

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА»

УДК 004.9, 519.6

УТВЕРЖДАЮ

№ госрегистрации 01201176783

Инв.№

Проректор – начальник
Управления научной политики и
организации научных исследований
МГУ имени М.В.Ломоносова

_____ В.Е. Подольский
« 12 » апреля 2013 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Исследования и разработка методов автоматического обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания для современных технологий компьютерной обработки изображений.

по теме:

ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ
(заключительный)

Шифр:«2011-1.9-519-020»

Руководитель темы

_____ 12.04.13 А.С. Крылов
подпись, дата

Москва 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,

д. ф.-м. н., профессор

_____ 12.04.13 А.С. Крылов (введение, разделы 1-5,
подпись, дата заключение)

Исполнители темы:

д. ф.-м. н., профессор

_____ 12.04.13 А.М. Денисов (раздел 1)
подпись, дата

к. ф.-м. н., ст. преп.

_____ 12.04.13 М.М. Мизотин (раздел 1)
подпись, дата

к. ф.-м. н., н.с.

_____ 12.04.13 Е.В. Никитина (разделы 1-3)
подпись, дата

к. ф.-м. н., м.н.с.

_____ 12.04.13 А.В. Насонов (введение, разделы 1-4,
подпись, дата заключение)

математик

_____ 12.04.13 И.Т. Ситдииков (разделы 1, 2)
подпись, дата

математик

_____ 12.04.13 А.А. Насонова (раздел 2)
подпись, дата

Нормоконтролёр:

к. ф.-м. н., н.с.

_____ 12.04.13 Е.В. Никитина
подпись, дата

РЕФЕРАТ

Отчет 68 с., 1 ч., 11 рис., 2 табл., 7 источников.

АРТЕФАКТ ЛОЖНОГО ОКОНТУРИВАНИЯ, ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ЭФФЕКТ ГИББСА, АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Целью проекта «Исследования и разработка методов автоматического обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания для современных технологий компьютерной обработки изображений» является разработка алгоритмов оценки и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях в автоматическом режиме.

На заключительном этапе работ «Обобщение и оценка результатов исследований» по проекту «Исследования и разработка методов автоматического обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания для современных технологий компьютерной обработки изображений» был создан прототип программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях, осуществлена его адаптация для выполнения задач на параллельных архитектурах, произведена доработка и корректировка тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием, произведена оценка и обобщение результатов НИР, включая технико-экономическую оценку результатов НИР и предложения и рекомендации по использованию разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса на изображениях для современных технологий обработки и компрессии изображений.

Созданный программный прототип осуществляет решение задачи обнаружения базовых контуров на изображениях, задачи обнаружения эффекта Гиббса и ложного оконтуривания и его уровня на изображениях, задачи подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений общего типа и задачи подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений, полученных в результате

повышения разрешения. Используемые в прототипе программы алгоритмы были адаптированы для использования на параллельных архитектурах.

Полученные при проведении работ результаты соответствуют мировому уровню работ в исследуемой области.

Разработанные алгоритмы обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания могут быть применимы в широком круге задач обработки и анализа изображений. Особенно актуально использование подобных алгоритмов повышения качества изображений в задачах обработки медицинских изображений, в частности, при обработке изображений магнитно-резонансной томографии. Алгоритмы обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания существенно повышают возможности методов улучшения качества изображений, поскольку удаётся подавить ложное оконтуривание, являвшееся до этого лимитирующим фактором многих алгоритмов в обработке изображений.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 8 |
| 1 Создание прототипа программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях и его адаптация для выполнения задач на параллельных архитектурах | 11 |
| 1.1 Создание прототипа программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях | 11 |
| 1.2 Адаптация разработанного прототипа программы для ЭВМ для выполнения задач на параллельных архитектурах | 14 |
| 1.2.1 Выбор параллельной архитектуры | 14 |
| 1.2.2 Параллельная реализация детектора границ Канни | 15 |
| 1.2.2.1 Выбор подхода для реализации детектора границ Канни | 15 |
| 1.2.2.2 Параллельная реализация фильтра Гаусса | 15 |
| 1.2.2.3 Параллельная реализация процедуры подавления немаксимальных точек | 18 |
| 1.2.2.4 Параллельная реализация процедуры маскирования | 19 |
| 1.2.3 Параллельная реализация алгоритма преобразования евклидового расстояния | 20 |
| 2 Дополнение и корректировка тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием с учётом полученных результатов | 22 |
| 2.1 Дополнение тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием | 22 |
| 2.2 Корректировка тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием | 25 |
| 2.3 Изменение структуры файла метрик | 30 |
| 2.4 Скорректированное описание тестовой базы данных | 32 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Оценка и обобщение результатов НИР, включая технико-экономическую оценку результатов НИР и предложения и рекомендации по использованию разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса на изображениях для современных технологий обработки и компрессии изображений | 34 |
| 3.1 | Описание и результаты работ предыдущих этапов | 34 |
| 3.1.1 | Этап 1. Выбор направления исследований | 34 |
| 3.1.2 | Этап 2. Теоретические исследования поставленных перед НИР задач | 36 |
| 3.1.3 | Этап 3. Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач | 37 |
| 3.2 | Технико-экономическая оценка результатов НИР | 38 |
| 3.2.1 | Постановка задачи | 38 |
| 3.2.2 | Оценка экономического эффекта от использования алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений | 38 |
| 3.2.3 | Оценка экономического эффекта от внедрения алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео в реальном времени | 41 |
| 3.3 | Обобщение и выводы по результатам НИР | 42 |
| 3.3.1 | Основные результаты проекта | 42 |
| 3.3.2 | Выводы по результатам НИР | 44 |
| 3.4 | Рекомендации и предложения по использованию результатов НИР | 46 |
| 4 | Создание прототипов программ, реализующих разработанные алгоритмы для сжатых изображений и их адаптация для выполнения задач на параллельных архитектурах | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1 | Создание прототипов программ, реализующих разработанные алгоритмы для сжатых изображений | 47 |
| 4.2 | Параллельная реализация морфологических операций | 50 |
| 4.3 | Параллельная реализация субградиентного метода для алгоритмов подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания | 51 |
| 5 | Дополнение и корректировка тестовой базы данных изображений, сжатых JPEG2000 и другими алгоритмами, с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием с учётом полученных результатов | 53 |
| 5.1 | Дополнение тестовой базы данных изображений, сжатых JPEG2000 и другими алгоритмами, с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием | 53 |
| 5.2 | Скорректированное описание базы данных | 55 |
| | Заключение | 66 |
| | Список использованных источников | 68 |

ВВЕДЕНИЕ

Артефакт ложного оконтуривания представляет собой волны или осцилляции от высококонтрастных контуров на изображениях. Этот артефакт вызван искажением или потерей высокочастотной информации на изображениях и встречается в широком наборе классов изображений, например, на изображениях, полученных в результате подавления эффекта размытия, на изображениях магнитно-резонансной томографии, на изображениях, подвергнутых передаче через аналоговые каналы связи, и многих других. В математических методах обработки изображений этот артефакт также называют эффектом Гиббса.

Существует множество путей для возникновения эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях. Их объединяет общая причина — потеря или искажение высокочастотной информации. Тем не менее, вид эффекта ложного оконтуривания может отличаться при различных искажениях высокочастотной информации. При полном отсечении высокочастотной информации возле каждого контура возникает большое число осцилляций равной ширины с уменьшающейся по мере удаления от контура амплитудой, форма и амплитуда осцилляций может быть вычислена аналитически. На практике чаще встречается искажение высокочастотной информации, а не полная её потеря. В этом случае обычно присутствует не более одной или двух осцилляции нерегулярной формы и амплитуды.

Эффект Гиббса и ложное оконтуривание обычно возникают после действия различных алгоритмов обработки изображений. Наиболее часто артефакт ложного оконтуривания возникает после сжатия с потерями. В основе многих используемых в настоящее время алгоритмах сжатия изображений и видео лежит преобразование изображения из пространственного представления в частотное с последующим кодированием частотных коэффициентов. При высоких требованиях к коэффициенту компрессии происходит сильное квантование высокочастотных коэффициентов, приводящее к потере высокочастотной информации. В зависимости от класса сжимаемых изображений, уровня и алгоритма компрессии, данный артефакт может быть как практически незаметным, так и раздражающим.

Чрезмерно сильное повышение резкости контуров на размытых изображениях может также привести к неприятным окаймлениям возле контуров.

В некоторых случаях на исходных изображениях уже присутствует артефакт ложного оконтуривания, например на изображениях магнитно-резонансной томографии. Результатом томографии является частотно-фазовая информация об изображении. При реконструкции магнитно-резонансных изображений в пространственных координатах эффект Гиббса возникает при недостаточной частоте дискретизации. В аналоговых стандартах телевидения, таких как NTSC, PAL, SECAM, передаваемый сигнал состоит из яркостной компоненты (Y) и цветowych компонент (U и V). По сравнению с яркостной компонентой, частотная полоса, отводимая под цветowych компоненты, существенно уже. Ограниченная полоса пропускания сигнала приводит к потере высокочастотной информации в цветowych компонентах и цветovому окаймлению контуров. Помимо этого, при недостаточно качественном сигнале, возможно появление окаймления и в яркостном канале (Y). Также многие современные телевизоры обладают фильтрами повышения резкости изображений, в реальной ситуации же эти фильтры приводят к чрезмерному контрастированию контуров с появлением артефакта ложного оконтуривания.

Для создания эффективных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях важно проведение экспериментального анализа алгоритмов эффекта Гиббса и ложного оконтуривания, возникающего в результате действия различных процессов, например, при передаче изображения по аналоговому каналу при телевидении, при обработке изображений различными методами повышения резкости, при компрессии и т.д., при этом важно охватить максимально возможное число источников возникновения эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Быстрый прогресс в области компьютерной техники позволяет применять для решения задач обработки и анализа изображений всё более современные математические методы. Более того, многие достижения в области обработки и анализа изображений во многом связаны именно с применением математических

методов. Математические методы, ранее возникшие и развившиеся при решении задач в различных прикладных областях, являются ценным источником для создания новых мультимедийных алгоритмов, в частности для создания алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях.

Высокая производительность компьютеров в настоящее время даёт возможность в реальном времени использовать сложные итерационные методы обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Целью проекта «Исследования и разработка методов автоматического обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания для современных технологий компьютерной обработки изображений» является разработка алгоритмов оценки и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях в автоматическом режиме.

Целью заключительного этапа работ «Обобщение и оценка результатов исследований» является создание прототипа программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях и его адаптация для выполнения задач на параллельных архитектурах, дополнение и корректировка тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием с учётом полученных результатов, оценка и обобщение результатов НИР, включая технико-экономическую оценку результатов НИР и предложения и рекомендации по использованию разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса на изображениях для современных технологий обработки и компрессии изображений.

Перечень ранее подготовленных отчётов по НИР:

- этап 1. «Выбор направления исследований» (без инв. номера);
- этап 2. «Теоретические исследования поставленных перед НИР задач» (без инв. номера);
- этап 3. «Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач» (без инв. номера).

1 Создание прототипа программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях и его адаптация для выполнения задач на параллельных архитектурах

1.1 Создание прототипа программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях

В рамках проекта был создан прототип программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях. Программа реализована на языках высокого уровня С# версии 2.0 и на языке С++.

Программа осуществляет решение следующих задач:

- задача обнаружения базовых контуров на изображениях — резких контуров, удалённые от других контуров;
- задача обнаружения эффекта Гиббса и ложного оконтуривания и его уровня на изображениях;
- задача подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений общего типа;
- задача подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений, полученных в результате повышения разрешения.

Программа предназначена для использования на персональных компьютерах, работающих под управлением операционной системы Microsoft MS Windows XP или выше с установленной средой Microsoft .NET Framework версии не ниже 2.0.

Для программы предъявляются следующие аппаратные требования к ПЭВМ:

- процессор с архитектурой x86;
- оперативная память — 512 МБ;
- дисковое пространство — не менее 250 МБ свободного места на диске, на который устанавливается ПП и среда Microsoft .NET Framework 2.0;

- клавиатура 101/102-х клавишная рус/лат.

Скорость работы программы на конкретном компьютере зависит также от характеристик отдельных его комплектующих (процессора, оперативной памяти и др.).

Программа работает с изображениями стандартных форматов BMP, PNG, GIF, JPEG, TIFF в режиме 8 или 24 бит/пиксель. Максимальный размер изображений ограничен платформой .NET и количеством оперативной памяти. При наличии 1 ГБ оперативной памяти гарантируется корректная работа с изображениями с разрешением до 4096x4096.

Работа с программой производится в режиме командной строки. Информация о режимах работы и способах запуска программы приведена в документе «Руководстве оператора».

На рисунке 1 приведён скриншот интерфейса программы с результатами работы в режиме подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания в автоматическом режиме.

На рисунках 2 и 3 приведены примеры результата работы программы в режиме подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на примере изображения «lena» из разработанной тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием.

```
[E:\Ringin\Programs\RinginControl\RinginControl\bin\Release] - Far 3.0.2997 x64 Administrator 11:13

E:\..\g\Programs\RinginControl\RinginControl\bin\Release>RinginControl.exe -suppress testimage.png outimage.png
Оцененная ширина контуров: 5
TVQ = 1,551, RE = 1,884
Коэффициент уменьшения TV = 0,75
RE после подавления рингинга = 1,368
Результат подавления рингинга записан в файл outimage.png

E:\..\g\Programs\RinginControl\RinginControl\bin\Release>
1Left 2Right 3View.. 4Edit.. 5Print 6MkLink 7Find 8Histry 9Video 10Tree 11ViewHs 12FoldHs
```

Рисунок 1 — Скриншот интерфейса разработанного прототипа программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях.



Рисунок 2 — Входное изображение для программы



Рисунок 3 — Результат подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для изображения с рисунка 2 с помощью разработанной программы.

1.2 Адаптация разработанного прототипа программы для ЭВМ для выполнения задач на параллельных архитектурах

1.2.1 Выбор параллельной архитектуры

Параллельная реализация алгоритмов во многих случаях существенно сокращает время обработки изображения. Это позволяет работать, например, с изображениями высокого разрешения в интерактивном режиме или же с видеопотоками в режиме реального времени.

Поскольку на данный момент обработка изображений на распределенных системах является крайне неэффективной, а многоядерные центральные процессоры не обладают достаточной вычислительной мощностью, интерес представляют лишь такие специализированные вычислительные устройства, как интегральные схемы (FPGA, VHSIC) и графические ускорители (NVIDIA, ATI). Последние отличаются доступностью и распространенностью. В связи с этим было принято решение адаптировать прототип программы для выполнения на

графических процессорах с учетом многочисленных особенностей целевой архитектуры.

Описанные алгоритмы были реализованы на языке программирования C++ с использованием технологии CUDA и протестированы на графических картах NVIDIA GeForce GTX 670 и NVIDIA GeForce 310M, где показали свою высокую эффективность.

Текст функций, относящихся к параллельной реализации алгоритмов из пунктов 1.2.2 и 1.2.3, приведён в документе «Текст программы».

1.2.2 Параллельная реализация детектора границ Канни

1.2.2.1 Выбор подхода для реализации детектора границ Канни

Был проведен анализ современных подходов к параллельной реализации детектора границ Канни. В результате анализа было выявлено, что существующие реализации опираются на ряд недопустимых в нашем случае упрощений: использование оператора Собеля вместо свертки с производной функции Гаусса для вычисления градиента изображения и грубое квантование направления градиента в процедуре подавления немаксимальных точек модуля градиента. Эти упрощения значительно снижают качество детектирования контуров на зашумленных изображениях и, как следствие, общее качество подавления артефакта ложного оконтуривания. Поэтому были разработаны и реализованы параллельные алгоритмы для детектора границ Канни высокой точности.

1.2.2.2 Параллельная реализация фильтра Гаусса

Двумерный фильтр Гаусса представляет собой свертку с двумерной функцией Гаусса, и его наивная реализация имеет сложность $O(N\sigma^2)$, где через N обозначено количество пикселей изображения, а через σ - радиус фильтра, то есть среднеквадратическое отклонение его ядра. Известное свойство сепарабельности фильтра Гаусса обеспечивает естественный уровень параллелизма: изображение может быть параллельно обработано одномерным фильтром Гаусса сначала по строкам, а затем - по столбцам. К тому же, такой подход имеет более низкую

сложность $O(N\sigma)$. При работе с зашумленными изображениями высокого разрешения приходится использовать фильтр Гаусса довольно большого радиуса ($\sigma > 10$), что делает его прямую реализацию недостаточно эффективной. Выполнение же свертки в частотной области происходит за время $O(N \log N)$, не зависящее от параметра σ . Однако, рост логарифмического множителя приводит к заметному снижению производительности при работе с изображениями большого размера.

Изучение соответствующей литературы показало, что наиболее успешными являются подходы, основанные на аппроксимации одномерного фильтра Гаусса рекурсивными фильтрами, которые дают достаточно точные приближения свертки с фильтром Гаусса за линейное время, не зависящее от радиуса σ . Оптимальный дизайн подобных фильтров был предложен в [1]. Передаточная функция аппроксимирующей рекурсивной системы имеет следующий вид в терминах Z-преобразования:

$$H(z) = \frac{a^2}{\left(1 - \sum_{i=1}^M b_i z^{-i}\right) \left(1 - \sum_{i=1}^M b_i z^i\right)}, \quad (1.1)$$

где M - порядок фильтра (обычно невелик), b_i - коэффициенты фильтра, вычисляемые по значению σ , а $a = 1 - \sum_{i=1}^M b_i$ - нормализующий множитель. В пространственной области эта система осуществляет двухпроходную фильтрацию. Сначала входной сигнал x обрабатывается слева направо:

$$w_n = a x_n + \sum_{i=1}^M b_i w_{n-i}, \quad (1.2)$$

а затем - справа налево:

$$y_n = a w_n + \sum_{i=1}^M b_i y_{n+i}, \quad (1.3)$$

формируя таким образом выходной сигнал y . Строка (столбец) изображения рассматривается как входной сигнал конечной длины, экстраполированный методом ближайшего соседа. На правой границе производится коррекция, как это описано в [2].

Ключевой проблемой рекурсивной фильтрации является то, что она не позволяет задействовать больше чем M потоков на строку (столбец), в то время как минимальный размер группы потоков графического процессора равен 32. Чтобы разрешить эту проблему, было предложено векторизовать рекурсивный фильтр, выполняя обработку M пикселей за один шаг. Рассмотрим следующую фильтрацию входного сигнала x :

$$y_n = a x_n + \sum_{i=1}^M b_i y_{n-i}. \quad (1.4)$$

Ее можно записать в матрично-векторной форме:

$$\bar{y}_n = \bar{a} x_n + Q \bar{y}_{n-1}, \quad (1.5)$$

где

$$\bar{y}_n = \begin{bmatrix} y_n \\ y_{n-1} \\ \vdots \\ y_{n-M+1} \end{bmatrix}, \quad \bar{a} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} b_1 & \cdots & b_{M-1} & b_M \\ 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & 1 & \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Отсюда имеем:

$$\bar{y}_{nM} = \bar{a} x_{nM} + Q \bar{a} x_{nM-1} + Q^2 \bar{a} x_{nM-2} + \dots + Q^{M-1} \bar{a} x_{nM-M+1} + Q^M \bar{y}_{nM-M}, \quad (1.7)$$

или

$$\bar{Y}_n = A \bar{X}_n + P \bar{Y}_{n-1}, \quad (1.8)$$

где

$$\bar{X}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ x_{n-1} \\ \vdots \\ x_{n-M+1} \end{bmatrix}, \quad \bar{Y}_n = \bar{y}_{nM}, \quad A = [\bar{a} \quad Q\bar{a} \quad \dots \quad Q^{M-1}\bar{a}], \quad P = Q^M. \quad (1.9)$$

Векторизованный вариант (1.8) рекурсивной фильтрации (1.4) отличается тем, что осуществляет блочную обработку входного сигнала, давая тем самым возможность задействовать до $2M^2$ потоков. При этом количество шагов сокращается в M раз.

Предложенный подход позволил эффективно реализовать аппроксимацию фильтра Гаусса рекурсивным фильтром до 8-ого порядка включительно и, как следствие, максимально точно вычислить градиент изображения.

1.2.2.3 Параллельная реализация процедуры подавления немаксимальных точек

Процедура подавления немаксимальных точек, или NMS, обнуляет градиент в точках, модуль градиента в которых не достигает локального максимума в направлении градиента. Для этого значение модуля градиента в каждом пикселе сравнивается с двумя соседними в направлениях градиента и антиградиента. В классическом варианте выполнения процедуры NMS выбираются точки на границе окрестности 3 на 3 референсного пикселя. При этом значения в выбранных точках интерполируются линейно. Это требует рассмотрения нескольких случаев, что приводит к ветвлению кода и, как следствие, падению производительности на графических процессорах. В связи с этим, было предложено выбирать точки, лежащие на пересечении линии градиента с единичной окружностью с центром в

референсном пикселе, и производить в них биквадратическую интерполяцию по всем девяти точкам окрестности. Во-первых, такой подход учитывает произвольное направление градиента, во-вторых — допускает реализацию без ветвлений за счет чуть более интенсивных вычислений. Предложенный метод проиллюстрирован на рисунке 4.

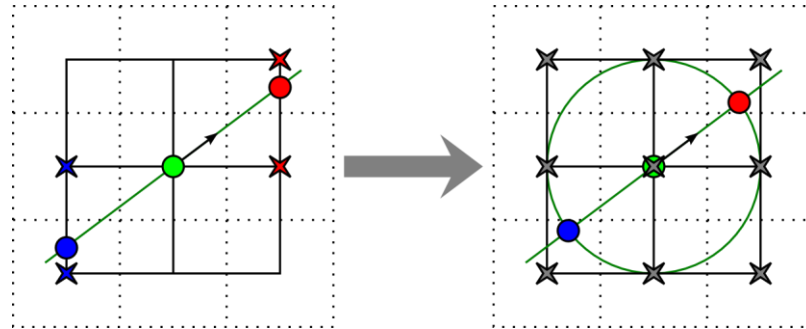


Рисунок 4 — Классический (слева) и предложенный (справа) варианты процедуры NMS. Изображена окрестность 3 на 3 пикселя, референсный пиксель (зеленый), вектор градиента, выбранные точки (красная и синяя) и пиксели, использованные при интерполяции, (крестики).

1.2.2.4 Параллельная реализация процедуры маскирования

В качестве пост-обработки модуля градиента g на него накладывается пороговое ограничение, а также условие маскирования:

$$g_{i_0j_0} > G_{i_0j_0} = \max_{i,j} \frac{g_{ij}}{2} \exp \left\{ -\frac{(i-i_0)^2 + (j-j_0)^2}{2R_m^2} \right\}, \quad (1.10)$$

где i, j - номера строки и столбца соответственно, а R_m - радиус маскирования. Высокая вычислительная сложность данного этапа обусловлена необходимостью подсчета маски G . Была предложена следующая схема вычисления маски:

$$\begin{aligned}
G_{i_0 j_0} &= \exp \left\{ -\frac{y_{i_0 j_0}}{2R_m^2} \right\}, \\
y_{i_0 j_0} &= \min_{i,j} \{x_{ij} + (i - i_0)^2 + (j - j_0)^2\}, \\
x_{ij} &= -2R_m^2 \ln \frac{g_{ij}}{2}.
\end{aligned} \tag{1.11}$$

Поскольку формулы (1.11) и (1.13) описывают поточечные преобразования, интерес представляет лишь задача минимизации (1.12), эффективное алгоритмическое решение которой подробно изложено в пункте 1.2.3.

1.2.3 Параллельная реализация алгоритма преобразования евклидового расстояния

Преобразование евклидового расстояния (EDT) изображения x в общем виде определяется как решение следующей задачи минимизации:

$$y_{i_0 j_0} = \min_{i,j} \{x_{ij} + (i - i_0)^2 + (j - j_0)^2\}. \tag{1.12}$$

Для нахождения точного решения этой задачи было предложено использовать модификацию современного и эффективного алгоритма РВА [3] (оригинальный алгоритм был ориентирован на вычисление диаграмм Вороного).

Предложенный алгоритм опирается на свойство сепарабельности EDT:

$$y_{i_0 j_0} = \min_i \{\xi_{ij_0} + (i - i_0)^2\}, \quad \xi_{ij_0} = \min_j \{x_{ij} + (j - j_0)^2\}, \tag{1.13}$$

то есть, возможность вычисления двумерного преобразования путем вычисления ряда одномерных преобразований сначала по строкам, а затем – по столбцам изображения. Одномерный аналог EDT,

$$y_{i_0} = \min_i \{x_i + (i - i_0)^2\}, \tag{1.14}$$

рассматривается как задача нахождения нижней огибающей набора эквидистантных парабол. Для ее решения список парабол прореживается путем удаления так называемых доминируемых парабол, которые заведомо не участвуют в формировании нижней огибающей. Алгоритм разбивает этот список на непересекающиеся полосы, прореживает каждую из них, а затем производит иерархическое слияние полос. Такой подход повышает уровень параллелизма, сохраняя линейную сложность совокупных вычислений.

2 Дополнение и корректировка тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием с учётом полученных результатов

2.1 Дополнение тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием

В основную группу референсной части базы данных были добавлены 6 изображений, из которых 5 изображений (см. рисунок 5 а-д) взяты из существующих баз данных изображений, а одно изображение (см. рисунок 5 е) создано вручную на основе публично доступного изображения, взятого из сети Интернет.



а) изображение «avion»



б) изображение «clown»



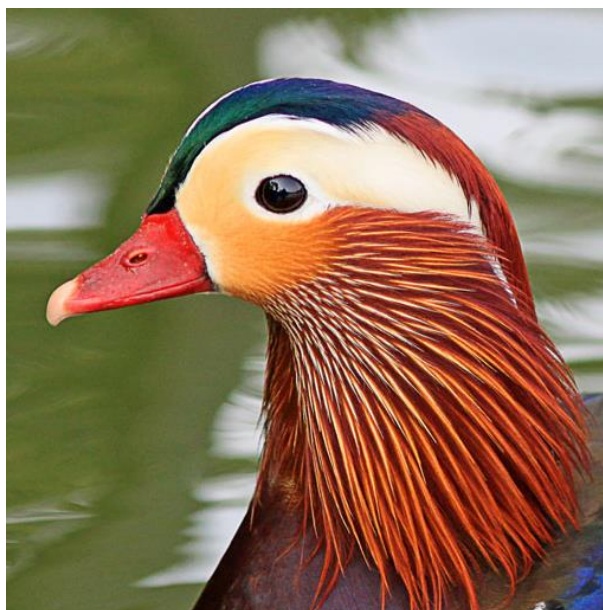
в) изображение «fruit»



г) изображение «goldhill»



д) изображение «isabe»



е) изображение «mandarin»

Рисунок 5 — Изображения, добавленные в основную подгруппу референсной части базы данных.

2.2 Корректировка тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием

На части референсных изображений, взятых из популярных баз данных с изображениями, был обнаружен недостаток, заключающийся в наличии серых или цветных окаймлений вдоль границ изображений, который может привести к искажению результатов после обработки изображений. На рисунке 6 приведено референсное изображение «reppers» и результат моделирования эффекта Гиббса на изображении с помощью отсечения высокочастотной информации. На референсном изображении присутствовали цветовые искажения в крайнем левом столбце и в крайней верхней строке, которые привели к возникновению эффекта Гиббса возле соответствующих границ изображения после отсечения высокочастотной информации.



а) референсное изображение «peppers»



б) результат отсечения высокочастотной информации

Рисунок 6 — возникновение эффекта Гиббса на границах изображений вследствие цветowych искажений.

Для устранения данного эффекта была произведена доработка референсных изображений по следующим правилам:

Правило 1: определение количества искажённых строк и столбцов с каждой из сторон изображения.

Правило 2: если количество искажённых строк и столбцов с каждой из сторон не превышает двух, то искажённые строки и столбцы заполняются путём дублирования ближайших неискажённых строк и столбцов.

Правило 3: в противном случае производится обрезка изображений таким образом, чтобы ширина и высота полученного изображения были удобными для вычисления преобразования Фурье: не содержали простых множителей больше 7, не более одного простого множителя 7, не более одного простого множителя 5 и не более двух простых множителей 3. Например, изображение с разрешением 768x512 при использовании данного правила обрезается до 720x480, а изображение с разрешением 720x480 — до 672x448.

В таблице 1 приведены результаты корректировки изображений базы данных.

Таблица 1 — результаты корректировки изображений базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием.

| Изображение | Исходное разрешение | Количество искажённых строк и столбцов | Результирующее разрешение |
|-------------|---------------------|--|---------------------------|
| avion | 512x512 | По 1 сверху, слева и снизу | 512x512 |
| baboon | 512x512 | нет | 512x512 |
| barbara | 512x512 | нет | 512x512 |

| Изображение | Исходное разрешение | Количество искажённых строк и столбцов | Результирующее разрешение |
|-------------|---------------------|--|--|
| bikes | 768x512 | 3 сверху, 5 слева, 7 справа, 3 снизу | 720x480 |
| boats | 512x512 | нет | 512x512 |
| cameraman | 256x256 | нет | 256x256 |
| caps | 768x512 | 3 сверху, 6 слева, 5 справа, 3 снизу | 720x480 |
| clown | 512x512 | нет | 512x512 |
| fruit | 512x512 | 6 сверху | 512x512 информация в искажённых строках восстановлена |
| goldhill | 720x576 | 10 сверху, 2 слева, 15 справа, 1 снизу | 672x512 |
| house | 768x512 | нет | 768x512 |
| house2 | 256x256 | нет | 256x256 |
| isabe | 512x512 | нет | 512x512 |

| Изображение | Исходное разрешение | Количество искажённых строк и столбцов | Результирующее разрешение |
|--------------|---------------------|---|--|
| lena | 512x512 | нет | 512x512 |
| lighthouse | 480x720 | нет | 480x720 |
| lighthouse2 | 768x512 | нет | 768x512 |
| mandarin | 512x512 | нет | 512x512 |
| monarch | 768x512 | нет | 768x512 |
| mri1 | 448x512 | нет | 384x512 размер уменьшен за счёт пустой области |
| mri2 | 512x512 | 3 справа | 512x512 изображение сдвинуто на 3 пикселя вправо с дополнением пустой области |
| mri3 | 512x512 | нет | 512x512 |
| ocean | 768x512 | 3 сверху, 6 слева, 5 справа, 4 снизу | 720x480 |
| paintedhouse | 768x512 | 1 слева | 768x512 |

| Изображение | Исходное разрешение | Количество искажённых строк и столбцов | Результирующее разрешение |
|-------------|---------------------|--|---------------------------|
| parrots | 768x512 | нет | 768x512 |
| peppers | 512x512 | 1 сверху, 1 слева | 512x512 |
| plane | 768x512 | 1 сверху | 768x512 |
| sailboat | 512x512 | 1 сверху, 1 слева, 1 справа | 512x512 |
| stream | 768x512 | 3 сверху, 6 слева, 5 справа, 3 снизу | 720x480 |
| woman | 480x720 | 1 слева | 480x720 |
| womanhat | 480x720 | 5 сверху, 4 слева, 2 справа, 5 снизу | 448x672 |

2.3 Изменение структуры файла метрик

Для каждого референсного изображения тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием в базе создан файл “metrics.txt” — таблица значений метрик сравнения тестового изображения с результатами обработки тестового изображения алгоритмами моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

В первой строке файла находятся имена заголовков столбцов, разделённых символом табуляции. Каждая из последующих строк файла соответствует одному

изображению и содержит разделённые символом табуляции имя файла с изображением и значения метрик, соответствующие метрикам, указанным в первой строке файла:

а) MSE (color) — среднеквадратичное отклонение значений пикселей изображения от референсного изображения по трём цветовым компонентам;

б) MSE (grayscale) — среднеквадратичное отклонение значений пикселей изображения после перевода изображений в градации серого;

в) SSIM (color) — значение метрики SSIM [4] по трём цветовым компонентам;

г) SSIM (grayscale) — значение метрики SSIM после перевода изображений в градации серого;

д) Edge Width — теоретически оцененная ширина контуров;

е) Ringing Value — значение уровня эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

ж) Ringing Value after deringing — значение уровня эффекта Гиббса и ложного оконтуривания после подавления данного артефакта во время тестирования алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на третьем этапе проекта;

и) Deringing TV ratio — отношение полной вариации изображений после и до подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

к) MSE (grayscale) after deringing — среднеквадратичное отклонение значений пикселей изображения после подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

л) SSIM (grayscale) after deringing — значение метрики SSIM после подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Первая строка файла после заголовка соответствует референсному изображению, последующие — изображениям с моделированным эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием.

Пример файла “metrics.txt” приведён в таблице 2.

2.4 Скорректированное описание тестовой базы данных

Скорректированное описание тестовой базы данных приведено в документе «Скорректированное описание организации информационной базы «База данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием».

Таблица 2 — Фрагмент файла “metrics.txt” для изображения house.

| Filename | MSE (color) | MSE (grayscale) | SSI M (color) | SSIM (grayscale) | Edge Width | Ringin g Value | Ringin g Value after dering ing | Derin ging TV ratio | MSE (grayscale) after dering ing | SSIM (grayscale) after dering ing |
|-------------------------------|----------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------|----------------------|--|------------------------------|--|---|
| reference.png | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.4263 | 1.4263 | 1.0000 | 0.0000 | 1.0000 |
| jpeg_1.png | 147.7856 | 104.8808 | 0.9650 | 0.9685 | 2.0000 | 1.5206 | 1.1944 | 0.6500 | 91.8349 | 0.9719 |
| jpeg_2.png | 51.5456 | 36.7932 | 0.9879 | 0.9890 | 2.0000 | 1.7222 | 1.5180 | 0.8000 | 33.4536 | 0.9899 |
| jpeg_3.png | 31.1974 | 21.3432 | 0.9927 | 0.9936 | 2.0000 | 1.6746 | 1.5307 | 0.8500 | 19.4057 | 0.9942 |
| wavelet_w1_q1.png | 138.8660 | 118.2381 | 0.9667 | 0.9638 | 3.0000 | 1.3204 | 1.1879 | 0.7500 | 115.5077 | 0.9643 |
| wavelet_w1_q2.png | 83.1538 | 68.6635 | 0.9803 | 0.9792 | 3.0000 | 1.3461 | 1.2626 | 0.8500 | 67.2438 | 0.9796 |
| wavelet_w1_q3.png | 48.5938 | 39.0102 | 0.9886 | 0.9883 | 3.0000 | 1.3672 | 1.3089 | 0.9000 | 38.3633 | 0.9885 |
| regdeblur_sigma2_noise3.png | 130.5780 | 119.6880 | 0.9695 | 0.9645 | 6.0000 | 1.5144 | 1.4307 | 0.8500 | 118.9354 | 0.9646 |
| regdeblur_sigma4_noise5.png | 246.3868 | 220.4117 | 0.9427 | 0.9350 | 12.0000 | 2.9844 | 2.4878 | 0.3500 | 191.6144 | 0.9420 |
| unsharpmask_sigma2_alpha3.png | 106.1509 | 104.1593 | 0.9747 | 0.9682 | 6.0000 | 1.3246 | 1.3246 | 1.0000 | 104.1593 | 0.9682 |
| unsharpmask_sigma2_alpha5.png | 118.2148 | 113.7066 | 0.9729 | 0.9668 | 6.0000 | 1.6163 | 1.4884 | 0.8000 | 113.1122 | 0.9667 |
| unsharpmask_sigma4_alpha3.png | 182.3820 | 176.6064 | 0.9558 | 0.9449 | 12.0000 | 2.3360 | 2.3360 | 1.0000 | 176.6064 | 0.9449 |
| unsharpmask_sigma4_alpha5.png | 199.4181 | 190.6530 | 0.9538 | 0.9435 | 12.0000 | 3.0515 | 2.5770 | 0.7000 | 187.8292 | 0.9434 |

3 Оценка и обобщение результатов НИР, включая технико-экономическую оценку результатов НИР и предложения и рекомендации по использованию разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса на изображениях для современных технологий обработки и компрессии изображений

3.1 Описание и результаты работ предыдущих этапов

3.1.1 Этап 1. Выбор направления исследований

Проведён аналитический обзор и анализ современной литературы в предметной области исследования. Выделено две основные подзадачи: детектирование артефакта ложного оконтуривания и подавление артефакта ложного оконтуривания. В зависимости от источника артефакта ложного оконтуривания выделены основные направления работ: общие методы подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания, методы обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания после повышения резкости изображений, обращения свёртки и подавления шума, обнаружение и подавление эффекта Гиббса на магнитно-резонансных изображениях, обнаружение и подавление артефакта ложного оконтуривания на специальных изображениях, обнаружение и подавление эффекта Гиббса после JPEG и JPEG2000 сжатия.

Проведён патентный поиск в области исследования.

На основании проведённого анализа современной литературы были исследованы пути создания алгоритма обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях. Осуществлён выбор методов и средств при разработке алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях.

Проведённый анализ современной литературы по теме исследования показал, что эффект Гиббса и ложного оконтуривания, полученный в результате действия различных алгоритмов обработки изображений, имеет существенные

различия. Наиболее эффективным решением для разработки алгоритма обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях был выбран комплексный подход, адаптивный к типу артефакта ложного оконтуривания. Комплексный подход заключается в интеграции деталей алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания различных типов в единый алгоритм.

Разработана методика моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях. В работе рассматриваются следующие способы получения изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием: получение эффекта Гиббса в чистом виде путём воздействия низкочастотных фильтров на изображение, моделирование артефакта ложного оконтуривания при повышении разрешения изображений, моделирование артефакта ложного оконтуривания при подавлении размытия, моделирование артефакта ложного оконтуривания при повышении локального контраста, моделирование артефакта ложного оконтуривания в результате компрессии изображений, получение изображений с эффектом ложного оконтуривания в реальных условиях при магнитно-резонансной томографии и при искажении видеосигнала при передаче через аналоговые каналы связи. Также рассматривается специальный случай моделирования эффекта ложного оконтуривания при обработке радиально-симметричных изображений с помощью полиномов Лагерра.

Разработан алгоритм поиска базовых контуров, в окрестности которых обнаруживается эффект Гиббса и ложное оконтуривание. Алгоритм поиска базовых контуров основан на методах математической морфологии. Основными требованиями к контурам были следующие требования: осцилляции эффекта Гиббса не должны детектироваться как контуры, интересующие нас контуры должны быть достаточно удалены друг от друга, не должно происходить эффекта маскирования и смещения контуров при потере высокочастотной информации. Предполагается использование данных контуров для обнаружения артефакта ложного оконтуривания.

Разработана структура тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием. Целью создания базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием является её дальнейшее использование при разработке алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания. База данных содержит репрезентативный набор изображений высокого качества, на которых моделируется эффект Гиббса и ложного оконтуривания.

Проведён аналитический обзор информационных источников по артефактам сжатия изображений и методам их подавления. Рассмотрены работы по подавлению артефакта ложного оконтуривания при сжатии с использованием дискретного косинусного преобразования и при сжатии с использованием дискретного вейвлет преобразования.

3.1.2 Этап 2. Теоретические исследования поставленных перед НИР задач

На втором этапе работ «Теоретические исследования поставленных перед НИР задач» по проекту «Исследования и разработка методов автоматического обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания для современных технологий компьютерной обработки изображений» был проведён комплекс исследований, нацеленных на создание алгоритма обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях:

Разработана программа и методика тестирования разрабатываемых алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Создана база данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием.

Проведён теоретический и экспериментальный анализ эффекта Гиббса. На основе проведённого анализа разработаны алгоритмы оценки уровня эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях.

Разработан комплекс алгоритмов для подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях. Для изображений общего типа был разработан

алгоритм, основанный на проектировании изображения на множество изображений с ограниченной полной вариацией. Для задачи подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания после повышения разрешения изображений был предложен метод выбора значения полной вариации в явном виде. Дополнительно был предложен блочный подход, позволяющий сгладить неравномерность подавления эффекта Гиббса для изображений с неоднородной структурой.

Рассмотрены применения разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для задачи повышения резкости изображений глазного дна, для задачи подавления эффекта Гиббса на изображениях магнитно-резонансной томографии и для задачи повышения качества изображений текста.

3.1.3 Этап 3. Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач

На третьем этапе работ «Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач» по проекту «Исследования и разработка методов автоматического обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания для современных технологий компьютерной обработки изображений» было произведено тестирование разработанных алгоритмов обнаружения и алгоритмов подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях из созданной на предыдущем этапе работ тестовой базы данных.

Тестирование осуществлялось на изображениях трёх классов: фотографические изображения, широко используемые для тестирования алгоритмов обработки изображений; телевизионные изображения, полученные путём аналоговой передачи видеосигнала; синтетические радиально-симметричные изображения.

Для оценки разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания были взяты изображения с моделированным эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием с помощью различных способов, покрывающих большинство источников возникновения данного артефакта:

получение эффекта Гиббса в чистом виде путём воздействия низкочастотных фильтров на изображение; моделирование эффекта ложного оконтуривания при повышении разрешения изображений; моделирование эффекта ложного оконтуривания при подавлении размытия; моделирование эффекта ложного оконтуривания при повышении локального контраста с помощью нерезкого маскирования.

В общей сложности было проведено 2606 тестов, на основании которых был сделан вывод о соответствии результатов тестирования разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания техническому заданию.

3.2 Технико-экономическая оценка результатов НИР

3.2.1 Постановка задачи

Технико-экономическая оценка результатов НИР продемонстрирована на примере задачи оценки экономического эффекта от использования алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео и задачи оценки экономического эффекта от внедрения алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео в реальном времени.

3.2.2 Оценка экономического эффекта от использования алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений

Задача повышения качества старых изображений и видеоданных низкого разрешения для их показа на дисплеях высокого разрешения является актуальной проблемой обработки изображений. Одной из важнейших проблем в ней является подавление артефактов на видео, в том числе и подавление эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Экономический эффект от использования алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений заключается в повышении стоимости изображений и видео после повышения качества.

Пусть имеется k объектов (изображений или видео), для которых возможно применение алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания, имеющих параметры:

- P_k — доход от использования одной копии k -го объекта без подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

- R_k — доход от использования одной копии объекта с подавлением эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

- N_k — количество копий объекта, планируемых к реализации;

- T_k — временные затраты на обработку объекта в условных единицах при использовании оборудования эталонной мощности.

Обработка изображений и видео характеризуется следующими параметрами:

- B — затраты на приобретение оборудования для обработки изображений и видео;

- M — мощность оборудования относительно оборудования эталонной мощности;

- Q — затраты на обработку изображений и видео в единицу времени, включающие в себя расходы на амортизацию оборудования, электроэнергию, носители данных и т.д.

Тогда доход от использования алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений будет вычисляться по формуле

$$\Delta = -B + \sum_k C_k, \quad (3.1)$$

где C_k — доход от применения обработки для k -го объекта,

$$C_k = (R_k - P_k)N_k - \frac{T_k}{M} Q \quad (3.2)$$

а суммарное время, потраченное на обработку изображений и видео, будет вычисляться по формуле

$$T = \sum_k \frac{T_k}{M}. \quad (3.3)$$

Относительный доход за единицу времени может быть выражен как

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= \frac{-B + \sum_k \left((R_k - P_k)N_k - \frac{T_k}{M} Q \right)}{\sum_k \frac{T_k}{M}} = \\ &= \frac{-B + \sum_k (R_k - P_k)N_k}{\sum_k T_k} M - Q \end{aligned} \quad (3.4)$$

Экономическая выгода от использования алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества отдельных объектов достигается при условии

$$(R_k - P_k)N_k > \frac{T_k}{M} Q. \quad (3.5)$$

Повышение экономической эффективности (3.4) возможно за счёт варьирования параметров В, М и Q, характеризующих обработку изображений и видео.

В случае фиксированных В, М, Q и наличии свободы выбора объектов для обработки целесообразно обрабатывать объекты, имеющие наибольший коэффициент α_k

$$\alpha_k = \frac{(R_k - P_k)N_k}{T_k}. \quad (3.6)$$

В этом случае относительный доход (3.4) будет максимален.

Следует отметить, что стоимость и количество копий изображения или видео после применения алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания может зависеть от времени. Например, субъект, имеющий более производительное оборудование, будет иметь конкурентное преимущество над субъектом, имеющим менее производительное оборудование, за счёт более быстрой обработки видео, вследствие чего субъект с менее производительным оборудованием сможет реализовать меньшее количество копий.

3.2.3 Оценка экономического эффекта от внедрения алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео в реальном времени

Экономический эффект от внедрения алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео в реальном времени может быть достигнут за счёт уменьшения затрат на хранение и передачу изображений и видео вследствие уменьшения размера файлов, т.е. при использовании изображений и видео более низкого качества с последующим повышением качества алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Пусть:

- E — суммарные затраты на внедрение алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео в реальном времени у одного конечного потребителя;

- Q — затраты на передачу одной условной единицы объёма информации одному потребителю;

- S — затраты на хранение одной условной единицы объёма информации;

- P_k — объём информации в условных единицах одной копии объекта без использования алгоритмов подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

- P_k — объём информации в условных единицах одной копии объекта более низкого качества с использованием алгоритмов подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

- T — время;

- n_k — передаваемые объекты.

Тогда:

$NQ \sum_k (P_{n_k} - R_{n_k})$ — суммарный положительный эффект от экономии при

передаче изображений и видео потребителем;

NE — суммарный отрицательный экономический эффект от внедрения алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на стороне потребителей;

$TS \sum_k (P_k - R_k)$ — суммарный положительный эффект от экономии на

хранении изображений и видео.

Таким образом, экономический эффект от внедрения алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео в реальном времени может быть выражен как

$$\Delta = NQ \sum_k (P_{n_k} - R_{n_k}) - NE + TS \sum_k (P_k - R_k). \quad (3.7)$$

3.3 Обобщение и выводы по результатам НИР

3.3.1 Основные результаты проекта

В процессе выполнения проекта были получены следующие основные результаты:

а) Предложен новый подход для выделения областей возле контуров на изображениях, в которых обнаруживается артефакт ложного оконтуривания.

б) Создана и наполнена база данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием, не имеющая мировых аналогов. База данных содержит набор референсных изображений и изображений с эффектом Гиббса и ложного оконтуривания, моделированным различными алгоритмами обработки изображений, охватывающими значительную часть причин возникновения эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Создан и наполнен раздел тестовой базы данных изображений, включающих изображения сжатые JPEG2000 и другими алгоритмами, с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием (работа выполнена иностранным партнером).

Разработана методика анализа и оценки качества алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на основе созданной базы данных.

в) Проведён вычислительный эксперимент по анализу изменения полной вариации профилей контуров на различных масштабах для контуров, содержащих эффект Гиббса и для контуров, не содержащих этого эффекта. В результате этого эксперимента был получен алгоритм численной оценки уровня эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях.

г) Разработан комплекс новых автоматических алгоритмов подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания, состоящий из следующих алгоритмов:

- алгоритм подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для изображений общего типа, использующий в качестве контроля разработанный метод оценки уровня эффекта Гиббса и ложного оконтуривания;

- алгоритм подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания при повышении разрешения изображений;

- алгоритм повышения резкости изображений с контролем уровня эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

д) Произведено тестирование разработанных алгоритмов обнаружения и алгоритмов подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях из созданной тестовой базы данных.

Произведено тестирование разработанных алгоритмов для изображений, сжатых JPEG2000 и другими алгоритмами, с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием (работа выполнена иностранным партнером).

е) Получены статистические значения для коэффициента подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания и уровней эффекта Гиббса и ложного оконтуривания до и после подавления данного эффекта в зависимости от используемого метода моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

ж) Создан прототип программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса на изображениях, позволяющий решать четыре задачи:

- задачу обнаружения базовых контуров на изображениях;
- задачу обнаружения эффекта Гиббса и ложного оконтуривания и его уровня на изображениях;
- задачу подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений общего типа;
- задачу подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений, полученных в результате повышения разрешения.

Используемые в прототипе программы алгоритмы были адаптированы для использования на параллельных архитектурах.

3.3.2 Выводы по результатам НИР

Проведённое на третьем этапе проекта тестирование разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на созданной тестовой базе данных привело к следующим результатам:

- применение алгоритмов подавления эффекта Гиббса либо не изменяет качество изображений, объективно оцененное с помощью метрик MSE и SSIM, в случае, если оцененный уровень эффекта Гиббса и ложного оконтуривания оказался ниже порога, либо улучшает качество изображений одновременно с понижением уровня эффекта Гиббса и ложного оконтуривания, если оцененный уровень эффекта Гиббса и ложного оконтуривания оказался выше порога, т.е. на изображении присутствовал данный артефакт;

- получена статистическая зависимости наилучшего с точки зрения оптимизации метрик коэффициента подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания от уровней эффекта Гиббса и ложного оконтуривания до и после подавления данного эффекта для различных методов моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания.

Эти результаты позволяют говорить об эффективности применения разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений в автоматическом режиме. Разработанные алгоритмы обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях обеспечивают возможность разработки принципиально новых адаптивных методов обработки и анализа изображений, включая: алгоритмы повышения контрастности изображения; алгоритмы повышения резкости изображения; алгоритмы повышения разрешения изображения.

Полученные при проведении работ результаты соответствуют мировому уровню работ в исследуемой области.

Разработанные алгоритмы обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания могут быть применимы в широком круге задач обработки и анализа изображений. Особенно актуально использование подобных алгоритмов повышения качества изображений в задачах обработки медицинских изображений, в частности, при обработке изображений магнитно-резонансной томографии. Алгоритмы обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания существенно повышают возможности методов улучшения качества изображений, поскольку удаётся подавить ложное оконтуривание, являвшееся до этого лимитирующим фактором многих алгоритмов в обработке изображений.

3.4 Рекомендации и предложения по использованию результатов НИР

Разработанные алгоритмы подавления эффекта ложного оконтуривания и их программная реализация могут быть использованы для повышения качества изображений:

а) в специализированных программах, ориентированных на решение конкретных задач (например: в медицине – при повышении качества изображений магнитно-резонансной томографии; обработке данных физических экспериментов с потерей высокочастотной информации);

б) при внедрении алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для повышения качества изображений и видео в реальном времени;

в) в комплексах программ обработки изображений общего назначения (таких как Photoshop, CorelDraw и др.);

г) в программах повышения качества изображений с высокой степенью компрессии (например, в формате JPEG2000).

Рекомендуется как использование разработанных методов и программ подавления эффекта ложного оконтуривания при полуавтоматической обработке изображений и видео с участием оператора, так и их использование, одновременно с использованием разработанных методов по обнаружению эффекта ложного оконтуривания, в автоматическом режиме для специализированных классов изображений и видео.

4 Создание прототипов программ, реализующих разработанные алгоритмы для сжатых изображений и их адаптация для выполнения задач на параллельных архитектурах

4.1 Создание прототипов программ, реализующих разработанные алгоритмы для сжатых изображений

Прототипы программ, реализующих разработанные алгоритмы для сжатых изображений, были интегрированы с прототипом программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях, описанным в подразделе 1.1.

На рисунках 7 и 8 продемонстрирована работа программы в режиме подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для изображения, сжатого JPEG.

На рисунках 9 и 10 продемонстрирована работа программы в режиме подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для изображения, сжатого JPEG2000.

Алгоритмы, параллельная адаптация которых приведена в подразделах 4.2 и 4.3, были программно реализованы на языке C++ с использованием технологии CUDA. Текст функций, относящихся к данным алгоритмов, приведён в документе «Текст программы».



Рисунок 7 — Фрагмент входного изображения для программы с эффектом Гиббса, полученного при сжатии JPEG.



Рисунок 8 — Результат подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для изображения с рисунка 7 с помощью созданной программы.



Рисунок 9 — Фрагмент входного изображения для программы с эффектом Гиббса, полученного при сжатии JPEG2000.



Рисунок 10 — Результат подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для изображения с рисунка 9 с помощью созданной программы.

4.2 Параллельная реализация морфологических операций

Была предложена эффективная параллельная реализация следующих операций математической морфологии бинарных изображений (операции определяются для произвольного подмножества E множества пикселей P):

1. Инверсия,

$$\bar{E} = P \setminus E. \quad (4.1)$$

2. Дилатация с круговым структурным элементом радиуса r ,

$$E + r = \{p \in P : \inf_{q \in E} |p - q| \leq r\}. \quad (4.2)$$

3. Эрозия с круговым структурным элементом радиуса r ,

$$E - r = \{p \in P : \inf_{q \in \bar{E}} |p - q| > r\} = \overline{\bar{E} + r}. \quad (4.3)$$

Поскольку инверсия — поточечная операция, а эрозия через нее сводится к дилатации, интерес представляет лишь процесс вычисления дилатации. Эффективный алгоритм нахождения множества заключается в сведении задачи к EDT, параллельная реализация которого описана в пункте 1.2.3:

$$\begin{aligned} E + r &= \{p \in P : D_E(p) \leq r\}, \\ D_E(p) &= \sqrt{Y_E(p)}, \\ Y_E(p) &= \min_{q \in P} \{X_E(q) + |p - q|^2\} \\ X_E(q) &= \begin{cases} 0, & q \in E, \\ +\infty, & q \notin E. \end{cases} \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.3 Параллельная реализация субградиентного метода для алгоритмов подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания

Многие методы подавления артефакта ложного оконтуривания используют полную вариацию изображения для контроля общего уровня осцилляций. Типичной для таких подходов является следующая задача минимизации:

$$J[u] = (u - f)^2 + \alpha TV[u] \rightarrow \inf, \quad (4.5)$$

где u - искомое изображение, f - исходное изображение, TV - функционал полной вариации, а α - параметр, контролирующий силу подавления осцилляций. Для ее численного решения может быть использован итеративный субградиентный метод:

$$u^{(0)} = f, \quad u^{(k+1)} = u^{(k)} - \tau_k J'[u^{(k)}], \quad (4.6)$$

где τ_k - шаг метода, а $J'[u]$ - элемент субградиента функционала J в точке u :

$$J'[u] = 2(u - f) + \alpha TV'[u]. \quad (4.7)$$

Здесь $TV'[u]$ - элемент субградиента функционала полной вариации в точке u :

$$TV'[u]_{ij} = \text{sgn}(u_{ij} - u_{i-1j}) + \text{sgn}(u_{ij} - u_{i+1j}) + \text{sgn}(u_{ij} - u_{ij-1}) + \text{sgn}(u_{ij} - u_{ij+1}). \quad (4.8)$$

Благодаря сильной локализации вычислений описанный алгоритм хорошо подходит для выполнения на параллельных архитектурах.

Иногда для ускорения сходимости итерационного процесса (4.6) используется адаптивный шаг:

$$\tau_k = \frac{C \gamma^k}{\|TV'[u^{(k)}]\|_1}, \quad C = const, \quad 0 < \gamma < 1. \quad (4.9)$$

В этом случае нормировочный множитель $\|TV'[u^{(k)}]\|_1$ может быть эффективно вычислен на GPU через подсчет так называемого интегрального изображения [5].

5 Дополнение и корректировка тестовой базы данных изображений, сжатых JPEG2000 и другими алгоритмами, с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием с учётом полученных результатов

5.1 Дополнение тестовой базы данных изображений, сжатых JPEG2000 и другими алгоритмами, с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием

Изображения тестовой базы с эффектом Гиббса и ложного оконтуривания, полученного в результате JPEG2000 сжатия, были промоделированы путём проведения дискретного вейвлет-преобразования со стандартным базисным вейвлетом CDF9/7, используемым в алгоритмах JPEG2000 сжатия, и последующего квантования коэффициентов без непосредственного получения сжатого изображения.

Существующие алгоритмы JPEG2000 различаются способами квантования коэффициентов, вследствие чего возможно появление различий в сжатых изображениях при одинаковом уровне сжатия.

Тестовая база данных изображений с эффектом Гиббса и ложного оконтуривания была дополнена изображениями с моделированным эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием, полученными с помощью реально используемых JPEG2000 кодеров. Одновременно с этим из тестовой базы данных были удалены старые изображения с моделированным эффектом Гиббса и ложного оконтуривания, полученные путём квантования коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования.

Были использованы две реализации алгоритма JPEG2000:

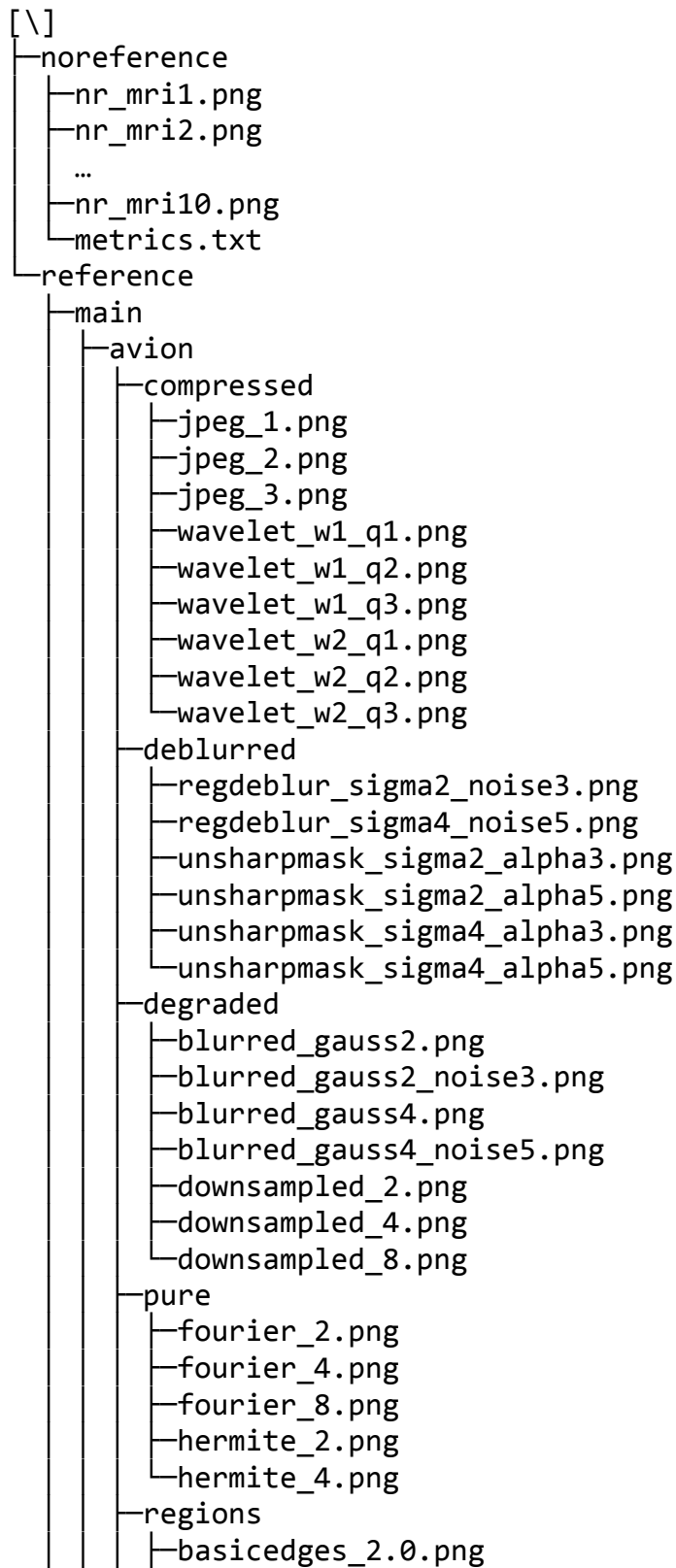
а) Kakadu [6]. Для моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания с помощью данного пакета была использована следующая последовательность действий:

- 1) Сохранение референсного изображения в формате BMP в директорию установки Kakadu под именем reference.bmp

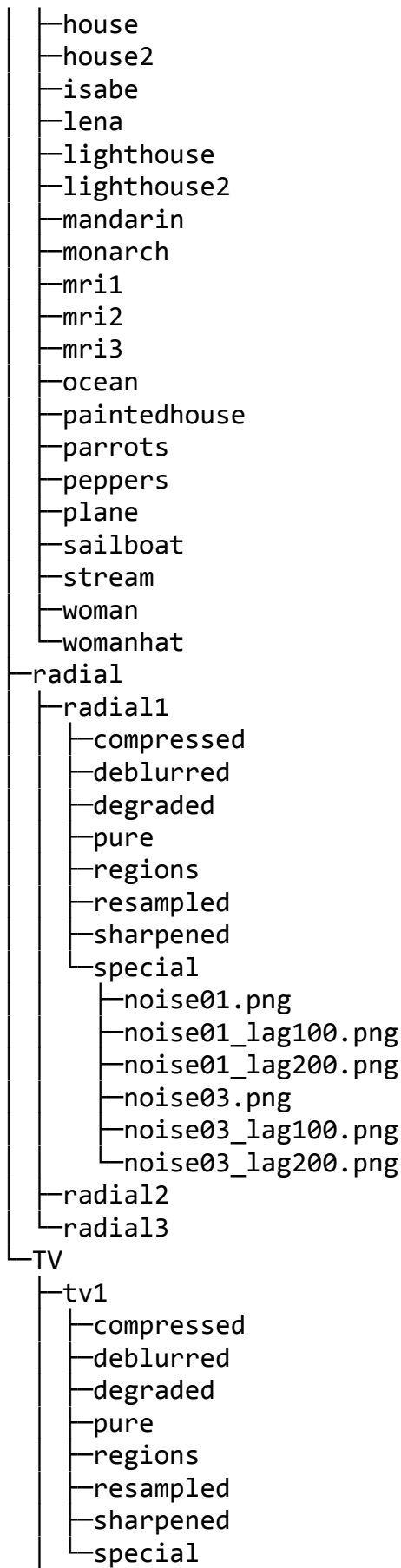
- 2) Запуск консольного приложения `kdu_compress` с параметрами:
`kdu_compress -i reference.bmp -o c.jp2 -rate <сжатие>`,
где значением параметра `-rate` является коэффициент сжатия изображения (количество бит на пиксель). Мы использовали значения: 0.1, 0.3 и 1.0.
 - 3) Запуск консольного приложения `kdu_expand` с параметрами:
`kdu_expand -i c.jp2 -o result.bmp`
 - 4) Сохранение изображения `result.bmp` в файлы `wavelet_w1_q1.png`, `wavelet_w1_q2.png`, `wavelet_w1_q3.png` в директорию `compressed` для значений параметра `-rate` 0.1, 0.3 и 1.0 соответственно.
- б) OpenJPEG [7]. Для моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания с помощью данного пакета была использована следующая последовательность действий:
- 1) Сохранение референсного изображения в формате BMP в директорию установки OpenJPEG под именем `reference.bmp`
 - 2) Запуск консольного приложения `orj_compress` с параметрами:
`orj_compress -i reference.bmp -r <сжатие> -o c.jp2 -rate`,
где значением параметра `-rate` является коэффициент сжатия, определяющий соотношение между размерами файлов исходного и результирующего изображений. Мы использовали значения 30, 100 и 300.
 - 3) Запуск консольного приложения `orj_decompress` с параметрами:
`decompress -i c.jp2 -o result.bmp`
 - 4) Сохранение изображения `result.bmp` в файлы `wavelet_w2_q1.png`, `wavelet_w2_q2.png`, `wavelet_w2_q3.png` в директорию `compressed` для значений параметра `-r` 300, 100 и 30 соответственно.

5.2 *Скорректированное описание базы данных*

На рисунке 11 приведена полная файловая структура созданной базы данных с учётом корректировок, описанных в подразделах 2.1, 2.2, 5.1.



```
├─basicedges_2.5.png
├─basicedges_3.0.png
├─basicedges_3.5.png
├─basicedges_4.0.png
├─basicedges_4.5.png
├─basicedges_5.0.png
├─basicedges_5.5.png
├─basicedges_6.0.png
├─basicedges_6.5.png
├─basicedges_7.0.png
├─basicedges_7.5.png
├─basicedges_8.0.png
├─basicedges_8.5.png
├─basicedges_9.0.png
├─basicedges_9.5.png
├─basicedges_10.0.png
├─resampled
│   ├─x2_bicubic.png
│   ├─x2_bilinear.png
│   ├─x2_lanczos3.png
│   ├─x2_reg_high.png
│   ├─x2_reg_low.png
│   ├─x2_reg_med.png
│   ├─x4_bicubic.png
│   ├─x4_bilinear.png
│   ├─x4_lanczos3.png
│   ├─x4_reg_high.png
│   ├─x4_reg_low.png
│   ├─x4_reg_med.png
│   ├─x8_bicubic.png
│   ├─x8_bilinear.png
│   └─x8_lanczos3.png
├─sharpened
│   ├─sharp2.png
│   ├─sharp3.png
│   ├─sharp4.png
│   └─sharp5.png
├─metrics.txt
├─reference.png
├─baboon
├─barbara
├─bikes
├─boats
├─cameraman
├─caps
├─clown
├─fruit
├─goldhill
```

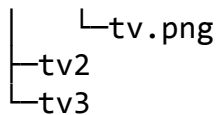


Рисунок 11 — Скорректированная файловая структура созданной базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием.

В корневой директории находятся две поддиректории. Поддиректория “noreference” содержит файлы с изображениями МРТ различного качества, уже имеющими эффект Гиббса или ложное оконтуривание. Для этих изображений моделирование эффекта Гиббса и ложного оконтуривания не производится.

Поддиректория “reference” — основная часть базы, содержит набор тестовых изображений и результаты применения к ним алгоритмов моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания, разработанных на первом и втором этапах работ по проекту.

Поддиректория “reference” содержит поддиректории “main”, “tv”, “radial”, соответствующие подгруппам используемых в базе изображений, в которых, в свою очередь, содержится набор имеющих унифицированную структуру поддиректорий, соответствующих отдельным тестовым изображениям.

Структура поддиректорий, соответствующих отдельным тестовым изображениям, показана на примере изображения “avion” на рисунке 11 и имеет следующий вид:

- Файл “reference.png” — тестовое (референсное) изображение в формате PNG.
- Текстовый файл “metrics.txt” — таблица значений метрик сравнения тестового изображения с результатами обработки тестового изображения алгоритмами моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания. Формат файла описан в подразделе 2.3.
- Поддиректория “degraded” — содержит промежуточные изображения, полученные алгоритмами моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания:

- Файл “blurred_gauss2.png” — размытие тестового изображения с помощью свёртки с фильтром Гаусса с радиусом 2.
- Файл “blurred_gauss2_noise3.png” — размытие тестового изображения с помощью свёртки с фильтром Гаусса с радиусом 2 с последующим добавлением шума с нормальным распределением со среднеквадратичным отклонением 3.
- Файл “blurred_gauss4.png” — размытие тестового изображения с помощью свёртки с фильтром Гаусса с радиусом 4.
- Файл “blurred_gauss4_noise5.png” — размытие тестового изображения с помощью свёртки с фильтром Гаусса с радиусом 4 с последующим добавлением шума с нормальным распределением со среднеквадратичным отклонением 5.
- Файл “downsampled_2” — результат уменьшения референсного изображения в 2 раза.
- Файл “downsampled_4” — уменьшение изображения в 4 раза с помощью метода (2.1).
- Файл “downsampled_8” — уменьшение изображения в 8 раз с помощью метода (2.1).
- Поддиректория “compressed” — результаты моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания с помощью алгоритмов компрессии изображений JPEG и JPEG2000. Поддиректория содержит файлы:
 - Файл “jpeg_1.png” — сжатие JPEG с качеством 10 (низкое качество) стандартными программными средствами платформы Microsoft .NET.
 - Файл “jpeg_2.png” — сжатие JPEG с качеством 40 (среднее качество).
 - Файл “jpeg_3.png” — сжатие JPEG с качеством 70 (качество выше среднего).
 - Файл “wavelet_w1_q1.png” — сжатие JPEG2000 с помощью библиотеки Kakadu с битрейтом 0.1 бит/пиксель (низкое качество).

- Файл “wavelet_w1_q2.png” — сжатие JPEG2000 с помощью библиотеки Kakadu с битрейтом 0.3 бит/пиксель (среднее качество).
- Файл “wavelet_w1_q3.png” — сжатие JPEG2000 с помощью библиотеки Kakadu с битрейтом 1.0 бит/пиксель (качество выше среднего).
- Файл “wavelet_w2_q1.png” — сжатие JPEG2000 с помощью библиотеки OpenJPEG с коэффициентом сжатия 300 (низкое качество).
- Файл “wavelet_w2_q2.png” — сжатие JPEG2000 с помощью библиотеки OpenJPEG с коэффициентом сжатия 100 (среднее качество).
- Файл “wavelet_w2_q3.png” — сжатие JPEG2000 с помощью библиотеки OpenJPEG с коэффициентом сжатия 30 (качество выше среднего).
- Поддиректория “deblurred” — результаты моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания при подавлении размытия:
 - Файл “regdeblur_sigma2_noise3.png” — результат работы регуляризирующего метода подавления размытия, применённого к изображению “blurred_gauss2_noise3.png” из поддиректории “degraded”.
 - Файл “regdeblur_sigma4_noise5.png” — результат работы регуляризирующего метода подавления размытия, применённого к изображению “blurred_gauss4_noise5.png” из поддиректории “degraded”.
 - Файл “unsharpmask_sigma2_alpha3.png” — применение метода нерезкого маскирования с параметрами $\sigma = 2, \alpha = 3$ к изображению “blurred_gauss_2.png” из поддиректории “degraded”.

- Файл “unsharpmask_sigma2_alpha5.png” — применение метода нерезкого маскирования с параметрами $\sigma = 2, \alpha = 5$ к изображению “blurred_gauss_2.png” из поддиректории “degraded”.
- Файл “unsharpmask_sigma4_alpha3.png” — применение метода нерезкого маскирования с параметрами $\sigma = 4, \alpha = 3$ к изображению “blurred_gauss_4.png” из поддиректории “degraded”.
- Файл “unsharpmask_sigma4_alpha5.png” — применение метода нерезкого маскирования с параметрами $\sigma = 4, \alpha = 5$ к изображению “blurred_gauss_4.png” из поддиректории “degraded”.
- Поддиректория “pure” — моделирование эффекта Гиббса методами низкочастотной фильтрации:
 - Файл “fourier_2.png” — применение преобразования Фурье к тестовому изображению с сохранением только половины низкочастотных коэффициентов (по каждому из измерений) и отсечением остальных высокочастотных коэффициентов.
 - Файл “fourier_4.png” — применение преобразования Фурье к тестовому изображению с сохранением только четверти низкочастотных коэффициентов и отсечением остальных высокочастотных коэффициентов.
 - Файл “fourier_8.png” — применение преобразования Фурье к тестовому изображению с сохранением только восьмой части низкочастотных коэффициентов и отсечением остальных высокочастотных коэффициентов.
 - Файл “hermite_2.png” — разложение тестового изображения по функциям Эрмита с сохранением только половины низкочастотных коэффициентов (по каждому из измерений) и отсечением остальных высокочастотных коэффициентов.
 - Файл “hermite_4.png” — разложение тестового изображения по функциям Эрмита с сохранением только четверти низкочастотных

коэффициентов (по каждому из измерений) и отсечением остальных высокочастотных коэффициентов.

- Поддиректория “regions” — результаты выделения областей базовых контуров на референсном изображении для параметра d от 2 до 10 с шагом 0,5, находящиеся в файлах с именами “basicedges_ d .png”. Жёлтым цветом обозначены области базовых контуров, зелёным — окрестности областей базовых контуров, синим — плоские области, удалённые от остальных контуров, серым цветом обозначены немаскированные контуры.
- Поддиректория “resampled” — моделирование эффекта Гиббса и ложного оконтуривания при повышении разрешения изображений:
 - Файл “x2_bilinear.png” — результат увеличения изображения “downsampled_2” из поддиректории “degraded” в 2 раза с помощью метода билинейной интерполяции.
 - Файл “x2_bicubic.png” — результат увеличения изображения “downsampled_2” из поддиректории “degraded” в 2 раза с помощью метода бикубической интерполяции.
 - Файл “x2_lanczos3.png” — результат увеличения изображения “downsampled_2” из поддиректории “degraded” в 2 раза с помощью метода Ланцоша 3 порядка.
 - Файл “x2_reg_low.png” — результат увеличения изображения “downsampled_2” из поддиректории “degraded” в 2 раза с помощью регуляризирующего метода с параметром $\lambda = 0.03$.
 - Файл “x2_reg_med.png” — результат увеличения изображения “downsampled_2” из поддиректории “degraded” в 2 раза с помощью регуляризирующего метода с параметром $\lambda = 0.07$.
 - Файл “x2_reg_high.png” — результат увеличения изображения “downsampled_2” из поддиректории “degraded” в 2 раза с помощью регуляризирующего метода с параметром $\lambda = 0.1$.

- Файл “x4_bilinear.png” — результат увеличения изображения “downsampled_4” из поддиректории “degraded” в 4 раза с помощью метода билинейной интерполяции.
- Файл “x4_bicubic.png” — результат увеличения изображения “downsampled_4” из поддиректории “degraded” в 4 раза с помощью метода бикубической интерполяции.
- Файл “x4_lanczos3.png” — результат увеличения изображения “downsampled_4” из поддиректории “degraded” в 4 раза с помощью метода Ланцоша 3 порядка.
- Файл “x4_reg_low.png” — результат увеличения изображения “downsampled_4” из поддиректории “degraded” в 4 раза с помощью регуляризирующего метода с параметром $\lambda = 0.03$.
- Файл “x4_reg_med.png” — результат увеличения изображения “downsampled_4” из поддиректории “degraded” в 4 раза с помощью регуляризирующего метода с параметром $\lambda = 0.07$.
- Файл “x4_reg_high.png” — результат увеличения изображения “downsampled_4” из поддиректории “degraded” в 4 раза с помощью регуляризирующего метода с параметром $\lambda = 0.1$.
- Файл “x8_bilinear.png” — результат увеличения изображения “downsampled_8” из поддиректории “degraded” в 8 раза с помощью метода билинейной интерполяции.
- Файл “x8_bicubic.png” — результат увеличения изображения “downsampled_8” из поддиректории “degraded” в 8 раза с помощью метода бикубической интерполяции.
- Файл “x8_lanczos3.png” — результат увеличения изображения “downsampled_8” из поддиректории “degraded” в 8 раза с помощью метода Ланцоша 3 порядка.
- Поддиректория “sharpened” — моделирование эффекта Гиббса и ложного оконтуривания при повышении резкости тестового изображения

- Файл “sharp_2.png” — применение метода нерезкого маскирования к тестовому изображению с параметрами $\sigma = 1, \alpha = 2$.
- Файл “sharp_3.png” — применение метода нерезкого маскирования к тестовому изображению с параметрами $\sigma = 1, \alpha = 3$.
- Файл “sharp_4.png” — применение метода нерезкого маскирования к тестовому изображению с параметрами $\sigma = 1, \alpha = 4$.
- Файл “sharp_5.png” — применение метода нерезкого маскирования к тестовому изображению с параметрами $\sigma = 1, \alpha = 5$.
- Поддиректория “regions” — содержит результаты нахождения базовых контуров и областей базовых контуров для значений d (ширина осцилляций эффекта Гиббса) от 2 до 10 с шагом 0,5.
- Поддиректория “special” — содержит результаты моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания для специальных случаев:
 - Для изображений из подгруппы телевизионных изображений в этой поддиректории находится только один файл “tv.png” — искажение тестового изображения при аналоговой передаче.
 - Для изображений из подгруппы радиально-симметричных изображений эта поддиректория состоит из следующих файлов:
 - Файл “noise01.png” — результат искажения тестового изображения и добавления белого шума с небольшой амплитудой.
 - Файл “noise01_lag100.png” — результат подавления шума и восстановления радиально-симметричного изображения из файла “noise01.png” при использовании 100 полиномов Лагерра.
 - Файл “noise01_lag200.png” — результат подавления шума и восстановления радиально-симметричного изображения из файла “noise01.png” при использовании 200 полиномов Лагерра.

- Файл “noise03.png” — результат искажения тестового изображения и добавления белого шума с большой амплитудой.
- Файл “noise03_lag100.png” — результат подавления шума и восстановления радиально-симметричного изображения из файла “noise03.png” при использовании 100 полиномов Лагерра.
- Файл “noise03_lag200.png” — результат подавления шума и восстановления радиально-симметричного изображения из файла “noise03.png” при использовании 200 полиномов Лагерра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На четвёртом этапе работ «Обобщение и оценка результатов исследований» по проекту «Исследования и разработка методов автоматического обнаружения и подавления артефакта ложного оконтуривания для современных технологий компьютерной обработки изображений» был создан прототип программы для ЭВМ для обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях, осуществлена его адаптация для выполнения задач на параллельных архитектурах, произведена доработка и корректировка тестовой базы данных изображений с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием, произведена оценка и обобщение результатов НИР, включая технико-экономическую оценку результатов НИР и предложения и рекомендации по использованию разработанных алгоритмов обнаружения и подавления эффекта Гиббса на изображениях для современных технологий обработки и компрессии изображений.

Созданный программный прототип осуществляет решение задачи обнаружения базовых контуров на изображениях, задачи обнаружения эффекта Гиббса и ложного оконтуривания и его уровня на изображениях, задачи подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений общего типа и задачи подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания на изображениях для изображений, полученных в результате повышения разрешения.

Используемые в прототипе алгоритмы вычисления фильтра Гаусса, метода подавления немаксимальных точек, маскирования и преобразования евклидова расстояния были адаптированы для использования на параллельных архитектурах и реализованы в прототипе программы для архитектуры CUDA.

Основная подгруппа референсной части тестовой базы данных была дополнена шестью изображениями, из которых пять были взяты из существующих баз данных изображений, а одно изображение создано вручную на основе публично доступного изображения, взятого из сети Интернет. Были устранены недостатки референсных изображений, заключающиеся в наличии серых или цветных окаймлений вдоль границ изображений, которые приводили к искажению

результатов после обработки изображений. В качестве алгоритмов моделирования эффекта Гиббса и ложного оконтуривания после сжатия JPEG2000 были взяты современные реализации алгоритма JPEG2000.

Проведены оценка и обобщение результатов научно-исследовательской работы, проведённая технико-экономическая оценка результатов работы и сделаны рекомендации и предложения по использованию результатов работы.

Составной частью отчета являются следующие результаты, полученные иностранным партнером — институтом СБИС Чжецзянского университета, Китай:

- адаптация морфологических операций и субградиентного метода для использования на параллельных архитектурах;
- создание прототипов программ, реализующих разработанные алгоритмы для сжатых изображений;
- дополнение и корректировка тестовой базы данных изображений, сжатых JPEG2000 и другими алгоритмами, с эффектом Гиббса и ложным оконтуриванием с учётом полученных результатов.

Выводы по этапу: разработанные алгоритмы обнаружения и подавления эффекта Гиббса и ложного оконтуривания, включённые в созданный прототип программы, могут быть рекомендованы к использованию для повышения качества реальных изображений. Рекомендуется как использование разработанных методов и программ подавления эффекта ложного оконтуривания при полуавтоматической обработке изображений и видео с участием оператора, так и их использование, одновременно с использованием разработанных методов по обнаружению эффекта ложного оконтуривания, в автоматическом режиме для специализированных классов изображений и видео.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 L. J. van Vliet, I. T. Young, P. W. Verbeek, "Recursive Gaussian derivative filters", ICPR, 1998, vol. 1, pp. 509-514.
- 2 Bill Triggs, Michael Sdika, "Boundary conditions for Young - van Vliet recursive filtering", IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, vol. 54, no. 5.
- 3 Thanh T. Cao, Ke Tang, Anis Mohamed, Tiow S. Tan, "Parallel Banding Algorithm to compute exact distance transform with the GPU", ACM SIGGRAPH, 2010, pp. 83-90.
- 4 Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, Apr. 2004.
- 5 D. Nehab, A. Maximo, R. S. Lima, H. Hoppe, "GPU-Efficient Recursive Filtering and Summed-Area Tables", ACM SIGGRAPH Asia, 2011, vol. 30, no. 6, p. 176.
- 6 <http://www.kakadusoftware.com/>
- 7 <http://www.openjpeg.org/>