

На правах рукописи



Шишков Илья Иванович

**Обработка и формирование растровых  
изображений в автоматизированных  
контролирующих системах**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Константинов Игорь Сергеевич

Официальные оппоненты: Иноземцев Александр Николаевич  
доктор технических наук, профессор,  
Тульский государственный университет, заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные системы»

Тараканов Олег Викторович  
кандидат технических наук, доцент,  
Академия ФСО России, заведующий кафедрой  
«Информатика и вычислительная техника»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет»

Защита состоится 22 мая 2012 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК» по адресу: 302020, РФ, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК».

Автореферат разослан 20 апреля 2012 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Волков В. Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Автоматизированные системы визуального контроля технических объектов и управления технологическими процессами по его результатам широко распространены в различных областях промышленности. В частности, к ним относятся системы оптического контроля печатных плат и изделий микроэлектроники, а также неразрушающего контроля деталей и конструкций. Процессы визуального контроля в большинстве данных систем сводятся к анализу полутоновых растровых изображений структуры изделий, получаемых такими методами, как микрофотография, рентгенография, ультразвуковая эхолотация и т. д., на предмет выявления таких дефектов, как микротрещины, неоднородности структуры и другие.

Методы и алгоритмы решения задач визуального контроля в настоящее время разработаны достаточно хорошо как в теории, так и на практике. Программное обеспечение известных систем обработки изображений предусматривает выполнение основных функций: высокочастотной и низкочастотной фильтрации, изменения контраста, интенсивности, масштаба, цветокоррекции. Однако существующие программные системы дороги, не предусматривают расширения, несовместимы по аппаратной платформе с другими системами. Кроме того, с каждым годом растёт объём обрабатываемых изображений и появляются всё новые классы прикладных задач, в значительной мере расширяющих границы области применения подобных алгоритмов. В результате возникает ситуация, в которой существующие системы обработки растровых изображений не включают всех необходимых процедур или обладают недостаточным быстродействием. Зачастую для их эксплуатации требуются дорогостоящие специализированные вычислительные мощности с очень высокой скоростью обработки.

Таким образом, необходимость повышения скорости обработки растровых изображений в автоматизированных контролирующих системах, а также высокая стоимость и недостаточное быстродействие существующих систем определяют **актуальность** создания одновременно высокоэффективных и недорогих средств обработки растровых изображений.

**Объектом исследования** является процесс обработки и формирования растровых изображений в автоматизированных контролирующих системах.

**Предметом исследования** являются методы и алгоритмы обработки и формирования растровых изображений.

**Целью исследования** является повышение эффективности обработки и формирования растровых изображений в автоматизированных контролирующих системах с учётом ограниченной вычислительной мощности современных персональных компьютеров.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решались следующие основные **задачи**.

1. Анализ методов и средств обработки и формирования растровых изображений, используемых в автоматизированных контролирующих системах.
2. Разработка и исследование модели процесса обработки растровых изображений в автоматизированных контролирующих системах.

3. Исследование методов и возможностей решения задачи визуального контроля объектов по растровым изображениям на современных персональных компьютерах.

4. Разработка и исследование структурно-функциональной модели адаптивной системы обработки растровых изображений.

5. Разработка и исследование алгоритмов параллельной обработки данных (параллельных алгоритмов) для реализации методов обработки растровых изображений.

6. Разработка прототипа адаптивной системы обработки растровых изображений и анализ результатов его применения.

**Методы исследования.** В качестве основных средств теоретических исследований использовались методы системного анализа, математического моделирования, дискретной математики, математической статистики, цифровой обработки изображений, а также методы оценки эффективности алгоритмов.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, достигается за счёт: корректного применения известного математического аппарата; непротиворечивости и воспроизводимости результатов, полученных теоретическим путём; соответствия результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Научная новизна** работы состоит в том, что:

- предложена автоматная модель процесса обработки и формирования растровых изображений в автоматизированных контролируемых системах, отличительной особенностью которой является то, что она учитывает присутствие человека в системе, обеспечивая своевременное предоставление ему результатов применения операций обработки изображений;

- предложены параллельные алгоритмы обработки растровых изображений, отличительной особенностью которых являются высокая степень параллелизма и способность выполняться на большинстве современных графических ускорителей;

- предложен метод повышения эффективности обработки и формирования растровых изображений на современном персональном компьютере, отличительной особенностью которого является применение графического ускорителя и разработанных параллельных алгоритмов;

- предложена структурно-функциональная модель адаптивной системы обработки растровых изображений, отличительной особенностью которой являются:

- адаптация системы за счёт конфигурирования её подключаемыми модулями,
- возможность автоматизации выбора алгоритма обработки на основании анализа доступного программного и аппаратного обеспечения.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что разработанные теоретические положения реализованы в виде комплекса алгоритмов и программ, представляющего собой прототип адаптивной системы обработки растровых изображений, а также в результатах внедрения указанного комплекса в ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК» и ЗАО «Научприбор».

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК» в рамках дисциплин «Компьютерная графика» и «Компьютерная обработка данных» и в ЗАО «Научприбор» в системе рентгеновского контроля «Express Inspection» и программно-аппаратном комплексе компьютерной томографии.

В основу диссертационной работы положены результаты исследований, полученные автором в ходе работ по программе «УМНИК» (проект «Программный комплекс оперативной обработки цифровых снимков большого размера») и Государственному контракту №14.740.11.1258 «Программные средства оперативной обработки полутоновых растровых изображений большого размера», выполняемому по Федеральной программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: IV Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (г. Орёл, 2010 г.); Международной научно-технической интернет-конференции «Информационные системы и технологии» (г. Орёл, 2011 г.); XVI научной конференции преподавателей и сотрудников ФГБОУ ВПО «Госунiversитета — УНПК» (г. Орёл, 2011 г.); II Международной научно-технической конференции «Компьютерные науки и технологии» (г. Белгород, 2011 г.); Международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» (г. Одесса, 2011 г.).

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Модель процесса обработки и формирования растровых изображений в автоматизированных контролируемых системах.
2. Метод повышения эффективности обработки растровых изображений.
3. Модель адаптивной системы обработки растровых изображений.
4. Параллельный алгоритм линейной фильтрации растровых изображений.
5. Параллельный алгоритм восстановления томографического среза методом обратных фильтрованных проекций.
6. Прототип адаптивной системы обработки растровых изображений.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 160 страницах и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и 2 приложений; содержит 4 таблицы и 26 рисунков.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость результатов работы, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён анализ применения растровых изображений в автоматизированных контролируемых системах. Проанализированы такие характеристики применяемых изображений, как размер, формат, цветность и разрядность. Кроме того, рассмотрено программное и аппаратное обеспечение, используемое в автоматизированных контролируемых системах для обработки и формирования растровых изображений.

При проведении анализа установлено, что во многих автоматизированных контролирующих системах растровые изображения и методы их обработки играют важную роль в интерпретации результатов контроля. В различных системах применяются изображения совершенно разных размеров: от  $320 \times 200$  пикселей до  $1600 \times 1200$  пикселей. При этом максимальный размер применяемых изображений постоянно растёт.

Также проведённый анализ выявил, что в современных автоматизированных контролирующих системах применяются как специализированные форматы цифровых изображений (например, радиометрический формат IS2), так и цифровые форматы общего назначения (JPEG, BMP, PNG, TIFF и т. д.).

Что касается цветности и глубины цвета, было выявлено, что в большинстве систем применяются полутоновые изображения с глубиной цвета 8 бит на пиксель и более. Для обработки и формирования растровых изображений в большинстве систем используются персональные компьютеры, работающие под управлением настольных операционных систем. Системы, использующие специализированное программное и аппаратное обеспечение, имеют возможность связи с персональным компьютером.

Проведён анализ существующих методов и средств обработки растровых изображений. В результате сделан вывод, что многие методы обработки растровых изображений допускают создание параллельных алгоритмов их реализации.

При анализе средств обработки растровых изображений рассмотрены программные и аппаратные средства. В результате выявлено, что в настоящее время существуют программные библиотеки, предоставляющие реализации большинства известных методов обработки растровых изображений (ImageMagick, GEGL). Однако эти реализации не всегда являются наиболее эффективными. Кроме того, существуют низкоуровневые библиотеки создания компьютерной графики, позволяющие создавать высокоэффективные программы, выполняющиеся на графическом ускорителе (OpenGL, CUDA, OpenCL). При этом анализ аппаратных средств показывает, что современные графические ускорители, применяемые в персональных компьютерах, предоставляют возможности организации произвольных параллельных вычислений.

Сформулирована задача дальнейшего исследования — повышение эффективности обработки полутоновых растровых изображений в автоматизированных контролирующих системах с учётом использования ограниченной вычислительной мощности современных персональных компьютеров. При этом под эффективностью понимается результат деятельности системы, который учитывает, с одной стороны, качество системы, а с другой — затраты на достижение этого качества. В соответствии с этим определением *повышение эффективности обработки растровых изображений означает снижение времени её выполнения при сохранении исходной функциональности и качества.*

**Во второй главе** разработана и исследована модель процесса обработки растровых изображений в автоматизированных контролирующих системах. Модель представляет собой детерминированный конечный автомат, алфавит которого соответствует операциям обработки изображений, переходы — процессам вы-

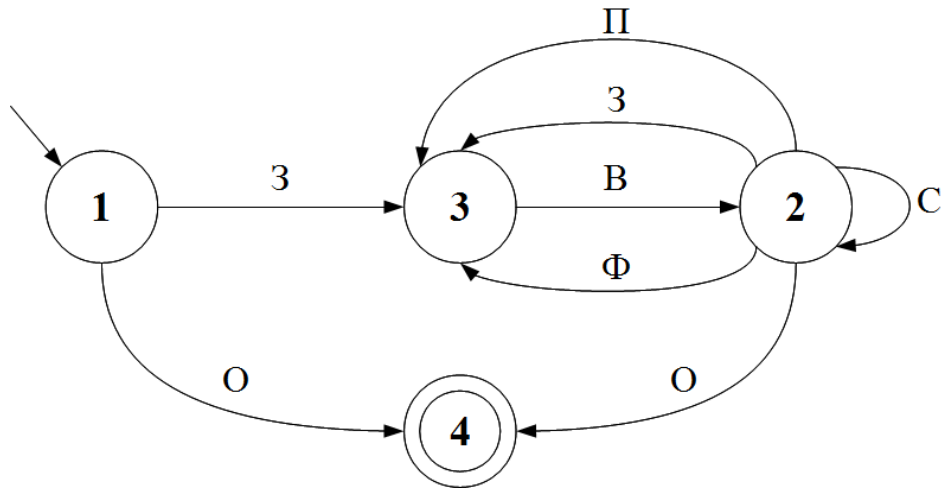


Рис. 1. Модель процесса обработки растровых изображений в автоматизированных контролируемых системах

полнения этих операций, а состояния — ожиданию начала выполнения очередной операции (рисунок 1).

Формально она определяется пятёркой  $\langle Q, \Sigma, \delta, q_0, f \rangle$ , где  $Q$  — множество состояний,  $\Sigma$  — входной алфавит,  $\delta \subseteq Q \times \Sigma \times Q$  — множество переходов,  $q_0 \in Q$  — начальное состояние,  $f \in Q$  — конечное состояние.

Множество состояний  $Q$  предлагаемой модели содержит 4 состояния, которые пронумерованы числами от 1 до 4. Начальным состоянием  $q_0$  является состояние 1, конечным состоянием  $f$  — состояние 4. Входным алфавитом  $\Sigma$  предлагаемой модели являются различные операции обработки изображений: 3 — загрузка, С — сохранение, П — изменение параметров визуализации, В — визуализация, Ф — фильтрация, О — окончание обработки. Таким образом,  $Q = \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $q_0 = 1$ ,  $f = 4$ ,  $\Sigma = \{3, С, П, В, Ф, О\}$ . Множество переходов  $\delta$  приведено в таблице 1.

Таблица 1. Таблица переходов модели процесса обработки растровых изображений в автоматизированных контролируемых системах

Состояние \ Символ	3	С	П	В	Ф	О
1	3	—	—	—	—	4
2	3	2	3	—	3	4
3	—	—	—	2	—	—
4	—	—	—	—	—	—

Важной особенностью предлагаемой модели является наличие в ней такой операции, как визуализация. Более того, в ней используется предположение о том, что результаты применения любой операции обработки изображений визуализируются сразу после завершения её выполнения. Это связано с тем, что в данной работе рассматриваются автоматизированные, а не автоматические контролируемые системы. Следовательно, в них обязательно присутствует человек, который должен иметь возможность сразу же оценить результаты применения последней операции и принять решение о дальнейшем направлении обработки изображений.

Поэтому переходы из состояния 2 по символам «З», «П» и «Ф» осуществляются в состояние 3, из которого есть только один переход — обратно в состояние 2 по символу «В».

В процессе исследования разработанной модели было выявлено множество операций, допускающих повышение эффективности. В него вошли следующие операции обработки растровых изображений: фильтрация, визуализация, изменение параметров визуализации, загрузка и сохранение.

Первым этапом повышения эффективности выделенных операций была формулировка требований к вычислительной сложности реализующих их алгоритмов в виде асимптотических оценок. Алгоритмы, не удовлетворяющие этим требованиям, признаются неэффективными и не могут использоваться для реализации рассматриваемых операций обработки растровых изображений.

Все сформулированные требования приведены в таблице 2. В ней  $S$  обозначает количество пикселей обрабатываемого изображения, а  $P$  — количество пикселей используемого дисплея.

Таблица 2. Требования к эффективности операций обработки растровых изображений в автоматизированных контролируемых системах

Операция	Асимптотическая оценка вычислительной сложности
Фильтрация	$O(S \log S)$
Визуализация	$O(P)$
Изменение параметров визуализации	$O(1)$
Загрузка	$O(S \log S)$
Сохранение	$O(S \log S)$

При разработке этих требований учитывался тот факт, что в рамках данной работы исследуется повышение скорости обработки растровых изображений при сохранении качества и функциональности. Поэтому для некоторых операций были выбраны менее жёсткие требования по сравнению с теоретически возможными. Например, для загрузки растрового изображения независимо от формата нужно обработать каждый его пиксель минимум один раз. Следовательно, вычислительная сложность операции загрузки имеет нижнюю оценку  $\Omega(S)$ . Если в качестве требования к эффективности операции загрузки взять оценку  $O(S)$ , то ей не будут удовлетворять методы загрузки изображений, сжатых, например, методом LZW, который требует  $O(S \log S)$  операций. Следовательно, использование оценки  $O(S)$  в качестве требования к вычислительной сложности операции загрузки невозможно без ограничения функциональности.

Далее было проведено исследование средств повышения эффективности обработки растровых изображений. Был выполнен анализ аппаратных возможностей персональных компьютеров с целью выявления тех из них, которые могут быть использованы для этой цели. В результате был сделан вывод, что графический ускоритель наиболее пригоден для повышения эффективности всех рассматриваемых операций обработки растровых изображений. Создавая параллельные ал-



горитмы, предназначенные для выполнения на графическом ускорителе, можно существенно снизить время выполнения реализуемых ими операций.

Ещё одной важной особенностью графических ускорителей персональных компьютеров является относительно низкая стоимость по сравнению со специализированными аппаратными средствами.

Однако графические ускорители накладывают следующие ограничения на предназначенные для них алгоритмы:

- копирование данных между оперативной памятью и памятью графического ускорителя занимает значительное время, поэтому алгоритмы должны стремиться минимизировать количество таких операций;
- параллельные потоки выполняются на графическом ускорителе группами размером от 32 потоков в каждой; в рамках одной группы все потоки должны выполнять одну последовательность инструкций; несоблюдение этого правила ведёт к существенному снижению производительности;
- на данный момент отсутствует возможность выполнять на графическом ускорителе рекурсивное обращение к функциям, поэтому рекурсивные алгоритмы должны реализовываться итеративно.

Кроме того, многие методы обработки растровых изображений (в частности, методы сжатия и декомпрессии, применяемые при выполнении загрузки и сохранения) не допускают распараллеливания. Следовательно, для повышения их эффективности необходимо искать другие пути.

Проведённый в первой главе анализ методов фильтрации растровых изображений показал, что многие из них являются проблемно ориентированными. Например, метод, являющийся весьма полезным для улучшения рентгеновских изображений, не обязательно окажется наилучшим для обработки снимков другого класса. Это говорит о том, что для обеспечения высокого качества фильтрации растровых изображений часто необходимо выбирать конкретный метод фильтрации на основании анализа структуры обрабатываемого снимка. Другим примером являются различные приближения дифференциального метода выделения контуров объектов на изображении: градиентный фильтр, оператор Робертса и оператор Собела. Эти методы обычно дают сходные результаты, но обладают различной чувствительностью к шуму. Следовательно, выбор одного из них определяется тем, насколько зашумлено изображение, то есть для повышения качества фильтрации необходимо анализировать качество исходного изображения.

Обобщая эти примеры, можно сделать вывод, что одним из возможных методов повышения качества фильтрации растровых изображений является выбор конкретного метода фильтрации на основании структуры и качества обрабатываемого изображения.

Структура и качество снимков влияет также на скорость их обработки. То есть на основании анализа структуры и качества исходного изображения можно выбирать наиболее быстрый метод, обеспечивающий требуемое качество обработки. Например, рассмотрим зависимость выбора метода выделения границ объектов от структуры обрабатываемого изображения. Предположим, что входное изображение является бинарным и на нём изображено небольшое число крупных

объектов. Тогда для выделения их границ достаточно применить поиск в ширину, обрабатывающий каждый пиксель один раз. Если же входное изображение имеет большую глубину цвета, то определение границ объектов не так тривиально и необходимо применять более сложные методы, требующие неоднократного обращения к каждому пикселю изображения. Таким образом, в данном случае анализ качества входного изображения, а именно глубины цвета, позволяет выбрать более быстрый метод выделения границ.

Параллельную обработку растровых изображений можно осуществлять, только если на используемом компьютере установлено соответствующее оборудование. Если это не так, она будет производиться на центральном процессоре. Следовательно, в процессе выбора метода обработки можно провести анализ доступного оборудования и выбрать тот метод, который будет наиболее эффективно использовать доступные ему вычислительные ресурсы.

Таким образом, в качестве альтернативного принципа повышения эффективности обработки растровых изображений в данной работе предлагается использовать адаптацию — автоматизированный выбор алгоритма обработки на основании анализа доступного оборудования, структуры и качества изображения.

Для реализации предложенных способов повышения эффективности операций обработки растровых изображений в автоматизированных контролирующих системах предлагается адаптивная система обработки растровых изображений.

На рисунке 2 приведена разработанная в рамках диссертационного исследования структурно-функциональная модель адаптивной системы обработки растровых изображений, для каждой подсистемы которой созданы соответствующие структура и функциональная модель.

База данных изображений и подсистема считывания изображений вынесены за границы системы, чтобы показать, что на систему не возлагаются функции регистрации изображений. Предполагается, что в неё поступают изображения, изначально представленные в цифровом формате.

В предлагаемой адаптивной системе обработки растровых изображений *принцип адаптивности реализуется за счёт её конфигурирования подключаемыми модулями*, которое осуществляется в трёх направлениях:

- формирование множества фильтров;
- формирование множества диалогов пользовательского интерфейса;
- формирование множества поддерживаемых цифровых форматов изображений.

Каждому из этих направлений в модели соответствует база данных подключаемых модулей.

В модели представлено три вида связей. Связи, обозначенные сплошной линией, соответствуют запросам, которые подсистемы модели посылают друг другу. Например, подсистема диалога с пользователем посылает в ядро системы запросы на обработку команд пользователя, ядро в свою очередь, классифицировав полученную команду, посылает запрос на её выполнение другой подсистеме и т. д.

Связи, обозначенные пунктирной линией, отражают движение информации об изображении в системе. Например, подсистема визуализации изображений по-

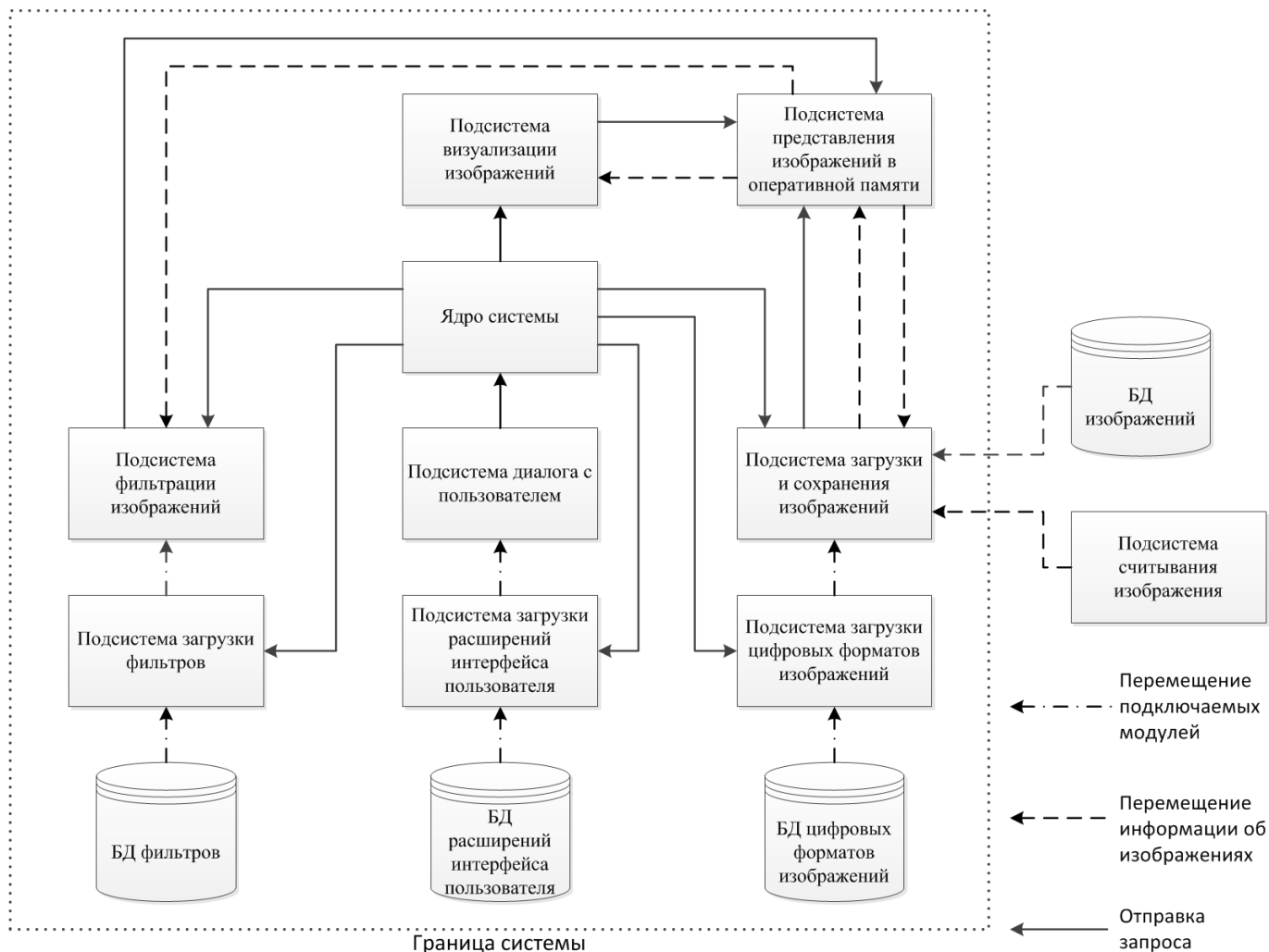


Рис. 2. Структурно-функциональная модель адаптивной системы обработки растровых изображений

сылает подсистеме представления изображений в оперативной памяти запрос с целью получения информации о визуализируемом изображении: размерах, глубине цвета, цвете пикселей и т. д. Связь между этими подсистемами, обозначенная пунктирной линией, соответствует получению этой информации.

Наконец, связи, обозначенные штрих-пунктирной линией, отражают перемещение в модели подключаемых модулей. Подсистемы загрузки фильтров, расширений интерфейса и цифровых форматов изображений обращаются к соответствующим базам данных, загружают из них в систему подключаемые модули и внедряют их в соответствующую подсистему.

**В третьей главе** сформулированы принципы создания параллельных алгоритмов в адаптивной системе обработки растровых изображений: выбраны исполнитель, модель параллельных вычислений и критерий оценки времени работы.

Во второй главе было выявлено, что графический ускоритель является наиболее подходящим средством для повышения эффективности обработки растровых изображений. Поэтому именно он был выбран в качестве исполнителя.

Параллельная обработка растровых изображений с использованием графического ускорителя может быть реализована двумя путями. Во-первых, параллелизм может заключаться в распределении выполняемой операции между цен-

тральным процессором и графическим ускорителем, которые будут параллельно выполнять требуемые вычисления. Кроме того, так как сам графический ускоритель поддерживает организацию произвольных параллельных вычислений, вся операция целиком может быть распараллелена на нём. Следовательно, из множества существующих моделей параллельных вычислений необходимо выбрать две: одну для организации параллельных вычислений на центральном процессоре и графическом ускорителе, а другую — для организации параллельных вычислений отдельно на графическом ускорителе.

В качестве первой из них было выбрано взаимодействие посредством обмена сообщениями с использованием распределённой памяти (рисунок 3). В качестве модели параллельных вычислений отдельно на графическом ускорителе была выбрана модель взаимодействия через общую память с использованием гибридной памяти (рисунок 4).

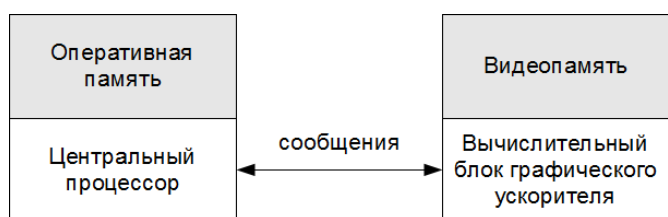


Рис. 3. Модель параллельных вычислений на центральном процессоре и графическом ускорителе

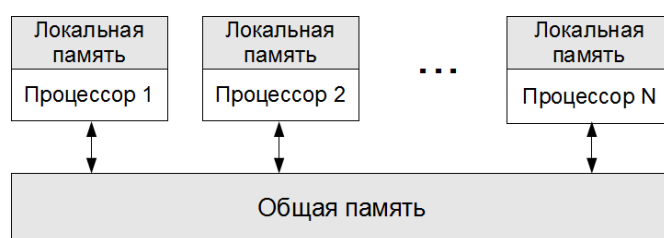


Рис. 4. Модель параллельных вычислений отдельно на графическом ускорителе

В качестве меры оценки времени работы параллельных алгоритмов было выбрано число циклов параллельного доступа к общей памяти как наиболее длительная и часто используемая операция.

В соответствии со сформулированными выше принципами был разработан алгоритм линейной фильтрации растровых изображений. Он осуществляет преобразование растрового изображения  $f$  размером  $M \times N$  пикселей с помощью фильтра размером  $m \times n$  по формуле

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) \cdot f(x + s, y + t), \quad (1)$$

где  $g(x, y)$  — отклик фильтра;

$m = 2a + 1$ ,  $n = 2b + 1$  ( $a, b \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ );

$w(s, t)$  — коэффициент маски фильтра;

$f(x, y)$  — пиксель обрабатываемого изображения.

При этом были разработаны последовательный алгоритм взаимодействия центрального процессора и графического ускорителя и параллельный алгоритм, выполняемый каждым процессором графического ускорителя (алгоритм 1). Алгоритм 1 предполагает, что имеется  $M \cdot N$  процессоров; в нём используются обозначения из формулы 1; параметр процедуры  $p$  задаёт порядковый номер процессора.

---

**Алгоритм 1** Параллельный алгоритм линейной фильтрации для  $M \cdot N$  процессоров

---

```
1: procedure LINEAR-FILTER( $p$ )
2:    $y \leftarrow \lfloor \frac{p}{M} \rfloor$ 
3:    $x \leftarrow p - y \cdot M$ 
4:    $sum \leftarrow 0$ 
5:   for  $s \leftarrow -a$  to  $a$  do
6:     for  $t \leftarrow -b$  to  $b$  do
7:       if  $0 \leq x + s \leq M - 1$  then
8:         if  $0 \leq y + t \leq N - 1$  then
9:            $sum \leftarrow sum + w(s, t) \cdot f(x + s, y + t)$ 
10:        end if
11:       end if
12:     end for
13:   end for
14:    $g(x, y) \leftarrow sum$ 
15: end procedure
```

---

В реальной системе число процессоров обычно меньше, чем число пикселей обрабатываемого изображения. Для решения этой проблемы была разработана модификация алгоритма 1, в которой каждый процессор последовательно выполняет линейную фильтрацию нескольких пикселей.

В процессе анализа алгоритма 1 было оценено количество осуществляемых им обращений к разделяемой памяти. Чтение интенсивности пикселя обрабатываемого изображения, которое хранится в общей памяти, осуществляется в строке 9. Эта операция находится внутри двух вложенных циклов **for**, которые выполняют  $m$  и  $n$  итераций соответственно. Следовательно, алгоритм 1 осуществляет  $O(nm)$  операций чтения общей памяти и одну операцию записи в общую память, осуществляемую в строке 14. Таким образом, время работы алгоритма 1 оценивается как  $O(nm)$ .

В третьей главе разработан *алгоритм восстановления томографического среза методом фильтрованных обратных проекций*.

Решению задачи восстановления томографического среза на графическом ускорителе посвящено много работ. Большинство из них связано с восстановлением методом фильтрованных обратных проекций на графическом ускорителе конкретной модели с применением специализированных программных средств (например, CUDA).

В данной работе был разработан параллельный алгоритм, осуществляющий восстановление томографического среза размером  $N \times N$  пикселей из  $M$  проекций, каждая из которых представляет собой массив из  $K$  значений. При этом созданный алгоритм работает в рамках выбранной модели параллельных вычислений, не зависит от оборудования и удовлетворяет требованиям к эффективности, сформулированным во второй главе.

---

**Алгоритм 2** Параллельный алгоритм восстановления томографического среза методом фильтрованных обратных проекций для  $M \cdot N^2$  процессоров

---

```
1: procedure BACKPROJECT( $p, row, column$ )
2:    $value \leftarrow 0$ 
3:    $\nu \leftarrow$  угол поворота, соответствующий проекции  $p$ 
4:    $x_s, y_s \leftarrow$  позиция источника для угла поворота  $\nu$ 
5:    $x_p, y_p \leftarrow$  координаты центра пикселя ( $row, column$ )
6:    $l \leftarrow$  прямая, проходящая через точки  $(x_p, y_p)$  и  $(x_s, y_s)$ 
7:   if  $l$  пересекает линейку детекторов then
8:      $i \leftarrow$  номер детектора, который пересекает прямая  $l$ 
9:      $value \leftarrow projection[p][i]$ 
10:  end if
11:  ATOMIC-ADD( $g[row][column]$ ,  $value$ )
12: end procedure
```

---

Как и для метода линейной фильтрации, для метода восстановления томографического среза были разработаны последовательный алгоритм взаимодействия центрального процессора с графическим ускорителем и параллельный алгоритм, выполняемый каждым процессором графического ускорителя (алгоритм 2). В последнем предполагается, что в нашем распоряжении имеется  $M \cdot N^2$  процессоров, и каждый процессор отвечает за обработку пары (проекция, пиксель). В нём используются следующие обозначения:

- $p$  — номер проекции;
- $row, column$  — координаты пикселя восстанавливаемого изображения;
- $projection[i][j]$  — значение  $j$ -й ячейки проекции с номером  $i$ ;
- $g$  — восстановленное изображение;
- ATOMIC-ADD — операция атомарного инкремента.

Для алгоритма 2 также была разработана модификация, предназначенная для выполнения на меньшем числе процессоров.

При его анализе было оценено количество осуществляемых им обращений к разделяемой памяти. В процессе своего выполнения алгоритм 2 выполняет не более одного чтения из разделяемой памяти. Это происходит в строке 9 в случае срабатывания проверки в строке 7. Процедура ATOMIC-ADD в процессе своего выполнения осуществляет одно чтение и одну запись в разделяемую память. Таким образом, оценка времени работы алгоритма 2 составляет  $O(1)$ .

Следовательно, время выполнения разработанных в третьей главе параллельных алгоритмов фильтрации удовлетворяет ограничениям вычислительной сложности, установленным для методов фильтрации во второй главе.

**В четвёртой главе** описана реализация и исследование прототипа адаптивной системы обработки растровых изображений.

Архитектура прототипа адаптивной системы обработки растровых изображений соответствует разработанной структурно-функциональной модели (рисунок 2).

В процессе поиска средств реализации каждой из подсистем прототипа проводился анализ языков программирования и программных библиотек и осуществлялся обоснованный выбор тех из них, которые позволяют создавать наиболее эффективные реализации. В результате для реализации прототипа адаптивной системы обработки растровых изображений был выбран язык программирования C++ и программные библиотеки OpenGL, Qt и CUDA.

Важными особенностями реализации подсистемы визуализации является применение текстурирования для вывода видимой части изображения и использование пиксельного шейдера для выполнения гамма-коррекции в процессе визуализации. Это позволяет осуществлять визуализацию за время, пропорциональное количеству пикселей используемого дисплея, независимо от выбранного масштаба и функции гамма-коррекции.

Особенности реализации методов фильтрации растровых изображений с помощью CUDA описаны на примере реализации разработанного параллельного алгоритма линейной фильтрации (см. алгоритм 1). Важнейшей её особенностью является выбор типа памяти для хранения ядра фильтра, входного и выходного изображений. CUDA предоставляет несколько типов памяти для хранения пользовательских данных: локальную, разделяемую, глобальную, текстурную и константную. Каждый из них обладает своими преимуществами и накладывает определённые ограничения на механизмы доступа. Для хранения ядра фильтра, входного и выходного изображений обоснованно выбраны типы памяти, обеспечивающие наиболее эффективный механизм доступа к ним.

Реализация параллельного алгоритма линейной фильтрации растровых изображений была применена в системе рентгеновского контроля «Express Inspection», разработанной ЗАО «Научприбор». Эта система изначально поддерживала линейную фильтрацию растровых изображений, которая выполнялась последовательным алгоритмом на центральном процессоре. После внедрения параллельного алгоритма было проведено экспериментальное исследование повышения эффективности линейной фильтрации. Для этого измерялось время выполнения этой операции с помощью параллельного и последовательного алгоритмов.

Время выполнения программы является случайной величиной. На него оказывают влияние многие факторы: алгоритм планирования используемой операционной системы, загруженность ресурсов компьютера другими программами, объём входных данных, качество скомпилированного кода, вычислительная мощность используемого компьютера и т. д. Влияние каждого из них можно также рассматривать как случайную величину, вносящую вклад в общее время выполнения программы. Следовательно, время выполнения программы можно представить как сумму нескольких независимых случайных величин. Тогда по центральной предельной теореме, утверждающей, что сумма достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин имеет близкое к нормальному распределение, можно предположить, что время выполнения программы имеет нормальное распределение.

На основании этих рассуждений был разработан план экспериментального исследования повышения эффективности выполнения линейной фильтрации за

счёт применения параллельного алгоритма, в соответствии с которым был сформирован набор тестовых изображений, для каждого из которых было выполнено 200 прогонов параллельного и последовательного алгоритмов линейной фильтрации. Для полученных серий значений с помощью критерия Пирсона была проверена гипотеза о нормальности распределения генеральной совокупности (уровень значимости 0,05), которая не была отвергнута ни для одной из них. После этого были найдены оценки параметров нормального распределения: выборочная средняя  $\bar{x}$  и выборочное среднее квадратическое отклонение (СКО).

Анализ полученных значений показал, что для последовательного алгоритма выборочное СКО изменяется от 3 до 30 мс, для параллельного — от 2 до 5 мс. Найденные выборочные средние представлены на логарифмической шкале на рисунке 5, график их отношения, отражающий снижение времени выполнения линейной фильтрации, приведён на рисунке 6. Из последнего графика видно, что применение параллельного алгоритма линейной фильтрации позволяет снизить время её выполнения минимум в 12 раз. Снижение скорости роста отношения выборочных средних на промежутке ( $2^{22}$ ,  $2^{24}$ ) объясняется недостатком процессоров графического ускорителя.

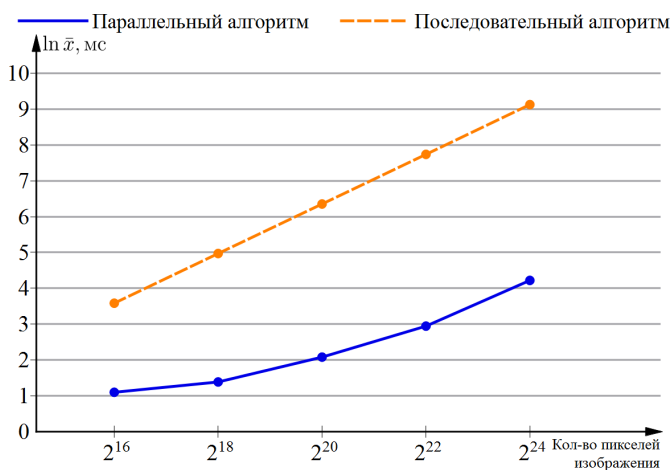


Рис. 5. Натуральные логарифмы выборочных средних времени выполнения последовательного и параллельного алгоритмов линейной фильтрации

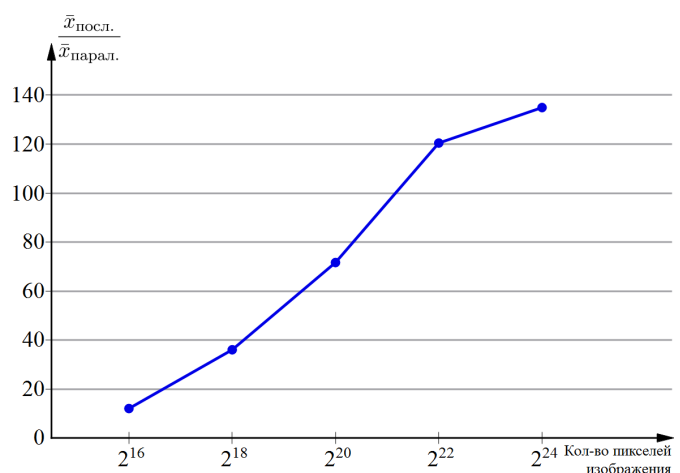


Рис. 6. Снижение времени выполнения линейной фильтрации растровых изображений, вызванное применением параллельного алгоритма

Прототип адаптивной системы обработки растровых изображений был использован в качестве основы программного обеспечения программно-аппаратного комплекса компьютерной томографии, разрабатываемого лабораторией специального программного обеспечения Госуниверситета — УНПК. В частности, в этом программно-аппаратном комплексе была применена реализация параллельного алгоритма восстановления томографического среза, разработанного в рамках данного диссертационного исследования (см. алгоритм 2). Для оценки повышения эффективности этой операции было проведено экспериментальное исследование по плану, аналогичному тому, который использовался для исследования повышения эффективности линейной фильтрации.



В результате проведённого эксперимента гипотеза о нормальности распределения не была отвергнута ни для одной из полученных серий. Анализ найденных оценок параметров нормального распределения показал, что для последовательного алгоритма выборочное СКО изменяется от 17 до 970 мс, а для параллельного — от 22 до 30 мс. Найденные выборочные средние представлены на логарифмической шкале на рисунке 7, график их отношения, отражающий снижение времени выполнения восстановления томографического среза, приведён на рисунке 8. Из приведённых графиков видно, что применение параллельного алгоритма восстановления томографического среза позволяет снизить время её выполнения минимум в 7 раз.

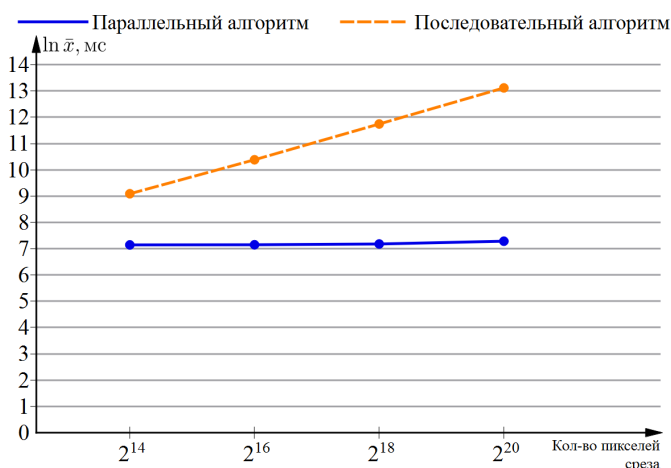


Рис. 7. Натуральные логарифмы среднего времени выполнения исследуемых алгоритмов восстановления томографического среза

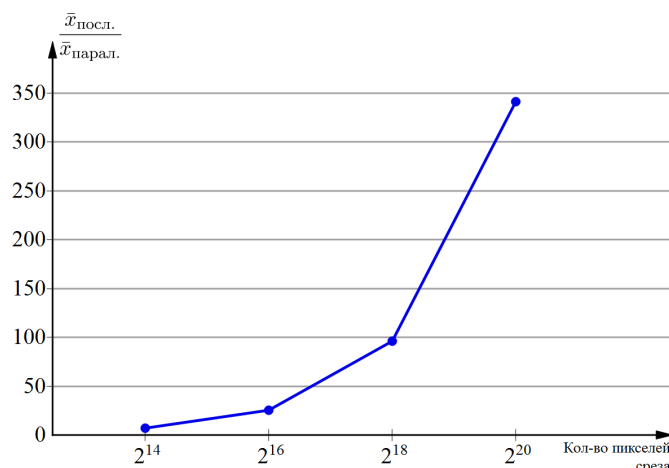


Рис. 8. Снижение времени выполнения восстановления томографического среза, вызванное применением параллельного алгоритма

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В приложениях** приведены программные реализации разработанных алгоритмов.

**Основные результаты работы.** В ходе выполнения диссертационного исследования получены следующие результаты.

1. В результате анализа средств обработки растровых изображений выявлено, что в современных автоматизированных контролируемых системах используются либо вычислительные мощности с высоким быстродействием, что зачастую экономически нецелесообразно, либо средства, обладающие низкой скоростью обработки, что может противоречить требованиям технологического процесса. При этом анализ методов обработки растровых изображений показал, что многие из них допускают создание параллельных алгоритмов их реализации.

2. Разработана модель процесса обработки и формирования растровых изображений в автоматизированных контролируемых системах, учитывающая наличие в них человека и позволяющая своевременно предоставлять ему результаты выполнения операций обработки изображений.

3. Сформулированы требования к эффективности представленных в модели операций в виде асимптотических оценок вычислительной сложности реализующих их алгоритмов.

4. Разработан метод обработки и формирования растровых изображений на современных персональных компьютерах, в основе которого лежит применение параллельных алгоритмов с использованием графического ускорителя.

5. Разработана структурно-функциональная модель адаптивной системы обработки растровых изображений, позволяющая автоматизировать процесс выбора алгоритма обработки на основании анализа доступного программного и аппаратного обеспечения и обладающая свойством конфигурирования подключаемыми модулями.

6. Сформулированы принципы создания параллельных алгоритмов в адаптивной системе обработки растровых изображений.

7. Разработан параллельный алгоритм линейной фильтрации растровых изображений, имеющий оценку времени выполнения, не зависящую от размеров обрабатываемого изображения.

8. Разработан параллельный алгоритм восстановления томографического среза методом фильтрованных обратных проекций, имеющий оценку времени, не зависящую от размеров среза.

9. Разработан прототип адаптивной системы обработки растровых изображений, в рамках которого были реализованы созданные параллельные алгоритмы.

10. Проведены исследования прототипа адаптивной системы обработки растровых изображений, которые показали его эффективность при решении задач обработки растровых изображений. В частности, происходит сокращение времени выполнения линейной фильтрации в 12 раз, а восстановления томографического среза — в 7 раз.

11. Результаты проведённых исследований внедрены в промышленных разработках (система досмотрового рентгеновского контроля «Express Inspection» и программно-аппаратный комплекс компьютерной томографии на ЗАО «Научприбор») и в учебном процессе (дисциплины «Компьютерная графика» и «Компьютерная обработка данных» на кафедре «Информационные системы» ФГБОУ ВПО «Государственный университет — УНПК»).

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России**

1. Шишков, И. И. Разработка универсальной программной библиотеки восстановления томографического среза [Текст] / И. И. Шишков // Информационные системы и технологии. — 2010. — №3(59). — Орёл: ОрёлГТУ. — С. 58–62.

2. Шишков, И. И. О проблеме визуализации изображений в информационной системе компьютерной томографии [Текст] / И. И. Шишков, С. В. Терентьев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2010. — №3(281). — Орёл: ОрёлГТУ. — С. 94–98. (личное участие 50%)

3. Шишков, И. И. [Текст] Линейная фильтрация растровых изображений с использованием графического ускорителя / И. И. Шишков // Информацион-

ные системы и технологии. — 2011. — №6(68). — Орёл: Госуниверситет — УНПК. — С. 19–26.

### **Монографии**

4. Шишков, И. И. Оперативная обработка растровых изображений большого размера. Модели, алгоритмы и программные средства [Текст] / И. И. Шишков, И. С. Константинов, С. С. Мозгов. — LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. — 108 с. — ISBN: 978-3-8473-1835-4. (личное участие 33%).

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации в материалах конференций**

5. Шишков, И. И. Об особенностях разработки программной библиотеки восстановления томографического среза [Текст] / И. И. Шишков // «Информационные технологии в науке, образовании и производстве»(ИТНОП). Материалы IV Международной научно-технической конференции. — 2010. — Орёл: ОрёлГТУ. — Т. 2. — С. 198–202.

6. Шишков, И. И. К вопросу об оперативной обработке растровых изображений большого размера [Текст] / И. И. Шишков, А. А. Митин // «Информационные технологии в науке, образовании и производстве»(ИТНОП). Материалы IV Международной научно-технической конференции. — 2010. — Орёл: ОрёлГТУ. — Т. 3. — С. 194–197. (личное участие 50%).

7. Шишков, И. И. Способы сокрытия реализации инструментальных средств создания прикладных программ [Текст] / И. И. Шишков // «Информационные системы и технологии 2011». Материалы международной научно-технической интернет-конференции. — 2011. — Орёл: Госуниверситет — УНПК. — Т. 2. — С. 110–113.

8. Шишков, И. И. Использование шаблонов проектирования в одной из задач разработки инструментальных средств создания элементов графического интерфейса пользователя [Текст] / И. И. Шишков // «Информационные системы и технологии». Материалы международной научно-технической интернет-конференции. — 2011. — Орёл: Госуниверситет — УНПК. — Т. 2. — С. 114–119.

9. Шишков, И. И. Архитектура программного комплекса оперативной обработки цифровых снимков большого размера [Текст] / И. И. Шишков // Компьютерные науки и технологии: сборник трудов Второй Международной научнотехнической конференции. — 2011. — Белгород: ООО «ГиК». — С. 697–701.

10. Шишков, И. И. Использование современных графических ускорителей для повышения эффективности обработки растровых изображений [Текст] / И. И. Шишков // Сборник научных трудов SWorld. По материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2011». — 2011. — Одесса: Черноморье. — Т. 3. — С. 40–41.

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

11. Шишков, И. И. Модуль формирования изображения среза методом фильтрованных обратных проекций, производящий вычисления на графическом процессоре // И. И. Шишков, И. С. Константинов, С. С. Мозгов и др. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011611433, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 февраля 2011 г. (личное участие 30%).

ЛР ИД №00670 от 05.01.2000 г.  
Подписано к печати 16.04.2012 г.  
Усл. печ. л.1,00 Тираж 100 экз.  
Заказ №149