

Программно-инструментальный комплекс высокопроизводительной обработки изображений медицинского и промышленного назначения

В.Ф. Заднепровский, А.А. Талалаев, И.П. Тищенко, В.П. Фраленко, В.М. Хачумов

Аннотация. Исследовано специализированное программное обеспечение зарубежных комплексов, предназначенных для обработки и визуализации ультразвуковых и рентгеновских снимков. На основе близости стандартов обработки и передачи медицинской и промышленной информации DICOM/DICONDE показана целесообразность построения универсальной интегрированной системы. Представлена концепция и рассматриваются вопросы построения экспериментального образца программно-инструментального комплекса, ориентированного на решение задач неразрушающего контроля, технической и медицинской диагностики в условиях возросших возможностей гибридных вычислительных сред. В состав предлагаемого комплекса входят базовые алгоритмы высокопроизводительной обработки сигналов и изображений на графических процессорных устройствах; прикладные библиотеки и пакеты медицинского и промышленного назначения.

Ключевые слова: обработка изображений, медицинские снимки, неразрушающий контроль, программно-инструментальный комплекс, высокопроизводительные вычисления, графический процессор, визуализация.

Введение

Оценка современного состояния решаемой научно-технической проблемы указывает на наличие следующих тенденций: повышенный интерес к проблеме построения универсальных инструментальных программных средств при одновременном отсутствии, несмотря на имеющийся прогресс, эффективных методов построения сложных прикладных медицинских и промышленных информационно-аналитических систем; активное патентование в США и других странах методов и систем обработки и визуализации сигналов и изображений, в которых все большую роль играют интеллектуальные методы анализа многомерных данных,

включая методы когнитивного отображения информации, нейросетевые и статистические классификаторы.

Решение задач требует выработки научной концепции на основе проработки особенностей построения сложных прикладных медицинских и промышленных информационно-аналитических систем, включая используемые форматы и стандарты, методы обработки и визуализации данных, задачи выбора алгоритмов и построения библиотек, анализа современных программно-аппаратных решений. Существенное значение имеют стандарт хранения, передачи и визуализации медицинских снимков DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), используемый в современном ульт-

¹ Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 13-07-12162 «Исследование и разработка методов и алгоритмов синтеза медицинских технологических процессов на основе прецедентной информации» и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №18 «Алгоритмы и математическое обеспечение для вычислительных систем сверхвысокой производительности».

развуковом, томографическом, радиографическом и индуктивном диагностическом оборудовании, и стандарт DICONDE (Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation) на цифровые изображения и протоколы связи в неразрушающем контроле.

Высокая производительность обработки сигналов и изображений обеспечивается путем использования кластерных вычислителей, оснащенных графическими ускорителями. Интерес представляют платформа и техника вычислений GPGPU (General-Purpose computation on Graphics Processing Units) общего назначения на «графических ускорителях» и вопросы организации подобных вычислений на основе программно-аппаратной архитектуры NVIDIA CUDA и интерфейса API (Application Program Interface) низкого уровня для гетерогенных вычислений OpenCL™ (Open Computing Language) с целью использования преимуществ параллельных групп вычислений.

Гетерогенные системы открывают новые горизонты для увеличения производительности при обработке больших объемов данных на основе средств и методов автоматического распараллеливания. Основными факторами, объясняющими их перспективность и актуальность, являются быстрое увеличение вычислительных возможностей и объема памяти компьютеров, а также значительное понижение стоимости подобных устройств.

В настоящей работе предлагаются решения в области построения обобщенной архитектуры системы визуализации и обработки сигналов и изображений, библиотек, ориентированных на гетерогенные вычислительные структуры. Центральное место в выдвинутой концепции построения унифицированного программно-инструментального комплекса и научно-технических решений занимают методы, направленные на эффективное использование возможностей гетерогенных вычислительных сред, построенных на основе высокопроизводительных кластерных вычислителей, оснащенных графическими процессорами. Исследуемое научное направление открывает перспективу решения проблемы эффективной программно-аппаратной поддержки принятия решений в медицине и промышленности. Создание про-

граммно-инструментального комплекса призвано значительно облегчить работу операторов и медицинского персонала, стать альтернативой поиску дефектов или патологий вручную, дать возможность глубже анализировать информацию и принимать обоснованные решения.

1. Анализ технологий обработки сигналов, рентгеновских и ультразвуковых изображений

Развитие новых информационных технологий позволило отображать информацию в цифровом виде, обрабатывать ее на высокопроизводительной вычислительной технике, что стало предпосылкой к появлению систем и комплексов автоматической обработки потоков изображений (рентгеновских и ультразвуковых). Для обеспечения автоматического анализа изображений требуется не только набор алгоритмов обработки, но и высокопроизводительные вычислительные устройства (графические и многоядерные процессоры, кластерные системы, специализированные вычислители), дружественные интерфейсы оператора и разработчика для интерактивной работы с целью нанесения на изображения меток, текста, маркировок участков интереса и автоматического поиска целевых объектов и регионов [1, 2].

1.1. Обзор современных решений и систем

В России и за рубежом ведутся интенсивные разработки программных и аппаратных комплексов для решения задач в области обработки снимков медицинского и промышленного назначения. Созданы как универсальные программные и программно-аппаратные комплексы, на основе которых могут быть построены прикладные системы, так и специализированные комплексы, предназначенные для анализа медицинских данных и решения задач неразрушающего контроля изделий в промышленности. Рассмотрим особенности подобных систем и приведем их краткое описание.

1.1.1. Универсальные решения

Компанией «Открытые Технологии» [3] разработаны конфигурации компактных гибридных вычислительных систем на GPU. Основные особенности этих решений:

1) наличие стандартных компонентов, достаточных для большинства задач, заказчику необходимо указать только номер конфигурации (или пиковую производительность), используемый тип GPU-вычислителей, необходимость высокоскоростной сети Infiniband, тип операционной системы (Linux либо MS Windows);

2) поставка системы в виде готовой к работе платформы, решение вопросов интеграции системы в инфраструктуру сводится к минимуму;

3) возможность использования серверного варианта GPU-вычислителя NVIDIA Tesla для обеспечения повышенной надежности, удобства обслуживания и гибкости в подключении к серверам кластера;

4) сопоставимость со стоимостью нескольких профессиональных рабочих станций при несоизмеримо более высокой совокупной производительности и возможностях.

В работе [4] изложено видение проблемы внедрения актуальных технологических решений как для лечебных и профилактических учреждений, так и для профильных ведомств и министерств. Показаны пути внедрения современных информационных технологий и систем в медицину для существенного повышения качества диагностики, лечения и реабилитации пациентов, расширения спектра решаемых медициной задач.

Архитектура системы обработки больших объемов изображений [5] на основе MapReduce [6] с автоматическим распараллеливанием является современной разработкой в области анализа изображений на кластерных установках. Особенность системы - изоляция от прикладного программиста, занимающегося обработкой изображений, деталей внутреннего устройства, связанных с организацией параллельной работы и загрузкой изображений. Программист разрабатывает последовательную функцию, обрабатывающую только одно изображение, запуск которой для обработки большого объема изображений в параллельном режиме выполняется системой автоматически.

1.1.2. Обзор решений в области медицинских технологий

Программный комплекс Magellan [7] направлен на обработку результатов компьютерной рентгенографии и цифровых рентгеновских

снимков. Комплекс имеет широкие возможности обработки изображений формата DICOM [8, 9], поддерживает интерфейс DICOM, систему передачи и архивации изображений на удаленных серверах Picture Archiving and Communication System (PACS) [10,11], позволяет выводить изображения на принтер. Комплекс обладает широким набором программных средств, что упрощает работу специалиста.

PROPAXX [12] является программным комплексом для просмотра, обработки и архивирования рентгеновских изображений, предоставляет удобный и многофункциональный пользовательский интерфейс. Основная часть системы PROPAXX – сервер для хранения изображений, работа с которым доступна с клиентских устройств. Система имеет модульную структуру, которая дает возможность расширять функции системы и обеспечивает работу с файлами в формате DICOM.

Продукт TiViPE [13] представляет собой программную систему для улучшения качества и визуализации медицинских рентгеновских снимков. TiViPE имеет модульную структуру и графический интерфейс, позволяющий составлять схемы решения задач с помощью графических блоков. TiViPE является законченным программным продуктом, предоставляет длительную техническую поддержку, обеспечивая высокие показатели контроля качества.

Компания «АМИКО рентгенотехника» [14] предоставляет аппаратно-программные комплексы с возможностью рентгеноскопии, обработки и визуализации медицинских снимков. Аппаратная часть представлена рентгенодиагностическими комплексами, цифровыми рентгенографическими аппаратами, прочими пленочными и цифровыми, стационарными и передвижными кабинетами с рентгенотехникой. Программная часть обеспечивает получение цифровых рентгеновских изображений и их визуализацию, получение дополнительной диагностической информации, возможность архивации, передачи по компьютерным сетям и получения твердых копий. К продуктам компании относятся: устройство для цифровой обработки, визуализации и архивирования медицинских изображений УЦОИ-«Аккорд»; автоматизированное рабочее место врача УЗИ;

рентгенологическая информационная система «АРИАДНА». Комплексы отличаются законченностью, не требуя настройки и установки дополнительного оборудования.

Автоматизированная рентгенологическая информационная система «ПроПИКС» [15] компании РЕНТГЕНПРОМ представляет собой программно-аппаратный комплекс для поддержки процесса обследования пациентов. «ПроПИКС», являясь PACS-системой, обеспечивает автоматизацию процесса ввода медицинских диагностических изображений; визуализацию и математическую обработку изображений; автоматизацию процесса составления отчетов; упорядоченное хранение изображений и результатов экспертизы; передачу по телекоммуникационным каналам связи изображений и результатов их экспертизы. Система обеспечивает работу с форматом DICOM, интеграцию с существующим аппаратным обеспечением.

Технологии компании ContextVision [16] предназначены для решения задач обработки изображений ультразвукового и рентгеновского обследования с использованием ресурсов GPU. Содержат реализации алгоритмов адаптивной фильтрации, обеспечивающей удаление шумов и помех, повышение резкости, повышения контрастности изображений и эффективное сжатие динамического диапазона. Технология GOPView является аппаратно-независимой и может быть интегрирована с любым программным обеспечением.

Пакет алгоритмов Image Processing Toolkit [17], предназначенный для обработки изображений магнитно-резонансной томографии (МРТ), позволяет значительно снизить время обработки массива изображений, полученного в ходе обследования пациента на томографе. Основной целью предлагаемой технологии является проведение реконструкции трехмерных моделей обследуемых органов, при этом ресурсоемкие вычисления переносятся на GPU.

1.1.3. Обзор решений в области промышленных технологий

Обработка и анализ изображений в промышленных технологиях, в основном, используется для систем неразрушающего контроля.

Следует заметить, что спектр комплексов данной направленности в промышленной области гораздо шире, чем в медицинской. Кроме того, существует большое количество стандартов, которых придерживаются разработчики.

Продукты FocalSpot [18] - это простые в использовании инструменты для рентгеноскопии, неразрушающего контроля, диагностирующей рентгенологии, анализа брака и других задач, направленных на улучшение качества промышленного производства с помощью рентгена. FocalSpot предоставляет несколько готовых решений, которые отличаются широким функционалом и углубленными возможностями предобработки рентгеновских снимков.

Система улучшения и обработки снимков iPX [19], являющаяся разработкой компаний Adaptive Energy и ScienX, предназначена для промышленного неразрушающего контроля посредством рентгеноскопии. iPX может использовать традиционное аппаратное обеспечение; передавать данные посредством электронной почты, облачных систем и социальных сетей; распечатывать снимки с помощью офисных принтеров. Система снабжена цифровой камерой и обеспечивает обработку снимков с разрешением 1024x768 пикселей.

Дополнительно укажем на программное обеспечение efX компании North Star Imaging [20] для 3D-реконструкции, визуализации и анализа результатов, полученных с использованием рентгенографических методов исследования; экспертную систему Kovid RT [21] компании Lucid Software для анализа и визуализации данных, полученных с использованием ультразвуковых, радиографических, термографических и других методов. Отметим платформу Rhythm [22] компании GE Measurement & Control, которая представляет собой удобный инструментарий для анализа изображений в задачах неразрушающего контроля. Возможности программного обеспечения позволяют значительно повысить эффективность работы и быстро обнаруживать проблемы, что уменьшает количество производственных дефектов. Поддерживаются открытые индустриальные стандарты передачи данных [23], предлагается широкий спектр ультразвукового и рентгеновского оборудования.

Выделяется ряд отечественных компаний, предлагающих научно-технические решения в области неразрушающего контроля. Научно-производственная Фирма «АВЭК» [24] предоставляет большое количество решений в области обработки и анализа изображений, в том числе, рентгеновских и ультразвуковых. Одним из известных продуктов компании является система MAPS, которая предназначена для автоматизации расшифровки снимков, исключения субъективного фактора в оценке параметров снимка и найденных дефектов. Система занимает одно из лидирующих мест в области неразрушающего контроля в России.

МИКРОКОН РАД [25] – компьютерная система с функциями оценки пригодности снимка к расшифровке по ГОСТ 7512 и интерактивной расшифровки снимка с формированием отчета по ГОСТ 23055. Система предназначена для прецизионного перевода в цифровую форму радиографических снимков, их обработки для повышения точности измерений, классификации сварных соединений, накопления базы снимков и протоколов с возможностью архивации на CD-R/DVD-R, отличается гибкой системой калибровки.

Аппаратно-программный комплекс Вид-Х [26] предназначен для цифровой обработки радиографических снимков. Осуществляет автоматическое управление системами сбора проекционных данных для цифровой томографии и томосинтеза (выделения произвольного слоя контролируемого объекта), управляет параметрами излучения рентгеновских аппаратов. Комплекс позволяет работать как с традиционными радиографическими пленками, так и с большинством современных цифровых детекторов. В программном обеспечении комплекса реализованы широкие возможности по обработке и улучшению рентгеновских изображений.

1.2. Обзор стандартов хранения, передачи и визуализации графических данных

1.2.1. Стандарт DICOM медицинских снимков

DICOM – отраслевой унифицированный стандарт создания, хранения, передачи и визуализации медицинских изображений и документов обследованных пациентов [8,9]. DICOM позволяет хранить не только изображения, но и

дополнительную информацию об условиях получения этих изображений. В свою очередь, он опирается на стандарт ISO 12052 [27] и поддерживается основными производителями медицинского оборудования и программного обеспечения.

ISO 12052 определяет два уровня стандарта DICOM:

1) файловый уровень – DICOM File – объектный файл с теговой организацией для представления кадра изображения (или серии кадров) и сопровождающей/управляющей информации (в виде DICOM тегов);

2) сетевой (коммуникационный) протокол – DICOM Network Protocols– для передачи DICOM файлов и управляющих DICOM команд по сетям с поддержкой TCP/IP.

DICOM Network Protocol [28] использует TCP/IP для передачи медицинской информации от медицинского оборудования различных производителей в PACS-систему и для связи между PACS-системами. PACS представляет собой клиент-серверную медицинскую систему, которая связывает между собой следующие компоненты [28]: медицинское DICOM оборудование (клиенты); один или несколько DICOM-серверов; одну или несколько диагностических DICOM-станций; один или несколько DICOM-принтеров. Стандарт позволяет производить интеграцию медицинского оборудования разных производителей в единую радиологическую или клиническую информационную систему.

1.2.2. Стандарт DICONDE промышленных снимков

Стандарт применяется в различных областях промышленности при рентгенографическом контроле сварных соединений различных металлоконструкций и других изделий ответственного назначения. DICONDE является общепринятым стандартом на цифровые изображения и протоколом связи в неразрушающем контроле, соответствует стандарту ASTM [29] на радиографический контроль и ультразвуковую дефектоскопию.

DICONDE разработан на основе стандарта DICOM, но при этом включает в себя много опций, предназначенных для неразрушающего

контроля. DICONDE содержит синтаксис, атрибуты и элементы данных, что позволяет получать, хранить, архивировать и передавать данные и изображения в универсальном формате [30]. Этот формат позволяет сохранять изображения вместе с контекстом, содержащим всю необходимую техническую информацию, а также данные о месте, дате, времени и авторе изображения. Информация может включаться в любой генерируемый отчет, а само включение ее в базу данных вместе с изображением означает, что к ней можно будет применять запросы по различным критериям.

Выполненный анализ показывает, что на фоне многочисленных специализированных решений в области промышленных и медицинских снимков решения универсальные пока занимают весьма скромное место и не отличаются большой функциональностью. В то же время потребность в них велика, поскольку

- решения в различных областях имеют много общего в методах обработки и могут основываться на пересекающихся множествах алгоритмов;
- решения опираются на весьма близкие или родственные по структуре стандарты в медицинском и промышленном секторах;
- используют одну и ту же высокопроизводительную технику, включая GPU.

Указанные обстоятельства приводят к необходимости построения универсальных систем и комплексов, которые способны по прогнозам дать и ощутимое экономическое преимущество.

2. Архитектура программно-инструментального комплекса

Общая концепция построения и архитектура высокопроизводительного универсального программного комплекса (инструментальных программных средств) была предложена ранее в работе [31]. Архитектура может быть легко адаптирована к использованию ресурсов гетерогенной среды GPU-кластера применительно к обработке сигналов, медицинских и промышленных снимков.

2.1. Концепция универсального комплекса

Рассмотрим способ организации вычислений на GPU-кластерах, содержащих графические ускорители в дополнение к процессорам общего назначения [32, 33]. Схема поступления и обработки медицинских и промышленных снимков на основе объединения стандартов DICOM и DICONDE представлена на Рис. 1 и Рис.2.

Система способна эффективно обрабатывать как одиночные снимки, так и потоки, сохраненные заранее или получаемые в режиме реального времени с некоторого оборудования. Реализация комплекса требует работы последовательности программных модулей:

- 1) модуль задания входных данных – производит задание источника данных;
- 2) модуль чтения – выполняет чтение одиночного снимка, потока снимков;
- 3) модули обработки – производят обработку поступающих снимков;

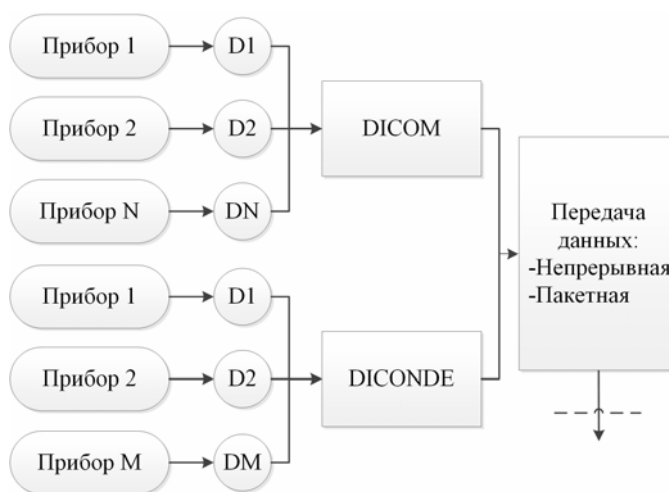


Рис. 1. Схема передающей части интегрированного комплекса, D1, D2 и т.д. – драйверы устройств

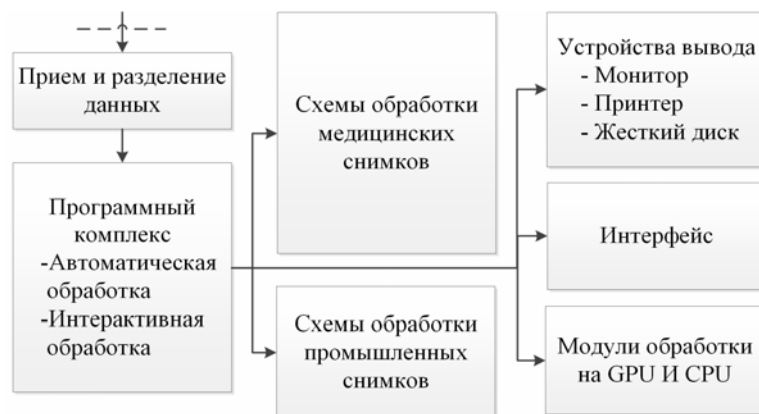


Рис. 2. Схема приемной части интегрированного комплекса

4) модули хранения – обеспечивают сохранение результата с целью последующей обработки или сравнения и передачи данных на визуализацию;

5) модули визуализации – принимают данные и отображают информацию на экране, в том числе, рекомендации пользователю.

Для промышленной части схемы предусматривается обработка как отдельного снимка, так и непрерывного потока снимков. Порядок действий не отличается от медицинских снимков, за исключением необходимости специальной регламентированной реакции на найденные повреждения и особенности.

Архитектура комплекса (Рис. 3) наследует полученные ранее структуры и результаты построения прикладных систем различного назначения [31, 34-36].

Функционально комплекс разбит на две основные части, включающие:

- вычислительное ядро, модули чтения, модули обработки, модули сохранения и передачи информации;

- графический интерфейс, модули задания входных данных, модули визуализации.

Модули обработки информации, применяемые для решения прикладных задач, реализуются в виде динамических библиотек и могут использовать ресурсы GPU для проведения необходимых расчетов. Система диспетчеризации нагрузки, реализованная в ядре системы, поддерживает выполнение задачи в многопоточном окружении на кластерном устройстве, обеспечивая конвейерно-параллельный режим обработки данных.

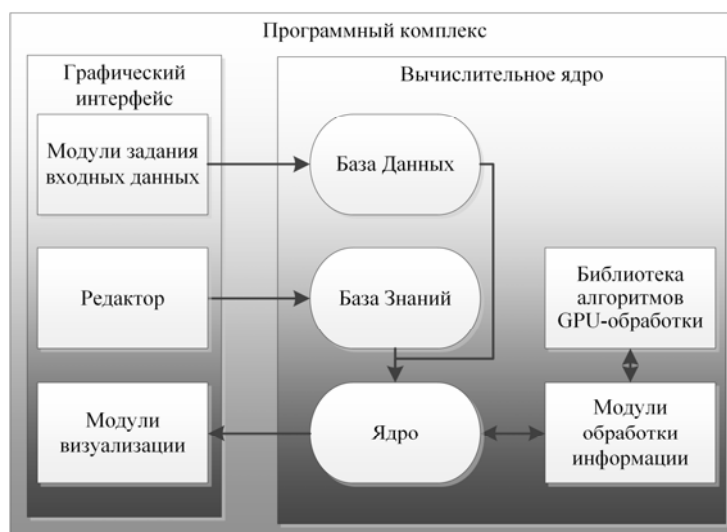


Рис. 3. Архитектура ПИК

2.2. Экспериментальные исследования комплекса

Средства, используемые при создании программно-инструментального комплекса высокопроизводительной обработки изображений медицинского и промышленного назначения, содержат набор алгоритмов матричной алгебры, фильтрации, анализа изображений, распознавания образов. Для реализации указанного набора алгоритмов используются программно-аппаратные платформы CUDA и OpenCL с применением программных библиотек MAGMA и OpenCV. Разработка алгоритмов GPU-обработки опирается на современные методики. В частности, вейвлет - преобразование Хаара реализовано на основе алгоритма, описанного в работе [37], а для сегментации изображений с помощью алгоритма QuickShift используется GPU-реализация [38], предложенная авторами статьи [39].

Для реализации алгоритмов, таких как: преобразование яркости и контраста, инвертирование изображений, гамма-коррекция, изменение яркости с помощью логарифмической функции, преобразование полутонового изображения в цветное, – может быть использована архитектура OpenCL. Все перечисленные операции сводятся к преобразованию значений каждого пикселя исходного изображения с помощью заданной функции либо таблицы поиска. Для реализации данного класса алгоритмов был разработан программный модуль на основе OpenCL API, реализующий следующую функциональность:

- инициализация библиотеки OpenCL;
- загрузка изображения в видео-ОЗУ в виде набора цветных каналов;
- runtime-компиляция и применение к изображению заданной OpenCL-программы;
- извлечение результатов из видео-ОЗУ для обработки, отображения или сохранения.

Примером алгоритмов преобразования является гамма-коррекция, основанная на степенной функции преобразования $y = x^k$, где y – яркость результирующего пикселя, x – яркость исходного пикселя, k – коэффициент гамма-коррекции. Для выполнения гамма-коррекции, достаточно выполнить OpenCL-программу вида:

```
__kernel void main(
    uint width, uint height,
    __global const uchar *iR,
    __global const uchar *iG,
    __global const uchar *iB,
    __global const uchar *iA,
    __global uchar *oR,
    __global uchar *oG,
    __global uchar *oB,
    __global uchar *oA)
{
    size_t idx = get_global_id(0);
    if (idx >= width*height) return;

    //коэф. коррекции
    __local float gamma_c;
    gamma_c = 2;

    //конвертация диапазонов и гамма-
    коррекция
    oR[idx] = pow(iR[idx]/255.0, gamma_c) * 255;
    oG[idx] = pow(iG[idx]/255.0, gamma_c) * 255;
    oB[idx] = pow(iB[idx]/255.0, gamma_c) * 255;
    oA[idx] = iA[idx];
}
```

Входные параметры OpenCL программы содержат ширину (width) и высоту (height) обрабатываемого изображения в пикселях, входные данные в виде константных массивов (iR, iG, iB, iA), соответствующих цветовым каналам изображения RGB и альфа-каналу, а также выходные массивы (oR, oG, oB, oA) для сохранения результатов обработки.

Исходное изображение и результат обработки данных представлены на Рис. 4 и Рис 5.

Использование модификатора global для входных данных обеспечивает возможность работы со всеми пикселями исходного изображения при каждом вызове OpenCL-программы, что позволяет без внесения дополнительных изменений разрабатывать другие алгоритмы, например, фильтры (сглаживание, размытие, выделение контуров, повышение резкости и т.п.).

Алгоритм поиска характерных областей на снимках путем анализа спектрографических текстур реализован на базе библиотеки MAGMA. Наиболее интенсивными являются вычисления обратных матриц, а также перемножение матриц и векторов. Все перечисленные алгоритмы входят в библиотеку алгоритмов GPU и исполь-



Рис. 4. Исходное изображение

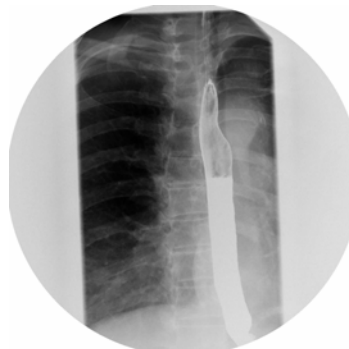


Рис. 5. Результат обработки (гамма-коррекция, коэффициент 2)

зуются в модулях обработки данных программно-инструментального комплекса.

Для оценки эффективности комплекса были проведены экспериментальные исследования. На рабочей станции, построенной на основе двух-процессорной конфигурации Intel Xeon X5570 @ 2.93GHz и снабженной графическим ускорителем Nvidia Tesla C1060, проведено сравнительное тестирование, в котором решалась задача перемножения матриц 2048x2048. Операция выполнялась для матриц с действительными и комплексными числами одинарной и двойной точности с использованием библиотек ATLAS (при вычислениях на CPU) и CUBLAS (при вычислениях на GPU). Для увеличения нагрузки операция выполнялась многократно. Результаты представлены в Табл. 1.

Проведенный эксперимент показывает, что одновременное использование ресурсов GPU из нескольких потоков в ходе решения задачи позволяет получить определенное преимущество, однако масштабирование скорости вычислений незначительно по сравнению с CPU-реализацией. При этом порог эффективного наращивания числа вычислительных потоков, предполагающего дальнейшее ускорение счета, для GPU выше. Для CPU уже при 16 конкурирующих параллельных потоках наблюдается снижение эффективности на операциях с действительными числами.

Тестирование программ, реализующих алгоритм фильтрации, проводилось на промышленных и медицинских снимках различного размера. Для получения сравнительных характеристик решения задачи фильтрации на GPU и CPU был реализован механизм конвейерной

Табл. 1. Время счета на GPU, многопоточный режим (от 1 до 16 потоков)

Формат данных	Количество конкурирующих потоков				
	1	2	4	8	16
Одинарная точность, с	15.45	18.40	21.56	35.87	55.65
Двойная точность, с	20.48	28.42	41.55	73.05	127.43
Комплексные числа с одинарной точностью, с	22.37	28.68	37.93	65.56	107.42
Комплексные числа с двойной точностью, с	40.12	62.75	104.34	190.73	343.94

фильтрации изображений. В процессе тестирования измерялось время обработки, без учета времени сохранения и передачи данных. Из исходных изображений был сформирован тестовый пакет, в который были включены 10 копий исходных изображений (всего 120 изображений). Тестирование проходило на трех узлах кластерной установки, оснащенных GPU. Результаты представлены в Табл. 2.

Наличие в системе GPU несколько сокращает время обработки изображений. Особенно это заметно при использовании малого числа параллельных процессов. Алгоритм для решения задач на GPU существенно отличается от алгоритма для CPU, что мешает быстрому переносу готовых решений. Эффективность счета на GPU падает в программах с большим количеством обращений к памяти (особенно к соседним потокам) и в случае малого числа операций, которые могут выполняться параллельно.

Табл. 2. Характеристики обработки снимков на GPU и CPU

Количество параллельных процессов	Обработка снимков на GPU		Обработка снимков на CPU	
	Общее время счета задачи (чтение и обработка), с	Время выполнения одного процесса (среднее), с	Общее время счета задачи (чтение и обработка), с	Время выполнения одного процесса (среднее), с
1	01:44.63	64.45	02:14.98	94.94
2	01:15.85	33.93	01:32.19	47.68
4	00:58.02	19.77	01:03.79	25.94
8	00:54.24	10.77	00:53.89	12.12
16	00:58.28	5.04	00:55.33	6.16

2.3. Визуализация медицинских данных с элементами когнитивной графики

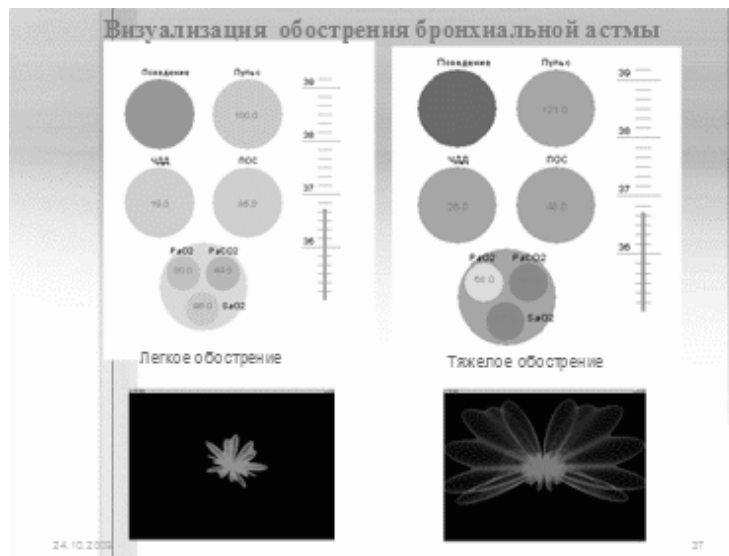
Отдельное направление исследований связано с анализом изображений для медицинских приложений. Медицинские данные с помощью ЭВМ могут быть соотнесены в когнитивный графический образ в виде интегральных функциональных профилей или сцен, отражающих особенности состояния объекта. Когнитивная графика может обеспечить, например, непрерывный контроль состояния пациентов, визуализируя текущее состояние и характерные особенности заболевания. На Рис. 6 показаны примеры когнитивной визуализации обострения бронхиальной астмы.

Состояние больного можно представлять в виде областей (кругов), каждый из которых визуализирует свой параметр и окрашивается в соответствии со значением этого параметра. Цвет параметров меняется от зеленого к крас-

ному через желтый. Зеленый цвет – значение в пределах нормы, красный – далеко от нормы, желтый и желто-оранжевый – промежуточные значения. Все величины нормируются так, чтобы значение параметра в пределах нормы было близко к нулю, а значения, далеко отстоящие от нормы, ближе к единице.

Проекции трехмерных образов («звезд») состояний человека с легким и тяжелым обострением бронхиальной астмы можно наблюдать в разных плоскостях. При отклонении параметров от нормы (в любую сторону) звезда увеличивается, причем по-разному в зависимости от упорядочения параметров. При увеличении первых параметров наблюдается сглаживание и объединение отдельных выпуклостей, а при увеличении последних параметров обнаруживается тенденция к разделению и увеличению числа концов «звезды». Звезда пациента при обострении тяжелой степени намного превосходит в размерах звезду легкого обострения и

Рис. 6. Возможности когнитивной визуализации бронхиальной астмы



выглядит более гладкой. По когнитивным образам врач способен моментально оценить общее состояние больного и принять адекватное решение.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить основные тенденции развития в области методов и технологий обработки сигналов и изображений в различных предметных областях, в частности, отобрать методы фильтрации, обработки изображений и распознавания образов, выделить основные задачи и необходимые для их решения алгоритмы.

Разработан и исследован экспериментальный универсальный комплекс программно-инструментальных средств обработки медицинских и промышленных снимков. Комплекс является уникальным по своей структурной организации и функциональным возможностям, учитывает положительные свойства, присутствующие в российских, иностранных и международных патентах.

Практическое применение полученных результатов соответствует современным тенденциям в области высокопроизводительной обработки изображений медицинского и промышленного назначения, обеспечивает хранение, конвейерно-параллельную обработку и визуализацию данных, поступающих в потоковом режиме.

Литература

- Куликов Д.Е. Визуальное представление данных в медицинских информационных системах. Проблемы и способы решения // Труды Молодежной научно-практической конференции «Научные информационные технологии», УГП им. А.К. Айламазяна, г. Переславль-Залесский, апрель 2009.
- Мальшевский А.А., Молодченков А.И., Хачумов В.М. Визуализация медицинских технологических процессов и многомерных данных для поддержки принятия решений // Материалы V Региональной научно-технической конференции (Дагинформ-2008, 18-20 сентября 2008 года) «Информационные и телекоммуникационные системы: информационные технологии в научных и образовательных процессах» – Махачкала: ДНЦ РАН, 2008, с. 164-176.
- Официальный сайт «Открытые Технологии». URL: <http://www.ot.ru/press20110215.html> (дата обращения: 01.07.2013).
- Лищук В.А., Калинин С.В., Шевченко Г.В. и др. Стратегия информатизации медицины – основные положения, принципы и предложения – Ейск: ЮгПолиграф, 2011. – 237 с.
- Созыкин А.В., Гольдштейн М.Л. Архитектура системы обработки больших объемов изображений с автоматическим распараллеливанием. URL: <http://agora.guru.ru/abrau2012/pdf/58.pdf> (дата обращения: 01.07.2013).
- Stonebraker M., Abadi D., Dawitt J. D., Madden S. MapReduce and Parallel DBMSs: Friends or Foes? Communications of the ACM, vol. 53, no. 1, 2010.
- Официальный сайт Magellan image processing software. URL: <http://www.imagingdynamics.com/content/view/18/22/> (дата обращения: 01.07.2013).
- Википедия. DICOM. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/DICOM> (дата обращения: 01.07.2013).
- Mustra M., Delac K., Grgic M. Overview of the DICOM Standard. ELMAR, 2008. 50th International Symposium. Zadar, Croatia. pp. 39-44. ISBN 978-1-4244-3364-3.
- Википедия. PACS. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/PACS> (дата обращения: 01.07.2013).
- Каперусов С.Ю. PACS – система архивирования и передачи изображений в лучевой диагностике // Радиология-практика, №3, 2007.
- Официальный сайт PROPAXX. URL: http://www.protec-med.com/en/product/26-image_processing_and_archiving_-_propaxx.html (дата обращения: 01.07.2013).
- Официальный сайт TiViPE. URL: http://www.tivipe.com/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=81 (дата обращения: 01.07.2013).
- Официальный сайт AMICO. URL: <http://www.amico.ru/produkcija/1/> (дата обращения: 01.07.2013).
- Официальный сайт Рентгенпром. URL: <http://www.roentgenprom.ru/products/software/179-propix.html> (дата обращения: 01.07.2013).
- Официальный сайт ContextVision. URL: <http://www.contextvision.com> (дата обращения: 01.07.2013).
- Chilingaryan S., Mirone A., Hammersley A. A GPU-based architecture for real-time data assessment at synchrotron experiments // 17th IEEE-NPSS Real Time Conference, Institute of Data Processing and Electronics, Karlsruhe Institute of Technology, Germany, 2010. URL: <http://hgpu.org/?p=3837> (дата обращения: 01.07.2013).
- Официальный сайт FOCALSPOT. URL: <http://www.focalspot.com/inspection-software.htm> (дата обращения: 01.07.2013).
- Официальный сайт Industrial X-RAY. URL: <http://www.industrialx-ray.com/> (дата обращения: 01.07.2013).
- Bangert M. Quality Innovations: The Six-Second Scan. // Quality Magazine, 2010. URL: <http://www.qualitymag.com/articles/87372-quality-innovations-the-six-second-scan> (дата обращения: 01.07.2013).

21. Kovid RT. URL: <http://www.lucidsoft.net/featuredproducts.htm> (дата обращения: 01.07.2013).
22. GE Measurement & Control Official site. URL: <http://www.ge-mcs.com> (дата обращения: 01.07.2013).
23. Enenkel L., Buechler J., Poirier J., Jervis D. A Portable Solution to Enable Guided Ultrasonic Inspection // 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 2012. URL: http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/313_wcndtfnal00313.pdf (дата обращения: 01.07.2013).
24. Официальный сайт АВЭК. URL: http://old.avek.ru/equipment/?section_id=101&item_id=730 (дата обращения: 01.07.2013).
25. Официальный сайт МИКРОКОН РАД. URL: <http://microkon.rosbizinfo.ru/products/37.html> (дата обращения: 01.07.2013).
26. Научно-производственный центр НЕЛК. Вид-Х. Комплекс для цифровой обработки радиографических снимков. URL: <http://www.nelk.ru/node/159> (дата обращения: 09.03.2013).
27. Стандарт ISO 12052. URL: http://www.iso.org/iso/ru/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=43218 (дата обращения: 01.07.2013).
28. DICOM-стандарт. URL: <http://www.course-as.ru/dicomdoc.html> (дата обращения: 01.07.2013).
29. Официальный сайт ASTM International. URL: <http://www.astm.org/> (дата обращения: 01.07.2013).
30. Jobst M., Hansen J., Howard P., Arrowood L. Developing New Information Object Definitions for DICONDE // 4th European-American Workshop on Reliability of NDE, 2009. URL: <http://www.ndt.net/article/reliability2009/Inhalt/th5b4.pdf> (дата обращения: 22.03.2013).
31. Талалаев А.А. Организация конвейерно-параллельных вычислений для обработки потоков данных // Информационные технологии и вычислительные системы, №1, 2011, с.8-13.
32. Кондратьев А.А., Тищенко И.П. Использование графических вычислителей в процессах обработки и распознавания изображений // V Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (5-7 июня 2012 г., г. Москва). Тезисы докладов. – М.: Радиотехника, 2012, с.92, ISBN 978-5-88070-025-7.
33. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: Учебное пособие / А.В.Боресков и др. – М.: Издательство московского университета, 2012. – 336 с.
34. Джораев А.Р. Гибридные вычислительные системы на основе GPU для задач биоинформатики. – Компьютерные исследования и моделирование, 2010, Т.2, №2, с.163-167.
35. Константинов К.А., Талалаев А.А., Тищенко И.П., Хачумов В.М. Концепция архитектуры нейросетевой системы контроля, диагностики и обработки изображений космического назначения // Авиакосмическое приборостроение, №5, 2009, с.39-47.
36. Хачумов В.М., Талалаев А.А. Технические характеристики кластерных вычислителей и анализ эффективности параллельных программных средств обработки потоков данных. // Авиакосмическое приборостроение, 2011, №12, с.3-17.
37. Madeena Sultana, Nurul Muntasir Mamun – Simple and Fast Implementation of Segmented Matrix Algorithm for Haar DWT on a Low Cost GPU // ACEEE Int. J. on Signal & Image Processing, Vol. 03, No. 01 – January 2012 – pp.32-35.
38. Really quick shift: Image segmentation on a GPU (GPU implementation of the QuickShift algorithm). URL: <http://vision.ucla.edu/~brian/gpuquickshift.html> (last visited: 01.07.2013).
39. gpu-2d-binary-ccl (GPU implementation of the connected components labeling algorithm). URL: <https://code.google.com/p/gpu-2d-binary-ccl/> (last visited: 01.07.2013).

Заднепровский Вадим Федорович. Генеральный директор компании «РСК СКИФ», заместитель директора ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. E-mail: v.f.z_skii@mail.ru

Талалаев Александр Анатольевич. Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуального управления исследовательского центра мультипроцессорных систем ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Кандидат технических наук. Автор более 30 работ. E-mail: arts@arts.botik.ru

Тищенко Игорь Петрович. Старший научный сотрудник лаборатории интеллектуального управления исследовательского центра мультипроцессорных систем ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Кандидат технических наук. Автор более 35 работ. E-mail: billy@billy.botik.ru

Фраленко Виталий Петрович. Научный сотрудник лаборатории интеллектуального управления исследовательского центра мультипроцессорных систем ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. Кандидат технических наук. Автор более 45 работ. E-mail: alarmod@pereslavl.ru

Хачумов Вячеслав Михайлович. Заведующий лабораторией методов интеллектуального управления ИСА РАН. Доктор технических наук, профессор. Автор более 180 работ. E-mail: vmh48@mail.ru