

На правах рукописи



Чкан Андрей Викторович

Методы и средства создания параллельно-конвейерных программ с масштабируемой разрядностью для решения задач цифровой обработки сигналов на реконфигурируемых вычислительных системах

Специальность 05.13.11 - Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» (ЮФУ) на кафедре «Интеллектуальные и многопроцессорные системы» (ИМС) и в Научно-исследовательском институте многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» (НИИ МВС ЮФУ).

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: Каляев Игорь Анатольевич,
академик РАН,
доктор технических наук, профессор

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Савченко Юрий Васильевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры вычислительной техники
Национального исследовательского
университета «Московский
институт электронной техники»,
г. Москва, г. Зеленоград;

Елисеев Александр Вячеславович,
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного
унитарного предприятия
«Ростовский-на-Дону научно-
исследовательский институт
радиосвязи», г. Ростов-на-Дону

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: АО «Научно-исследовательский
центр электронной вычислительной
техники», г. Москва.

Защита диссертации состоится «17» марта 2017 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.208.24 при Южном федеральном университете по адресу: г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корп. «И», комн. 347.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Южного федерального университета <http://hub.sfedu.ru/diss/>.

Автореферат разослан « » января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



А.И. Кухаренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Решение современных задач гидро- и радиолокации, обработки изображений, кодирования информации, интеллектуального управления техникой и т.п. требует обработки больших массивов данных в реальном времени. Такие задачи относятся к классу вычислительно трудоёмких потоковых задач цифровой обработки сигналов (ЦОС), для решения которых, как правило, используются многопроцессорные вычислительные системы (МВС). Однако большинство современных МВС, построенных на базе универсальных или цифровых сигнальных процессоров, показывает низкую реальную производительность при решении задач ЦОС и, более того, наблюдается эффект ее снижения при увеличении числа процессоров в системе, что связано с ростом непродуктивных вычислений, направленных на организацию вычислительного процесса и взаимодействия между процессорами.

Указанных недостатков лишены реконфигурируемые вычислительные системы (РВС), реализующие структурный способ организации вычислений, элементной базой которых являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Совокупность ПЛИС образует вычислительное поле РВС, которое может программироваться пользователем под структуру решаемой задачи, что значительно снижает долю непродуктивных вычислений, направленных на организацию вычислительного процесса и повышает реальную производительность системы. Современные РВС позволяют достигать реальной производительности 60-90% от пиковой производительности систем для широкого класса вычислительно трудоёмких задач. При этом увеличение числа ПЛИС в системе обеспечивает близкий к линейному рост реальной производительности РВС.

Важнейшей характеристикой вычислительных систем является удельная производительность – отношение реальной производительности вычислительной системы к затрачиваемому аппаратному ресурсу, необходимому для решения поставленной задачи. В задачах потоковой обработки наиболее широко используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ), поэтому удельная производительность РВС для этого класса задач существенно зависит от эффективности реализации БПФ.

Важным фактором, влияющим на удельную производительность вычислительных систем, является выбор формата операндов. Известно, что использование формата с фиксированной запятой при структурной реализации алгоритмов БПФ на реконфигурируемых вычислительных системах позволяет добиться высокой удельной производительности за счет экономии задействованных аппаратных ресурсов ПЛИС, однако в силу узкого динамического диапазона может приводить к высокой погрешности вычислений и ошибкам переполнения разрядной сетки. При этом погрешность и число ошибок переполнений могут возрасти с увеличением размерности БПФ и малой разрядности входных данных. Существующие методы реализации быстрого преобразования Фурье не позволяют обеспечить повышение удельной производительности РВС без серьезной потери точности вычислений. Указанные недостатки могут быть устранены за счет использования масштабируемой разрядности операндов при реализации алгоритмов БПФ. Под масштабированием разрядности понимается процедура ограниченного (целенаправленного) увеличения разрядности результатов операций или согласованного применения операции масштабирования для гарантированности вычислений (без переполнений и при обеспечении требуемой точности).

Поэтому актуальной научной задачей является разработка новых методов программной реализации алгоритмов БПФ с масштабируемой разрядностью.

Цель работы заключается в увеличении удельной производительности реконфигурируемых вычислительных систем при решении задач ЦОС.

Объектом исследований является программное обеспечение реконфигурируемых вычислительных систем.

Предметом исследований являются методы реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов на реконфигурируемых вычислительных системах.

Научная задача, решаемая в диссертационной работе, заключается в разработке методов создания параллельно-конвейерных программ с масштабируемой разрядностью, повышающих удельную производительность реконфигурируемых вычислительных систем при решении задач ЦОС на основе быстрого преобразования Фурье для заданной точности вычислений.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) провести анализ методов и средств реализации алгоритмов ЦОС на многопроцессорных вычислительных системах;

2) разработать методы создания параллельных программ для реализации быстрого преобразования Фурье на РВС для данных с фиксированной запятой;

3) разработать методику создания структурно-процедурных алгоритмов и параллельно-конвейерных программ для решения на РВС задач цифровой обработки сигналов, использующих быстрое преобразование Фурье;

4) разработать алгоритмы согласованной фильтрации с масштабируемой разрядностью для РВС;

5) разработать алгоритмы двумерного БПФ и частотной фильтрации изображений с масштабируемой разрядностью для РВС;

6) на основе разработанных методов и алгоритмов создать библиотеки программ, которые могут быть использованы при решении практических задач цифровой обработки сигналов на РВС.

Методы исследований. При проведении исследований были использованы: теория цифровой обработки сигналов, теория математической статистики, методы конструирования аппаратных вычислительных устройств, методы структурно-процедурного параллельного программирования. Экспериментальные исследования проведены на действующих реконфигурируемых вычислительных системах.

Достоверность и обоснованность научных результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждены корректностью и непротиворечивостью математических выкладок, результатами численных экспериментов, решением практических задач для различных организаций, что подтверждается соответствующими актами внедрения. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на российских и международных научно-технических конференциях, где соискатель выступал с докладами по данной проблематике и получил положительный отзыв научной общественности.

Научная новизна диссертации определяется тем, что в ней разработаны:

1) метод создания параллельных программ для реализации быстрого преобразования Фурье на РВС для данных с фиксированной запятой, отличающийся от известных априорным определением итераций БПФ с масштабированием;

2) метод создания параллельных программ для реализации быстрого преобразования Фурье на РВС для данных с фиксированной запятой, отличающийся от известных поэтапным увеличением разрядности представления результатов

вычислений в заданной группе итераций БПФ и масштабированием, с выбором максимально возможного числа значащих разрядов;

3) методика создания структурно-процедурных алгоритмов и параллельно-конвейерных программ для решения задач цифровой обработки сигналов, использующих БПФ, отличающаяся подбором метода масштабируемой разрядности операндов, позволяющего повысить удельную производительность РВС для заданной точности вычислений;

4) алгоритмы согласованной фильтрации с масштабируемой разрядностью для РВС, отличающиеся или априорным определением итераций с масштабированием, или поэтапным увеличением разрядности с последующим масштабированием, как для прямого, так и для обратного БПФ;

5) алгоритмы двумерного БПФ и частотной фильтрации изображений с масштабируемой разрядностью для РВС, отличающиеся процедурой определения общего для всех строк (столбцов) входной двумерной матрицы коэффициента масштабирования.

Положения, выдвигаемые для защиты:

1) разработанные методы создания параллельных программ с масштабируемой разрядностью обеспечивают повышение удельной производительности РВС при решении задач цифровой обработки сигналов на основе БПФ;

2) разработанные методы создания параллельных программ с масштабируемой разрядностью обеспечивают заданную точность вычислений при решении задач цифровой обработки сигналов на РВС.

Результаты, выдвигаемые для защиты:

1) методы создания параллельных программ, реализующих алгоритмы быстрого преобразования Фурье на РВС для данных с фиксированной запятой;

2) алгоритмы согласованной фильтрации с масштабируемой разрядностью для РВС;

3) алгоритмы двумерного БПФ и частотной фильтрации изображений с масштабируемой разрядностью для РВС.

Научная значимость результатов исследований заключается в развитии теоретических положений технологии программирования высокопроизводительных вычислительных систем при решении задач цифровой обработки сигналов.

Практическая ценность работы.

На основании разработанных методов создано программное обеспечение для решения на РВС практических задач цифровой обработки сигналов, использующих алгоритмы быстрого преобразования Фурье.

Применение методов создания параллельных программ, реализующих БПФ на РВС для данных с фиксированной запятой, позволило сократить задействованные аппаратные ресурсы ПЛИС в сравнении с реализацией БПФ для данных с плавающей запятой в 3,7 раза при использовании метода с априорной оценкой итераций, требующих масштабирования, и в 2,9 раза при использовании метода, основанного на поэтапном увеличении разрядности и масштабировании; а также в сравнении с реализацией БПФ для данных с фиксированной запятой с изначально увеличенной разрядностью; в 2,3 раза при использовании метода с априорной оценкой итераций, требующих масштабирования, и в 1,9 раза при использовании метода, основанного на поэтапном увеличении разрядности и масштабировании.

Реализация и внедрение результатов работы. Материалы диссертационной работы использовались при выполнении ряда НИОКР в НИИ МВС ЮФУ:

–«Исследование возможности создания программируемого блока обработки сигналов из состава прибора 46 серийного образца изделия «Л-01»», отчет о НИР, № гос. рег. 01201360203, Таганрог, НИИ МВС ЮФУ, шифр «Ли́ра», 2013;

–«Разработка реконфигурируемой вычислительной системы РВС-7 и организация на ее основе производства реконфигурируемых вычислительных систем с производительностью до 1015 операций в секунду в одностоечном конструктиве 47U», отчет об ОКР, № гос. рег. 01201179033, Таганрог, НИИ МВС ЮФУ шифр «Плеяда», 2013;

–«Разработка и исследование методов синтеза прикладных программ для реконфигурируемых вычислительных систем на основе перспективных ПЛИС сверхвысокой степени интеграции», отчет о НИР, № гос. рег. 114061040060, Таганрог, НИИ МВС ЮФУ шифр «Шкала», 2014;

–«Разработка и исследование технологии создания ресурснезависимого прикладного программного обеспечения высокопроизводительных вычислительных систем гибридного типа», отчет о НИР, № гос. рег. 114101540005, Таганрог, НИИ МВС ЮФУ, шифр «Русалка», 2014;

–«Разработка комплексов моделей, методов и масштабируемого программного обеспечения для предсказательного моделирования неблагоприятных и опасных явлений в водных системах на высокопроизводительных вычислительных системах», отчёт о НИР, № гос. рег. 01201461935, Таганрог, НИИ МВС ЮФУ, шифр «Xsenia-2», 2016.

Созданные методы, алгоритмы и программные средства внедрены в следующих организациях: НИИ МВС ЮФУ (г. Таганрог), ООО «НИЦ СЭ и НК» (г. Таганрог), ОАО «РТИ» (г. Москва).

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: IX, X, XI, XII ежегодных научных конференциях студентов и аспирантов базовых кафедр ЮНЦ РАН, Ростов-на-Дону; 2-й, 3-й, 4-й Всероссийских научно-технических конференциях «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2012, СКТ-2014, СКТ-2016) и 6-й, 8-й Всероссийских мультikonференциях по проблемам управления (МКПУ-2013, МКПУ-2015), с. Дивноморское, г. Геленджик; III-ей международной заочной научно-практической конференции «Академическая наука-проблемы и достижения», Москва, 2014 г.

Личный вклад автора заключается в разработке методов создания параллельных программ с масштабируемой разрядностью для реализации на РВС алгоритмов быстрого преобразования Фурье, согласованной фильтрации, двумерного БПФ и частотной фильтрации изображений; создании на основании разработанных методов и алгоритмов библиотеки программ, которая может использоваться при решении практических задач ЦОС на реконфигурируемых вычислительных системах.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных печатных работах: из них 7 статей, из которых 3 статьи опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, а также тезисы и материалы 9 докладов на российских и международных научно-технических конференциях. По теме диссертации получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы отражены в 5 отчетах о НИОКР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 96 наименований и двух приложений. Основная часть работы изложена на 179 страницах и включает 66 рисунков.

Диссертация соответствует п. 8 («Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования») в части «методов создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных» паспорта специальности 05.13.11 «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей», технические науки.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, а также приведено краткое содержание каждой из глав.

В первой главе диссертации проведен анализ современных многопроцессорных вычислительных систем, предназначенных для задач ЦОС. Сделан вывод о том, что РВС на базе ПЛИС обладают существенными преимуществами в сравнении с многопроцессорными вычислительными системами традиционных архитектур, позволяя настраивать вычислительное поле системы под структуру алгоритма решаемой задачи и обеспечивать более высокую реальную производительность, близкую к пиковой, при решении вычислительно трудоёмких и сильносвязанных задач ЦОС в режиме реального времени.

Показано, что использование формата представления данных с фиксированной запятой при решении задач обработки сигналов на РВС значительно повышает удельную и реальную производительности системы, однако требует контроля над точностью вычислений и переполнениями разрядной сетки в условиях ограниченной и изменяемой разрядности представления данных на различных вычислительных этапах. Широко используемыми алгоритмами при решении вычислительно трудоёмких задач ЦОС являются алгоритмы быстрого преобразования Фурье. Однако было показано, что существующие методы структурной реализации БПФ на многопроцессорных вычислительных системах не позволяют обеспечить высокую удельную производительность РВС при заданной точности вычислений. Таким образом, доказана необходимость разработки новых методов создания параллельно-конвейерных программ, реализующих алгоритмы БПФ и повышающих удельную производительность РВС при обеспечении требуемой точности вычислений.

Во второй главе разработан метод создания параллельно-конвейерных программ для реализации быстрого преобразования Фурье на РВС для данных с фиксированной запятой, использующий априорное (до начала расчёта алгоритма) определение итераций БПФ, требующих масштабирования данных с целью исключения возможных переполнений разрядной сетки при выполнении арифметических операций. Метод позволяет уменьшить число операций масштабирования и связанных с ними погрешностей при выполнении БПФ, осуществляя масштабирование только там, где это необходимо в потоке поступления данных. При этом количество задействованного аппаратного ресурса ПЛИС на реализацию метода является минимальным, что позволяет обеспечить максимальную удельную производительность РВС. Метод включает следующие этапы:

1) априорное определение номера первой итерации БПФ с масштабированием:

$$\text{для БПФ с прореживанием по частоте: } it = \text{floor} \left(\frac{2}{3} \cdot \log_2 \left(\frac{M}{Am} \right) \right) + 1; \quad (1)$$

для БПФ с прореживанием по времени: $it = \text{floor} \left(\frac{1}{\log_2(1 + \sqrt{2})} \cdot \log_2 \left(\frac{M}{Am} \right) \right) + 1$; (2)

где $Am = \max \left[\max_n |\text{Re}[\dot{S}_{\text{ex}}(n)]|, \max_n |\text{Im}[\dot{S}_{\text{ex}}(n)]| \right]$; $M=2^{b-1}-1$, b – количество разрядов в слове данных; $|\text{Re}[\dot{S}_{\text{ex}}(n)]|$, $|\text{Im}[\dot{S}_{\text{ex}}(n)]|$, – модули реальных и мнимых частей входных комплексных данных $\dot{S}_{\text{ex}}(n)$, $n=[0..(N-1)]$, N – число данных;

2) априорное определение числа итераций БПФ с масштабированием:

$$R_{\text{БПФ}} = \min \left[(It - it), \max \left[0, \text{ceil} \left[\log_2 \left(\frac{|S_f|_{\text{max}}}{M} \right) \right] \right] \right], \quad (3)$$

где $It = \log_2(N)$ – число итераций БПФ; $|S_f|_{\text{max}} = \max \left(K_{3C} \sqrt{\frac{F_d}{\Delta F}}, K_{III} \right) \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} |\dot{S}_{\text{ex}}(n)|^2}$, –

верхняя граница спектра входного сигнала; ΔF – рабочая полоса частот; F_d – частота дискретизации; K_{3C} , K_{III} – коэффициенты, учитывающие неравномерность амплитуды спектра в полосе частот;

3) расстановка команд на применение масштабирования для итераций БПФ;

4) расчёт БПФ с масштабированием на итерациях с it по $(it + R_{\text{БПФ}} - 1)$.

Структурная схема метода реализации БПФ с априорным определением итераций, требующих масштабирования на РВС, представлена на рисунке 1, где блоки I_p , $p=[1..P]$, – ступени конвейера, выполняющие расчёт итерации БПФ; M – управляемые блоки масштабирования данных, которые в зависимости от управляющей команды k_i применяют или не применяют операцию масштабирования; $\dot{W}(l) = \exp(-j2\pi l / N)$ – комплексные поворачивающие множители.

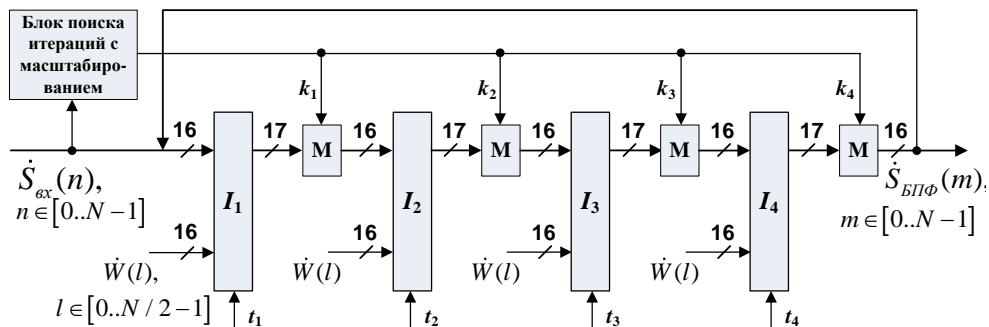


Рисунок 1 – Пример структурной схемы реализации БПФ с априорным определением итераций с масштабированием на четырёхступенчатом вычислительном конвейере

Для обеспечения более высокой удельной производительности РВС в сравнении с существующими методами и для повышения точности получаемых результатов в сравнении с созданным методом априорного поиска итераций с масштабированием разработан метод создания параллельно-конвейерных программ, реализующий БПФ на РВС с поэтапным увеличением разрядности представления результатов вычислений на выходах каждой ступени вычислительного конвейера и масштабированием на последней ступени конвейера. Метод включает следующие этапы.

1) Расчёт группы итераций БПФ посредством P -ступенчатого вычислительного конвейера с увеличивающейся на один бит разрядностью представления результатов базовых операций БПФ на каждой ступени конвейера.

2) Если все итерации БПФ рассчитаны, то выход, иначе переход на п. 3).

3) Масштабирование данных на выходе последней ступени вычислительного конвейера для приведения к разрядности входов на первую ступень. Масштабирование выполняется с сохранением максимально возможного числа значащих разрядов. Для этого:

– все данные умножаются на: $k = 2^{-R}$, $R = \text{enc}(Am) - b + 2$, (4)

где $\text{enc}(Am)$ – функция поиска старшего значащего бита числа Am ; b – число разрядов результата масштабирования; $Am = \max \left[\max_n |\text{Re}[\dot{S}(n)]|, \max_n |\text{Im}[\dot{S}(n)]| \right]$;

– выбирается диапазон разрядов масштабируемых значений, начиная с $(b - 1)$ по младший нулевой разряд; переход на п. 1).

Структурная схема метода реализации БПФ с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием на РВС представлена на рисунке 2.

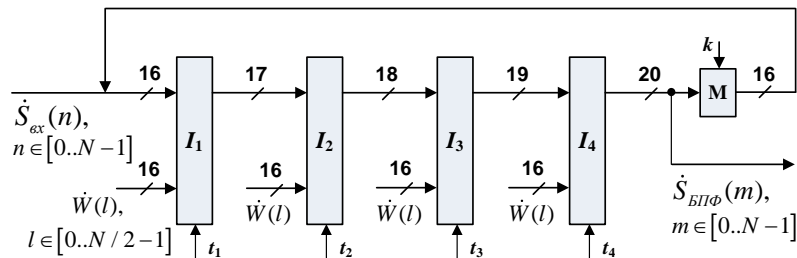


Рисунок 2 – Пример структурной схемы реализации БПФ с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием на четырёхступенчатом вычислительном конвейере

Для разработанных методов проведён сравнительный анализ задействованных аппаратных ресурсов ПЛИС фирмы Xilinx серии Virtex-7 (рисунок 3). Для удобства и наглядности сравнения задействованного аппаратного ресурса ПЛИС использовались реализации различных операций в ПЛИС (арифметических, логических, управляющий, коммутационных и др.) на логических элементах (LUTs– Look-Up-Table) и триггерах (FlipFlops) без использования DSP-блоков (DSP48E1).

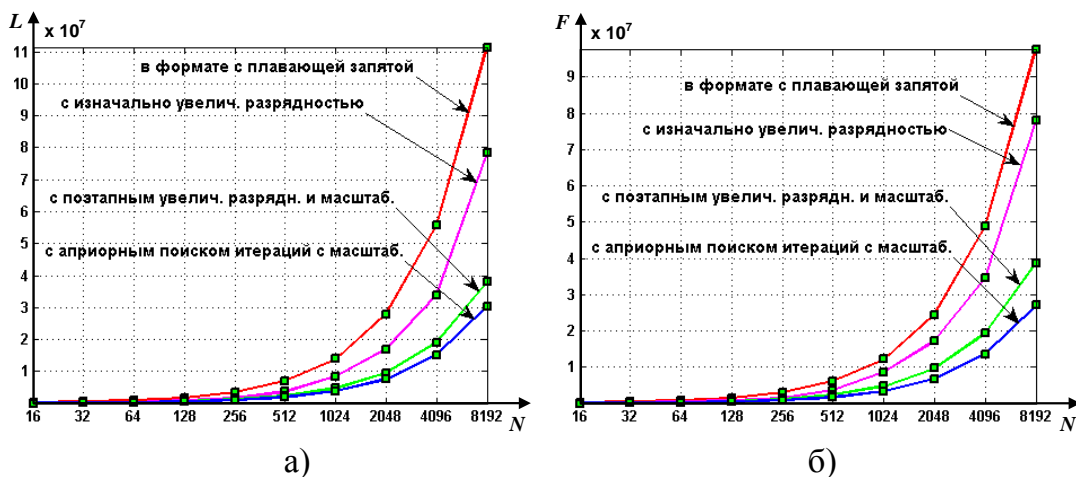


Рисунок 3 – Зависимость аппаратных затрат ПЛИС от числа входных отсчётов N для различных методов реализации БПФ: а) LUTs; б) FlipFlops

Анализ показал уменьшение задействованных аппаратных ресурсов ПЛИС в сравнении с реализацией БПФ на базе с плавающей запятой: для метода априорного

поиска итераций с масштабированием – в 3,7 раза по LUTs и 3,6 раза по FlipFlops; для метода с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием – в 2,9 раза по LUTs и 2,5 раза по FlipFlops. Уменьшение задействованных аппаратных ресурсов ПЛИС в сравнении с реализацией БПФ на базе с фиксированной запятой, с использованием изначально увеличенной на число итераций БПФ разрядности составило: для метода априорного поиска итераций с масштабированием – в 2,3 раза по LUTs и в 2,6 раза по FlipFlops; для метода с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием – в 1,9 раза по LUTs и в 1,8 раза по FlipFlops.

Благодаря сокращению аппаратных ресурсов было обеспечено пропорциональное повышение удельной производительности PBC при использовании созданных методов. При этом погрешности вычислений для разработанных методов и метода с изначально увеличенной разрядностью соизмеримы.

Сравнение созданных методов между собой показало, что метод с априорным поиском итераций задействует меньшее число аппаратных ресурсов ПЛИС, в среднем в 1,25 раза (на 20%) для LUTs и в 1,43 раза (на 30%) для FlipFlops, обеспечивая лучшую удельную производительность при практически сопоставимой точности вычислений (рисунок 4), что позволяет сделать выбор в пользу этого метода при расчёте спектра сигнала. Однако следует отметить, что точность получаемых решений для метода априорного поиска итераций с ростом числа входных отсчётов ухудшается, что связано с увеличением числа операций масштабирования. Показано, что если точность получаемых решений с помощью метода априорного поиска итераций с масштабированием не будет удовлетворять требуемой, то следует воспользоваться методом реализации БПФ с поэтапным увеличением разрядности, как обеспечивающим лучшую точность.

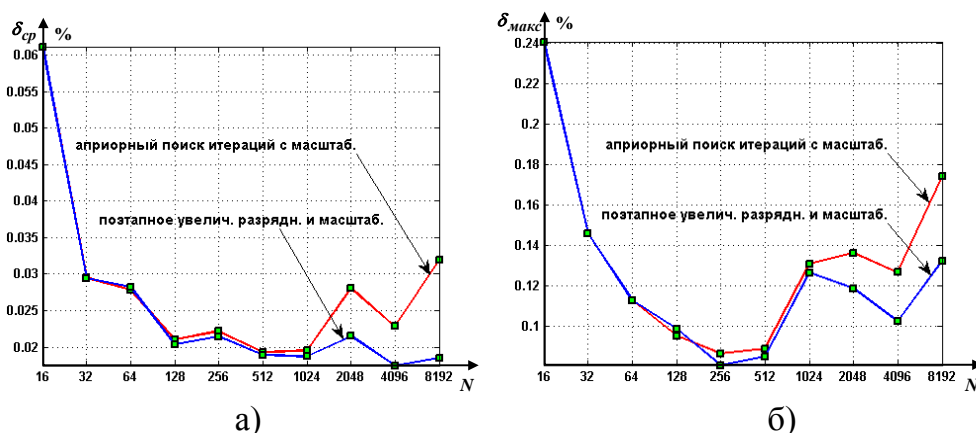


Рисунок 4 – Зависимость погрешности результатов БПФ от числа входных отсчётов N для созданных методов: а) средняя относительная δ_{cp} ; б) максимальная относительная δ_{max}

На основе предложенных методов реализации алгоритмов быстрого преобразования Фурье на PBC разработана методика создания структурно-процедурных алгоритмов и параллельно-конвейерных программ для решения задач цифровой обработки сигналов, использующих БПФ, которая включает этапы:

- 1) синтез общей функциональной структуры реализуемого алгоритма задачи;
- 2) расстановку базовых функциональных элементов реализуемого алгоритма;
- 3) выбор варианта масштабируемой разрядности для функциональных элементов, обеспечивающего заданную точность вычислений:
 - управляемое масштабирование результата текущей операции;
 - поэтапное увеличение разрядности результата текущей операции;

–комбинированный вариант масштабируемой разрядности;

4) создание унифицированной вычислительной структуры для выбранного варианта масштабируемой разрядности (под унифицированной вычислительной структурой понимается структура, топология которой не меняется при организации различных информационных потоков);

5) разработку программы на языке высокого уровня COLAMO для полученной вычислительной структуры.

Алгоритмическая схема методики создания структурно-процедурных алгоритмов и программ для РВС при решении задач ЦОС представлена на рисунке 5.

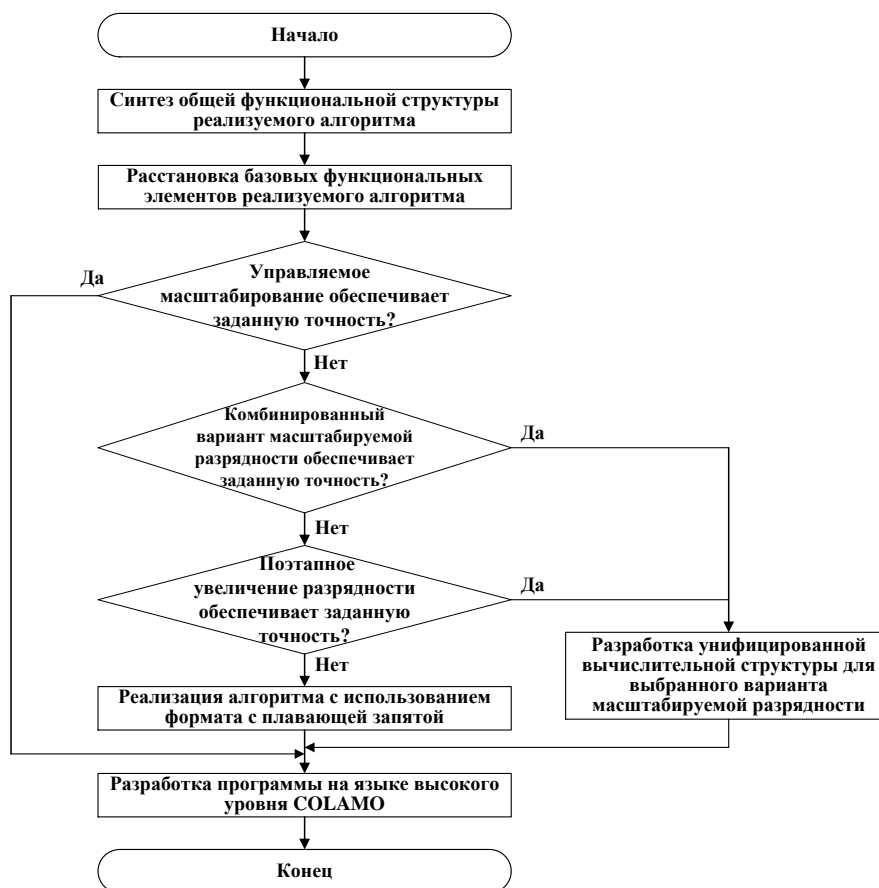


Рисунок 5 – Алгоритмическая схема методики создания структурно-процедурных алгоритмов и программ для РВС при решении задач ЦОС

В третьей главе на основе разработанных методов и методики создания структурно-процедурных алгоритмов и параллельно-конвейерных программ созданы алгоритмы согласованной фильтрации с масштабируемой разрядностью для РВС, основанные либо на априорном поиске итераций с масштабированием как для прямого, так и обратного БПФ, либо на поэтапном увеличении разрядности в заданной группе итераций БПФ и масштабировании на всех вычислительных этапах, требующих уменьшения разрядности данных. Разработанные алгоритмы позволяют синтезировать рациональную с точки зрения аппаратных затрат унифицированную вычислительную структуру для прямого и обратного БПФ.

Алгоритм согласованной фильтрации для РВС с априорным поиском итераций, требующих масштабирования, включает следующие этапы:

1) априорное определение номера первой итерации (см. выражения (1), (2)) и числа итераций с масштабированием прямого БПФ (см. выражение (3)) и априорное определение числа итераций с масштабированием обратного БПФ:

$$R_{\text{БПФ}} = \min \left[It, \max \left[0, \text{ceil} \left[\log_2 \left(\frac{N \cdot \sqrt{\frac{\Delta F}{F_d}} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} |S_{\text{ex}}(n)|^2}{2^{R_{\text{БПФ}}} \cdot M} \right) \right] \right] \right],$$

где $R_{\text{БПФ}}$ – число итераций с масштабированием в алгоритме прямого БПФ;

2) расстановку команд управляемого масштабирования для итераций прямого и обратного БПФ (масштабирование обратного БПФ выполняется с первой итерации);

3) расчёт прямого БПФ с масштабированием на итерациях с it по $(it+R_{\text{БПФ}}-1)$;

4) умножение комплексного спектра входной последовательности на комплексно-сопряжённый спектр эталонного сигнала;

5) масштабирование результатов произведений спектров путём выбора необходимого диапазона разрядов, начиная со старшего;

б) переключение вычислительного конвейера с помощью управляющей команды на расчёт обратного БПФ и вычисление обратного БПФ с масштабированием на итерациях с 1-ой по $R_{\text{БПФ}}$.

Структурная схема реализации на РВС согласованной фильтрации с априорным поиском итераций с масштабированием приведена на рисунке 6.

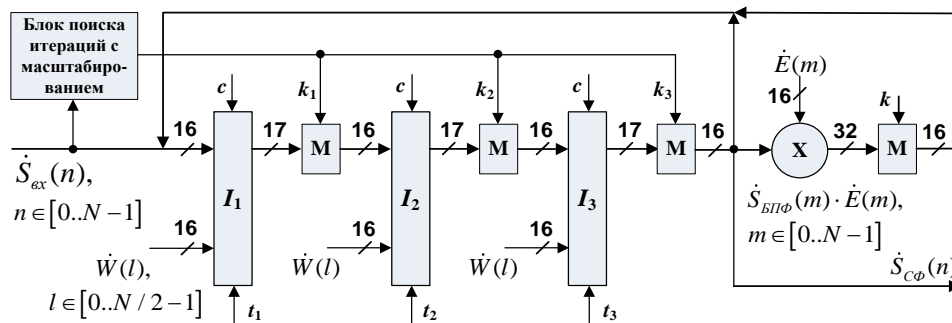


Рисунок 6 – Структурная схема реализации согласованной фильтрации с априорным определением итераций с масштабированием на трёхступенчатом конвейере

Алгоритм согласованной фильтрации для РВС с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием включает следующие этапы:

1) расчёт группы итераций прямого БПФ посредством P -ступенчатого вычислительного конвейера с увеличивающейся на один бит разрядностью представления результатов базовых операций БПФ;

2) умножение комплексного спектра входной последовательности на комплексно-сопряжённый спектр эталонного сигнала;

3) расчёт группы итераций обратного БПФ посредством P -ступенчатого вычислительного конвейера;

4) масштабирование данных в соответствии с выражением (4) на всех вычислительных этапах требующих масштабирования.

Структурная схема реализации согласованной фильтрации с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием приведена на рисунке 7.

Сравнение аппаратных затрат для созданных алгоритмов реализации согласованной фильтрации на РВС показало такое же соотношение аппаратных затрат, как и при сравнении реализаций БПФ – в среднем в 1,25 раза (на 20%) для LUTs и в 1,43 раза (на 30%) для FlipFlops, что связано с использованием одной унифицированной вычислительной структуры для расчёта прямого и обратного БПФ. При этом в реализацию согласованной фильтрации добавляются только блок

комплексного умножения, необходимый для расчёта произведений спектров комплексного входного сигнала и комплексно-сопряжённого эталонного сигнала, а также необходимые коммутационные связи. Аппаратные ресурсы ПЛИС, задействованные при реализации блока комплексного умножения, ничтожно малы в сравнении с ресурсами, затрачиваемыми на реализацию БПФ.

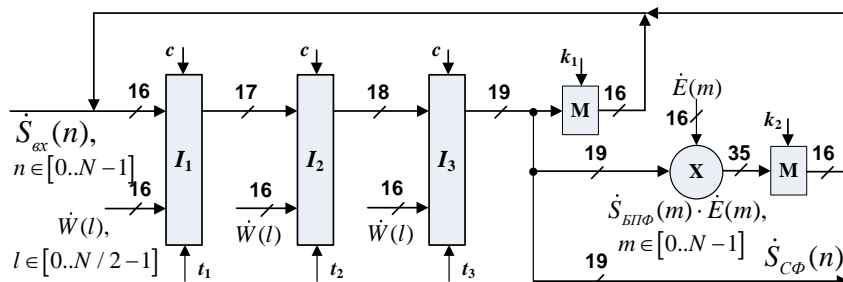


Рисунок 7 – Структурная схема реализации согласованной фильтрации с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием на трёхступенчатом конвейере

Аналогичные оценки аппаратных затрат были проведены и для реализаций различных операций в ПЛИС с использованием DSP-блоков (DSP48E1) (рисунок 8). Основным элементом, использующим DSP-блоки, является умножитель. При анализе аппаратных затрат следует учитывать, что число DSP-блоков, задействованных в умножителе, меняется ступенчато при достижении определённых порогов разрядности по входам и выходам.

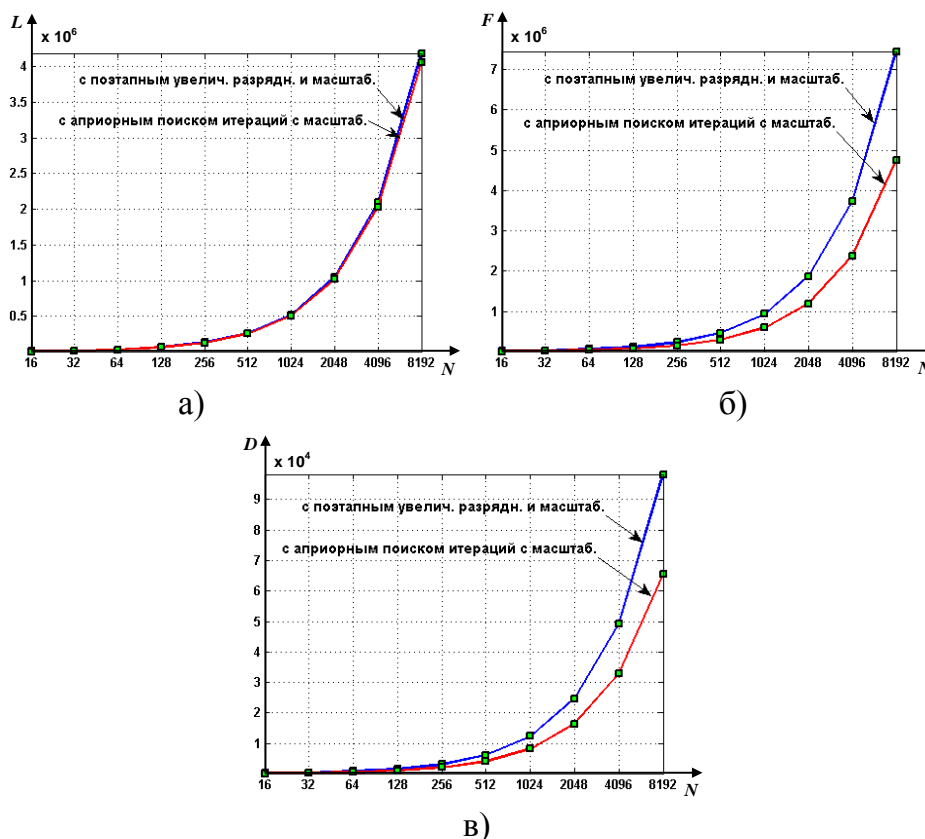


Рисунок 8 – Зависимость аппаратных затрат ПЛИС от числа входных отсчётов N для согласованной фильтрации с априорным поиском итераций с масштабированием и с поэтапным увеличением разрядности: а) LUTs; б) FlipFlops; в) DSP48E1

Сравнение точности вычислений для разработанных алгоритмов (рисунок 9) показало существенный рост погрешности согласованной фильтрации с априорным поиском итераций, с ростом размерности БПФ, что вызвано увеличением числа

операций масштабирования. В результате можно сделать вывод о том, что нельзя рекомендовать этот метод для задач с высокими требованиями к точности получаемых результатов. В свою очередь, использование реализации согласованной фильтрации с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием позволяет существенно снизить погрешности получаемых результатов, в том числе и для большого числа входных данных, что делает целесообразным применение этого алгоритма для решения задач ЦОС с повышенным требованием к точности.

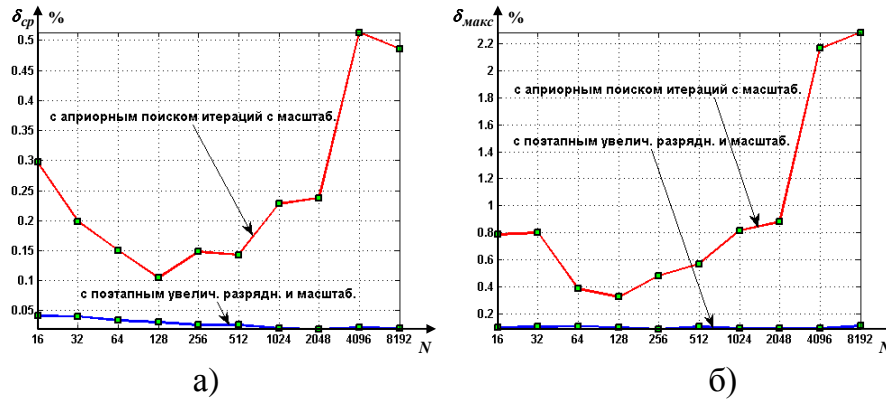


Рисунок 9 – Зависимость погрешности результатов от числа входных отсчётов N для согласованной фильтрации с использованием созданных методов:
а) средняя относительная δ_{cp} ; б) максимальная относительная δ_{max}

В четвёртой главе на основе разработанных методов реализации быстрого преобразования Фурье и методики создания структурно-процедурных алгоритмов и параллельно-конвейерных программ разработаны алгоритмы двумерного БПФ и частотной фильтрации изображений с масштабируемой разрядностью для РВС. Первый алгоритм основан на априорном поиске общих для всех строк (столбцов) матрицы изображений итераций БПФ с масштабированием. Второй алгоритм использует поэтапное увеличение разрядности в заданной группе итераций БПФ с последующим масштабированием по строкам (столбцам) матрицы на основе общего рассчитанного коэффициента. В результате оба алгоритма обеспечивают корректные, одинаково отмасштабированные данные результирующего изображения и унифицированную вычислительную структуру для расчёта прямого и обратного БПФ. Процедура частотной фильтрации изображений предназначена для улучшения, восстановления изображения и включает следующие этапы: расчёт прямого двумерного БПФ, умножение на передаточную функцию частотного фильтра, расчёт обратного двумерного БПФ. При этом расчёт двумерного БПФ выполняется по строкам и столбцам матрицы изображения с помощью одномерного БПФ.

Реализация на РВС частотной фильтрации изображений с априорным поиском итераций, требующих масштабирования, состоит из следующих этапов:

- 1) поиска номера первой итерации it_x и числа итераций R_x (см. выражение (1), (2), (3)) БПФ с масштабированием для каждой строки $x \in [1..M]$ матрицы изображений;
- 2) определения минимального номера первой итерации $it_{min} = \min(it_x)$ и максимального числа итераций с масштабированием $R_{max} = \max(R_x)$ для полученных значений по строкам;
- 3) расчёта алгоритма БПФ по всем строкам матрицы изображений с масштабированием на итерациях от it_{min} до $(it_{min} + R_{max} - 1)$;
- 4) поиска номера первой итерации it_y и числа итераций R_y БПФ с масштабированием для каждого столбца $y \in [1..M]$ матрицы изображений;

- 5) определения минимального номера первой итерации $it_{min} = \min(it_y)$ и максимального числа итераций с масштабированием $R_{max} = \max(R_y)$ по столбцам;
- б) расчёта алгоритма БПФ по всем столбцам матрицы изображений с масштабированием на итерациях от it_{min} до $(it_{min} + R_{max} - 1)$;
- 7) умножения матрицы спектра двумерного БПФ $S_{БПФ}(x,y)$ на передаточную функцию частотного фильтра $H(x,y)$;
- 8) масштабирования полученных произведений путём выбора необходимого диапазона разрядов, начиная со старшего;
- 9) переключения блоков базовых операций БПФ на режим расчёта обратного БПФ и выполнение пп.1)-б) для расчёта двумерного обратного БПФ.

Структурная схема реализации метода изображена на рисунке 10.

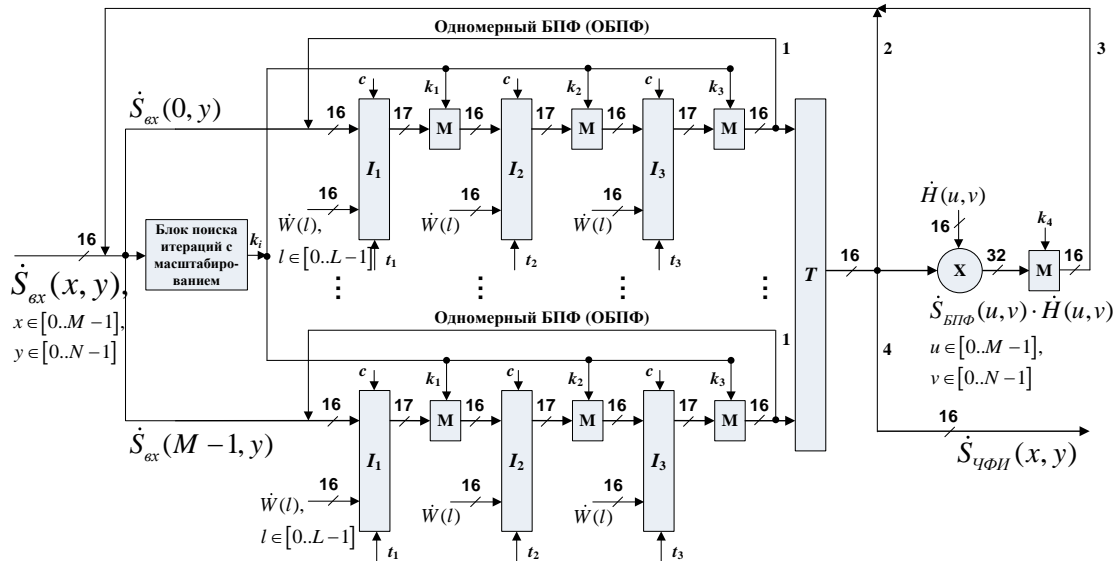


Рисунок 10 – Пример структурной схемы реализации частотной фильтрации изображений на РВС с априорным определением итераций с масштабированием

Алгоритм частотной фильтрации изображений с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием включает следующие этапы:

- 1) выбор строк $x \in [1..N]$ матрицы изображений и расчёт одномерных БПФ по всем строкам матрицы с помощью P -ступенчатого вычислительного конвейера;
- 2) расчёт общего коэффициента масштабирования $k_1 = \max(k_x)$ на выходе последней ступени вычислительного конвейера и коэффициента масштабирования k_2 после расчёта одномерного БПФ с последующим масштабированием результатов по всем строкам матрицы, где k_x – коэффициенты, полученные для каждой строки, k_x и k_2 вычисляются в соответствии с формулой (4);
- 3) выбор столбцов $y \in [1..M]$ полученной матрицы изображений и расчёт одномерных БПФ по всем столбцам матрицы с помощью P -ступенчатого конвейера;
- 4) расчёт общего коэффициента масштабирования $k_1 = \max(k_y)$ на выходе последней ступени вычислительного конвейера и коэффициента масштабирования k_2 после расчёта одномерного БПФ с последующим масштабированием результатов по всем столбцам матрицы, где k_y – коэффициенты, полученные для каждого столбца, k_y и k_2 вычисляются в соответствии с формулой (4);
- 5) умножение полученного спектра двумерного БПФ $S_{БПФ}(u,v)$ на передаточную функцию частотного фильтра $H(u,v)$;
- б) масштабирование полученных произведений с выбором максимально возможного числа значащих разрядов данных;

7) переключение конвейерных блоков базовых операций БПФ на режим расчёта обратного БПФ и выполнение пп.1)-4) для расчёта двумерного обратного БПФ.

Структурная схема реализации метода изображена на рисунке 11.

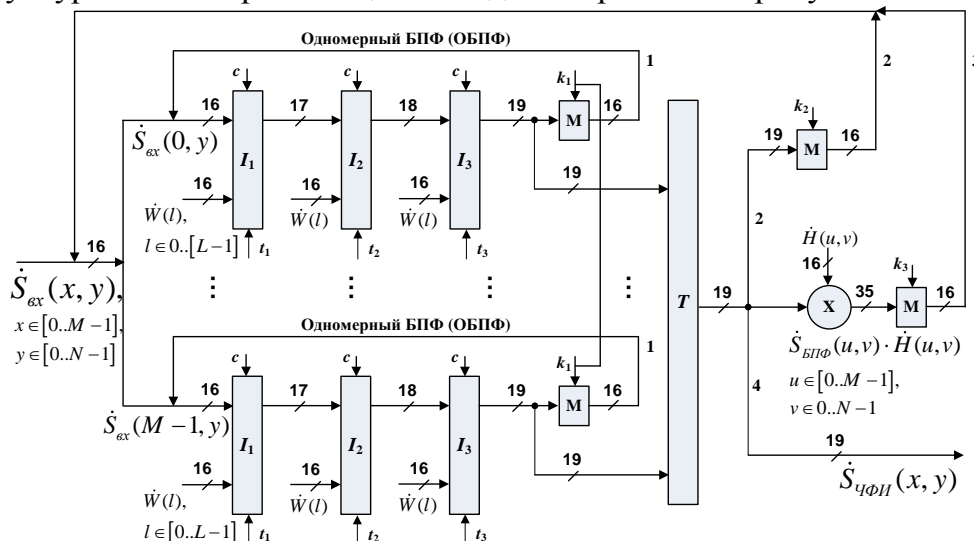


Рисунок 11 – Пример структурной схемы реализации частотной фильтрации изображений на РВС с поэтапным увеличением разрядности и масштабированием

Сравнение аппаратных затрат для разработанных алгоритмов частотной фильтрации изображений на РВС соотносятся с полученными оценками для реализаций БПФ и согласованной фильтрации (в среднем в 1,25 раза (на 20%) для LUTs и в 1,43 раза (на 30%) для FlipFlops) в силу унифицированной вычислительной структуры для расчёта как прямого, так и обратного БПФ, и благодаря пропорциональному росту аппаратных затрат с увеличением размера обрабатываемого изображения для обеих реализаций алгоритма.

Сравнение точности получаемых решений для разработанных алгоритмов частотной фильтрации изображений на РВС (рисунок 12) показало высокую максимальную погрешность алгоритма с априорным поиском итераций, которая может вносить искажения в результирующее изображение, поэтому при повышенных требованиях к качеству получаемых изображений следует воспользоваться алгоритмом частотной фильтрации изображений с поэтапным увеличением разрядности, обладающим приемлемой и стабильной точностью получаемого результата с погрешностью менее 1% для различных размеров входных изображений.

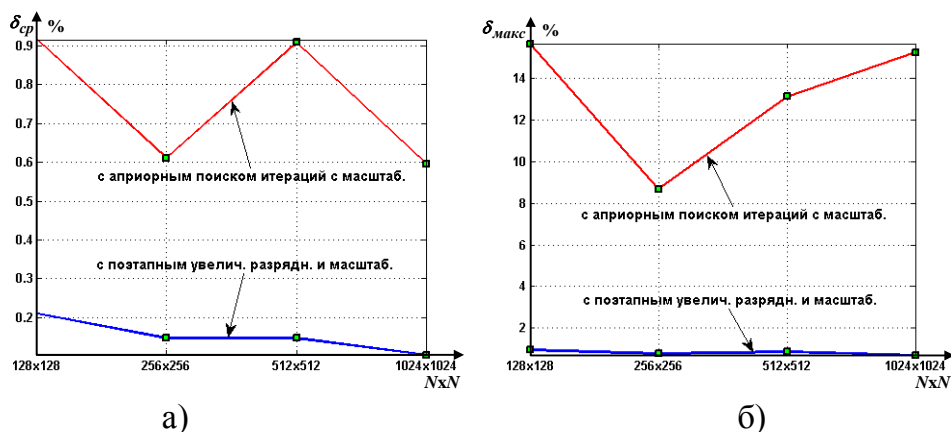


Рисунок 12 – Зависимость погрешности результатов частотной фильтрации изображений от числа входных отсчётов N с использованием созданных методов:

а) средняя относительная $\delta_{ср}$; б) максимальная относительная $\delta_{макс}$

На основе разработанных методов и алгоритмов были созданы библиотека программ и графический интерфейс взаимодействия пользователя с библиотекой. Графический интерфейс позволяет осуществлять взаимодействие библиотеки с компонентами программного комплекса средств разработки приложений для PBC и на основе выбранного пользователем библиотечного элемента создавать необходимые конфигурации ПЛИС. Схема взаимодействия библиотеки программ с программным комплексом разработки приложений для PBC показана на рисунке 13.

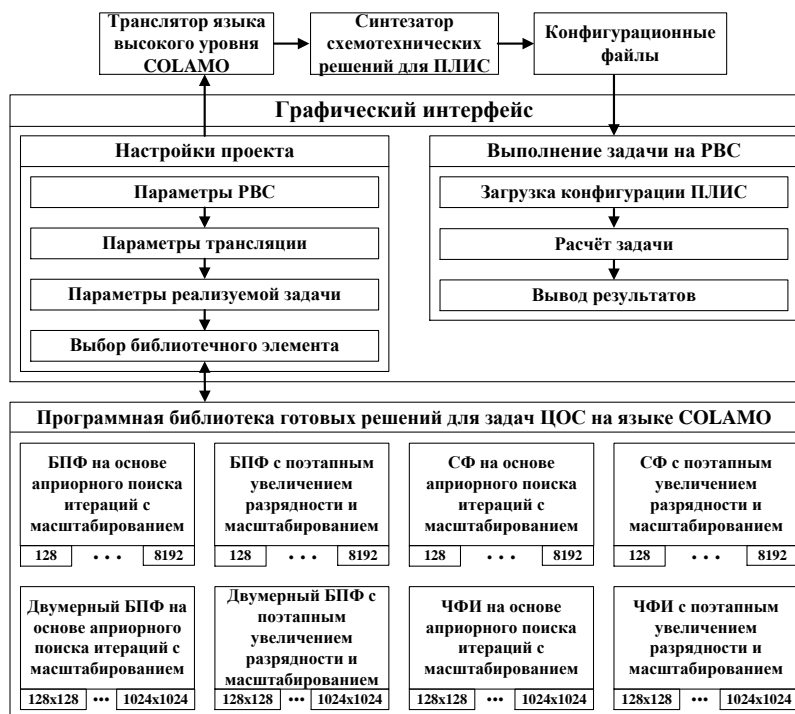


Рисунок 13 – Схема взаимодействия библиотеки программ с программным комплексом разработки приложений для PBC

В заключении работы сформулированы основные научные, теоретические и прикладные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основной научный результат диссертации заключается в решении **актуальной научной задачи**: *разработке методов создания параллельно-конвейерных программ с масштабируемой разрядностью, повышающих удельную производительность реконфигурируемых вычислительных систем при решении задач ЦОС на основе быстрого преобразования Фурье для заданной точности вычислений.*

При проведении исследований и разработок в диссертации получены следующие теоретические и прикладные результаты, обладающие научной новизной:

1) метод создания параллельных программ для реализации быстрого преобразования Фурье на PBC для данных с фиксированной запятой, отличающийся от известных априорным определением итераций БПФ с масштабированием;

2) метод создания параллельных программ для реализации быстрого преобразования Фурье на PBC для данных с фиксированной запятой, отличающийся от известных поэтапным увеличением разрядности представления результатов вычислений в заданной группе итераций БПФ и масштабированием, с выбором максимально возможного числа значащих разрядов на вычислительных этапах, требующих уменьшения разрядности данных;

3) алгоритмы согласованной фильтрации с масштабируемой разрядностью для РВС, отличающиеся или априорным определением итераций с масштабированием, или поэтапным увеличением разрядности с последующим масштабированием как для прямого, так и для обратного БПФ;

4) алгоритмы двумерного БПФ и частотной фильтрации изображений с масштабируемой разрядностью для РВС, отличающиеся процедурой определения общего для всех строк (столбцов) входной двумерной матрицы коэффициента масштабирования;

5) методика создания структурно-процедурных алгоритмов и параллельно-конвейерных программ для решения задач ЦОС на РВС, позволяющая применять разработанные методы с масштабируемой разрядностью операндов в различных алгоритмах и задачах обработки сигналов, использующих БПФ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Чкан, А.В. Метод поиска итераций с переполнением разрядной сетки в алгоритмах быстрого преобразования Фурье при обработке данных в формате с фиксированной запятой [Текст] / А.В. Чкан // Вестник компьютерных и информационных технологий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2016 г. – №7 (146), С. 41-47. **(ведущий рецензируемый журнал, входит в перечень ВАК);**

2. Чкан, А.В. Масштабирование данных с фиксированной точкой в процедуре быстрой свертки [Текст] / А.В. Чкан, О.В. Ершова, Е.В. Кириченко, Е.А. Семерников // Журнал «Радиотехника». – М.: «Радиотехника», 2015 г. – №4. – С. 66-72. **(ведущий рецензируемый журнал, входит в перечень ВАК);**

3. Чкан, А.В. Ошибки усечения результатов арифметических операций с фиксированной точкой в алгоритмах БПФ [Текст] / А.В. Чкан, О.В. Ершова, Е.В. Кириченко, Е.А. Семерников // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014г. – №12(161). – С. 138-148. **(ведущий рецензируемый журнал, входит в перечень ВАК);**

4. Чкан, А.В. Особенности обработки целочисленных данных с фиксированной точкой при расчете диаграммы направленности фазированной антенной решетки [Текст] / А.В. Чкан, Е.А. Семерников, М.С. Кочерга // Высокопроизводительные вычислительные системы // Труды молодых учёных ЮФУ и ЮНЦ РАН. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 102-107;

5. Чкан, А.В. Организация вычислений и анализ обработки данных в конвейерном вычислителе БПФ на основе ПЛИС семейства Virtex [Текст] / А.В. Чкан, Е.А. Семерников, М.С. Кочерга // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии» (СКТ-2012). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – Т.1 – С. 125-130;

6. Чкан, А.В. Источники погрешностей и способы их минимизации в алгоритме БПФ при обработке данных с фиксированной запятой [Текст] / А.В. Чкан // Материалы 6-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2013). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013г. – С. 185-187;

7. Чкан, А.В. Библиотека математических операций для программного моделирования алгоритмов обработки данных с фиксированной запятой, предназначенных для реализации в ПЛИС [Текст] / А.В. Чкан // Труды 3-ей международной заочной научно-практической конференции «Академическая наука – проблемы и достижения». – Москва, – 2014 г. – С. 151-153;

В совместных работах автором получены **следующие результаты**: в работе [2] предложены условия поиска итераций с масштабированием в алгоритмах прямого и обратного БПФ, сформулирован метод структурной реализации БПФ и согласованной фильтрации с априорным поиском итераций, требующих масштабирования; в [3] получены аналитические выражения среднеквадратического значения ошибок вычисления БПФ для белого гауссовского шума при округлении результатов арифметических операций в алгоритме БПФ с прореживанием по частоте в отсутствие масштабирования; в [4] предложен механизм битовых преобразований для входных 16-разрядных знаковых целых чисел с фиксированной запятой; в [5] предложен подход приведения данных к требуемой разрядности при выполнении целочисленной арифметики в конвейерном вычислительном блоке, реализующем базовую операцию БПФ.

Подписано к печати ____ .01.2017 г.
Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная. Печать ризография.
Усл. п.л. - 1,25. Уч.-изд.л. - 1,15.
Заказ № _____. Тираж 120 экз.