

*На правах рукописи*



Артемьев Владимир Владимирович

**Проектирование рекурсивных цифровых целочисленных фильтров**

05.12.04 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2018

Работа выполнена в филиале ФГУП РЯЦ-ВНИИЭФ «НИИС им. Ю.Е. Седакова».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Бугров Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Самойлов Александр Георгиевич,  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»,

кандидат технических наук, Фадеев Роман Сергеевич,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет».

Защита диссертации состоится 12 декабря 2018 в 13.00 часов в аудитории 1315 на заседании диссертационного совета Д 212.165.01 при НГТУ им. Р.Е. Алексеева по адресу: г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ им. Р.Е. Алексеева или по электронному адресу:

[https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org\\_structura/instit\\_fakul\\_kaf\\_shkoly/fsvk/dissertacii/2018/artemyev\\_v\\_v.pdf](https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/org_structura/instit_fakul_kaf_shkoly/fsvk/dissertacii/2018/artemyev_v_v.pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор технических наук, профессор Белов Юрий Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Цифровой фильтр (ЦФ) является основным устройством во многих системах цифровой обработки сигналов (ЦОС). Большинство проектируемых цифровых фильтров – это фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ). Они хорошо изучены и имеют широкое распространение в программных и аппаратно-программных средствах. Их основные преимущества – это линейность фазо-частотной характеристики (ФЧХ), стабильность, слабая чувствительность к шумам квантования и отсутствие предельных циклов, приводящих к колебаниям, простота проектирования. В настоящее время в мире для КИХ-фильтров ведется активный поиск новых приемов и подходов с целью снижения количества используемых ресурсов и повышения быстродействия при аппаратной реализации на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС).

Другим типом ЦФ являются фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) (или рекурсивные фильтры), использующие обратную связь. Их основными преимуществами являются лучшая амплитудно-частотная характеристика по сравнению с КИХ при меньшем количестве коэффициентов, необходимых для реализации, и меньшей задержке прохождения сигнала.

Однако вследствие нелинейности ФЧХ, нестабильности, по сравнению с КИХ фильтрами, БИХ фильтры не получили широко распространения. В большинстве современных САПР ПЛИС есть IP-блоки, например, "FIR Compiler", позволяющие реализовать на ПЛИС ЦФ с КИХ, но в тоже время нет IP блоков ЦФ с БИХ, например, "IIR Compiler". Есть возможность получения ЦФ с БИХ при помощи использования других программных пакетов, работающих совместно с САПР и позволяющих осуществлять генерацию кода, например, Matlab.

Главным образом сложность ЦФ, содержащих умножители, сумматоры, регистры и другие вспомогательные устройства, определяется умножителями. Сложность и быстродействие самих умножителей определяются разрядностями коэффициентов и внутренних переменных в фильтре. Поэтому эти разрядности

необходимо выбирать минимально возможными. Зачастую на практике при построении различных систем ЦОС широко применяются ЦФ с постоянными коэффициентами и, как правило, высокоскоростные специализированные системы ЦОС используют целочисленную арифметику с фиксированной, а не с плавающей точкой. Использование полноценных умножителей при разработке таких ЦФ является неоправданно затратным, особенно при большом их количестве и высокой разрядности. При проектировании ЦФ для систем, реализуемых на ПЛИС, заказных или полузаказных СБИС, ставятся задачи получения требуемых частотных характеристик при минимальном количестве ресурсов кристалла, например, таких как логические элементы. Особо остро вопрос количества необходимых ресурсов стоит для отечественных микросхем базовых матричных кристаллов (БМК), на которых осуществляется изготовление конкретных БИС, и ПЛИС, например, таких как ПЛИС 5576ХС7Т и 5578ТС024, имеющих невысокие показатели количества логических элементов и быстродействия по сравнению с импортными аналогами. Неоптимальное решение этой задачи приводит к нерациональному расходованию площади кристалла, к неоправданному увеличению потребляемой мощности, снижению быстродействия, препятствует размещению системы ЦОС на одном или малом числе кристаллов и, в конечном итоге, повышает стоимость изделия. Таким образом создание методики проектирования рекурсивных ЦФ с учётом основных факторов, определяющих их аппаратную реализацию на ПЛИС/БМК, является актуальной научно-технической проблемой.

### **Степень разработанности темы.**

Большинство работ по проектированию рекурсивных ЦФ с минимальным количеством ресурсов, необходимых для их реализации на ПЛИС, основывается на использовании каскада из двух секций всепропускающих фильтров, подключенных в параллель. Как правило, выделяют два этапа:

- 1) Поиск хороших начальных точек в области исходных параметров.

2) Локальный поиск решений с квантованными коэффициентами в окрестности этих точек.

В работе авторов Persson P., Nordebo S., Claesson I. для поиска оптимальных коэффициентов фильтра предлагается применять алгоритм ММ-MFA, основанный на глобальном поисковом алгоритме имитации отжига. Также для поиска коэффициентов применяются генетические алгоритмы. Однако эти поисковые алгоритмы не гарантируют нахождение наилучшего результата.

Наиболее близка к решению задачи проектирования ЦФ с учетом аппаратной реализации работа авторов Milic L. D., Lutovac M. D., в которой рассматривается вопрос синтеза ЦФ с применением билинейного преобразования аналогового прототипа эллиптических рекурсивных фильтров максимальной добротности (Elliptic filters with maximal Q-factor (EMQF)). В работе определяется некоторое подмножество целых чисел, оптимальных при реализации умножения с помощью операций сдвига и суммирования. Однако алгоритм выборки не гарантирует точную выборку из этого подмножества, и билинейное преобразование не позволяет осуществлять поиск решения задачи проектирования ЦФ по совокупности характеристик фильтра, например, с учетом амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и ФЧХ.

**Целью работы** является создание методики проектирования рекурсивных цифровых фильтров в целочисленном пространстве состояний с учётом основных факторов, определяющих их реализацию.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи диссертационной работы:**

1) Разработка математической модели рекурсивного цифрового фильтра с учётом особенностей реализации на кристалле;

2) Синтез рекурсивного фильтра на подмножестве целых чисел на основе знакоразрядного представления методами дискретного математического программирования;

3) Разработка универсального HDL-описания рекурсивного цифрового целочисленного фильтра, синтезированного методом целочисленного нелинейного программирования, для ПЛИС зарубежного и отечественного производства;

4) Реализация рекурсивных цифровых целочисленных фильтров на ПЛИС/БМК. Оценка быстродействия и количества необходимых ресурсов кристалла.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

- Предложено решение задачи математического программирования полимодальной нелинейной целевой функции с заданной системой прямых и функциональных ограничений для проектирования ЦФ, в отличие от известных решений, на неэквидистантных подмножествах целых чисел численными поисковыми методами.

- Предложен способ проектирования целочисленных рекурсивных ЦФ, позволяющий, в отличие от известных способов, находить решение задачи синтеза ЦФ численными методами нелинейного программирования по совокупности требований с учётом особенностей ПЛИС/БМК.

- Создан алгоритм получения ЦФ с необходимой характеристикой на основе подмножества целых чисел со структурой представления отличающийся от известной оптимизации по использованию ресурсов при реализации на ПЛИС/БМК.

- Разработана методика оценки количества сумматоров в ЦФ без умножителей, синтезированных с помощью метода билинейного преобразования и целочисленного нелинейного программирования.

- Подтверждено соответствие результатов расчетов математического моделирования целочисленного ЦФ без умножителей, синтезированного методом ЦПН на подмножестве целых чисел, экспериментальным данным.

**Теоретическая значимость** работы заключается в следующем:

- Разработан алгоритм получения подмножеств целых чисел с структурой представления, требующих минимального количества ресурсов при реализации в ПЛИС операции умножения на константу;

- Разработан способ оценки выигрыша по количеству сумматоров и быстродействию, позволяющий сравнивать каскадные рекурсивные цифровые фильтры, спроектированные на различных подмножествах целых чисел.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем:

- Создан программный продукт, позволяющий сформировать подмножества целых чисел с минимальным количеством сумматоров и структуру этих подмножеств;

- Разработано универсальное VHDL-описание целочисленного БИХ-фильтра без умножителей для ПЛИС зарубежного и отечественного производства;

- Созданы конструкции 16-ти разрядных ЦФ на отечественных ПЛИС 5576XC7T и 5578TC024, обладающие значительным выигрышем по ресурсам и быстродействию.

Практическая значимость подтверждается актом №195-95-30-3340-08/12 о внедрении результатов диссертации в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ "НИИИС им. Ю.Е. Седякова". Акт внедрения прилагается к диссертации.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы математического анализа, математической статистики, анализа алгоритмов, формирования и обработки сигналов, цифровой обработки сигналов, а также объектно-ориентированный подход для создания программного обеспечения, математического моделирования на ЭВМ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Решение задачи математического программирования для полимодальной нелинейной целевой функции с заданной системой прямых и функциональных

ограничений позволяет синтезировать цифровые фильтры на подмножестве целых чисел численными поисковыми методами.

2. Способ проектирования целочисленных цифровых фильтров на заранее определённом неэквидистантном подмножестве целых чисел численными методами нелинейного программирования позволяет проектировать рекурсивный цифровой фильтр с минимальным количеством ресурсов, необходимым для его реализации на ПЛИС.

3. Алгоритм получения подмножеств целых чисел и их структуры представления позволяет сформировать подмножества чисел с минимальным количеством операций суммирования.

4. Конструкции 16-ти разрядных ЦФ на отечественных ПЛИС 5576ХС7Т и 5578ТС024, обладающие значительным выигрышем по ресурсам и быстродействию.

#### **Достоверность результатов диссертации подтверждается:**

данными компьютерного моделирования и экспериментальных исследований на лабораторных макетах. Результаты и выводы диссертации согласуются с известными положениями статистической радиотехники, теории чисел, цифровой обработки сигналов.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- Международных научно-технических конференциях "Информационные системы и технологии" ИСТ-2013, ИСТ-2014, ИСТ-2015, Нижний Новгород, 2013, 2014, 2015;

- XIII научно-техническая конференция "Молодежь в науке", Саров, 2014;

- IX Молодежная научно-техническая конференция "Высокие технологии атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе", Нижний Новгород, 2014;

- XX Нижегородская сессия молодых учёных. Технические науки, Нижний Новгород, 2015;



- XXI Научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, 2017;
- XX Международная конференция "ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ" DSPA-2018, Москва, 2018.

**Публикации.** Основные результаты работы изложены в 18 публикациях, из которых 6 статей в журналах, включённых в перечень изданий, рекомендуемых ВАК для опубликования результатов диссертационных работ,

Получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора заключается в**

- разработке математической модели рекурсивного ЦФ с учётом особенностей реализации на кристалле;

- решении задачи синтеза рекурсивного фильтра на подмножестве целых чисел на основе знакоразрядного представления методами дискретного математического программирования;

- разработке универсального HDL-описания рекурсивного целочисленного ЦФ, синтезированного методом целочисленного нелинейного программирования, для ПЛИС зарубежного и отечественного производства;

- реализации рекурсивных цифровых целочисленных ЦФ на ПЛИС, проведении оценки быстродействия и количества необходимых ресурсов кристалла.

Соискателем опубликовано 9 статей без соавторов, в том числе 4 – в журналах, включённых в перечень изданий, рекомендуемых ВАК для опубликования результатов диссертационных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений, библиографического списка использованной литературы из 111 наименований и приложений. Объем диссертации составляет 170 страниц текста, 58 рисунков и 10 таблиц.

**Основное содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность работы, дано краткое описание проблемы, проведен анализ современного состояния вопроса, сформулированы

цель работы и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту. Кратко приведено содержание глав диссертации.

**В первой главе диссертации** дано краткое описание особенностей реализации ЦФ на ПЛИС. Современные ПЛИС имеют широкий набор встроенных блоков и модулей, однако, по сути ПЛИС представляет собой кристалл, на котором расположено большое количество элементарных логических элементов. И как в следствии этого появляется особенность при реализации алгоритмов ЦОС на ПЛИС – это целочисленность. Вещественная арифметика не может быть напрямую применена в ПЛИС, как например в цифровых сигнальных процессорах (DSP), где есть аппаратный модуль операций с плавающей запятой (FPU). Несмотря на данный недостаток у ПЛИС есть существенное преимущество над цифровыми сигнальными процессорами это возможность высокой степени параллелизма, что позволяет производить ЦОС на несколько порядков быстрее.

Показаны подходы проектирования ЦФ без умножителей, в которых умножения на коэффициенты заменены операциями сдвиг/суммирование. Постоянные коэффициенты, используемые в операциях умножения, при реализации на ПЛИС, могут быть представлены в виде степени двойки:

$$C = \sum_{i=1}^{W_k} k_i * 2^i \quad (1)$$

где  $k_i \in \{0,1\}$ , а  $W_k$  – разрядность коэффициентов. Однако, целесообразно при аппаратной реализации на ПЛИС/БМК использовать канонический знако-разрядный код (КЗРК) представления чисел, где коэффициенты представлены в виде суммы и/или разности чисел, равных степени двойки, где  $k_i \in \{0,1,-1\}$  с минимальным количеством 1 и -1. Преимуществом при представлении числа в виде КЗРК является меньшее количество операций суммирования, необходимых для реализации умножителя, что дает выигрыш при аппаратной реализации.

Приведены основные недостатки принципов построения рекурсивных ЦФ без умножителей с применением билинейного преобразования и квантованием

коэффициентов. Проектное решение в вещественном пространстве состояний никак не учитывает аппаратные особенности реализации на ПЛИС/БМК. Прямой синтез ЦФ без умножителей невозможен такими подходами. Никакие дополнительные внешние условия, функциональные ограничения, например, условия масштабируемости сигнала в каскадных ЦФ, при косвенном синтезе рекурсивного ЦФ по аналоговому прототипу не могут быть учтены.

В качестве альтернативного подхода к решению задачи проектирования ЦФ без умножителей предложен метод проектирования с применением целочисленного нелинейного программирования (ЦНП). Предложено выполнять поиск коэффициентов целочисленного ЦФ уже на подготовленных наборах чисел, требующих минимальное количество ресурсов ПЛИС и имеющих высокое быстродействие при реализации на ПЛИС.

В главе приводится постановка задачи синтеза ЦФ на заранее определенном подмножестве целых чисел. Принципиальное отличие ЦНП-синтеза заключается в том, что в данном случае для удовлетворения требуемого функционирования целочисленного ЦФ на стадии его проектирования не используются никакие искусственные приёмы и подходы классических методов, приводящие к существенным ограничениям в выполнении функциональных требований и систематическим ошибкам, а осуществляется прямой поиск требуемых целочисленных коэффициентов фильтра прямо по его математическому определению (модели). Критерием поиска является соответствие совокупного текущего функционирования фильтра его требуемому функционированию.

В качестве базовой структуры ЦФ синтезируемого методом ЦНП используется форма каскадного соединения целочисленных БИХ-звеньев 2-го порядка с передаточной функцией:

$$H(z) = \prod_{i=1}^m \frac{b_{0i} + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}{a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}} \quad (2)$$

где  $m$  – число звеньев ЦФ, комплексная переменная  $z = e^{j\omega}$ , а  $\omega = \frac{2\pi f}{F_d}$ .

Из соотношения (3) получается разностное уравнение для одного звена рекурсивного целочисленного ЦФ:

$$y_n = (b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2} - a_1 y_{n-1} - a_2 y_{n-2}) / a_0 \quad (3)$$

Операция деления на целочисленный нормирующий коэффициент  $a_0$  реализуется при помощи операции сдвига, при условии принадлежности каждого  $i$ -го нормирующего коэффициента биномиальному целочисленному ряду:

$$a_{0i} \in \{2^q\}, \quad q = \overline{0, W_k - 1} \quad i = \overline{1, m} \quad (4)$$

где  $W_k$  – разрядность цифровой платформы.

На рисунке 1 приведена структура звена рекурсивного целочисленного ЦФ, соответствующая разностному уравнению (4).

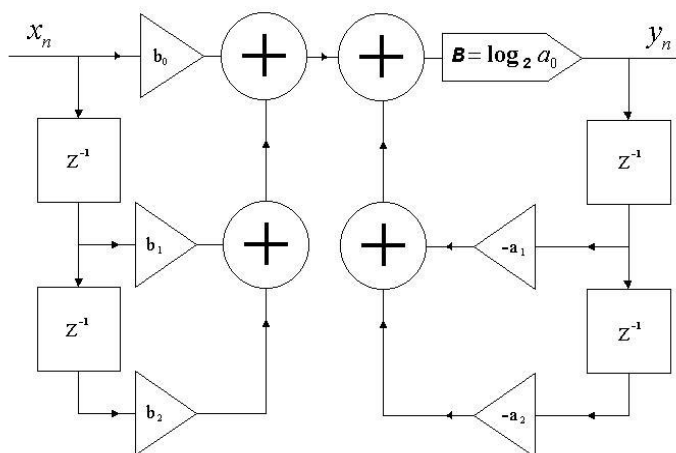


Рисунок 1 – Структура рекурсивного звена ЦФ

При синтезе рекурсивного ЦФ с линейной фазой целевая функция формируется в виде взвешенной суммы двух частных целевых функций  $f_{АЧХ}(\mathbf{IX})$  и  $f_{ФЧХ}(\mathbf{IX})$ , обеспечивающих соответственно выполнение требований как к АЧХ ЦФ, так и к линейности его ФЧХ:

$$F(\mathbf{IX}) = \beta_1 f_{АЧХ}(\mathbf{IX}) + \beta_2 f_{ФЧХ}(\mathbf{IX}) \quad (5)$$

Частная целевая функция  $f_{АЧХ}(\mathbf{IX})$  при этом определяется средне-квадратичной ошибкой  $\sigma$  выполнения требований к АЧХ фильтра, а функция  $f_{ФЧХ}(\mathbf{IX})$  – максимальным отклонением текущей фазы фильтра от требуемой линейной ФЧХ фильтра.

Во второй главе диссертации приводится алгоритм формирования подмножеств целых чисел, на которых предлагается осуществлять синтез целочисленных ЦФ.

Полученные по предложенному алгоритму множества являются неэквидистантными. На рисунке 2 показаны структуры целочисленного звена при использовании подмножеств целых чисел  $I_0, I_1, I_2$  (а, б, в соответственно), где  $I$  – обозначение множества, а индекс отображает максимальное количество операций суммирования, используемых в представлении числа.

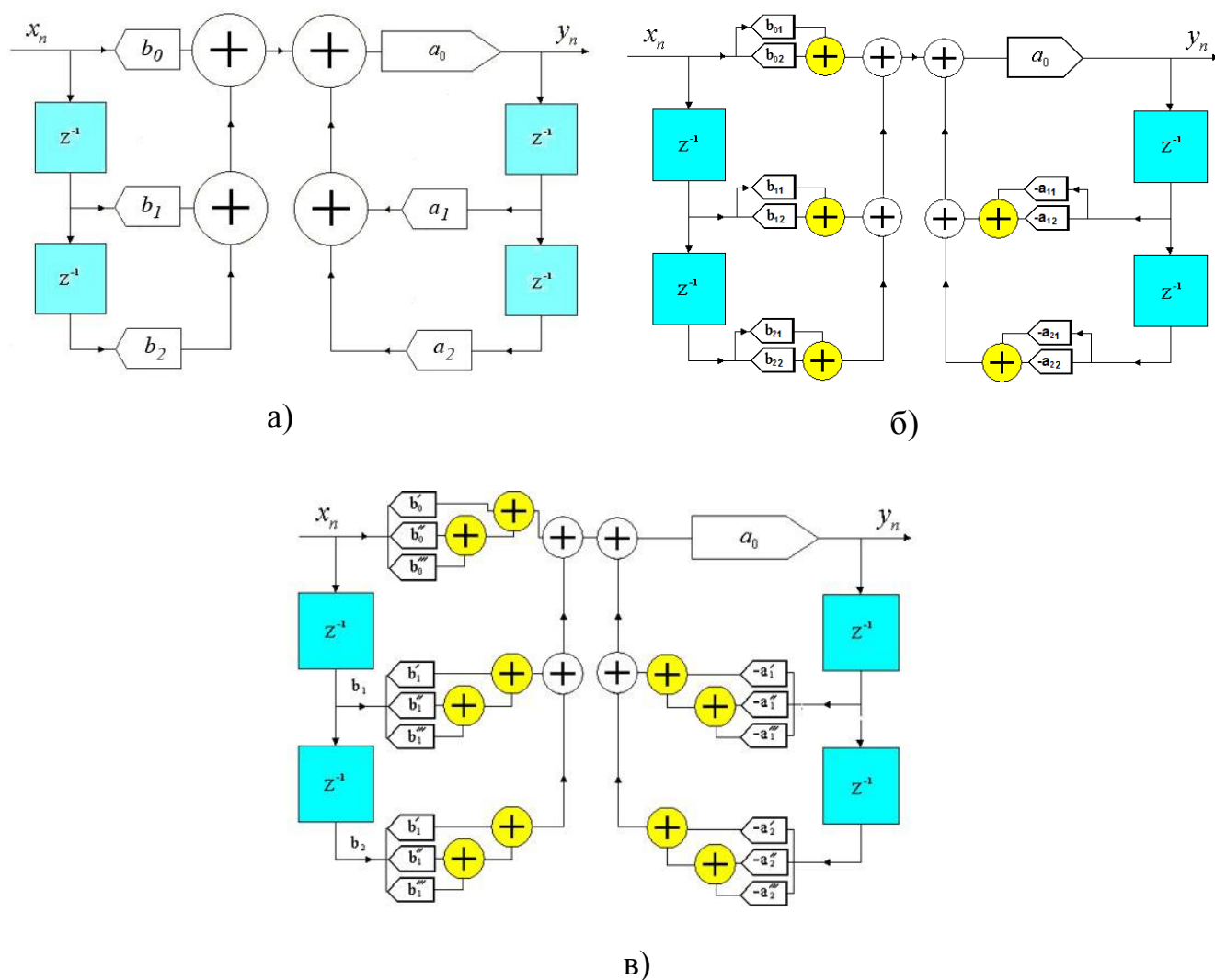


Рисунок 2 – Структура целочисленного звена: а –  $I_0$ ; б –  $I_1$ ; в –  $I_2$

Как видно из рисунка 2 с увеличением индекса подмножества в структуре звена увеличивается количество сдвиговых сумматоров, использующиеся при реализации операции умножения.

Показано решение задачи проектирования ЦФ с помощью метода ЦНП на различных неэквидистантных подмножествах целых чисел  $I_s$  и разных разрядностей ЦФ. В общем виде задача целочисленного нелинейного программирования для синтеза рекурсивного ЦФ с заданной разрядностью представления данных на подмножестве целых чисел  $I_s$  записывается так:

$$F^o(\mathbf{IX}^o) = \min F(\mathbf{IX}) \quad (6)$$

$$\mathbf{IX} \in I_s^{5m}$$

$$- 2^{W_k-1} < a_{di} < 2^{W_k-1} \quad d=\overline{1,2} \quad i=\overline{1,m} \quad (7)$$

$$- 2^{W_k-1} < b_{di} < 2^{W_k-1} \quad d=\overline{0,2} \quad i=\overline{1,m}$$

$$a_{0i} \in \{2^q\}, \quad q = \overline{0, W_k - 1} \quad i = \overline{1, m} \quad (8)$$

$$|Z_{pi}| < 1 \quad i = \overline{1, m} \quad (9)$$

$$K_i^{\min} \leq |K_i(e^{j\omega})| \leq K_i^{\max} \quad i = \overline{1, m} \quad (10)$$

где  $m$  - число звеньев второго порядка,  $d$  - индекс коэффициента передаточной функции звена (2),  $\mathbf{IX}$  - вектор многомерного целочисленного пространства,  $F(\mathbf{IX})$  - целевая функция,  $K_i^{\min}$ ,  $K_i^{\max}$  - допустимые границы изменения коэффициента усиления  $i$ -го звена. Общая экстремальная задача дискретного синтеза (6) записана относительно целочисленного пространства  $I_s^{5m}$  коэффициентов фильтра, размерностью  $5m$ . Ограничение (7) задает границы изменения этих целочисленных коэффициентов, а соотношение (8) определяет принадлежность коэффициентов  $a_{0i}$  биномиальному ряду. Функциональные ограничения (9) контролируют условие устойчивости рекурсивного фильтра по всем полюсам коэффициента передачи, а ограничения (10) масштабируют коэффициенты передачи звеньев в заданный интервал, обеспечивая широкий динамический диапазон проектируемого фильтра. В поисковом алгоритме минимизации выполнение данных ограничений реализуется применением штрафных функций. Для численного решения задачи (6) при проектировании

рекурсивного ЦФ используется эффективный алгоритм поиска глобального экстремума на сетке кода Грея, адаптированный к поиску решений в целочисленном пространстве  $I_S^{5m}$  коэффициентов фильтра.

На рисунках 3 и 4 приведены АЧХ и ФЧХ 16-ти разрядных целочисленных ЦФ 20-го порядка синтезированных на полном множестве  $I$  и на подмножествах  $I_2, I_1$  и  $I_0$ .

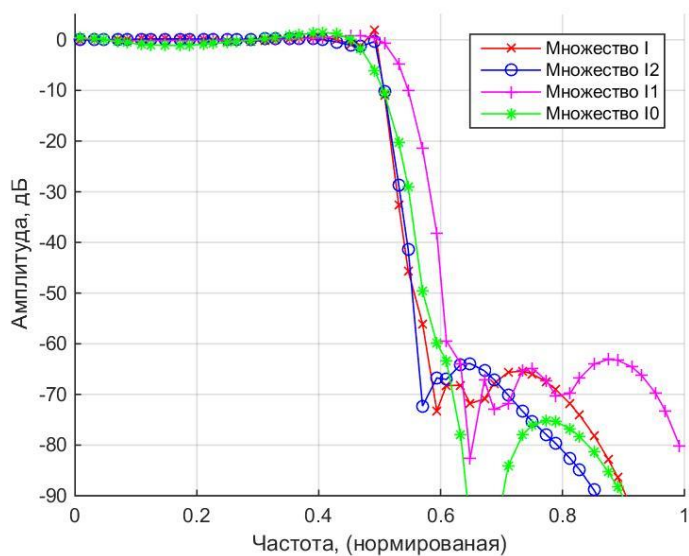


Рисунок 3 - АЧХ 16-ти разрядных ЦФ 20-го порядка, синтезированных на множестве  $I$  и на подмножествах  $I_2, I_1$  и  $I_0$

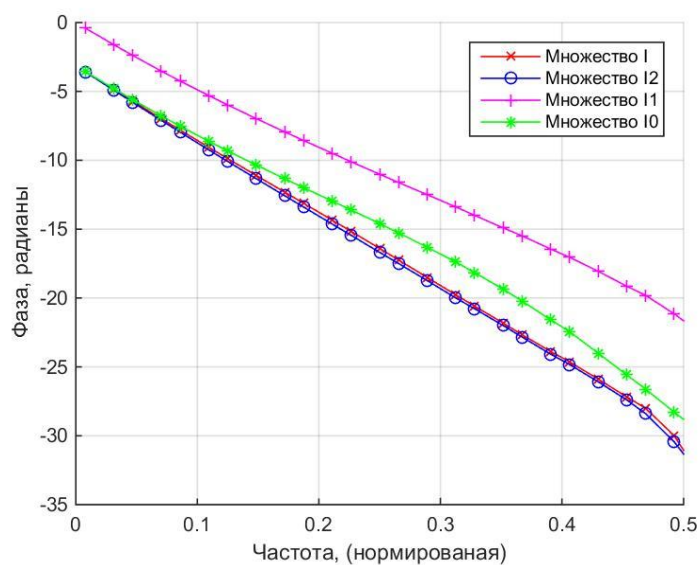


Рисунок 4 - ФЧХ 16-ти разрядных ЦФ 20-го порядка, синтезированных на множестве  $I$  и на подмножествах  $I_2, I_1$  и  $I_0$

В главе приводится оценка выигрыша по количеству операций суммирования и быстродействию:

- Средний выигрыш по количеству операций суммирования множества  $I_1$  для шестнадцатиразрядных коэффициентов ЦФ составляет 85,74% относительно двоичного представления и 79,15% - относительно КЗРК.
- Выигрыш по быстродействию множества  $I_1$  с одной сдвиговой операцией суммирования в сравнении с двоичным представлением составляет 42,86%.
- Средний выигрыш по количеству операций суммирования множества  $I_2$  для шестнадцатиразрядных коэффициентов составляет 71,54% относительно двоичного представления и 58,38% - относительно КЗРК.
- Выигрыш по быстродействию множества  $I_2$  с двумя сдвигowymi операциями суммирования в сравнении с двоичным представлением составляет 28,57%.

При малых разрядностях ( $W_k \leq 8$ ) величина выигрыша уменьшается поскольку элементы множества на которых осуществляется синтез одни и те же для разных методик проектирования. Например, при  $W_k=5$  множества  $I_1$  и  $I_2$  отличаются только элементами 11 и 13.

**В третьей главе диссертации** приводится реализация целочисленного ЦФ на ПЛИС. Показаны схемы (RTL Schematic) звена рекурсивного целочисленного ЦФ по VHDL описанию для подмножеств  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ . Представлены значения матричного пространства, необходимого для реализации ЦФ, описанных во второй главе, в ПЛИС зарубежного и отечественного производства. Для сравнения объема матричного пространства ПЛИС используются ЦФ полученные с помощью билинейного преобразования, проектирование которых проводилось в среде FDATool системы MatLab. Также в главе приводятся гистограммы быстродействия ЦФ в ПЛИС зарубежного и отечественного производства.

ЦФ без умножителей, спроектированные на неэквидистантных подмножествах  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ , дают выигрыш в объеме используемого матричного пространства ПЛИС и в максимальной тактовой частоте по сравнению с ЦФ,



полученными с помощью билинейного преобразования на полноценном множестве в диапазоне от  $-2^{W_k}+1$  до  $2^{W_k}-1$  двоичного представления.

Наибольший выигрыш получается при высокой разрядности ЦФ по ресурсу ПЛИС - комбинационная логика (ЛУТ таблицы). При разрядности ЦФ  $W_k=16$  и для множеств  $I_0, I_1, I_2$ , по типу ресурса ЛУТ таблицы, относительно полного множества выигрыш в ПЛИС зарубежного и отечественного производства составляет 73,42%–79,25%, 56,96%–63,94% и 39,80%–48,41%, а относительно ЦФ, полученного с помощью билинейного преобразования с применением CSD 72,33%–81,02%, 53,90%–69,28% и 34,04%–57,03% соответственно.

Выигрыш по максимальной тактовой частоте при разрядности ЦФ  $W_k=16$  для ПЛИС зарубежного и отечественного производства и множеств  $I_0, I_1, I_2$ , относительно полного множества составляет 35,66%–94,93%, 22,70%–48,23% и 3,30%–16,50%, а относительно ЦФ, полученного с помощью билинейного преобразования с применением CSD 92,65%–160,31%, 71,13%–97,95% и 37,95%–58,74% соответственно.

**В четвёртой главе диссертации** приводятся описание экспериментальной установки для снятия АЧХ и ФЧХ целочисленных ЦФ и результаты экспериментального исследования ЦФ, описанных во второй главе диссертационной работы и реализованных на ПЛИС.

Пример реальных измеренных частотных характеристик для 16-ти разрядных ЦФ, синтезированных на множествах  $I_0, I_1, I_2$ , для частоты дискретизации 200 кГц приведен на рисунках 5-6.

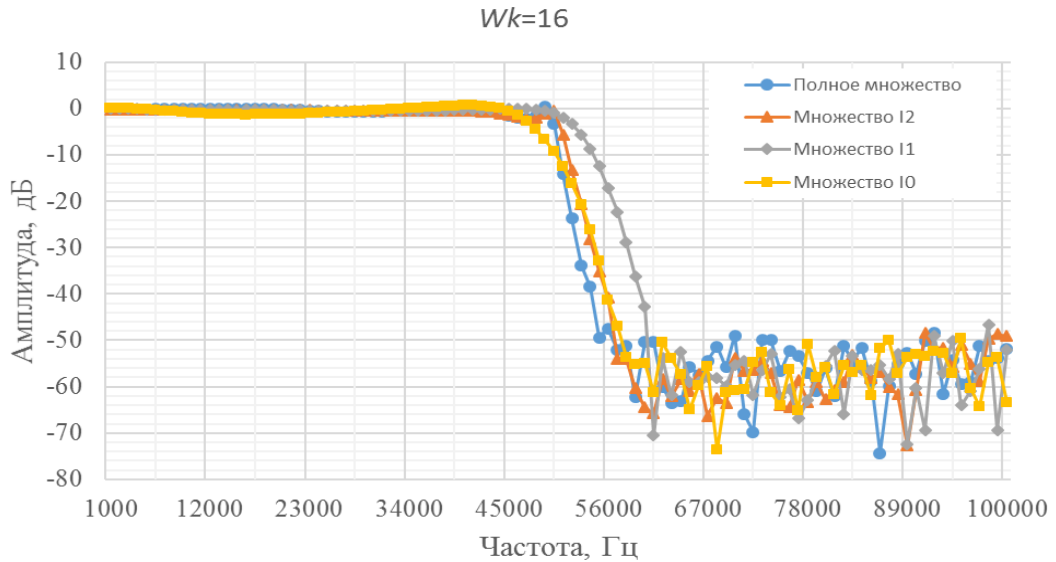


Рисунок 5 - АЧХ ЦФ, синтезированных на полном множестве и на подмножествах  $I_0, I_1, I_2$

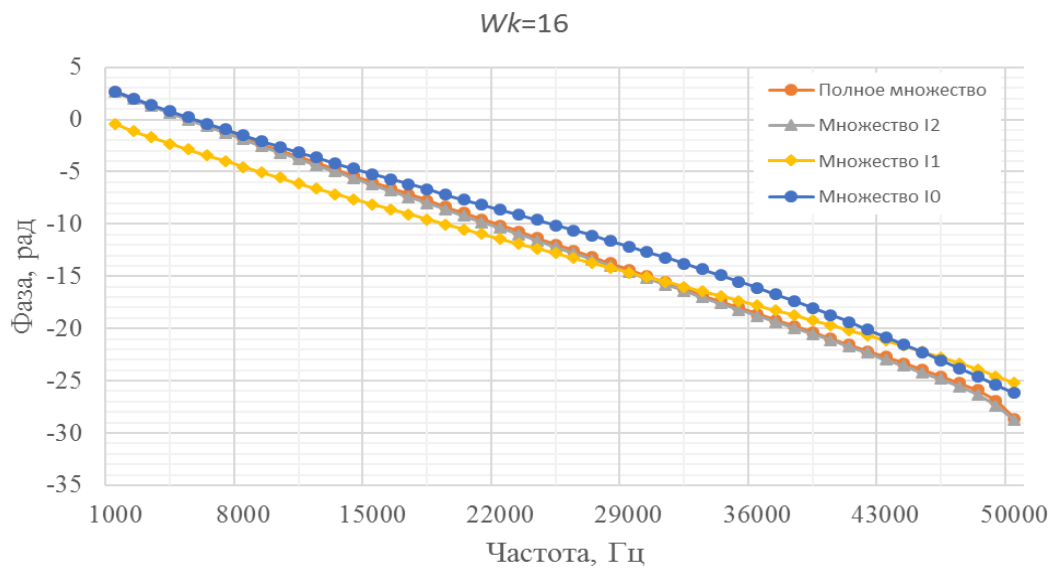


Рисунок 6 - ФЧХ ЦФ, синтезированных на полном множестве и на подмножествах  $I_0, I_1, I_2$

Полученные АФЧ и ФЧХ ЦФ соответствуют теоретическим и расчетным, приведённым во второй главе диссертационной работы, что подтверждает предложенную методику проектирования рекурсивных ЦФ в целочисленном пространстве состояний с учётом основных факторов, определяющих их реализацию на ПЛИС.

**В заключении** приводятся основные результаты. В диссертационной работе предложен способ проектирования целочисленных ЦФ на ПЛИС, который является эффективным и перспективным при решении задачи проектирования системы цифровой обработки информации на платформе с ограниченными ресурсами. Способ позволяет найти оптимальное решение задачи на ограниченном неэквидистантном подмножестве целых чисел, необходимых для реализации ЦФ, по совокупности параметров и характеристик, включая ресурсы ПЛИС. Это даёт возможность существенно повысить качество проектируемых фильтров, сократить время их разработки и снизить их стоимость.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах перечня ВАК**

1. Артемьев, В.В. Моделирование и синтез цифровых ЦНП-фильтров с линейной фазой / В.В. Артемьев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. -2014. -С.132-137.
2. Артемьев, В.В. Реализация целочисленных рекурсивных фильтров без умножителей на ПЛИС / В.В. Артемьев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. -2014. -С.138-141.
3. Артемьев, В.В. Моделирование и дискретный синтез селективной системы гидроакустического датчика / Артемьев В.В. // Датчики и системы. -2014. -№5. -С. 52-55.
4. Артемьев, В.В. Синтез целочисленных рекурсивных фильтров без умножителей на неэквидистантном множестве параметров / В.В. Артемьев, В.Н. Бугров // Успехи современной радиоэлектроники. -2017. -№7. -С.53-60.
5. Артемьев, В.В. Реализация на ПЛИС целочисленных цифровых рекурсивных фильтров без умножителей, синтезированных на неэквидистантном множестве параметров / В.В. Артемьев // Успехи современной радиоэлектроники. -2017. -№8. -С. 67-76.

6. Артемьев, В.В. Реализация целочисленных цифровых рекурсивных фильтров без умножителей на ПЛИС отечественного производства / В.В. Артемьев, А.В. Кашин // Цифровая обработка сигналов. -2018. -№1. -С. 56-61.

#### **Публикации в прочих научных журналах и изданиях**

7. Артемьев, В.В. Синтез цифровых рекурсивных фильтров с линейной фазой / В.В. Артемьев, В.Н. Бугров // Компоненты и технологии. -2013. -№7. -С. 60-62.

8. Артемьев, В.В. Целочисленные цифровые фильтры – эффективное решение для 8-битовых цифровых платформ / В.В. Артемьев, В.Н. Бугров, В.И. Пройдаков, Е.И. Шкелев. // Компоненты и технологии. -2013. -№10. -С. 104-110.

9. Артемьев, В.В. Поисковые технологии проектирования целочисленных цифровых фильтров. Часть 1. / Артемьев В.В., Бугров В.Н., Пройдаков В.И. // Компоненты и технологии. -2014. -№6. -С. 124-131.

10. Артемьев, В.В., Поисковые технологии проектирования целочисленных цифровых фильтров. Часть 2. / В.В. Артемьев, В.Н. Бугров, В.И. Пройдаков. // Компоненты и технологии. -2014. -№10. -С. 142-149.

11. Артемьев, В.В. Оценка быстродействия каскадных рекурсивных цифровых фильтров, синтезированных методом ЦНП при реализации на ПЛИС / В.В. Артемьев // Компоненты и технологии. -2017. -№5. -С. 6-10.

#### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017613044, Filter АИР. Автор: В.В. Артемьев. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09 марта 2017 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017613690, Code Gen АИР. Автор: В.В. Артемьев. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24 марта 2017 г.