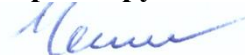


**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Институт компьютерных технологий и информационной безопасности
Кафедра интеллектуальных и многопроцессорных систем

На правах рукописи



Чекина Мария Дмитриевна

**Методы и средства обработки фракталов на реконфигурируемых
вычислительных системах**

*Специальность 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,
технические науки*

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» (ЮФУ) на кафедре интеллектуальных и многопроцессорных систем (ИМС) Института компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ) Инженерно-технологической академии (ИТА).

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор технических наук, профессор,
Левин Илья Израилевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Заборовский Владимир Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-
Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
г. Санкт-Петербург, директор Института
компьютерных наук и технологий

Ватутин Эдуард Игоревич,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Юго-Западный
государственный университет»
г. Курск, доцент кафедры
вычислительной техники

Защита диссертации состоится «22» сентября 2023 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.02.06 при Южном федеральном университете по адресу: г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корп. «И», комн. 347.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 148, и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: <https://hub.sfedu.ru/storage/1/1317176/b096aabf-f294-4fef-8403-12598f578a06/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



А.П. Кухаренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обработка геометрических параметров объектов различных размеров является важной частью математических моделей. Описание реальных объектов очень трудоемко или вообще невозможно при использовании инструментария, предоставляемого евклидовой геометрией, поэтому при решении задач, связанных с описанием реальных природных и техногенных объектов, возникает необходимость оперировать самоподобными структурами – фракталами. Фрактальные алгоритмы применяются в таких областях, как анализ финансовых рынков, обработка изображений, моделирование пористых веществ, фильтрации жидкостей и природных объектов, обладающих сложной структурой.

Для областей приложения фрактальных алгоритмов характерны обработка больших массивов данных и высокая информационная связность задач. При распараллеливании таких задач требуется выполнять многочисленные обмены данными между параллельно выполняемыми процессами. С увеличением количества задействованных вычислительных узлов возрастает время обмена данными между ними, т.к. скорость работы интерфейсов обмена данными существенно ниже, чем у вычислительных узлов.

Для многопроцессорных систем на базе универсальных процессоров характерны большие накладные расходы на передачу данных между процессорами и синхронизацию параллельных процессов, приводящие к простоям части вычислительного оборудования. Графические ускорители обладают большой вычислительной мощностью, но не могут функционировать как самостоятельные устройства. Внутренняя видеопамять в графических процессорах ограничивается десятками гигабайт и при работе с массивами большого объема требуется осуществлять загрузку данных и выгрузку полученных результатов. Из-за того, что скорость работы шины обмена данными намного ниже производительности графического процессора, при увеличении аппаратного ресурса вычислительной системы этот разрыв увеличится и произойдет снижение ее реальной производительности.

Вычислительные системы на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) обладают большим потенциалом для решения задач фрактального типа, благодаря гибкой логике и возможности адаптации архитектуры под структуру конкретной задачи. В широко применяемых гибридных вычислительных системах ПЛИС не являются самостоятельными вычислительными устройствами, а работают в качестве ускорителей для универсальных процессоров. Для гибридных систем также характерна процедурная парадигма вычислений, обладающая всеми недостатками, присущими вычислительным системам, построенным на базе традиционной архитектуры, а именно: необходимостью постоянного обмена данными между процессором управляющей машины и ускорителем, а также регулярными обращениями к внешней памяти, так называемое «бутылочное горло фон Неймана».

В отличие от описанных выше устройств, реконфигурируемые вычислительные системы (РВС), объединяющие множество ПЛИС в единое вычислительное поле, используют структурную парадигму вычислений. Благодаря этому РВС успешно позволяет решить проблему «бутылочного горла», изменяя гибкую логику ПЛИС и выстраивая пространственные коммутации между вычислительными блоками. В то же время на данный момент для РВС не существует методов представления и обработки самоподобных структур, для которых характерна нерегулярность данных, а также необходимость хранения и обработки, помимо полезных данных, управляющей информации, которая определяет связность блоков и может динамически меняться по ходу решения задачи. Существующие методы обработки данных на РВС не позволяют эффективно задействовать вычислительный ресурс при решении задачи фрактального типа. Таким образом, возникает необходимость

в создании новых методов и средств для эффективного решения задач фрактального типа на РВС, обеспечивающих масштабирование приложений.

Степень разработанности темы исследования. Фрактальные методы обработки развивали многие известные ученые. Первое компьютерное моделирование фракталов было проведено Б. Мандельбротом, который ввел понятие «фрактал». Е. Федер описал применение фракталов для различных областей математического моделирования природных объектов и для компьютерной графики. Л. Карпентер применил фракталы для генерации реалистичных ландшафтов. М. Барнсли разработал метод фрактального сжатия изображений, который позже был улучшен А. Слоуном и А. Жакеном. В работах Д. Гиллела и Г. Спозито представлено применение фрактальных методов для моделирования распространения жидкостей и газов в пористых средах.

В диссертации был выполнен обзор существующих методов и средств решения сильносвязных задач на РВС. Метод распараллеливания по итерациям на РВС, реализованный Левиным И.И., позволяет сократить количество вычислительного ресурса, затрачиваемого на подсистему коммутации, и количество памяти, используемой для хранения промежуточных данных. Данный метод решения задач на РВС в дальнейшем использовали: Пелипец А.В. – для задач линейной алгебры, Коваленко А.Г. – для задач математической физики, Семерников Е.А. – для задач цифровой обработки сигналов, Касаркин А.В. – для решения графовых NP-трудных задач. Все перечисленные варианты метода распараллеливания по итерациям основаны на выделении кортежа изоморфных подграфов, реализуемого в РВС неизменными вычислительными структурами, обрабатывающими регулярные потоки данных. Однако при использовании метода распараллеливания по итерациям для решения задач фрактального типа невозможно получить изоморфные информационные графы для эффективного масштабирования вычислительной структуры. В данной работе **впервые** решается задача создания эффективных параллельно-конвейерных программ для решения задач фрактального типа на реконфигурируемых вычислительных системах.

Объект исследования: задачи фрактального типа.

Предмет исследования: методы, алгоритмы и программные средства для решения задач фрактального типа на РВС.

Целью работы является повышение реальной производительности РВС при решении задач фрактального типа.

Научная задача, решаемая в диссертации, состоит в разработке методов и средств обработки самоподобных структур, повышающих реальную производительность реконфигурируемых вычислительных систем при решении задач фрактального типа.

Для достижения сформулированной цели и решения научной задачи необходимо:

1) провести анализ существующих вычислительных средств и методов, позволяющих решать задачи фрактального типа, и существующих способов представления фрактальных данных в вычислительных системах;

2) разработать методы решения на РВС параллельно-конвейерным способом задач фрактального сжатия и декомпрессии изображений, обеспечивающие максимальное задействование вычислительного ресурса системы;

3) разработать метод синтеза вычислительной структуры для решения на РВС задачи распространения газа во фрактальной среде, использующий подобные подграфы;

4) разработать программные средства для решения задач фрактального сжатия и декомпрессии изображений и задачи распространения газа во фрактальной среде.

Методы исследований. В ходе исследований были использованы методы структурной организации вычислений на РВС, основы линейной алгебры, методы дискретиза-

ции математических моделей, методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Практические исследования проведены на РВС «Терциус-2» и «Арктур».

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена корректностью, непротиворечивостью математических выкладок и результатами вычислительных экспериментов. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских научно-технических конференциях, где соискатель выступала с докладами по данной проблематике и получила положительный отзыв научной общественности.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней разработаны:

1) метод решения на РВС параллельно-конвейерным способом задачи фрактального сжатия изображений, **отличающийся** от известных побитовой обработкой данных и сортировкой структур, содержащих выходные данные, по номеру рангового блока;

2) метод решения на РВС параллельно-конвейерным способом задачи декомпрессии сжатых изображений, **отличающийся** от известных использованием одинарной косвенной адресации памяти, содержащей доменные блоки;

3) метод синтеза вычислительной структуры для решения на РВС задачи распространения газа во фрактальной среде, **отличающийся** от известных возможностью оптимизации вычислительной структуры для конкретной СЛАУ на основе оценки ее параметров и использованием подобных вычислительных подграфов в конвейере.

Положения, выдвигаемые для защиты:

1) при решении задач фрактального типа на традиционных многопроцессорных вычислительных системах рост производительности замедляется с увеличением числа задействованных узлов вследствие увеличения объемов данных, пересылаемых между процессорами и памятью устройства, а необходимость синхронизации параллельных процессов приводит к простоем оборудования;

2) разработанные методы параллельно-конвейерной реализации фрактального сжатия и декомпрессии изображений для РВС обеспечивают значительный рост реальной производительности при увеличении вычислительного ресурса системы по сравнению с многопроцессорными приложениями;

3) разработанный метод синтеза вычислительной структуры для решения на РВС задачи распространения газа во фрактальной среде обеспечивает увеличение реальной производительности по сравнению с классическими способами решения СЛАУ на РВС.

Результаты, выдвигаемые для защиты:

1) метод решения на РВС параллельно-конвейерным способом задачи фрактального сжатия изображений, **отличающийся** от известных побитовой обработкой данных, обеспечивающей максимальное задействование вычислительного ресурса системы, и сортировкой структур, содержащих выходные данные, по номеру рангового блока;

2) метод решения на РВС параллельно-конвейерным способом задачи декомпрессии сжатых изображений, **отличающийся** от известных использованием одинарной косвенной адресации для блоков памяти, содержащих доменные блоки;

3) метод синтеза вычислительной структуры для решения на РВС задачи распространения газа во фрактальной среде, **отличающийся** от известных возможностью оптимизации вычислительной структуры для конкретной СЛАУ на основе оценки ее параметров и использованием подобных вычислительных подграфов в конвейере.

Научная значимость. Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, являются важными в развитии теории решения задач фрактального типа. Автор сформулировал принципы организации эффективной обработки фрактальных структур на РВС и показал, что при решении задач, согласно этим принципам, обеспечивается рост реальной производительности при увеличении вычислительных ресурсов системы по сравнению с известными многопроцессорными реализациями.

Автором доказано, что реальная производительность традиционных вычислительных систем при решении задач фрактального типа при линейном увеличении вычислительного ресурса снижается.

Практическая ценность работы. Для решения на РВС задач фрактального сжатия и декомпрессии изображений и задачи супердиффузии разработаны программные средства на языке программирования COLAMO (Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023614463, № 2023617300, № 2023617550, РФ) и синтезированы соответствующие вычислительные структуры.

Разработанные программные средства обеспечивают ускорение в 15000 раз при выполнении на РВС фрактального сжатия по сравнению с аналогичной реализацией для многоядерного универсального процессора. Сравнение времени решения с другими существующими реализациями на ПЛИС показало повышение реальной производительности в 10-40 раз для реализаций на одном кристалле и более чем в 50 раз – по сравнению с графическими ускорителями. При декомпрессии изображения обеспечивается ускорение в 300 раз по сравнению с аналогичной реализацией для многоядерного универсального процессора.

Применение предложенного метода синтеза вычислительной структуры для решения задачи распространения газа во фрактальной среде позволяет повысить реальную производительность на 40% по сравнению с известными способами реализации этой задачи на РВС.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены в ООО «НИЦ СЭ и НК», акт о внедрении от 21 апреля 2023 г., утвержден техническим директором НИЦ СЭ и НК. Материалы диссертации использовались:

- в рамках НИОКР «Разработка нового поколения программного обеспечения РВС для решения ресурсоёмких научно-технических задач различных предметных областей», шифр «Поколение» №НЦ-160217 от 15.08.2016, при реализации модельных параллельно-конвейерных программ, выполняющих обработку данных;

- в рамках НИР «Выбор направления исследований и разработки высокопроизводительных вычислительных систем «СКИФ-ГЕО» второй базовой конфигурации, обеспечивающих формирование оптимальных конфигураций аппаратных средств и программного обеспечения для решения расчетных геолого-геофизических задач», шифр «Нефть» № гос. рег. 115092410004 по договору № 2-26-06-СКИФ/НИР/15 от 22.06.2015.

Результаты диссертации внедрены в учебном процессе кафедры интеллектуальных и многопроцессорных систем (ИМС) Института компьютерных технологий и информационной безопасности (ИКТИБ) Южного федерального университета (ЮФУ), акт от 20 апреля 2023 г., утвержден директором ИКТИБ ЮФУ. Материалы диссертации используются в лекционных курсах по дисциплинам «Современные проблемы прикладной математики и информатики» (тема № 11 «Фракталы. Дробные производные») и «Математическое моделирование процессов гидрофизики на высокопроизводительных вычислительных системах» (модуль 2 «Численная реализация математических моделей гидрофизики»), для подготовки магистров направления подготовки 01.04.02 Прикладная математика и информатика (образовательные программы «Прикладная математика для высокопроизводительных вычислительных систем», «Математическое моделирование в инженерных науках»).

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на всероссийских научно-технических конференциях: 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2014)» с. Дивноморское, Геленджик, 2014 г., XVI ежегодной молодежной научной конференции «Юг России: вызовы времени, открытия, перспективы», г. Таганрог, 2020 г., XVII Ежегодной молодежной научной конференции «Наука и технологии Юга России», г. Таганрог, 2021 г., XIV Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2021) с. Дивноморское, Геленджик, 2021 г., XVIII ежегодной молодежной науч-

ной конференции «Наука Юга России: достижения и перспективы», г. Таганрог, 2022 г., Всероссийской научно-технической конференции «Многопроцессорные вычислительные системы» (МВУС-2022) г. Таганрог, 2022 г., XIX ежегодной молодежной научной конференции «Достижения и перспективы научных исследований молодых ученых Юга России», г. Таганрог, 2023 г.

В 2022 г. цикл работ автора «Методы обработки фракталов на реконфигурируемых вычислительных системах» был удостоен премии для молодых ученых имени академика А.В. Каляева.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных печатных работах: из них 5 статей опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ, 3 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ, а также тезисы и материалы 8 докладов на российских научно-технических конференциях. Результаты работы использованы в отчете о НИР, шифр «Нефть».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 137 наименований и трех приложений. Основная часть работы изложена на 167 страницах и включает 92 рисунка.

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 для параллельной обработки данных и средства параллельного программирования» паспорта специальности 2.3.5 «Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей», технические науки.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выдвигаемые для защиты научные положения, а также приведено краткое содержание каждой из глав.

В первой главе приведен анализ применения фракталов в различных предметных областях, рассмотрены различные способы применения самоподобных структур при моделировании природных и техногенных объектов и процессов.

Показано, что задачи фрактального типа обладают большой вычислительной сложностью и требуют больших вычислительных мощностей, но при этом фрактальные алгоритмы требуют постоянного обмена данными между вычислительными узлами, т.к. обладают высокой связностью, что затрудняет их масштабирование.

Показано, что существующие методы решения задач фрактального типа для многопроцессорных вычислительных систем, построенных на основе графических ускорителей или универсальных процессоров, достигают меньшей производительности, чем реализации для устройств на основе ПЛИС что *доказывает первое положение, выдвигаемое для защиты.*

Выполнен обзор существующих способов решения задач фрактального типа на ПЛИС. Выявлены недостатки существующих реализаций, основным из которых является отсутствие возможности их масштабирования на несколько ПЛИС.

Произведен обзор структур данных, используемых для обработки фракталов в классических вычислительных системах. Рассмотрены двоичные, четверичные и восьмеричные деревья, списки с пропусками, хранение систем итерируемых функций (СИФ) и их коэффициентов. Указан основной недостаток данных структур – требования динамического выделения оперативной памяти и последующая фрагментация данных в памяти устройств.

Проведен анализ описанных выше структур на предмет возможности их применения при решении задач фрактального типа на РВС. Описаны способы представления данных, применяющиеся в РВС (линейная и косвенная адресация памяти, множества, пакеты данных), доказана их неэффективность для хранения самоподобных структур, показана необходимость создания специальных структур данных для работы с фрактальными структурами на РВС.

Сформулированы принципы синтеза эффективных параллельно-конвейерных программ для обработки самоподобных структур на РВС: необходимость использования структурного подхода организации вычислений для работы с самоподобными структурами на РВС; предпочтение распараллеливанию по итерациям, а не по слоям; объединение в вычислительные структуры подобных подграфов, а не изоморфных для масштабирования вычислений при решении задач фрактального типа на РВС; использование предварительной сортировки данных для увеличения эффективности алгоритма на РВС; уменьшение скважности потока операндов методом конвейера в конвейере или автоподстановки для увеличения быстродействия вычислительной структуры, содержащей обратные связи.

Во второй главе предложены методы создания параллельно-конвейерных программ для решения задач фрактального сжатия и декомпрессии на РВС. Для задачи фрактального сжатия используется распараллеливание алгоритма по слоям и итерациям, вынос в начало конвейера повторяющихся операций. Для увеличения степени параллелизма используется побитовая подача данных, что позволяет использовать больше параллельных каналов для обработки сжимаемого изображения. При декомпрессии изображения применяется предварительная сортировка входных данных, за счет чего становится возможным применение однократной косвенной адресации.

Фрактальная архивация основана на том, что на основе поиска самоподобных участков изображение переводится в коэффициенты системы итерируемых функций (СИФ):

$$w \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ I^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \\ v \end{pmatrix}.$$

Здесь x^* , y^* , I^* - координаты и яркость рангового блока, x , y , I - координаты и яркость доменного блока, a, b, c, d, e, f - коэффициенты преобразований координат на плоскости, u - коэффициент сжатия яркости, v - сдвиг по яркости.

Алгоритм фрактальной архивации изображений состоит из пяти основных пунктов:

1. Кодированное изображение разбивается на множество ранговых блоков $\{R_i\}$, которые не пересекаются между собой.

2. На ранговые блоки накладывается множество доменных блоков $\{D_i\}$, элементы которого могут пересекаться друг с другом.

3. Над доменными блоками выполняют аффинные преобразования: сжатие до размеров рангового блока, изменение ориентации в восьми направлениях (повороты на 90° , 180° , 270° , 360° , а также выполнение ротации с отзеркаленным доменным блоком). После этого вычисляют значения коэффициентов преобразования доменного блока для его наилучшего соответствия ранговому

$$w_{ij}(d_{xy}) = a_{ij} d_{xy} + b_{ij},$$

где a_{ij} , b_{ij} - коэффициенты СИФ, $d_{xy} \in D_{ij}$, D_{ij} - i -й доменный блок в j -й ориентации.

4. Для выявления соответствия доменного блока ранговому вычисляется расстояние между ними по формуле:

$$E(R, D) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (u d_{ij} + v - r_{ij})^2, \quad (1)$$

где N_{R_i} - количество пикселей в ранговом блоке, $d_{xy} \in D_{ij}$, $r_{xy} \in R_i$.

5. Если для пары ранговый-доменный блок значение $E(R,D)$ не превышает заданной допустимой погрешности, то процедура перебора доменов для этого рангового блока останавливается и начинается обработка следующего рангового блока. Если во время перебора не нашлось таких доменных блоков, для которых значение расстояния не превысило бы допустимой погрешности, то выполняется проверка максимального уровня разбиения ранговых блоков.

- Если ранговый блок не находится на максимальном уровне разбиения, то его разбивают на меньшие блоки и для них повторяют сравнение с доменными блоками.

- Если ранговый блок уже находится на максимальном уровне разбиения, то из всех доменных блоков выбирают тот, значение $E(R,D)$ которого является минимальным среди остальных, и считают рассматриваемый ранговый блок покрытым этим доменом.

Для выполнения фрактального сжатия изображения необходимо выполнить четыре разработанных базовых операции над всеми парами ранговых и доменных блоков: сжатие доменного блока до размеров рангового (W), поворот сжатого блока (F_i , где $i=0..7$), сдвиг по яркости (L), вычисление расстояния между преобразованным доменным блоком и ранговым (E) (рисунок 1).

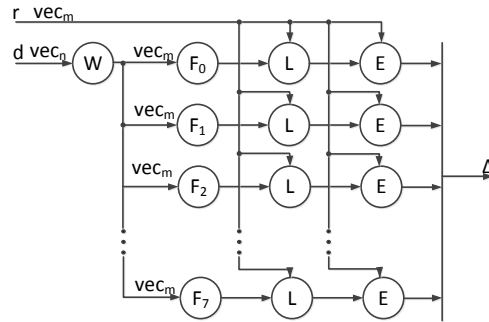
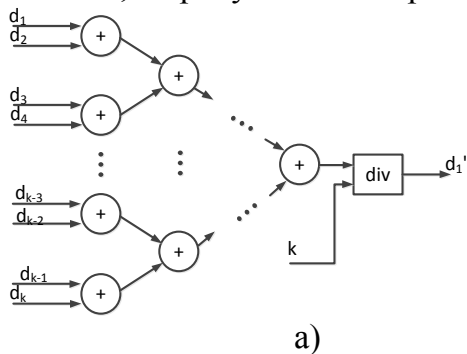


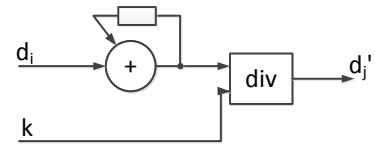
Рисунок 1– Базовые операции блока λ

Время работы блока составит сумму времени предварительной подготовки данных t_{prep} , времени заполнения конвейера t_{conv} для блоков сдвига по яркости и вычисления расстояния между преобразованным доменным блоком и ранговым $t_{\lambda} = t_{prep} + t_{conv} + S \cdot \tau$, где τ – длительность одного такта. Также учитывается скважность S для конвейерной подачи данных.

Если размер доменного блока – n пикселей, а размер рангового – m , то количество пикселей каждого доменного блока, сжимаемых до одного, будет равно $k=n/m$. На рисунке 2-а показана макрооперация усреднения пикселей при параллельной подаче каждого значения, на рисунке 2-б – при использовании сумматора с накоплением.



а)



б)

Рисунок 2 – Усреднение пикселей доменного блока: пирамида сумматоров (а) и сумматор с накоплением (б)

Хотя скорость работы вычислительной структуры, использующей сумматор с накоплением, уступает варианту с пирамидой сумматоров, за счет экономии каналов

возможно разместить несколько вычислительных слоев, что в конечном итоге приведет к увеличению быстродействия.

При конвейерной подаче данных результат из блока W будет выходить каждые k тактов, формируя во всем вычислительном конвейере поток данных с задержками в k тактов. В соответствии с принципами эффективной обработки самоподобных структур на РВС для решения этой проблемы можно поставить k параллельно работающих блоков W , принимающих на вход части одного доменного блока, из которого будет сформирован блок, сжатый до размеров рангового, при этом поток результатов, выходящий из обновленного блока W' , не будет иметь задержек k (рисунок 3).

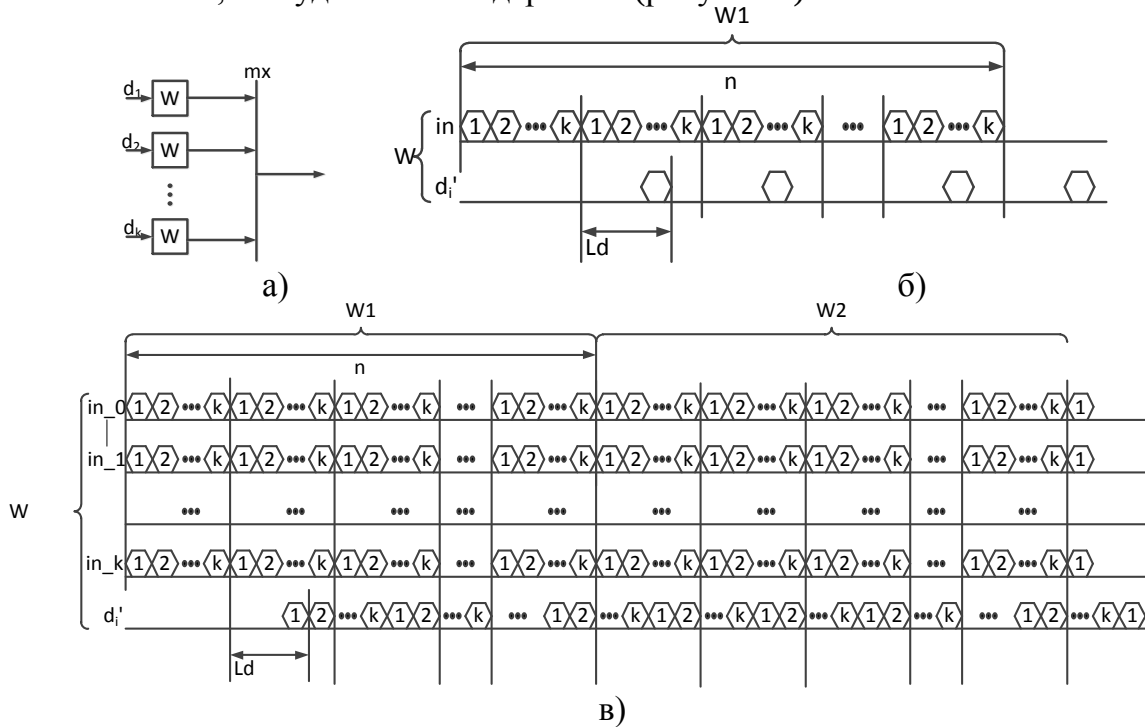


Рисунок 3 – Уплотнение потока данных а) вычислительная структура; б) временная диаграмма для одного блока W ; в) временная диаграмма для k блоков W

После операции усреднения выполняются процедуры поворота и отражения сжатого доменного блока и вычисления сдвига по яркости по формуле (1). При этом сложение значений пикселей рангового и доменного блока выполняется независимо друг от друга, что позволяет производить эти процессы параллельно. На выходе получается значение v – сдвиг по яркости, которое является коэффициентом СИФ и участвует в вычислении расстояния между доменным и ранговым блоками. Далее следует вычисление расстояния между преобразованным доменным и ранговым блоками, которое определяет успешность покрытия рангового блока доменным.

В соответствии с принципами организации эффективной обработки фрактальных структур на РВС выполнение операций над доменными и ранговыми блоками можно распараллелить по слоям, т.к. между этими вершинами графа отсутствуют информационные связи. Этот способ позволяет значительно повысить производительность вычислительной системы, но подходит только для ограниченного количества РВС, обладающих большим ресурсом входных каналов для данных. Поэтому, согласно второму принципу, следует отдать предпочтение распараллеливанию по итерациям, при котором существует последовательная информационная зависимость между вычислительными узлами. Сочетание распараллеливания по слоям и итерациям, где большая часть вычислительного ресурса выделена для итераций, приведет к увеличению реальной производительности вычислительной системы.

При конвейерном способе расположения блоков λ нет необходимости выполнять каждый раз сжатие доменного блока и его повороты. Эти операции можно провести один раз перед началом работы конвейера и для дальнейших вычислений подавать модифицированные доменные блоки D_i'' (рисунок 4). Таким образом, блок λ будет разделен на блок WF, который будет выполнять сжатие доменного блока до размеров рангового и восемь вариантов поворота за время t_{WF} , и блок LE, вычисляющий коэффициент сдвига по яркости и расстояние между ранговым и доменным блоками для каждой из восьми модификаций сжатого блока, время работы которого будет равно суммарному времени для блоков L и E t_{LE} .

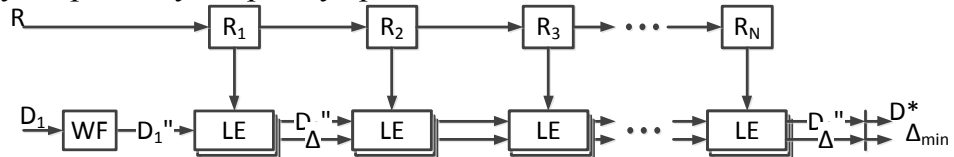


Рисунок 4 – Вынос в начало конвейера операций сжатия и поворотов

При такой реализации время работы конвейерной программы составит

$$T_{conv} = t_{WF} + t_{LE}N + MS\tau,$$

где M – количество подаваемых доменных блоков, N – глубина конвейера.

На рисунке 5 показана вычислительная структура, позволяющая выполнять несколько прогонов поступившей на вход последовательности доменных блоков через конвейер. Для задачи фрактального сжатия изображений в качестве накопителя данных идеально подходят контроллеры распределенной памяти (КРП), т.к. они могут быть как источниками, так и приемниками обрабатываемых данных. КРП также позволяют организовывать множество синхронных потоков данных, что делает их использование особенно эффективным. Каждый из блоков LE формирует маркер записи блока в память КРП. Для хранения последовательностей доменных блоков выделены два КРП, из RAM1 происходит чтение данных в схему, тогда как в RAM2 накапливаются те данные, которые прошли через конвейер. После того как все данные из RAM1 были отработаны, происходит переключение, и теперь данные из RAM2 поступают на вход конвейера.

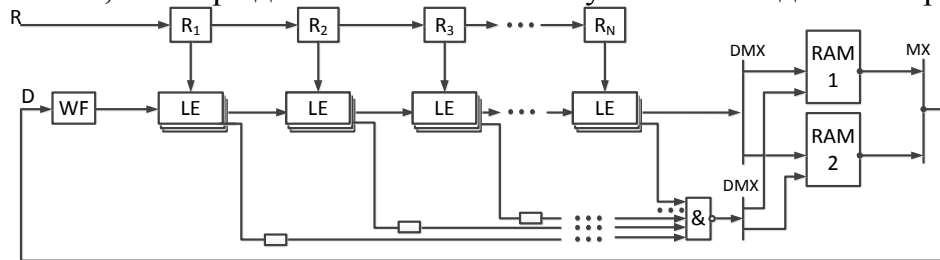


Рисунок 5 – Обработка множества доменных блоков, для которых не нашлось решения

Данные в RAM2 записываются, если ни в одном из блоков LE не произошло совпадения пары доменный+ранговый блок. Если же было хотя бы одно совпадение, то сигнал записи в ячейку памяти не формируется до тех пор, пока не придет значение, которое необходимо сохранить для следующего прогона.

Выполнено сравнение производительности реализации фрактального сжатия изображений на PBC по сравнению с аналогичной для универсальных процессоров. Полученная реализация фрактального сжатия изображений показывает ускорение в 15000 раз по сравнению с аналогичной реализацией для многоядерного универсального процессора.

При покрытии изображения адаптивной сеткой ранговых блоков возможно сократить количество операций для однотонных частей изображений и более точно закодировать мелкие детали. При использовании адаптивного разбиения значение m в формуле (1) становится переменным и уникальным для каждой отдельной группы ранговых бло-

ков. При этом $m \in (a_1, a_2, \dots, a_q)$ – множество возможных значений, полученных при разбиении изображения.

Покрывание доменными блоками может также быть адаптивным и использовать доменные блоки разных размеров скользящим окном покрывающих неодинаковое количество ранговых блоков для всего изображения.

Сравним время работы существующей однокристалльной реализации $T_* = t_{wf*} + t_{le*} \frac{NMS_{le*}}{K'}$ с разработанной:

$$\frac{T_{convK}}{T_*} \approx \frac{t_{LE} N + \frac{M\bar{S}}{K}}{t_{le*} NMS_*} \cdot K' \approx \left(\frac{1}{M\bar{S}_*} + \frac{1}{t_{le*} NK} \right) \cdot K',$$

где K – количество параллельно работающих вычислительных слоев в предложенной реализации, а K' – в рассматриваемой.

Поскольку $K' \ll M\bar{S}_*$ и $K' \ll NK$, отношение $\frac{T_{convK}}{T_*}$ будет в $\frac{M\bar{S}_* + t_{le*} NK}{M\bar{S}_* t_{le*} NK}$ меньше

количества параллельно выполняемых операций K' для существующих реализаций. При сравнении экспериментальных данных получено ускорение в 10-40 раз по сравнению с существующими реализациями на ПЛИС.

Декомпрессия изображения, сжатого фрактальным способом, является методом восстановления оригинального изображения из полученных ранее коэффициентов системы итерируемых функций. Этот процесс осуществляется итерационно, применяя найденные коэффициенты к произвольному начальному изображению. Согласно теореме о сжимающем отображении, итерационный процесс будет сходиться к неподвижному изображению. Таким образом, декомпрессия изображения может быть применена для восстановления оригинального изображения, сохраняя тем самым качество и детали изображения.

Изначально входные данные для декомпрессии не упорядочены, и может возникнуть проблема обращения к требуемой области памяти устройства, а также проблема разметки рабочей области ранговыми и доменными блоками. В таких случаях принято использовать косвенную адресацию. При выполнении декомпрессии изображения адреса используемых ранговых и доменных блоков вычисляются, исходя из их номеров, которые загружаются вместе с коэффициентами СИФ.

Однако наличие двойной косвенной адресации мешает эффективному распараллеливанию по данным описанной выше структуры из-за неизбежности возникновения одновременных запросов на чтение и запись к одному каналу памяти. Эту проблему можно решить, если, следуя принципам эффективной обработки самоподобных структур на РВС, выполнить предварительную подготовку данных. Если отсортировать элементы массива входных данных $X = (N_r, N_d, i, v)$ по номерам ранговых блоков N_r , то набор из четырех параметров уменьшится до трех $X_R = (N_d, i, v)$. Эта модификация позволяет перейти от двойной косвенной адресации к одинарной и создает возможность улучшить распараллеливание по данным.

Возможны несколько способов сортировки элементов структуры X , содержащей коэффициенты СИФ. Самым простым из них является предварительная сортировка данных на персональном компьютере (ПК) и подача уже отсортированного массива в РВС. Этот способ может подойти только для небольших массивов данных, иначе предварительная подготовка может занять больше времени, чем вычисления, поэтому наилучшим вариантом будет создание уже отсортированной структуры X_R во время сжатия изображения. Ранговые блоки загружаются во внутреннюю память по порядку, поэтому воз-

можно привязать номер рангового блока к номеру каждого элемента массива результатов (рисунок 6).

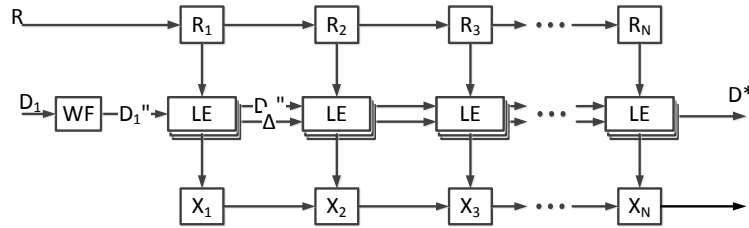


Рисунок 6 – Упорядочивание значений в массиве результатов X_R

Номера элементов X_R соответствуют номерам ранговых блоков, которые хранятся во внешней памяти. Адрес чтения из памяти RAM D формируется за счет подаваемого номера доменного блока N_D . Пиксели доменного блока обрабатываются в блоке WFT, где происходит их сжатие, повороты на заданный угол и применение сдвига по яркости. После этого преобразованные данные записываются во внешнюю память, обновляя хранящиеся там ранговые блоки. Двухпортовая память дает возможность осуществлять чтение и запись независимо. Данные обновленных ранговых блоков после установления соответствия в блоке ψ записываются в RAM D (рисунок 7).

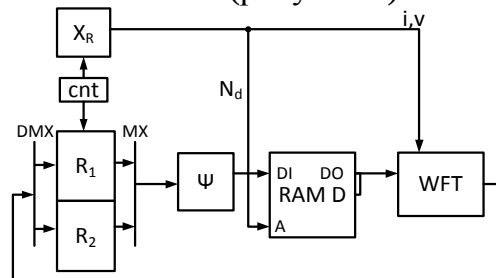


Рисунок 7 – Использование упорядоченных значений X_R

Для изображения, разбитого на 250 000 квадратных ранговых блоков, время работы на РВС Терциус-2 составит примерно 0,003 секунды, тогда как время выполнения этой же задачи на универсальном процессоре Intel Core i7-10700 составит примерно 0,9 секунды. Таким образом, реализация декомпрессии изображения на РВС показывает ускорение в 300 раз по сравнению с аналогичной реализацией для многоядерного универсального процессора, что *доказывает второе положение, выдвигаемое для защиты*.

В третьей главе предложен метод создания параллельно-конвейерных программ решения задачи распространения газа во фрактальной среде (супердиффузия), который заключается в модификации графа задачи, согласно параметрам входной СЛАУ. В зависимости от математического ожидания $M(Q)$ и среднеквадратичного отклонения ΔQ , полученных для количества ненулевых элементов Q в строке СЛАУ, вычислительная структура задачи перестраивается для получения оптимального соотношения скорости вычислений и загрузки оборудования.

Аномальная диффузия описывает процессы переноса на стационарных процессах, характеризующиеся нестационарным распределением частиц в пространстве, где квадрат расстояния r , которое прошла частица за время t , пропорционален $r^2 \sim Dt^\chi$, где $\chi = 1$ для классической диффузии и $\chi \neq 1$ - для аномальной. Если параметр χ больше единицы, то такой случай называют супердиффузией (ускоренное блуждание частиц), при χ меньше единицы говорят о субдиффузии (замедленное блуждание частиц). Для описания этого явления используется дифференциальное уравнение дробного порядка, при этом порядок дробной производной связан с размерностью фрактала.

Известно, что модель переноса радона в неоднородной среде, учитывающая фрактальный характер пористой среды, наиболее точно отражает реальные данные. Повышение концентрации радона в воздухе из-за сейсмической активности земной коры является одним из признаков приближающихся землетрясений. В связи с этим критическую важность имеет точность и скорость моделирования распространения радона. Поэтому возникает необходимость создания эффективной параллельной реализации для решения задачи в реальном времени.

Использование адаптивных сеток (рисунок 8-а) позволяет получить более точное решение задачи супердиффузии, однако в настоящее время не существует подходящих методов и средств для реализации на ПЛИС решения СЛАУ, полученных посредством применения адаптивных сеток. Таким образом, возникает необходимость создания таких методов и средств.

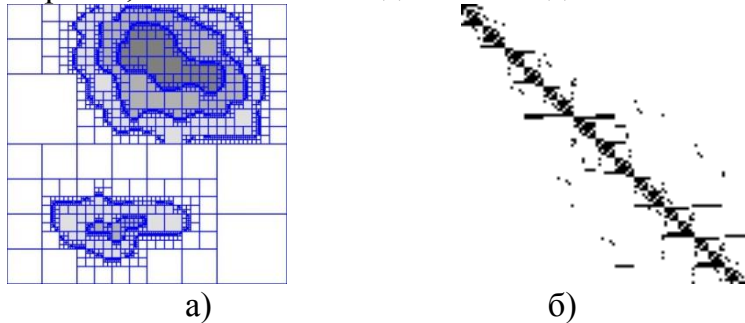


Рисунок 8 – Примеры адаптивной сетки (а) и распределения элементов в СЛАУ(б)

Задачи математической физики, требующие решения СЛАУ, имеющих пять диагоналей со значимыми коэффициентами, успешно решаются на РВС посредством метода Якоби, который возможно распараллелить как по итерациям, так и по слоям. Однако СЛАУ, образованная при дискретизации задачи супердиффузии, имеет неравномерное заполнение значащими элементами (рисунок 8-б), из-за чего ее решение с помощью существующих методов на РВС приводит к снижению реальной производительности.

Для одновременного вычисления нескольких ступеней метода Якоби можно применить распараллеливание по итерациям, последовательно соединяя несколько базовых подграфов (рисунок 9). На каждой итерации на вход ступени поступает поток операндов a_{ij} и x_j^k , вычисленные на предыдущей ступени. Выходными данными ступени являются новые значения x_j^{k+1} , которые в свою очередь подаются на следующую итерацию.

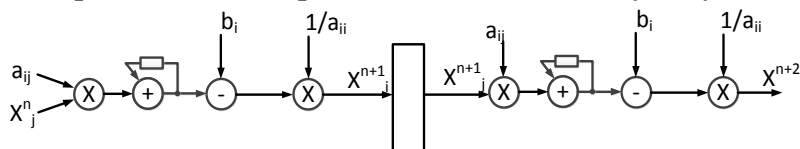


Рисунок 9 – Распараллеливание по итерациям

Подобный подход становится малоэффективным, если СЛАУ содержит матрицу с нерегулярной структурой, как в случае дискретизации на адаптивных сетках математической модели, описывающей супердиффузию газа. Количество диагоналей, содержащих значимые элементы, может приближаться к количеству строк в матрице, но только пять центральных диагоналей плотно заполнены коэффициентами и содержат 70-95% всех ненулевых элементов матрицы. Если для решения подобной СЛАУ применить метод Якоби, ориентированный на специфику ленточных матриц, то большую часть времени вычисления будут производиться над нулевыми элементами, что фактически означает простой оборудования. Исходя из выше сказанного, требуется модификация реализации метода Якоби с учетом специфики задачи.

При решении СЛАУ, содержащей матрицу с нерегулярной структурой, как в случае дискретизации математической модели, описывающей супердиффузию газа на адаптивных сетках, возникает необходимость обработки строк разной длины. При этом минимальное количество данных в строке равно трем, а максимальное зависит от способа дискретизации и может быть на порядок больше.

Реализация максимальной вычислительной структуры (рисунок 10-а) будет малоэффективна, т.к. количество строк, содержащих максимальное количество ненулевых элементов Q_{max} , менее 0,5% от общего размера матрицы. Таким образом, при подобной реализации значительная часть оборудования будет простаивать 99% времени вычисления.

При реализации минимальной вычислительной структуры (рисунок 10-б) возможно избежать простоя оборудования, однако придется столкнуться с необходимостью провести модификацию вычислительной структуры, обеспечивающей корректное подсуммирование результатов при вычислении строк, имеющих длину больше минимальной.

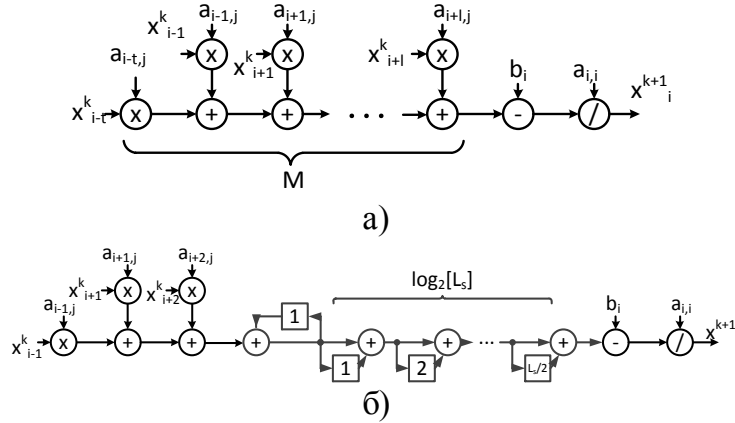


Рисунок 10 – Максимальная (а) и минимальная (б) реализации вычислительной структуры

Следует найти оптимальную структуру для базового изоморфного подграфа. Ключевой задачей при поиске оптимальной структуры является определение необходимого количества каналов для подачи данных, связанного со средним количеством ненулевых элементов в строке и влияющего на затраты оборудования.

Рассмотрим случай, при котором количество каналов $x < Q_{max}$. В этом случае коэффициент использования оборудования для прохода всей матрицы будет равен

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i / x}{\lceil Q_i / x \rceil}, \text{ где } N - \text{количество строк в матрице, } Q_i - \text{количество элементов в } i\text{-й строке.}$$

В этом случае целесообразно выполнить оценку для этого параметра с помощью математического ожидания $M(Q)$ и среднеквадратичного отклонения ΔQ

$$U^* \approx \frac{(M(Q) + \Delta Q) / x}{\lceil (M(Q) + \Delta Q) / x \rceil}. \text{ Найдем оптимальное значение для количества каналов } x. \text{ Для это-}$$

го возьмем производную от U^* и приравняем ее к нулю:

$$\frac{((M(Q) + \Delta Q) / x)' \lceil (M(Q) + \Delta Q) / x \rceil - (M(Q) + \Delta Q) / x (\lceil (M(Q) + \Delta Q) / x \rceil)'}{\lceil (M(Q) + \Delta Q) / x \rceil^2} = 0. \quad (2)$$

Функция $y = \lceil (M(Q) + \Delta Q) / x \rceil$ не имеет производной, поэтому заменим ее непрерывным аналогом, полученным с помощью метода наименьших квадратов.

Проведенные вычислительные эксперименты позволили сделать вывод, что оптимальным количеством каналов для подачи элементов строки СЛАУ может являться не среднее количество элементов, а значение, несколько отличающееся от него.

Информационный граф, соответствующий оптимальной вычислительной структуре, представлен на рисунке 11.

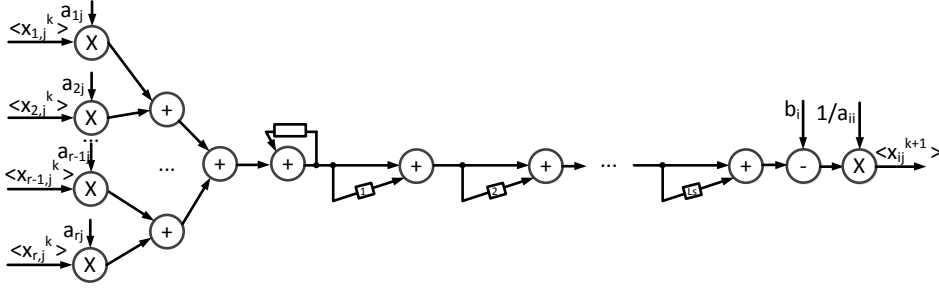


Рисунок 11 – Информационный граф модифицированной вычислительной структуры

Ускорение по сравнению с реализацией минимального информационного подграфа составит

$$S_{o/min} = \frac{T_{min}}{T_{opt}} = \frac{L_{mul} + L_{sum} \cdot Q \cdot n}{n + L_{mul} + \left\lceil \frac{Q}{r} \right\rceil \left[\cdot U' + L_{sum} (\log_2 r + \log_2 L_{sum} + 1) + L_{sub} \right]} \approx L_{sum} \cdot Q$$

где L_{mul} , L_{sum} , L_{sub} – латентности умножителя, сумматора и вычитателя соответственно, r – количество одновременно подаваемых данных, n – максимальный размер строки.

Ускорение по сравнению с модификацией минимального информационного подграфа составит

$$S_{o/mod} = \frac{T_{mix}}{T_{opt}} = \frac{2 \cdot L_{mul} + \hat{Q} \cdot n + L_{sum} + L_{sub} + \lceil \log_2 L_{sum} \rceil L_{sum}}{n + L_{mul} + \left\lceil \frac{Q}{r} \right\rceil \left[\cdot U' + L_{sum} (\log_2 r + \log_2 L_{sum} + 1) + L_{sub} \right]} \approx \hat{Q}$$

Ускорение по сравнению с реализацией максимального информационного подграфа составит

$$S_{o/max} = \frac{T_{max}}{T_{opt}} = \frac{U \cdot n + L_{mul} + L_{sub} + L_{sum} \log_2 m}{n + L_{mul} + \left\lceil \frac{Q}{r} \right\rceil \left[\cdot U' + L_{sum} (\log_2 r + \log_2 L_{sum} + 1) + L_{sub} \right]} \approx U$$

Значение U лежит в пределах $[0,1]$. При реализации всей задачи на РВС соотношение между временем работы максимальной вычислительной структуры и разработанной автором составит

$$\frac{T_{max}}{T_{opt}} = \frac{INQ_{max}}{A\hat{Q}} \frac{A(P_q + 2\hat{Q})}{IN\hat{Q}K_L(P_q + 2\hat{Q} + \lceil \log_2 L_{sum} \rceil)} = \frac{Q_{max}(P_q + 2\hat{Q})}{\hat{Q}^2 K_L(P_q + 2\hat{Q} + \lceil \log_2 L_{sum} \rceil)},$$

где I – количество итераций, P_{it} – количество реализованных итераций, P_q – количество затраченного оборудования, P_s – количество реализованных слоев, A – количество доступного оборудования, K_L – коэффициент использования каналов. При подстановке значений перечисленных параметров ускорение составит 1,2-1,5 раз.

Время выполнения одного полного прогона СЛАУ составит

$$T_{opt} = \left(\frac{n}{H_{opt}} + L_{mul} + \left\lceil \frac{Q}{r} \right\rceil \left[\cdot U' + L_{sum} (\log_2 r + \log_2 L_{sum} + 1) + L_{sub} \right] \right) \tau,$$

где H_{opt} – количество одновременно реализуемых вычислительных блоков.

Предложенный метод решения задачи распространения газа в фрактальной среде обеспечивает повышение реальной производительности на 40% по сравнению с известными способами решения, что доказывает *третье положение, выдвигаемое для защиты*.

Можно дополнительно увеличить производительность вычислений, если специально подготовить матрицу, содержащую обрабатываемые значения. Для этого необходимо произвести сортировку строк матрицы с учетом количества значимых данных в каждой строке.

При работе с несколькими параллельными слоями необходимо в сортировке матрицы и ее последующем распределении исходить из количества слоев. Пусть у нас M слоев, в каждый из которых поступают строки матрицы по порядку $0, 2 \dots M; M+1, M+2, \dots 2M$ и т.д., таким образом, каждый из слоев получит одинаковое количество строк в обработку, и могут возникнуть проблемы с задержками (рисунок 12-а).

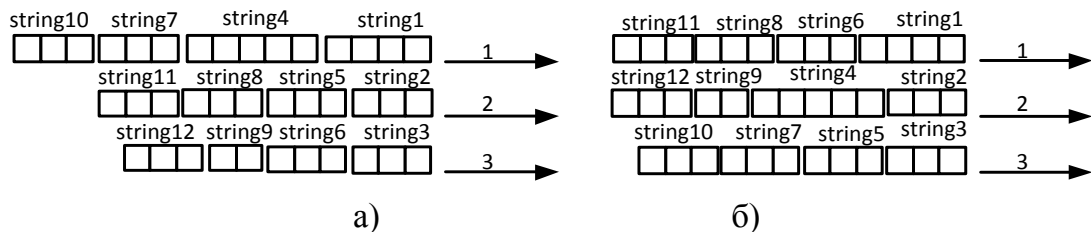


Рисунок 12 – Поступление данных на слои в прямом порядке (а) и после пересортировки (б)

Каждый слой имеет K входных каналов, данные с которых поступают на вычислители. Для некоторых строк пакет данных имеет длину большую, чем количество каналов K , и будет подаваться на обработку за 2 такта. В это время слой, получивший более короткие строки, сможет принять в обработку 2 строки. Отсюда следует, что необходимо распределять строки на обработку между слоями не по порядку, а согласно занятости слоя.

При подготовке данных к загрузке матрица разделяется на подматрицы, которые будут подаваться в параллельную обработку. Для этого при чтении строк матрицы необходимо ввести признак занятости слоя, который покажет, как быстро освободится для приема следующих данных конкретный слой. В первый проход в каждый слой загружаются строки по порядку, затем производится анализ занятости слоев. Занятые в следующий такт слои не получают новые строки, пока не освободятся (рисунок 12-б).

Такой способ распределения строк между слоями обеспечивает увеличение скорости работы конвейера на 5-7%, работает для любых распределений ненулевых элементов в СЛАУ, полученных при дискретизации задачи супердиффузии на адаптивных сетках.

Реализация решения задачи супердиффузии на одной ПЛИС XCVU35P (PBC Арктур) показала ускорение в 35-37 раз по сравнению с универсальным процессором Intel Core i7-10700, а на плате Арктур, содержащей 6 ПЛИС, ускорение составит примерно 215 раз.

В заключении изложен основной научный результат диссертации и сформулированы теоретические и прикладные результаты, полученные в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основной научный результат диссертации заключается в решении **актуальной научной задачи**: *разработке методов и средств обработки самоподобных структур для решения задач фрактального типа на реконфигурируемых вычислительных системах, позволяющих повысить их производительность*, имеющей существенное научно-практическое значение.

При проведении исследований и разработок в диссертации получены следующие теоретические и прикладные результаты:

1. Разработан метод решения на PBC параллельно-конвейерным способом задачи фрактального сжатия изображений, **отличающийся** от известных побитовой обработкой данных, обеспечивающей максимальное задействование вычислительного ресурса си-

стемы, и сортировкой структур, содержащих выходные данные, по номеру рангового блока, что позволяет получить ускорение при выполнении на PBC в 15000 раз по сравнению с аналогичной реализацией для многоядерного универсального процессора и в 10-40 раз по сравнению с выполнением на устройстве, содержащем одну ПЛИС. Масштабирование данного метода обеспечит близкий к линейному рост производительности при увеличении вычислительного ресурса.

2. Разработан метод решения на PBC параллельно-конвейерным способом задачи декомпрессии сжатых изображений, **отличающийся** от известных использованием одинарной косвенной адресации для блоков памяти, содержащих доменные блоки. Данный метод позволяет получить на PBC ускорение более чем в 50 раз по сравнению с аналогичной реализацией для многоядерного универсального процессора.

3. Разработан метод синтеза вычислительной структуры для решения на PBC задачи распространения газа во фрактальной среде, **отличающийся** от известных возможностью оптимизации вычислительной структуры для конкретной СЛАУ на основе оценки ее параметров и использующий подобные подграфы, обеспечивающий увеличение эффективности на 40% по сравнению с классическими способами решения СЛАУ на PBC.

4. Разработаны программные средства на языке программирования COLAMO для решения на PBC задач фрактального сжатия и декомпрессии изображений и задачи супердиффузии (на программные продукты получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ).

Разработанные при решении научной задачи методы и средства позволили достигнуть поставленной цели, заключающейся в повышении реальной производительности PBC при решении задач фрактального типа, что подтверждено как теоретическими выкладками, так и экспериментальными исследованиями.

Результаты диссертационного исследования были внедрены и использованы в ООО «НИЦ СЭ и НК» (г. Таганрог), и в учебном процессе кафедры ИМС ИКТИБ ЮФУ (г. Таганрог).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Чекина, М.Д. Математическое моделирование задач геофильтрации в почвогрунтах с фрактальной структурой на многопроцессорных вычислительных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 12 (161). – С. 242-251. **(ведущий рецензируемый журнал, входит в Перечень ВАК).**

2. Чекина, М.Д. Решение разреженных СЛАУ большой и сверхбольшой размерности многосеточным методом на PBC // М.Д. Чекина, А.В. Подопригора / Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8 (202). – С. 212-221. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-8-212-221 **(ведущий рецензируемый журнал, входит в Перечень ВАК).**

3. Чекина, М.Д. Реализация фрактального сжатия и декомпрессии изображений параллельно-конвейерным способом на реконфигурируемых вычислительных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 7 (217). – С. 130-142. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-7-130-142 **(ведущий рецензируемый журнал, входит в Перечень ВАК).**

4. Чекина, М.Д. Параллельно-конвейерная реализация фрактального сжатия изображений на реконфигурируемых вычислительных системах // М.Д. Чекина, И.И. Левин / Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2021. – Т. 18. – № 4 (202). – С. 37-44. DOI: 10.14489/vkit.2021.04.pp.037-044 **(ведущий рецензируемый журнал, входит в Перечень ВАК).**

5. Чекина, М.Д. Модификация реализации метода Якоби при моделировании супердиффузии радона на реконфигурируемых вычислительных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 7 (224). – С. 198-206. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-7-198-206 (ведущий рецензируемый журнал, входит в Перечень ВАК).

6. **Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023614463, РФ.** Программа фрактального сжатия изображений // Чекина М.Д., Левин И.И. Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 01.03.2023 г. Правообладатель: ООО «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров».

7. **Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023617300, РФ.** Программа декомпрессии изображений, сжатых фрактальным способом // Чекина М.Д., Левин И.И. Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 07.04.2023 г. Правообладатель: ООО «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров».

8. **Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2023617550, РФ.** Программа для решения задачи супердиффузии // Чекина М.Д., Левин И.И. Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 11.04.2023 г. Правообладатель: ООО «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров».

9. Чекина, М.Д. Математическое моделирование задач геофильтрации в почвогрунтах с фрактальной структурой на многопроцессорных вычислительных системах // Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2014)». - Ростов/Д: Изд-во ЮФУ, 2014. - С. 258-262.

10. Чекина, М.Д. Решение больших и сверхбольших разреженных СЛАУ на реконфигурируемых вычислительных системах // М.Д. Чекина, А.В. Подопригора / Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2018). Материалы 5-й Всероссийской научно-технической конференции. – 2018. – Т. 1. – С. 201-204.

11. Чекина, М.Д. Реализация фрактальных алгоритмов на реконфигурируемых вычислительных системах // Суперкомпьютерные технологии: сборник трудов молодых ученых; Южный Федеральный Университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог, 2020. – с. 129-133.

12. Чекина, М.Д. Управление анализом сейсмической активности с применением модели супердиффузии радона на реконфигурируемых вычислительных системах // XIV Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021). Материалы XIV Всероссийской Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2021): в 4 томах. – 2021 г. – Т. 2. – С. 278-280.

13. Чекина, М.Д. Решение задачи супердиффузии на реконфигурируемых вычислительных системах // Всероссийская научно-техническая конференция «Многопроцессорные вычислительные системы» (МВУС-2022). Материалы всероссийской научно-технической конференции. – 2022. – С. 155-160.

Подписано к печати 05.07.2023 г.

Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная. Печать ризография.

Усл. п.л. - 1,25.

Уч.-изд.л. - 1,15.

Заказ № _____.

Тираж 120 экз.

Отпечатано в типографии издателя Ступина С.А.

347900, Ростовская область, г. Таганрог, пер. Лермонтовский, 25

Тел/факс: 8 (8634) 311-288.