки сигнала является линейный сумматор, реализуемый в виде нерекурсивного фильтра (НФ). При этом наиболее распространенным методом коррекции коэффициентов адаптивных НФ является метод наименьших квадратов (МНК). Достоинствами данного метода является простота, эффективность и возможность определения коэффициентов НФ практически в реальном масштабе времени. В силу ограниченности апертуры большинства РТС большее значение приобретает критерий, минимизирующий динамический диапазон сигнала ошибки на выходе ЦФ. Практическая реализация этого критерия приводит к необходимости использования методов оптимизации, требующих значительного объема вычислений, что делает невозможным функционирование ЦФ в реальном масштабе времени. В связи с этим возникает интерес к поиску некоторых комбинированных критериев оптимизации коэффициентов ЦФ, сочетающих достоинства алгоритма МНК с одной стороны и возможность уменьшения динамического диапазона сигнала ошибки на выходе фильтра с другой.

В ходе многокритериального синтеза алгоритмов ЦОС рассмотрены некоторые возможности применения данного подхода при вычислении коэффициентов ЦФ [12...17]. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что комбинированный критерий (1) может быть использован при оптимизации в реальном масштабе времени коэффициентов адаптивных ЦФ КИХ-типа в тех случаях, когда требуется уменьшить динамический диапазон сигнала ошибки на выходе фильтра. В зависимости от задач, решаемых РТС, и требований к быстродействию вычисления коэффициентов могут использоваться те или иные критерии качества. Такими критериями качества в случае вычисления коэффициентов ЦФ по методу «окна» могут быть ширина переходной полосы и уровень пульсаций, тогда как требование высокого быстродействия вычисления коэффициентов адаптивных ЦФ заставляет применять алгоритмы МНК. Предложены различные варианты построения структуры устойчивой системы идентификации коэффициентов БИХ-фильтра [6, 13, 15...17]. Одна из них – система идентификации коэффициентов по раздельной ошибке ε'_k и ε''_k для рекурсивной и нерекурсивной частей адаптивного фильтра (АФ), представлена на рис. 1, где x_k – реализация входного сигнала, y_k – эталонный сигнал, формируемый моделирующим фильтром, АФ1 – адаптивный КИХ-фильтр для нерекур-

сивной части МФ; АФ2 – адаптивный КИХ-фильтр для рекурсивной части МФ, МФ – моделирующий фильтр, АФ3 – обратный адаптивный КИХ-фильтр для нерекурсивной части МФ; АФ4 – обратный адаптивный КИХ-фильтр для рекурсивной части МФ, АА1 – алгоритм адаптации для КИХ-фильтра АФ1; АА2 – алгоритм адаптации для обратного КИХ-фильтра АФ2; А1 – алгоритм вычисления обратного КИХ-фильтра АФ3 для нерекурсивной части МФ, А2 – алгоритм вычисления обратного КИХ-фильтра АФ4 для рекурсивной части МФ.

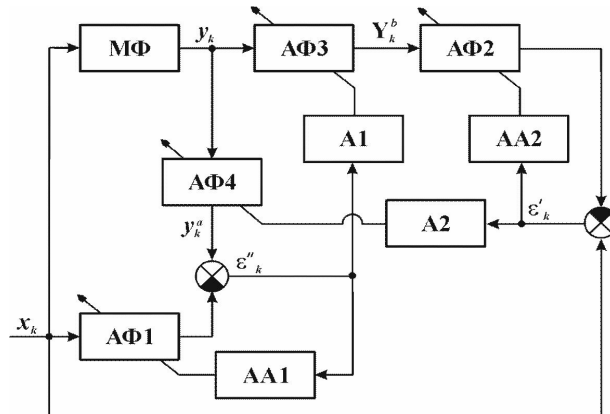


Рис. 1. Предложенная структура устойчивой системы идентификации коэффициентов БИХ-фильтра по раздельной ошибке для рекурсивной и нерекурсивной частей АФ

Экспериментальные исследования, проводимые методом численного моделирования предложенных систем идентификации при различных начальных условиях, показали [13, 15], что введение обратных адаптивных фильтров АФ3, АФ4 в предложенный алгоритм позволило обеспечить в 18 раз более высокую точность аппроксимации АЧХ и ФЧХ фильтра по сравнению с существующими алгоритмами на основе адаптации по общей ошибке. Основными результатами, полученными при многокритериальном синтезе устройств ЦОС, являются:

- предложен априорно-устойчивый квазиоптимальный алгоритм адаптации коэффициентов БИХ-фильтров на основе независимого прямого и обратного моделирования нерекурсивной и рекурсивной частей передаточной функции цифрового фильтра [13], позволяющий в 2 раза повысить показатели качества работы системы;
- обоснован и исследован модифицированный критерий оптимизации коэффициентов адаптивного фильтра [10, 12, 13, 15], использующий информацию о скорости изменения погрешности адаптации, позволяющий на 40...50% снизить порядок фильтра при тех же показателях качества работы (применение данного критерия к фильтрам речевого сигнала (РС) позволило повысить максимальное отношение сигнал-шум на 4...6 дБ);
- разработан алгоритм синтеза коэффициентов весовых фильтров сжатия ФМн сигналов [12, 14], устойчивых к влиянию искажений, что приводит к снижению на 2 дБ уровня боковых лепестков сигнала по сравнению с существующими методами синтеза;
- обоснован алгоритм адаптации коэффициентов ЦФ на основе комбинированного метода наименьших квадратов [11, 18], при этом доказана возможность уменьшения в 1,5...3,5 раз параметра сходимости и в 1,1 раза

дисперсии оценки градиента, кроме того обеспечивает большая устойчивость к аддитивным помехам;

– предложена реализация ЦФ на основе искусственных нейронных сетей [38], что позволяет уменьшить ошибки оценивания в условиях априорной неопределенности относительно характеристик обрабатываемого сигнала.

Многокритериальный синтез базисных систем

Широкое распространение в современных цифровых РТС получили методы обобщенной спектральной обработки, когда исходный сигнал анализируется в некотором заданном базисе, позволяющем выявить его характерные свойства. В частности, наиболее известными являются базисы Карунена-Лозва, Фурье, Уолша, Кристенсона и др. Однако, в связи с необходимостью обработки нестационарных сигналов важным условием обработки является локализованность базисных функций. Этому критерию отвечают вейвлет-функции (ВФ), теория которых появилась в конце девяностых годов прошлого века.

Существует множество вариантов построения ВФ, однако большинство из этих вариантов в процессе синтеза учитывают только один основной критерий, что приводит к существенному ухудшению других показателей. В связи с этим были проведены исследования алгоритмов многокритериального синтеза базисных ВФ [28...41]. Было показано, что разработанные функции позволяют существенно повысить качество работы алгоритмов анализа сигналов, в частности, повысить качество сжатого РС.

В результате проведенных исследований предложены методы [22] построения системы банков фильтров с бесконечной длительностью импульсной характеристики, имеющей аналитическую форму записи. По сравнению с известной системой банков фильтров К. Шеннона предложенная система в среднем выигрывает по уровню боковых лепестков амплитудно-частотной характеристики на 17 дБ, по уровню подавления сигнала в зоне заграждения на 10 дБ и по дисперсии ошибки восстановления на 15 дБ. При этом конкретный выигрыш зависит от количества фильтров в системе и относительной ширины переходной полосы. Произведен синтез [20, 37, 38, 41] максимально-компактных вейвлет-базисов на основе интерполирующей функции-прототипа по критерию минимума произведения эффективной длительности на эффективную полосу частот базисной скейлинг-функции, обеспечивающей снижение среднеквадратической ошибки восстановления при отбрасывании G-ветви разложения по сравнению с базисными функциями Добеши соответствующего порядка. Предложен алгоритм сжатия РС на основе вейвлет-пакетного разложения с адаптацией базиса на каждом уровне, позволяющий снизить скорость передачи РС до 4 кбит/с в системах IP-телефонии. Реализация предложенных алгоритмов произведена на основе искусственных нейронных сетей, что обеспечивает гибкость и унификацию создаваемых систем. Получено выражение [32] для дисперсии ошибки восстановления

случайного стационарного сигнала при отбрасывании ВЧ или НЧ его компонентов в случае биортогональных вейвлет-функций. Разработаны процедуры [37] оптимизации локальных базисов с перекрывающейся областью определения, обеспечивающие минимум среднеквадратической ошибки восстановления сигнала. Показано, что выигрыш по дисперсии ошибки восстановления РС в случае полученных базисов по сравнению с известными локальными тригонометрическими базисами составляет в зависимости от коэффициента сжатия и формы корреляционной функции обрабатываемой реализации фонемы от 40 до 500%.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости дисперсии D_s ошибки восстановления РС, нормированной к единице, от глубины разложения d для трех значений коэффициента сжатия ($K_c = 4$ – кривая 1; $K_c = 2,7$ – кривая 2; $K_c = 2$ – кривая 3).

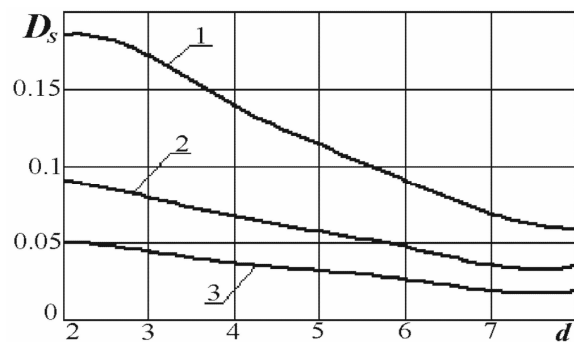


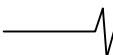
Рис. 2. Зависимости дисперсии ошибки восстановления РС от глубины разложения для различных значений коэффициента сжатия

Из анализа рис. 2 следует, что с ростом глубины разложения дисперсия ошибки восстановления сначала достаточно быстро уменьшается, а затем изменяется незначительно и даже начинает немного возрастать. Проведенные исследования показали, что предложенные ВФ обеспечивают качество речи $K = 4.5$ (ВФ класса Мейера), $K = 4.3$ (ВФ на основе рекурсивных фильтров) и $K = 4.1$ (ВФ на основе схемы лифтинга), в то время как ВФ Добеши 3-го порядка – $K = 3.9$, т.е. увеличение качества речи составляет 0.6, 0.4 и 0.2 балла, соответственно.

Дальнейшим развитием теории многокритериального синтеза базисных функций является переход к обработке сигналов в весовом пространстве Соболева (ВПС), накладывающем дополнительные ограничения на энергию производной сигнала [33, 34, 39, 40] и определяемом нормой функции вида:

$$\|f(t)\|_w = (1 - \alpha) \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} [f'(t)]^2 dt, \quad (2)$$

где α – весовой коэффициент пространства. Это позволяет обеспечить реализуемость базисных систем, а также повышает устойчивость получаемых решений. Разработаны методы расчета ВФ, ортогональных в ВПС, и исследованы их свойства [42]. Показано, что, например, применение данных функций в задачах сжатия изображений [42] приводит к повышению качества восстановленных изображений и увеличению степени concentra-



ции энергии в низкочастотной части спектра. Проведенные исследования показали [42], что применение для сжатия сигналов ВФ, ортогональных в ВПС, действительно позволяет существенно повысить качество восстановленных изображений. При повышении процента обнуляемых коэффициентов увеличивающиеся при обработке в пространстве L_2 артефакты приводят к существенному визуальному ухудшению изображения вплоть до невозможности его распознавания. В то же время обработка в весовом пространстве Соболева позволяет сохранить часть мелких деталей изображения и меньше искажает контуры, что повышает его визуальное качество и распознаваемость. Также были проведены исследования по многокритериальному синтезу других обобщенных базисов на основе различных ортогональных разложений как в пространстве L_2 , так и в весовом пространстве Соболева и показано преимущество данного подхода по сравнению с классическими методами [30...32, 36, 37, 41].

Заключение

Таким образом, в ходе многолетних научных исследований в области разработки методов многокритериального синтеза алгоритмов ЦОС с учетом мешающих факторов и ограничений удалось добиться существенного повышения показателей качества работы РТС. При этом разработаны новые цифровые алгоритмы, устойчивые к искажению сигналов, а также получены базисные системы, обеспечивающие повышение качество обработки и представления сигналов.

Литература

1. Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н., Дмитриев В.Т., Лоцманов А.А., Степанов М.В. «Практические аспекты применения алгоритмов цифровой фильтрации и обработки сигналов в радиотехнических системах. Часть 1. Перспективные методы цифровой фильтрации в радиотехнических системах». Под ред. Кириллова С.Н. Рязань. РГРТУ. 2009 ISBN 978-5-7722-0317-0, 272 с.
2. Кириллов С.Н., Соколов М.Ю. Оптимальные весовые функции при синтезе цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой // Радиотехника. 1999 №1. с. 80-81.
3. Кириллов С.Н., Степанов М.В. Комбинированный критерий оптимизации коэффициентов адаптивных фильтров с конечной импульсной характеристикой // Радиотехника. 1999. №2. с. 39-41.
4. Кириллов С.Н., Макаров Д.А., Бакке А.В. Многокритериальный синтез устойчивых к искажениям весовых фильтров сжатия фазоманипулированных сигналов // Радиотехника. 1999. №7. с. 15-19.
5. Кириллов С.Н., Степанов М.В. Оптимизация устройств цифровой обработки сигналов по комбинированному критерию минимума среднего квадрата ошибки // Цифровая обработка сигналов. 2000. №1. с. 27-32.
6. Кириллов С.Н., Степанов М.В. Оптимизация параметров АРСС – моделей по комбинированному критерию минимума среднего квадрата ошибки // Изв. Вузов Радиоэлектроника. 2000. №3. с. 21-26.
7. Кириллов С.Н., Степанов М.В., Виноградов О.А. Синтез адаптивных цифровых фильтров по комбинированному методу наименьших квадратов // Цифровая обработка сигналов. 2001, №1, с. 12-14.
8. Кириллов С.Н., Зорин С.В. Реализация алгоритмов вейвлет-анализа на основе рекурсивных фильтров // Радиотехника. 2002. №3 с. 33-37.
9. Кириллов С.Н., Зорин С.В. Оптимальное по критерию среднеквадратической ошибки вейвлетные представления случайных процессов // Цифровая обработка сигналов. 2002. №2. с. 32-35.
10. Кириллов С.Н., Шубин С.М. Робастные алгоритмы оптимизации коэффициентов нерекурсивных фильтров по комбинированному критерию минимума среднего квадрата ошибки // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 2003, т.46, №1, с. 69-73.
11. Кириллов С.Н., Виноградов О.А. Двухэтапная процедура оптимизации коэффициентов рекурсивных фильтров // Цифровая обработка сигналов. 2003. №28. с. 2-4.
12. Кириллов С.Н. Поспелов А.В. Многокритериальный синтез коэффициентов весового фильтра сжатия сигналов с линейной частотной манипуляцией // Изв. вузов. Радиоэлектроника, 2003, №7, с. 77-80.
13. Кириллов С.Н. Лоцманов А.А. Устойчивый квазиоптимальный алгоритм адаптации цифровых фильтров с бесконечной импульсной характеристикой // Радиотехника. 2003. №12 с. 31-35.
14. Кириллов С.Н. Поспелов А.В. Полифазная реализация цифровой когерентной обработки сигналов с минимальной частотной манипуляцией // Цифровая обработка сигналов. 2004. №1. с. 6-10.
15. Кириллов С.Н. Лоцманов А.А. Алгоритм адаптации нелинейных нерекурсивных фильтров на основе метода наименьших квадратов // Радиотехника. 2004 №4 с. 25-27.
16. Кириллов С.Н. Лоцманов А.А. Адаптивный дифференциальный импульсно-кодированный модулятор с нелинейным фильтром предсказателем // Электросвязь. 2004. №5 с. 36-38.
17. Кириллов С.Н. Лоцманов А.А. Линеаризации проходной амплитудной характеристики широкополосного усилителя мощности CDMA с использованием адаптивного нелинейного инерционного фильтра // Электросвязь. 2004. №12. с. 29-30.
18. Кириллов С.Н., Круглов А.В., Бахурин С.А. Алгоритм управления космическим аппаратом на основе комбинированного критерия минимума среднего квадрата ошибки в условиях действия нестационарных полей // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. Вып 1. 2005 с. 69-78.
19. Кириллов С.Н., Круглов А.В., Бахурин С.А., Слесарев А.С. Быстрые алгоритмы обработки фазоманипулированных сигналов в системах передачи информации радиолиний управления и телеметрии космических аппаратов // Электромагнитные волны и электронные системы. Т.10, №10, 2005, с. 27-30.
20. Кириллов С.Н., Круглов А.В., Хахулин С.С. Алгоритм обработки шумоподобных сигналов спутниковых систем связи на основе искусственных нейронных сетей // Электромагнитные волны и электронные системы. т.10. № 10. 2005. с. 33-38.

21. Кириллов С.Н., Круглов А.В., Дронов А.Н. Устройства обработки фазоманипулированных сигналов на основе полифазного представления в спутниковых системах передачи информации // Электромагнитные волны и электронные системы. т.10. №11. 2005. с. 41-44.
22. Кириллов С.Н., Зорин С.В. Проектирование фильтров на основе теории кратномасштабного анализа // Цифровая обработка сигналов. 2005. №4. с. 9-15.
23. Кириллов С.Н., Круглов А.В., Бахурин С.А., Хахулин С.С. Алгоритмы цифровой обработки сигналов на основе вейвлетных разложений в радиотехнических устройствах// Цифровая обработка сигналов. №1. 2007, с. 25-33.
24. Кириллов С.Н., Ватутин В.М., Бахурин С.А., Леонов М.С., Круглов А.В., Слесарев А.С., Смирнов С.В. Модели и быстрые алгоритмы корреляционной обработки сигналов радиотехнических систем // Информационно-измерительные и управляющие системы. №7. т.5. 2007. с. 41-43.
25. Кириллов С.Н., Хахулин С.С., Ватутин В.М. Полтавец Ю.Н., Гусаров Н.В. Алгоритм обработки информационно-управляющих сигналов на основе вейвлет-пакетного разложения в нейросетевом логическом базисе // Информационно-измерительные и управляющие системы. №7. т.5. 2007. с. 70-72.
26. Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Цыплаков А.А., Ватутин В.М., Полтавец Ю.И., Смирнов С.В. Помехоустойчивый алгоритм обработки фазоманипулированных сигналов на основе вейвлет-пакетного разложения в системах передачи информационно-управляющих потоков // Информационно-измерительные и управляющие системы. №7. т.5. 2007. с. 73-78.
27. Кириллов С.Н., Хахулин С.С., Ватутин В.М. Полтавец Ю.Н., Хрущев А.В., Крылов И.А. Устройство весовой обработки сигналов спутниковых систем передачи информации на основе искусственных нейронных сетей// Информационно-измерительные и управляющие системы №7. т.5 2007. с. 106-107.
28. Кириллов С.Н., Шелудяков А.С. Дикторонезависимое распознавание фонем на основе оптимальных ортогональных разложений // Изв. РАН Теория и системы управления. 1997. №5. с. 53-55.
29. Кириллов С.Н., Шелудяков А.С. Реализация кодеков речи на основе быстрых ортогональных преобразований// Электросвязь. 1999. №1. с. 15-17.
30. Кириллов С.Н., Шустиков О.Е. Оптимальная весовая обработка периодограммы обобщенной спектральной плотности случайного процесса // Изв. РАН Автоматизация. 2000. №3. с. 54-63.
31. Кириллов С.Н., Зорин С.В. Применение алгоритмов вейвлет анализа для сжатия речевых сигналов в IP-телефонии // Электросвязь. 2001. №4. с. 40.
32. Кириллов С.Н., Зорин С.В. Алгоритмы биортогонального вейвлет-анализа на основе рекурсивных фильтров // Цифровая обработка сигналов . 2001. №3. с. 9-12.
33. Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н. Оценка спектральной плотности мощности сигналов в модифицированном пространстве Соболева // Изв. Вузов Радиотехника, т.45. 2002. №12. с. 46-51.
34. Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н. Алгоритм дискретного спектрального анализа сигналов в модифицированном пространстве Соболева // СОРАН. Автоматизация. 2003. т.39. №1. с. 88-94.
35. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Помехоустойчивость и реализуемость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Радиотехника. 2003. №1. с. 73-75.
36. Кириллов С.Н., Шустиков О.Е. Минимизация среднеквадратической ошибки оценивания спектра мощности случайного процесса // РАН. Автоматизация. 2003. т.39. №6. с. 98-103.
37. Кириллов С.Н., Зорин С.В. Оптимальные по критерию минимума среднеквадратической ошибки локальные базисы с перекрывающейся областью определения // Радиотехника. 2004. №6. с. 17-22.
38. Кириллов С.Н. Хахулин С.С. Робастный алгоритм корреляционно-спектрального анализа случайных процессов на основе нейронных сетей // Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение. 2004. № 12 с. 16-20.
39. Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н. Алгоритм восстановления аналогового сигнала в модифицированном пространстве Соболева // РАН Сиб. Отд. Автоматизация т.41. №2. 2005. с. 75-80.
40. Кириллов С.Н., Бузыкканов С.Н. Вычисление спектра сигналов в модифицированном пространстве Соболева на основе быстрого преобразования Фурье // РАН СО Автоматизация. 2006. т.42. №6. с. 16-25.
41. Кириллов С.Н., Ватутин В.М., Бахурин С.А., Смирнов С.В., Никифоров П.С. Алгоритм формирования вейвлет-базисов по критерию минимума среднеквадратической ошибки восстановления сигналов в информационно-управляющих и измерительных системах. // Информационно-измерительные и управляющие системы №7. т.5 2007. с. 54-60.
42. Бузыкканов С.Н. Вейвлет-обработка изображений в весовом пространстве Соболева // Вестник РГПУ. вып. № 4(34) 2010. С. 12-19.

MULTI-CRITERIA SYNTHESIS METHODS OF DIGITAL SIGNALS PROCESSING ALGORITHMS

Kirillov S.N., Buzykanov S.N.

The options of multi-criteria synthesis application for digital signals processing algorithms are considered in the article. Theoretical basics of the multi-criteria synthesis are proved. Specific design features are considered for: multi-criteria synthesis of digital signal processing devices; multi-criteria synthesis of basic systems.

Considering each of the given applications the advantages of multi-criteria approach is shown comparing to methods taking into account for the synthesis only one basic criterion. In particular, it is proved that multi-criteria synthesis application has allowed to achieve a higher tolerance of synthesized result parameters to the inaccuracy of a priori data setting and to the influence of stirring factors as well as to receive results realized in practice. Examples of specific results of multi-criteria synthesis of signals processing systems are given.