

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
Самохина Александра Борисовича
на диссертационную работу Будуновой Кристины Андреевны
«Атомарные функции в задачах фильтрации
и восстановления сигналов»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.4 – «Радиофизика»

Диссертационная работа Будуновой К.А. посвящена разработке методов синтеза фильтров низких частот с амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ), приближающимися по форме к атомарным функциям $h_a(x)$. Теоретической основой методов восстановления сигналов с помощью предложенных в работе фильтров выступает ряд Кравченко-Котельникова – обобщение ряда Уиттекера-Котельникова-Шеннона спектрами атомарных функций. Полезным свойством разложения Кравченко-Котельникова является быстрое затухание его погрешности усечения. Ряд успешно применялся при решении задач восстановления многомерных сигналов, синтеза диаграммы направленности антенны, реконструкции изображений компьютерной томографии.

В диссертационной работе Будуновой К.А. ставится задача построить на основе теоремы Кравченко-Котельникова совокупность методов фильтрации, позволяющих усовершенствовать обработку сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах. В качестве идеальной АЧХ новых аналоговых и цифровых фильтров предлагается рассматривать бесконечно дифференцируемую финитную функцию $h_a(x)$. Фильтры на основе атомарных функций, как и классические, могут применяться при обработке сигналов в цифро-аналоговых преобразователях, радиоприемных и радиопередающих устройствах, системах многоскоростной обработки. Следует отметить, что задача создания методов синтеза частотно-избирательных фильтров с АЧХ на основе атомарных функций ранее не решалась, поэтому тема исследования является **актуальной**.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, дается описание цели и задач исследования, приводится перечень полученных в работе новых результатов, формулируются положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова. В первых двух параграфах содержатся вспомогательные сведения: дается описание семейства атомарных функций $h_a(x)$, излагаются свойства обобщенного ряда отсчетов на основе спектров атомарных функций. В третьем параграфе доказываются теоремы об оценках ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова. Формулы оценок представлены в теоремах 1.1 и 1.2, причем оценка из теоремы 1.1 является

более точной, а выражение из теоремы 1.2 имеет вид, удобный для практического применения. Еще одна оценка получена для ошибки усечения ряда, в котором в качестве базисных функций вместо спектров атомарных функций используются частичные произведения, описаны условия, при которых для ошибки усечения соответствующего ряда справедливы неравенства из теорем 1.1 и 1.2. Рассматриваются также случаи асимметричной суммы и произвольных значений переменной t . Проанализировано асимптотическое поведение погрешности усечения ряда на основе атомарных функций. В последнем параграфе обсуждается возможность использования разложения Кравченко-Котельникова в качестве теоретической основы методов фильтрации сигналов.

В главе 2 предложен метод синтеза цифровых фильтров, имеющих конечную импульсную характеристику (КИХ) и АЧХ, аппроксимирующую функцию $h_a(x)$. Метод вычисления коэффициентов импульсной характеристики основан на усечении последовательности отсчетов спектра функции $h_a(x)$ прямоугольной весовой функцией. Наличие параметра позволяет строить фильтры с заданными граничными частотами полос пропускания и подавления АЧХ. Кроме того, в главе рассмотрены фильтры на основе сумм сдвигов атомарных функций. Для фильтров выведены оценки отклонений АЧХ в полосах пропускания и подавления. Проведен численный эксперимент, в котором рассмотрена одна из основных операций многоскоростной обработки сигналов – повышение частоты дискретизации цифрового сигнала. В эксперименте сравниваются результаты применения новых КИХ-фильтров на основе атомарных функций и некоторых классических фильтров.

В главе 3 разрабатывается метод построения аналоговых фильтров с АЧХ, приближающейся по форме к функции $h_a(x)$. Построенные непрерывные фильтры используются в качестве прототипов для синтеза цифровых фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). Глава 3 начинается с описания специального алгоритма аппроксимации финитных функций неотрицательными рациональными дробями, который в дальнейшем дает возможность получать устойчивые аналоговые фильтры на основе атомарных функций. Алгоритм основан на равенстве, вытекающем из интегральной формулы Коши. Теоретическое обоснование метода аппроксимации представлено в параграфе 3.3, пошаговое описание алгоритма поиска дробно-рационального приближения дается в параграфе 3.4. Построенная рациональная дробь используется для расчета передаточной функции аналогового фильтра. Приводится пример применения фильтра с АЧХ на основе функции $h_3(x)$ в цифро-аналоговом преобразовании. Для сравнения осуществляется реконструкция сигнала с помощью классического фильтра Баттерворта. В проведенном эксперименте фильтр на основе атомарной функции обеспечивает существенно лучшее качество восстановления сигнала по неполной выборке отсчетов. Построение рассмотренных далее цифровых БИХ-фильтров по аналоговым прототипам выполняется методами

инвариантной импульсной характеристики и билинейного преобразования. В примере 3.2 с применением новых и классических БИХ-фильтров решается задача интерполяции цифрового сигнала. Цифровые БИХ-фильтры на основе атомарных функций, как и аналоговые фильтры, позволили выполнить качественное восстановление сигнала по усеченной выборке отсчетов.

В главе 4 рассмотрен метод ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) с фильтрацией, предназначенный для передачи данных по сетям мобильной связи. В начале главы 4 приводятся предварительные сведения об алгоритме OFDM, затем дается описание метода OFDM с фильтрацией для восходящей линии связи. Выполнен анализ погрешности восстановления символов квадратурной амплитудной модуляции (QAM, quadrature amplitude modulation) при применении метода OFDM с фильтрацией. Предложен модифицированный метод, основанный на дополнении OFDM-символов циклическим продолжением, имеющем размер циклического префикса. Выполнено моделирование процесса передачи данных с применением классического и модифицированного алгоритмов OFDM с фильтрацией. Новый алгоритм позволил восстановить QAM-символы с меньшей погрешностью и обеспечил качественное восстановление данных для схем высокого порядка QAM 1024, QAM 4096. Рассмотрена передача данных при применении в модифицированном методе OFDM с фильтрацией КИХ-фильтров на основе атомарных функций, предложенных в главе 2.

Научная новизна исследования заключается в том, что 1) впервые получена оценка ошибки усечения для ряда Кравченко-Котельникова, проанализировано асимптотическое поведение данной ошибки; 2) представлен оригинальный алгоритм расчета коэффициентов импульсных характеристик КИХ-фильтров на основе атомарных функций; 3) разработан новый метод дробно-рациональной аппроксимации, дающий возможность выполнять синтез устойчивых аналоговых фильтров с АЧХ на основе финитных функций; 4) впервые синтезированы аналоговые фильтры с АЧХ, аппроксимируемыми атомарными функциями $h_a(x)$, построенные фильтры использованы в качестве прототипов цифровых БИХ-фильтров; 5) получена новая формула погрешности, образующейся при применении метода OFDM с фильтрацией для передачи символов QAM-модуляции; 6) предложен модифицированный алгоритм OFDM с фильтрацией, позволяющий осуществлять восстановление QAM-символов с меньшей погрешностью по сравнению с классическим алгоритмом.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что построенная оценка ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова может использоваться при практическом применении данного ряда в задачах обработки сигналов и изображений. Предложенный в работе алгоритм дробно-рациональной аппроксимации дает возможность развить новые методы

синтеза аналоговых фильтров с заданной формой АЧХ. Фильтры на основе атомарных функций могут найти применение в методах обработки сигналов в системах беспроводной связи и телевизионного вещания. Модифицированный метод OFDM с фильтрацией позволит улучшить качество передачи данных по сетям мобильной связи.

Диссертационная работа Будуновой К.А. «Атомарные функции в задачах фильтрации и восстановления сигналов» соответствует паспорту специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Будуновой К.А. опубликовано по теме диссертации 5 статей в журналах, индексируемых в системе Scopus, 6 статей в изданиях, входящих в «белый список» научных журналов, 3 статьи в журналах из перечня ВАК. Результаты исследований были доложены на всероссийских и международных конференциях.

После ознакомления с диссертационной работой возникли следующие замечания.

1. Отсутствует знак модуля в выражении для числа M из формулировки теоремы 1.1 об оценке ошибки усечения ряда Кравченко-Котельникова.
2. В примере применения аналоговых фильтров в цифро-аналоговом преобразовании (с. 64) фильтр на основе атомарной функции $h_a(x)$ сравнивается лишь с одним классическим фильтром на основе функции Баттерворта. Не проводится сравнение с фильтром Чебышева и эллиптическими фильтрами. То же замечание касается и цифровых БИХ-фильтров.
3. В главе 4 метод OFDM с фильтрацией применяется только для восходящей линии связи. Полезно было бы рассмотреть модифицированный алгоритм OFDM с фильтрацией в случае нисходящей линии.
4. В примере 4.1 (с. 96) сравнивается эффективность работы стандартного и модифицированного алгоритмов OFDM с фильтрацией при использовании схем QAM модуляции высоких порядков. Не указано, какой выигрыш в скорости передачи данных обеспечивает предложенный модифицированный алгоритм.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа Будуновой К.А. «Атомарные функции в задачах фильтрации и восстановления сигналов» является законченным научным исследованием и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям

Официальный оппонент,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.01.07 – «Вычислительная математика»),
профессор кафедры прикладной математики
Института информационных технологий
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет»

Самохин Александр Борисович

e-mail: absamokhin@yandex.ru

УДОСТОВЕРЯЮ:

Начальник Управления кадров М.М. Буханова

