

на правах рукописи

БИБИКОВ
Сергей Алексеевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ЦВЕТОВОЙ КОРРЕКЦИИ
ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ**

Специальность:
05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (национальный исследовательский университет)» и Учреждении Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор Владимир Алексеевич Фурсов

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, доцент Александр Григорьевич Храмов
кандидат технических наук Леонид Дидимович Ложкин

Ведущая организация:
Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-производственный ракетно-космический комплекс «ЦСКБ-Прогресс»

Защита состоится 17 декабря 2010 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.215.05 в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (национальный исследовательский университет)» (СГАУ), по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева.

Автореферат разослан 15 ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор

В.А. Фурсов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Задача цветовой коррекции цифровых изображений является одной из наиболее популярных и востребованных. Перечень приложений, в которых необходима цветовая коррекция очень широкий: создание художественных сюжетов видео, системы и технологии многокрасочной печати, обработка данных мониторинга, системы технического зрения, восстановление уникальных изображений и др.

К сожалению, математические модели и технологии цветовой коррекции, полностью удовлетворяющие пользователей, отсутствуют. Связано это, с одной стороны, с недостаточной изученностью физики процессов (Херш Р.Д., Коллауд Ф., Крит Ф., Эммель П., 2004), с другой стороны, – со сложностью реализации известных моделей.

Первые результаты, связанные с изучением моделей цветообразования, получены И. Ньютоном, Т. Янгом, Х. Гюйгенсом, Г. Гельмгольцем и Дж. Максвеллом. В течение ряда последующих десятилетий велись интенсивные исследования как отечественными (Сеченов И.М., Лачинов Д.А. и др.), так и зарубежными (Дж. Гилд, Д. Райт) учеными. Важным итогом этих работ явилось принятие в 1931 году Международной Комиссией по Освещению стандартных цветовых пространств (RGB, XYZ), создание цветного телевидения, введение равноконтрастных цветовых пространств Lab, использование которых позволило решить ряд задач колориметрии и цветовоспроизведения.

В последние десятилетия большой вклад в развитие теории цвета и создание методов и алгоритмов цветовой коррекции внесли отечественные ученые (Попов А., Шашлов Б.), а также зарубежные (Джадд Д., Вышецки Г., Форсит Д., Финлейсон Дж., Фунт Б. и др.). В 1971 г. Лэндом предложен подход к представлению цвета – ретинекс, получивший широкое применение в распознавании образов и анализе изображений. Наряду с этим активно развивались теории цветовой константности (Малони Л., Вандел Б. и др.), цветовых инвариантов (Финлейсон Дж., Фунт Б., Хили Дж. и др.) и «серого мира» (Финлейсон Дж.).

Тем не менее, задача цветовой коррекции во многих приложениях до сих пор остается искусством, доступным узкому кругу специалистов. Примером такого приложения является предпечатная подготовка цифровых изображений репродукций произведений живописи. В процессе регистрации картин возникают следующие основные виды искажений: матовые блики (из-за неравномерности освещения поля картины), теневые полосы у кромок боковых рамок и множественные точечные блики (вследствие отражения света от мазков масляной краски). Устранение указанных артефактов выполняется специалистами высокой квалификации, обычно, с использованием системы Adobe Photoshop. При этом коррекция цветных изображений средних размеров (от 10 до 30 Мп) может занимать до 10 часов.

Попытки автоматизировать процесс цветовой коррекции, например, в рамках подхода ретинекс или в рамках других известных подходов, к сожалению, наталкиваются на трудности задания параметров алгоритма, которые обычно приходится подбирать путем многократных проб и корректировок.

Наиболее свободным от указанного недостатка является подход, основанный на идентификации моделей по тестовым изображениям (Фурсов В.А., Никоноров А.В., 2005 г.), использовавшийся для решения близкой задачи цветовоспроизведения. Основной довод для применения этого подхода к задаче цветовой коррекции – возмож-

ность высокой степени автоматизации технологии. В данном случае от пользователя не требуется знаний в области теории цвета, для построения модели достаточно указать лишь желаемые цвета на нескольких фрагментах.

Вместе с тем, использование алгоритмов идентификации в задаче цветовой коррекции имеет некоторые специфические особенности, требующие разработки новых методов. Теория идентификации получила развитие благодаря работам отечественных (Цыпкин Я.З., Перельман И.И., Поляк Б.Т., Пытьев Ю.П., Юсупов Р.М., Теряев Е.Д., Шамриков Б.М., Жданов А.И.) и зарубежных (Калман Р.Е., Гроп Д., Эйкхофф П., Льюнг Л., Ли Р., Сейдж Э.П., Мелса Дж.) ученых. В данном случае трудность состоит в том, что для идентификации модели обычно может быть задано лишь небольшое число тестовых фрагментов изображения, притом некоторые могут содержать грубые ошибки, связанные с субъективностью восприятия цвета.

Известен подход, позволяющий в значительной степени преодолеть указанные трудности, – это так называемая согласованная идентификация. К сожалению, этот метод основан на прямом переборе вариантов, что требует значительного объема вычислений. Поэтому актуальной является задача развития методов согласованной идентификации моделей цветовой коррекции в направлении снижения вычислительной сложности алгоритмов без снижения точности определения параметров.

Таким образом, в настоящей работе ставится и решается актуальная задача разработки методов и информационной технологии цветовой коррекции цифровых изображений, обеспечивающих существенное сокращение времени обработки изображений за счет применения методов параметрической идентификации моделей, допускающих высокую степень автоматизации процессов цветовой коррекции.

Цель и задачи исследований.

Целью работы является сокращение времени цветовой коррекции цифровых изображений за счет применения методов параметрической идентификации моделей, допускающих высокую степень автоматизации процессов обработки изображений.

В соответствии с поставленной целью в рамках диссертационной работы решаются следующие задачи.

1. Разработка информационной технологии цветовой коррекции изображений, основанной на параметрической идентификации моделей цветового преобразования.
2. Развитие теории и методов параметрической идентификации моделей по малому числу наблюдений в условиях априорной неопределенности, разработка модификаций, направленных на снижение вычислительной сложности алгоритмов.
3. Построение параметрических классов моделей цветовой коррекции бликов, разработка допускающих высокую степень автоматизации алгоритмов локализации и устранения бликов различного типа.
4. Разработка устойчивых к неопределенности изменения функции яркости методов локализации тени на цифровом изображении и основанных на параметрической идентификации моделей цветовой коррекции алгоритмов устранения теневых искажений.
5. Создание программного комплекса для автоматизированной обработки цифровых изображений с целью цветовой коррекции и устранения артефактов.

Научная новизна работы.

В диссертации получены следующие новые научные результаты.

1. Предложена новая информационная технология цветовой коррекции изображений, основанная на параметрической идентификации моделей, отличающаяся высокой степенью автоматизации.
2. Разработана новая модификация метода согласованной идентификации с последовательным отбором множества согласованных оценок, обеспечивающая существенное снижение вычислительной сложности алгоритма.
3. Построены параметрические классы моделей бликов различного типа на цифровых изображениях и на этой основе разработаны новые автоматизированные методы и алгоритмы их локализации и устранения.
4. Разработаны устойчивый к неопределенности изменения функции яркости новый метод локализации тени на изображении и основанная на параметрической идентификации моделей автоматизированная технология цветовой коррекции теневых искажений.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются в технологическом процессе обработки цветных изображений в издательском доме «Агни» (г. Самара), а также используются в учебном процессе Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева и в научных исследованиях Института систем обработки изображений РАН.

Основные результаты получены в рамках следующих проектов.

«Разработка теории и методов восстановления, цветовой коррекции и понимания цветных изображений в условиях априорной неопределенности моделей искажений и помех», выполняемый по гранту РФФИ № 09-07-00269-а (2009 – 2011 г.г.).

«Научно-образовательный центр математических основ дифракционной оптики и обработки изображений», выполняемый в рамках российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE).

«Развитие теории оценивания для решения задач обработки данных в распределенных системах видеонаблюдения» (шифр 04в-Б058-035), выполняемый по заданию Рособразования на проведение научных исследований (темплан).

«Разработка сетевых информационных технологий параллельной и распределенной обработки данных, электронного обучения и интернет-телевещания», выполняемый в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» (ГК П2234 от 11 ноября 2009 г.).

По теме диссертации опубликованы 15 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 работы выполнены автором лично, остальные написаны в соавторстве.

Апробация работы.

Основные результаты, связанные с разработкой *методов и алгоритмов цветовой коррекции*, докладывались на следующих конференциях: VII Международная конференция «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов» (2 – 5 февраля 2009, Ульяновск); VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (1 – 4 июня 2009, Самара); X Всероссийская молодежная научная

конференция с международным участием «Королёвские чтения» (6 – 8 октября 2009, Самара); III International Workshop on «Image Mining Theory and Applications» (IMTA 2010) in conjunction with VISIGRAPP 2010 (17-21 May 2010, Angers, France); VII Всероссийская научная конференция с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (3 – 6 июня 2010, Самара); III International Multi-Conference on «Automation, Control, and Information Technology» (ACIT 2010) (15 – 18 June 2010, Novosibirsk); International Conference on «Signal Processing and Multimedia Applications» (SIGMAP 2010) (26 – 28 July 2010, Athens, Greece); Международная Конференция с элементами научной школы для молодежи "Перспективные информационные технологии для авиации и космоса" (ПИТ-2010) (29 сентября – 1 октября 2010, Самара).

Результаты, связанные с разработкой *программного комплекса*, докладывались на следующих конференциях: XVI Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика 2009» (22 – 25 июня 2009, Санкт-Петербург); Всероссийская суперкомпьютерная конференция «Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность» (21 – 26 сентября 2009, Новороссийск); Международная научная конференция «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ 2010) (29 марта – 2 апреля 2010, Уфа); Международная конференция «Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи» (20 – 25 сентября 2010, Новороссийск).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Новая информационная технология цветовой коррекции изображений, основанная на параметрической идентификации моделей, отличающаяся высокой степенью автоматизации.
2. Модификация метода согласованной идентификации с последовательным отбором множества согласованных оценок, обеспечивающая существенное снижение вычислительной сложности алгоритма.
3. Параметрические классы моделей бликов различного типа на цифровых изображениях и новые автоматизированные методы и алгоритмы их локализации и устранения.
4. Устойчивый к неопределенности изменения функции яркости новый метод локализации тени на изображении и основанная на параметрической идентификации моделей автоматизированная технология цветовой коррекции теневых искажений.
5. Программный комплекс для автоматизированной обработки цифровых изображений с целью цветовой коррекции и устранения артефактов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы составляет 125 страниц, 38 рисунков, 1 таблица. Библиографический список насчитывает 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи. Проведен обзор известных методов решения задач цветовой коррекции. Приводятся перечень научных результатов и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены краткие сведения из теории цвета, описана общая схема цветовой коррекции на основе идентификации, рассмотрены общие подходы к решению проблем улучшения качества цветных изображений, конкретизированы задачи диссертационного исследования.

Трехкомпонентную величину, описывающую цвет, принято представлять точкой в пространстве, называемом *цветовым пространством*. Координата цвета C_1 в цветовом пространстве устройства (отклик рецептора цифрового регистратора на свет определенной длины волны, отраженный от поверхности) определяется как

$$C_1 = k_1 \int_{\Lambda} f_1(\lambda) S(\lambda) E(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где k_1 – нормировочный коэффициент; $f_1(\lambda)$ – функция цветового соответствия, определяющая связь спектра регистрируемого излучения и величину отклика; $S(\lambda)$ – спектр освещения; $E(\lambda)$ – спектр отражения; λ – длина световой волны, лежащая в пределах Λ . В работе приведены описания основных используемых цветовых пространств: RGB и CIE Lab, HSL/HSV, связей между ними и особенностей их применения. В работе сформулированы проблемы улучшения качества цветных изображений, указаны основные подходы к их решению: представление спектров через разложение по малому числу базисных функций; совокупность подходов, объединенных термином «серый мир» (gray world); цветовые инварианты и др., указаны их достоинства и недостатки.

В разделе 1.3 приведено описание предлагаемой общей схемы цветовой коррекции, основанной на использовании параметрической идентификации моделей. Подход опирается на предположение о том, что для любого изображения I существует некоторое отображение ψ , приводящее цвета реального изображения к цветам эталонного изображения $I^* = \psi(I)$ (Форсит, 1988 г.). Поскольку в соответствии с (1) отклик цифрового регистратора зависит как от спектра освещения, так и от спектра отражения, в работе цифровое изображение представляется в виде суммы двух изображений, соответствующих «эталонным» и искажающим освещению и отражению:

$$I(x, y) = I^*(x, y) + \Delta I(x, y), \quad (2)$$

где $I^*(x, y)$ – эталонное изображение, $\Delta I(x, y)$ – искажающее изображение.

Рассмотрены основные типы цветовых искажений на цифровых изображениях: множественные точечные блики, возникающие вследствие отражения света от больших участков, протяженные матовые блики, вызываемые неравномерностью освещения, а также затененность отдельных участков изображения. Указанные искажения обычно локализованы в некоторой области и неравномерны по полю изображения. Для учета этой неравномерности фигурирующее в (2) искажающее изображение ΔI представляется в виде

$$\Delta I(x, y) = P(x, y) \cdot \psi(I(x, y)),$$

где $\psi(I(x, y))$ – функция цветового искажения, а $P(x, y)$ определенная на множестве точек изображения весовая функция. Соответствующая модель цветовой коррекции представлена в виде:

$$\hat{F}(x, y) = I(x, y) - \hat{P}(x, y) \cdot \hat{\psi}(I(x, y)), \quad (3)$$

где \hat{F} – скорректированное изображение, \hat{P} – оценка весовой функции, $\hat{\psi}$ – оценка цветового искажения.

Опираясь на введенную в рассмотрение общую модель цветовой коррекции (3) в работе обосновано «расщепление» общей задачи цветовой коррекции на задачи определения функции веса $P(x, y)$, описывающей изменение светлости, и функции преобразования цветовых координат $\psi(I(x, y))$. Установлено, что весовая функция $P(x, y)$ в различных цветовых пространствах может быть получена либо как значение одной координаты (в CIE Lab, HSL это координата L), либо непосредственным преобразованием цветовых координат (RGB, HSV).

Предложена информационная технология цветовой коррекции, основанная на параметрической идентификации моделей цветового преобразования. Для идентификации используется небольшое число тестовых фрагментов, цвета которых задаются либо с использованием информации о естественных цветах объектов, либо путем копирования цветов с качественного изображения аналогичного сюжета и др. В рамках указанной общей схемы цветовой коррекции в работе рассматриваются две основные проблемы: формирование параметрических классов моделей и построение алгоритмов параметрической идентификации этих моделей по малому числу тестовых фрагментов.

В разделе 1.4 конкретизированы связанные с указанными проблемами задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются вопросы построения алгоритмов идентификации по малому числу наблюдений, содержащих грубые ошибки типа сбоев. Развивается метод согласованной идентификации, в частности, строится процедура последовательного формирования множества согласованных оценок.

Показано, что в задачах цветовой коррекции подлежащие идентификации функции цветового преобразования $\psi(I(x, y))$ в большинстве случаев могут быть представлены в виде линейной по параметрам модели:

$$z(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^M c_j \cdot s_j(x_i, y_i) + \xi_i, \quad i = \overline{1, N} \quad (4)$$

где $z(x_i, y_i)$ – заданные «желаемые» цветовые координаты на тестовых фрагментах, $s_j(x_i, y_i)$, $j = \overline{1, 2, \dots, M}$ – значения функций цветовых координат (яркости) в точках (x_i, y_i) на тех же фрагментах, ξ_i – ошибки, связанные с неточностью модели и ошибками в задании цветов, M – порядок модели.

Если в области цветового пространства, которой принадлежат цветовые координаты всех, например, N тестовых фрагментов, существует функция преобразования с фиксированным вектором параметров \mathbf{c} , составленным из фигурирующих в (4) коэффициентов c_j , $j = \overline{1, 2, \dots, M}$, можно записать матричное равенство:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{S}\mathbf{c} + \mathbf{O}, \quad (5)$$

где \mathbf{Z} , \mathbf{O} – $N \times 1$ -векторы, составленные из наблюдений $z(x_i, y_i)$ и ошибок ξ_i , а \mathbf{S} – $N \times M$ -матрица, составленная из значений $s_j(x_i, y_i)$, $j = \overline{1, 2, \dots, M}$. Задача идентификации заключается в построении оценки $\hat{\mathbf{c}}$ вектора параметров \mathbf{c} по матрице \mathbf{S} и вектору \mathbf{Z} ($N > M$), при неизвестном векторе ошибок \mathbf{O} .

В работе развивается метод согласованной идентификации (Фурсов В.А., 2004), обеспечивающий высокое качество оценок в условиях априорной неопределенности, связанной с малым числом тестовых фрагментов. Идея метода состоит в том, чтобы в исходной системе среди всех возможных L подсистем (верхнего уровня) найти подсистему наиболее свободную от шума. Для поиска такой подсистемы вычисляются

оценки для всех возможных вариантов подсистем (нижнего уровня) с квадратными матрицами. В качестве искомой принимается l -я подсистема (верхнего уровня), для которой:

$$l = \arg \min_l W(l) \quad W(l) = \sum_{\substack{i,j=1, \\ i \neq j}}^{K_l} \|\mathbf{\epsilon}_{i,j} - \mathbf{\epsilon}_{i,j}\|_E^2, l = \overline{1, L}. \quad (6)$$

В работе предложен метод, позволяющий избежать полного перебора для поиска наиболее свободной от шума подсистемы верхнего уровня. В частности, множество согласованных оценок формируется путем последовательного присоединения к созданному на очередном шаге промежуточному множеству $\Phi_q, q=1,2,\dots$ оценки $\hat{\mathbf{c}}_{q+1}$, не принадлежащей множеству Φ_q и удовлетворяющей условию

$$\mathbf{\epsilon}_{q+1} : w[\mathbf{\epsilon}_{q+1}] = \min_{\forall \mathbf{\epsilon}_{q+1} \notin \Phi_q} \sum_{i=1}^q \|\mathbf{c}_i - \mathbf{c}_{q+1}\|_E^2. \quad (7)$$

В качестве критерия остановки может использоваться либо допустимое число присоединяемых оценок, либо число n наблюдений, вошедших в формируемую подсистему верхнего уровня.

Если в (7) начальная оценка $\hat{\mathbf{c}}_1$ – любая оценка из множества согласованных оценок, удовлетворяющих критерию (6), множество согласованных оценок, сформированное по правилу (7) и содержащее C_n^M оценок, совпадает с множеством согласованных оценок построенным методом полного перебора.

В работе получено неравенство

$$2([n - M + 1] \dots [n - 1])n[> (N - M + 1) \dots (N - 1)N, \quad (8)$$

из которого определяется минимальное число $n[$ наблюдений, где $n[$ ближайшее (в сторону увеличения) целое число, в подсистеме верхнего уровня почти свободной от шума, для которых оценка $\hat{\mathbf{c}}_1$, полученная на некоторой подсистеме нижнего уровня и соответствующая среднему члену вариационного ряда, составленного из норм векторов ошибок оценивания, является также одной из согласованных оценок. При $M=1$, как и следовало ожидать, $n[> N/2$, при увеличении числа M оцениваемых параметров множество наблюдений n всегда меньше половины всех наблюдений.

Построен следующий алгоритм согласованной идентификации с последовательным отбором согласованных оценок:

Шаг 1. Вычисление множества Σ всех возможных C_N^M оценок на подсистемах нижнего уровня.

Шаг 2. Определение на множестве Σ начальной оценки $\hat{\mathbf{c}}_1$, являющейся средним членом вариационного ряда, составленного из норм этих C_N^M оценок.

Шаг 3. Формирование множества согласованных оценок, путем последовательного присоединения к множеству Φ_q оценок из множества Σ , удовлетворяющих условию (7), до выполнения условия остановки.

Шаг 4. Вычисление точечной оценки на множестве согласованных оценок.

Для экспериментальной проверки работоспособности предложенного метода решалась задача идентификации $M=4$ параметров линейной модели по $N=10$ наблюдениям. Метод сравнивался с согласованной идентификацией при полном переборе и с методом наименьших квадратов (МНК). Поскольку МНК оптимален в случае гауссо-

вых помех, компоненты вектора ошибок намеренно формировались путем выбора из множества нормально распределенных случайных величин $N(0, \sigma_l^2)$. Для моделирования аномальных (выделяющихся) ошибок с вероятностью $p \leq 0,2$ добавлялись также нормально распределенные ошибки $N(0, \sigma_2^2)$ $\sigma_2^2 \gg \sigma_l^2$. Моделирование проводилось для разных дисперсий и размерностей P подсистем верхнего уровня $P < N$ по 10000 реализаций для каждого варианта.

Для сравнительной оценки точности методов на каждой реализации подсчитывалось отношение ошибок МНК-оценок к ошибкам согласованных оценок, полученных полным перебором и методом последовательного отбора. На рисунке 1 приведены гистограммы распределения полученных отношений: сплошная линия – отношение ошибок МНК-оценок к ошибкам согласованной идентификации с полным перебором, пунктирная – отношение ошибок МНК-оценок к ошибкам в методе последовательного отбора.

Как видно из графиков, обе согласованные оценки по точности превосходят оценки МНК, а оценки, полученные методом последовательного отбора не уступают по точности оценкам, полученным методом полного перебора. При этом время реализации алгоритма с последовательным формированием согласованных оценок, например, для $P=7$ и $\sigma_2^2 > 9\sigma_l^2$, сокращается в 8 раз.

Третья глава посвящена построению параметрических классов моделей и алгоритмов цветовой коррекции, в частности, рассмотрены алгоритмы покомпонентной цветовой коррекции, коррекции на основе триангуляции Делоне, модели множественных точечных и протяженных матовых бликов и алгоритмы их устранения, а также метод и алгоритм коррекции теневых искажений.

Первая группа методов – цветовая коррекция с использованием RGB -представления цветных изображений. Модель цветовой коррекции строится в виде соотношений, реализующих покомпонентные преобразования вида:

$$R_k^* = \sum_{i=0}^M c_{ki} [R_k]^i, \quad k = 1, 2, 3, \quad (9)$$

где R_k – k -я координата цвета на исходном изображении, R_k^* – координаты цвета на эталонном изображении, а c_{ki} – коэффициенты функции преобразования, которые определяются в результате идентификации.

Для их определения формируются N тестовых фрагментов, для которых в левой части модели (9) задаются «желаемые» координаты цвета R_k^* . По полученным таким образом N соотношениям вида (4) формируется система (5) и решается задача идентификации. Полученная таким образом функция преобразования затем подвергается привязке к точкам с координатами $(0,0)$ и $(1,1)$, обеспечивающим неискаженную передачу черного и белого цвета.

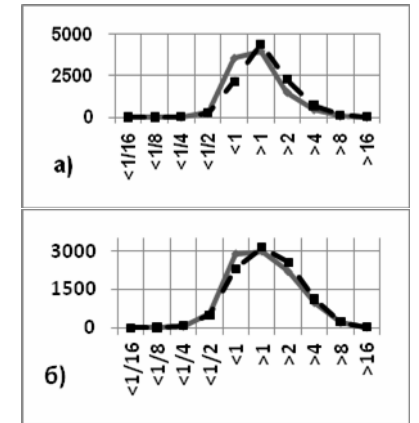


Рисунок 1 – Распределение отношений ошибок оценивания при различиях дисперсий смеси: а) в 3 раза; б) в 5 раз.

В работе исследовалась также модель цветовой коррекции, основанная на триангуляции Делоне. Для построения модели выделяется подпространство HS в цветовом пространстве HSL , представляющее собой круг единичного радиуса (рис. 2). Подпространство разбивается на треугольные области. Далее для вершин с корректируемыми цветами задаются желаемые координаты в подпространстве HS , а функция преобразования цветковых координат в рассматриваемой области задается проективным преобразованием соответствующих треугольников. Достоинством указанного подхода является возможность цветовой коррекции лишь на отдельных участках цветового пространства.

Методы цветовой коррекции локальных областей, содержащих неравномерные искажения, строятся на основе общей модели (3), позволяющей разделить определение функций цветовой коррекции – $\psi(I(x, y))$ и веса – $P(x, y)$. В частности, для матового блика параметрический класс моделей, используемых для построения оценки $\mathcal{I}(I(x, y))$ сигнала коррекции цветковых искажений $\psi(I(x, y))$ для каждого компонента задается в виде полинома:

$$\mathcal{I}(I(x, y)) = \sum_{i=0}^M \hat{c}_i I(x, y)^i, \quad (10)$$

где $I(x, y)$ – значение цветкового компонента в точке (x, y) , а \hat{c}_i – оценки коэффициентов полинома. Задача определения оценок параметров \hat{c}_i по N заданным тестовым фрагментам в данном случае решается также, с использованием соотношений вида (4) и (5), как и для модели (10).

Функцию веса $P(x, y)$ в данном случае предложено строить в виде

$$P(x, y) = \frac{\Delta f(x, y)}{\max_{x, y} \Delta f(x, y)}, \quad \Delta f(x, y) = \frac{a(\sqrt{eA^2 + B^2} - c)}{1 + b|\sqrt{eA^2 + B^2} - c|} + \frac{a}{b} + d, \quad (11)$$

где $A=(x-x_0)\cos\varphi-(y-y_0)\sin\varphi$, $B=(x-x_0)\sin\varphi+(y-y_0)\cos\varphi$.

Модель (11) учитывает наличие центрального освещенного пятна, плавное изменение его светлости, а так же произвольную ориентацию и вытянутость матового блика. Характер изменения светлости матового блика в любом сечении перпендикулярном полю изображения и построенном на луче, начало которого в центре блика, показан на рисунке 3. Для построения оценок параметров модели (11) должен быть задан набор тестовых фрагментов как на границах блика, так и в области его максимальной интенсивности. Параметры a, b, c, d, φ модели (11) определяются методами многомерного поиска. Цветовая коррекция компонентов осуществляется взве-

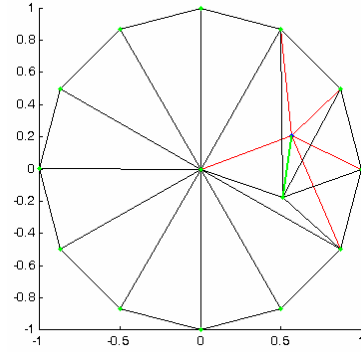


Рисунок 2 – пример цветовой коррекции на основе триангуляции Делоне

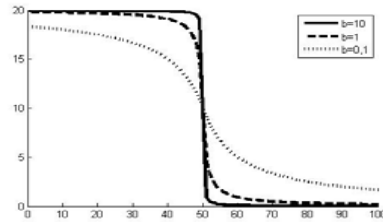


Рисунок 3 – Примеры весовой функции блика

шенным суммированием исходного значения компонента цвета $I(x, y)$ и оценки $\mathcal{I}(I(x, y))$ сигнала коррекции цветковых искажений в каждой точке:

$$I^*(x, y) = (1 - \hat{F}(x, y))I(x, y) + \hat{F}(x, y)\mathcal{I}(I(x, y)),$$

где $\hat{F}(x, y)$ – оценка весовой функции (11) в точке (x, y) .

В отличие от матовых бликов множественные точечные блики характеризуются почти полной потерей информации о цвете, поэтому для них задача отыскания оценки функции $\mathcal{I}(x, y)$ заменяется на задачу замещения цвета (ретуширования блика). В работе предложена технология замещения пикселей блика, основанная на идентификации параметров модели замещения с использованием информации о цвете в окрестности блика. Технология реализована в предположении, что цвет задан в пространстве RGB , а значения цветковых компонентов в окрестности блика описываются поверхностью M -го порядка:

$$z_k(x, y) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_k^{ij} x^i y^j,$$

где $z_k(x, y)$ – значение k -го цветкового компонента в точке (x, y) , C_k^{ij} – коэффициенты полинома, подлежащие оцениванию.

В разделе 3.3 описаны разработанные метод и алгоритмы локализации и цветовой коррекции теневых искажений, образующихся при фотографировании картины в рамке, освещаемой с двух сторон. Вследствие того, что источник освещения не является точечным, граница тени оказывается размытой. Размытие образует так называемую переходную область шириной S , а функция распределения светлости $P(x, y)$ для любой строки y_i изображения представляется в виде:

$$P(x, y_i) = \begin{cases} 1, & x \leq G(y_i) - \frac{S}{2}, \\ P'(x), & G(y_i) - \frac{S}{2} < x \leq G(y_i) + \frac{S}{2}, \end{cases}$$

где $P'(x)$ функция изменения светлости в переходной области, а $G(y)$ – средняя линия границы тени.

Для определения средней линии границы тени в каждой строке в области тени и примыкающей освещенной области вычисляется так называемая функция контраста:

$$f(s) = C_R - C_L,$$

где $C_R = \frac{1}{N-s} \sum_{i=s+1}^N \tilde{L}_k(x_i)$, $C_L = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s L_k(x_i)$ – оценки среднего значения функции яркости на интервалах $[s+1, N]$ и $[1, s]$ соответственно, а N – количество отсчетов на исследуемом участке строки изображения.

Для определения ширины и границ переходной области тени используется аппроксимация функции $P'(x)$:

$$P'(x) = \frac{b(x-c)}{1+a|x-c|} + d. \quad (12)$$

Параметры a, b, c, d определяются методом многомерного случайного поиска. На рисунке 4 приведена иллюстрация использования функции (12).

Для построения оценок функции цветовой коррекции $\psi[*]$ реализуется описанная выше технология, идентификации полиномиальной модели, основанная на формировании соотношений типа (4), (5). При этом «желаемые» цвета для N тестовых фрагментов могут копироваться с аналогичных цветов в освещенных областях.

Поэлементное преобразование отсчетов в каждой строке области тени осуществляется согласно модели (3):

$$L_i^*(x_i) = L_k(x_i) + w(i) \cdot \tilde{\Delta}_L,$$

$$\tilde{\Delta}_L = \psi[L_k(x_i)] - L_k(x_i),$$

где $\psi[L_k(x_i)]$ – функция преобразования цвета в k -й строке равномерно затененной области, а $w(i)$ – функция веса (12), равная 1 в равномерно затененной области.

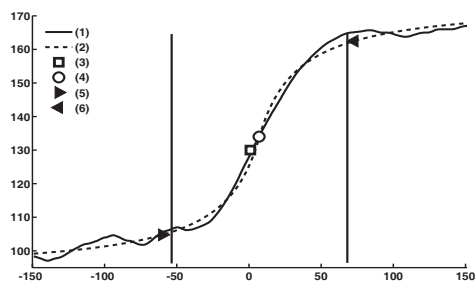


Рисунок 4 – Определение границ переходной области: (1) – исходная функция, (2) – аппроксимирующая функция, (3) – точка линии тени, (4) – уточненная точка линии тени, (5-6) – границы переходной области

В четвертой главе описываются разработанный программный комплекс и результаты экспериментальных исследований на модельных примерах и реальных изображениях.

На рисунке 5 приведена архитектура разработанного программного комплекса. Предусмотрена возможность его интеграции с системой Adobe Photoshop, а также работа в автономном режиме. Быстродействие обеспечивается применением параллельных алгоритмов с декомпозицией по данным. Операции реализуются поэтапно, предусмотрены режимы, когда можно возвращаться на предыдущие шаги. С использованием программного комплекса проведены экспериментальные исследования, некоторые результаты которых приведены на рисунке 6.

На рисунках 6а-б приведен пример цветовой коррекции (б) изображения (а) с использованием покомпонентно идентифицируемых функций преобразования вида (13). На рисунке 6в показан фрагмент изображения с множественными точечными бликами, а на рисунке 6г результат их автоматической компьютерной ретуши. Рисунок 6е иллюстрирует пример устранения матового блика в правой части изображения, пока-

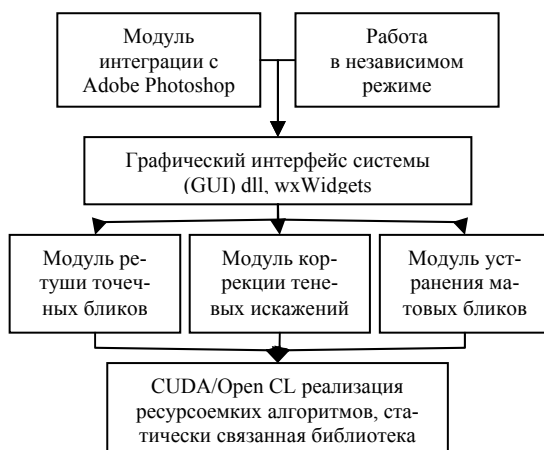


Рисунок 5 – Архитектура программного комплекса

званного на рисунке 6д. На рисунке 6з приведен пример реализации автоматизированной процедуры локализации и устранения теневого искажения, показанного на рисунке 6ж.

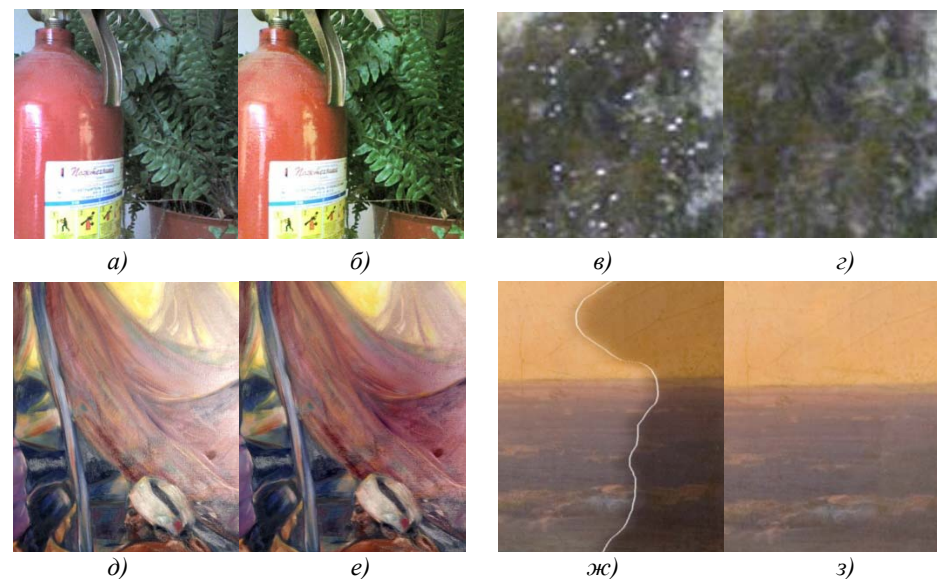


Рисунок 6 – Примеры цветовой коррекции

Проведены испытания разработанного программного обеспечения в процессе предпечатной подготовки реальных цифровых изображений репродукций произведений живописи в издательском доме «Агни» (г. Самара).

В общей сложности обработано более 1,5 тысяч цифровых изображений. На работу с таким количеством изображений по традиционной технологии требуется более 3,5 тысяч часов. С использованием разработанного программного комплекса обработка была проведена приблизительно за 150 часов.

Основные результаты диссертации:

Предложена информационная технология цветовой коррекции изображений, основанная на параметрической идентификации моделей цветового преобразования, обеспечивающая возможность высокой степени автоматизации процесса.

Разработана новая модификация метода согласованной идентификации с последовательным отбором множества согласованных оценок, позволяющая существенно снизить вычислительные затраты при той же точности.

Построены параметрические классы моделей и разработана информационная технология локализации и устранения бликов различного типа, отличающаяся высокой степенью автоматизации цветовой коррекции.

Разработаны устойчивый к мешающим факторам и помехам метод локализации тени на изображении и основанная на параметрической идентификации моделей технология цветовой коррекции теневых искажений.

Создан программный комплекс для автоматизированной обработки цифровых изображений с целью цветовой коррекции и устранения артефактов.

Проведено тестирование программного обеспечения (ПО) на реальных изображениях, определены параметры алгоритмов, позволяющие получать результат цветовой коррекции, не требующий ручной «доводки», в 80% случаев.

С использованием разработанного ПО проведена обработка более 1,5 тысяч цифровых изображений произведений живописи на этапе их предпечатной подготовки, занявшая 150 часов. Обработка такого количества изображений по традиционной технологии потребовала бы более 3,5 тысяч часов.

Основные результаты опубликованы:

В журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Бибиков, С.А.** Цветовая коррекция на основе идентификации моделей по тестовым фрагментам изображений [Текст] / С.А. Бибиков, В.А. Фурсов // Компьютерная оптика. – Самара-Москва, 2008. – Т.32, №3. – С.302-307.
2. **Бибиков, С.А.** Информационная технология коррекции теневых искажений на цветных цифровых изображениях [Текст] / С.А. Бибиков, А.В. Никоноров, В.А. Фурсов // Компьютерная оптика. – Самара-Москва, 2010. – Т.34, №1. – С.124-131.
3. **Бибиков, С.А.** Цветовая коррекция бликов на цифровых изображениях [Текст] / С.А. Бибиков, Минаев Е.Ю., Никоноров А.В., Фурсов В.А. // Компьютерная оптика. – Самара-Москва, 2010. – Т.34, №3. – С.384-394.

В других изданиях:

4. **Бибиков, С.А.** Модели цветовой коррекции цифровых изображений [Текст] / С.А. Бибиков, В.А. Фурсов // Труды Седьмой Международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов» (2-5 февраля 2009 г., г. Ульяновск). – Ульяновск, 2009. – С.44-46.
5. **Бибиков, С.А.** Модели и алгоритмы коррекции цвета в пространстве HSL [Текст] / С.А. Бибиков // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 4: Информационные технологии в математическом моделировании. – Самара: СамГТУ, 2009. – С.19-21.
6. **Бибиков, С.А.** Реализация распределенной системы многопоточной обработки изображений с использованием технологии CUDA [Текст] / С.А. Бибиков, А.В. Никоноров, В.А. Фурсов // Труды XVI Всероссийской научно-методической конференции «Телематика-2009» (22-25 июня 2009 г., г. Санкт-Петербург). – С.-Пб., 2009. – С.423-425.
7. **Бибиков, С.А.** Исследование эффективности технологии CUDA в задаче распределенной предпечатной подготовки цифровых изображений [Текст] / С.А. Бибиков, А.В. Никоноров, В.А. Фурсов, П.Ю. Якимов // Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность: Труды Всероссийской суперкомпьютерной конференции (21-26 сентября 2009 г., г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2009. – С.204-207.
8. **Бибиков, С.А.** Алгоритмы коррекции артефактов изображений при создании репродукций картин [Текст] / С.А. Бибиков // X Королевские чтения: Всероссий-

ская молодежная научная конференция с международным участием, Самара, 6-8 октября 2009 года: Тезисы докладов. – Самара, 2009. – С.309.

9. **Бибиков, С.А.** CUDA-технология цветовой коррекции теневых искажений на цифровых фотокопиях произведений живописи [Текст] / С.А. Бибиков, А.В. Никоноров, В.А. Фурсов, П.Ю. Якимов // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2010): Труды международной научной конференции (Уфа, 29 марта – 2 апреля 2010 г.) – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С.656.
10. **Bibikov, S.A.** Shadow Artifacts Correction on Fine Art Reproductions [Text] / S.A. Bibikov, V.A. Fursov, A.V. Nikonorov // Proceedings of IMTA 2010 in conjunction with VISIGRAPP 2010, Angers, France, 17-21 May 2010. – P.3-12.
11. **Бибиков, С.А.** Идентификация параметров модели цветовой коррекции точечных бликов [Текст] / С.А. Бибиков // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 4: Информационные технологии в математическом моделировании. – Самара: СамГТУ, 2010. – С.28-30.
12. **Bibikov, S.A.** Information technology of retouching of point-like artefacts on color images [Text] / S.A. Bibikov, A.V. Nikonorov, V.A. Fursov // Proceedings of the IASTED International Conference on Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010) (15 – 18 June 2010, Novosibirsk, Russia). – ACTA press. – P.123-126.
13. **Nikonorov, A.** Desktop supercomputing technology for shadow correction of color images [Text] / Artem Nikonorov, Sergey Bibikov, Vladimir Fursov // Proceedings of the International Conference on «Signal Processing and Multimedia Applications» (SIGMAP 2010) (26-28 July 2010, Athens, Greece). – SciTePress, 2010. – P.124-129.
14. **Бибиков, С.А.** Идентификация с последовательной схемой отбора согласованных оценок [Текст] / С.А. Бибиков, А.В. Гаврилов, В.А. Фурсов // Международная Конференция с элементами научной школы для молодежи "Перспективные информационные технологии для авиации и космоса" (ПИТ-2010) (29 сентября – 1 октября 2010, Самара). – Самара, 2010. – С.494-499.
15. **Бибиков, С.А.** Обработка видеоданных в распределенной массивно-многопоточной CUDA-среде [Текст] / С.А. Бибиков, А.В. Никоноров, В.А. Фурсов, П.Ю. Якимов // Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (20-25 сентября 2010 г., г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2010. – С.197-204.