

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Арапов Сергей Юрьевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦВЕТА
ИСКУССТВЕННО ОКРАШЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в Департаменте информационных технологий и автоматике Института радиоэлектроники и информационных технологий - РтФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,

Тягунов Андрей Геннадьевич

Официальные оппоненты: **Макарецкий Евгений Александрович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, профессор кафедры «Радиоэлектроника» Института высокочастотных систем им. В.П. Грязева;

Маликов Рамиль Фарукович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы», г. Уфа, профессор кафедры информационных технологий Института математики, физики, цифровых и нанотехнологий;

Голунов Александр Владимирович, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, доцент кафедры «Математические методы и информационные технологии в экономике» Факультета информационных технологий и компьютерных систем

Защита диссертации состоится «17» мая 2022 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.3.05.13 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3399>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности. Промышленное получение цветных поверхностей или изображений сопряжено с вероятностью возникновения отклонений от заданного цвета и визуально-различимых дефектов. При массовом производстве это может привести к существенным материальным потерям. Контроль цветовых отклонений основан на значениях цветовых координат, рассчитываемых по спектральным характеристикам стандартного наблюдателя, поэтому для точного определения цвета объекта по изображению, полученному трихроматической камерой, необходимо соблюдение спектральных условий (Лютера-Айвса) и точное воспроизведение спектра стандартных осветителей. Эта проблема может разрешима с помощью мультиспектральных информационных систем (МИС), с линейным процессом формирования многоканальных мультиспектральных изображений (МСИ), представленном на схеме (рисунок 1).

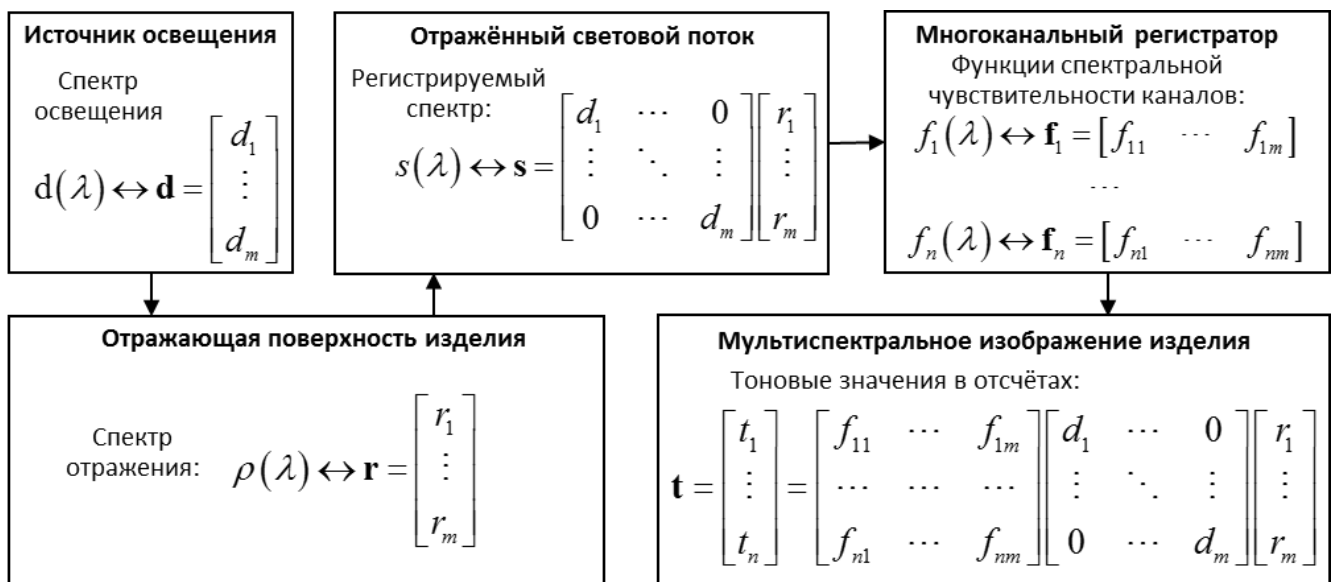


Рисунок 1. Схема формирования МСИ в n -канальной МИС, где все спектральные величины представлены в дискретной матричной форме для m спектральных зон

Из рисунка 1 видно, что в таких МИС формирование вектора \mathbf{t} тоновых значений (ТЗ) в отсчёте МСИ может быть представлено линейным отображением:

$$\mathbf{t} = \mathbf{F} \text{Diag}(\mathbf{d}) \mathbf{r} = \mathbf{H} \mathbf{r}, \quad (1)$$

где \mathbf{r} — вектор спектра отражения (СО), состоящий из значений коэффициента отражения для m спектральных зон, $\text{Diag}(\mathbf{d})$ — функция «создающая» диагональную матрицу с главной диагональю из компонентов вектора спектра освещения \mathbf{d} , \mathbf{F} — матрица спектральной чувствительности МИС, $\mathbf{H} = \mathbf{F} \text{Diag}(\mathbf{d})$ — спектральная

характеристика МИС с учётом осветителя. Обычно количество спектральных каналов n в МИС меньше количества спектральных зон m . На практике ищется решение обратной задачи реконструкции СО r по модели (1), что позволяет определить цвет для любого заданного освещения. Таким образом анализ МСИ даёт возможность одновременного контроля цветового и графического оформления продукции.

Мультиспектральные системы, для работы с искусственно окрашенными поверхностями рассматривались в работах Р. Бернса, П. Бёрнса, Й. Брауэрса, С. Хеллинга, Х. Эрнандеса-Андреса, Ф. Имаи, Х. Лян, Ю. Чжао, Ф. Шмитта, Й. У. Хардберга, и др. При этом в алгоритмах обработки МСИ широко используются методы теории решения обратных задач, рассмотренные, например, в монографиях В. Ю. Терибижа или М. Бертеро, П. Боккаччи. Вопросы построения информационных систем для управления цветом и его контроля в промышленности рассматривались в работах Ю. Н. Самарина, Ю. С. Андреева и др. Однако, несмотря на большое количество научных работ, промышленные МИС для контроля цвета пока не получили широкого распространения. Это обусловлено высокой стоимостью оптико-электронной элементной базы МИС, низкой скоростью работы, недостаточной проработкой метрологического обеспечения, что осложняет контроль допусков, заданных стандартами.

В настоящее время оптико-электронная элементная база для разработки МИС становится доступнее. Таким образом, является актуальной задача разработки математического и алгоритмического обеспечения МИС, расширяющего их функциональность возможностью текущего контроля цвета окрашенных поверхностей, обеспечивающего высокую скорость реконструкции СО, теоретическую оценку случайной погрешности и устойчивую работу для различных технологий синтеза цвета поверхности.

Целью работы является разработка математического и алгоритмического обеспечения, расширяющего функциональные возможности промышленных МИС. Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Проанализировать состояние разработок математического и алгоритмического обеспечения промышленных МИС, на основе данных о существующих МИС, методах реконструкции СО, системах СО искусственно окрашенных поверхностей и характеристиках МИС, необходимых для эффективного контроля цвета.

2. Разработать математическое и алгоритмическое обеспечение для реконструкции СО по данным мультиспектральной съёмки с теоретической оценкой случайной погрешности.

3. Разработать экспериментальную МИС для тестирования математического и алгоритмического обеспечения при реконструкции СО образцов искусственно окрашенных поверхностей.

4. Провести экспериментальное исследование по выявлению факторов, влияющих на точность реконструкции СО при работе с образцами, моделирующими промышленную продукцию.

Объект исследования — МИС, предназначенная для определения СО произвольного локального участка искусственно окрашенной поверхности и расчёта его цветовых координат.

Предмет исследования — математическое и алгоритмическое обеспечение реконструкции спектров для МИС, в которых формирование измерительных данных описывается линейной моделью.

Научная новизна работы:

1. Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение для реконструкции СО по данным мультиспектральной съёмки, отличающееся от известного теоретической оценкой случайной погрешности результатов.

2. Предложен новый тип фиксированных функциональных базисов для аппроксимации СО в задачах искусственного синтеза цвета, соответствующий характерному виду кривых СО.

3. Проведено экспериментальное исследование по выявлению факторов, влияющих на точность реконструкции СО при работе с образцами, моделирующими промышленную печать изображений.

Методология и методы исследований. В работе использованы методы: линейной алгебры, прикладной математической статистики, теории решения обратных задач, компьютерной обработки изображений, спектроскопии, светотехники и колориметрии.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в разработке математического и алгоритмического обеспечения для реконструкции СО с одновременной оценкой случайной погрешности и возможностью выделения её систематической составляющей, что позволяет целенаправленно совершенствовать МИС.

Практическая значимость результатов работы заключается в:

1. Определении требований к промышленным МИС и подтверждении возможности разработки высокоскоростных МИС для использования в качестве компонента промышленных систем автоматизированного управления;

2. Разработке математического и алгоритмического обеспечения с теоретической оценкой погрешности реконструкции СО создающего предпосылки для разработки метрологического обеспечения, необходимого для практического использования МИС.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение может использоваться для реконструкции СО в высокоскоростных промышленных системах контроля цвета.

2. Предложенный тип базисов может быть эффективно использован для реконструкции СО искусственно окрашенных поверхностей в случае невозможности использования метода главных компонент.

3. Разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение позволяет выделить систематическую составляющую погрешности реконструкции СО и даёт возможность анализировать влияющие на неё факторы.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректным применением математических методов, подтверждается проведёнными экспериментами и сопоставлением с результатами других авторов.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационной работы используются в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия (акт об использовании результатов от 22.06.2021); в ПАО «Аскольд», г. Арсеньев, Россия (акт об использовании результатов от 17.06.2021), в ООО «СК Графические системы», г. Екатеринбург, Россия (акт об использовании результатов от 17.06.2021).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: 5th International Conference on New Horizons in Education (INTE 2014), Paris, France, June 25–27 2014; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления», Екатеринбург, Россия, 15–17 декабря 2014; Международная научно-практическая конференция «Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации» Екатеринбург, Россия, 19–20 марта 2015; Международная конференция «Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (САИ-2016)» Екатеринбург, Россия, 5–6 мая 2016; Международная конференция «Информация: передача, обработка, восприятие» Екатеринбург, Россия, 12–13 января 2017.

Личный вклад. Автор разработал математическое и алгоритмическое обеспечение МИС для реконструкции СО с теоретической оценкой случайной погреш-

ности, обосновал способ аппроксимации СО в репродукционных задачах с помощью сглаженных ступенчатых базисов, разработал экспериментальную МИС, обработал и проанализировал результаты экспериментов по выявлению факторов, влияющих на точность реконструкции СО при работе с образцами, моделирующими промышленную продукцию.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах WoS и Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, 3 приложений. Работа изложена на 216 страницах, содержит 93 рисунка и 13 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, дана краткая характеристика работы, отражена научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

Первая глава содержит анализ текущего состояния разработок МИС в области репродуцирования изображений. В проанализированных работах рассмотрены элементная база, технические решения, а также методы обработки МСИ, формирование которых описывается линейной моделью (1) с учётом аддитивного шума:

$$\begin{cases} \mathbf{t} = \mathbf{H}\mathbf{r} + \xi, \\ \mathbf{C} = \text{cov}(\xi), \quad \langle \xi \rangle = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где ξ — случайный вектор шума МСИ с нулевым средним значением $\langle \xi \rangle$ и известной ковариационной матрицей \mathbf{C} , распределение которого удовлетворительно соответствует нормальному закону. Задача обработки МСИ, относящаяся к классу обратных задач, и состоит в реконструкции вектора СО \mathbf{r} по известному вектору \mathbf{t} , имеющему меньшую размерность.

Анализ вычислительных затрат существующих методов реконструкции СО показал, что наименее трудоёмкими являются методы, в которых СО реконструируется линейным преобразованием мультиспектральных данных \mathbf{t} :

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}\mathbf{t} + \mathbf{b}, \quad (3)$$

где \mathbf{R} — реконструирующая матрица размера $m \times n$, m — количество спектральных зон в спектре \mathbf{r} , n — количество каналов в МСИ, \mathbf{b} — постоянный вектор, который

может быть нулевым. Матрица \mathbf{R} может быть найдена разными методами. Временная вычислительная сложность в этом случае оценивается как $O(L \times m \times n)$, где L — чёткость МСИ (количество отсчётов), но поскольку значения m и n невелики ($m \approx 30, n \approx 10$) по сравнению с L ($\sim 10^7 - 10^8$), асимптотическая оценка $O(L)$ будет корректнее. Было показано, что высокие требования к скорости работы промышленных МИС делают предпочтительными решения в виде (3).

Погрешность традиционно оценивается сравнением реконструированных СО с измеренными спектрофотометром по среднеквадратичному отклонению спектра и цветовому отличию ΔE (евклидову расстоянию в цветовом пространстве Lab). В экспериментах, как правило, используются стандартные цветовые шкалы, например, *ColorChecker* (CCh) компании *X-Rite*.

В заключительной части главы, на основе проведённого анализа, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе описано разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение для реконструкции СО в МИС. Аналитически показано, что после преобразования модели (2) с использованием аппроксимации СО, уменьшающей размерность с помощью подстановки:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad (4)$$

где \mathbf{A} — матрица со столбцами образованными базисными функциями для аппроксимации решения \mathbf{r} , \mathbf{x} — вектор коэффициентов разложения искомого спектра \mathbf{r} по базису \mathbf{A} , реконструкция СО может быть произведена по формуле, аналогичной (3):

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} \cdot \langle \mathbf{t}_i \rangle, \quad (5)$$

где $\langle \mathbf{t}_i \rangle$ — усреднённое значение N векторов $\{\mathbf{t}_i\}$, соответствовавших компактно расположенным отсчётам МСИ, в пределах зоны в которой СО априорно считался одинаковым. Реконструирующая матрица \mathbf{R} определялась следующим образом:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \left(\mathbf{H}_1^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}_1 \right)^{-1} \mathbf{H}_1^T \mathbf{C}^{-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{H}_1 = \mathbf{H} \cdot \mathbf{A}$.

Для выбора базиса \mathbf{A} обычно используется метод главных компонент (ГК), обеспечивающий адаптацию базиса к системе спектров исследуемых объектов. Однако, в условиях промышленного применения МИС предварительный анализ этой системы методом ГК не всегда осуществим, и возникает необходимость использования готового фиксированного базиса. Для этого было проведено сравнение наборов следующих функций с фиксированными параметрами: базис ступенчатого

типа, полиномиальный базис и два сглаженных ступенчатых базиса на основе арктангенса и интеграла ошибок. Последний представлен на рисунке 2.

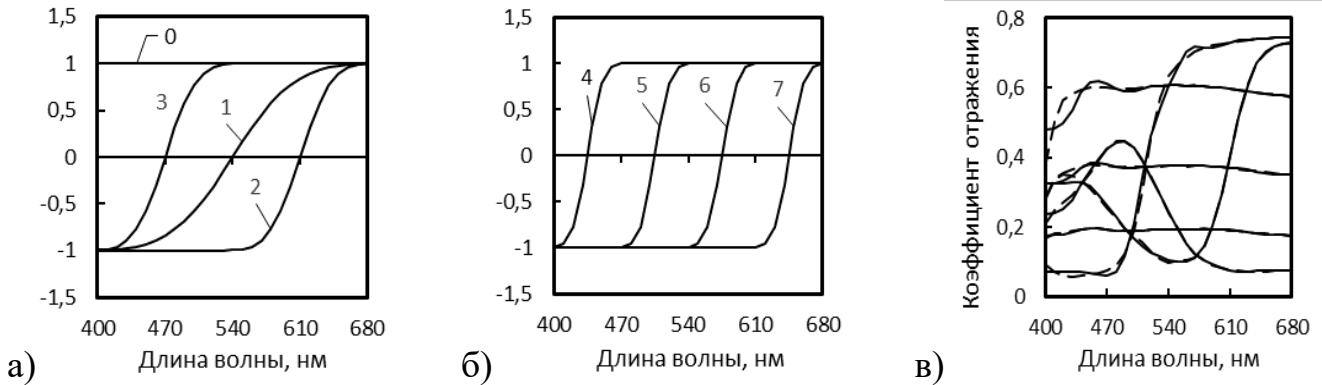


Рисунок 2 – Аппроксимация СО. а), б) — функции сглаженного ступенчатого базиса в) примеры аппроксимации (сплошные линии) и оригинальные СО (пунктир)

Перечисленные варианты аппроксимации строились для СО полей цветовой шкалы CSh и специально отпечатанной тестовой цветовой шкалы, которые затем использовались в экспериментах. Точность аппроксимации сравнивалась с исходным СО по цветовому отличию ΔE , среднеквадратичному и максимальному абсолютному отклонениям. В результате обосновано использование для дальнейших расчётов сглаженного ступенчатого базиса и базиса ГК.

Использованное для получения оценки (5), (6) неравенство Рао-Крамера позволило определить дисперсию вектора \mathbf{r} и доверительный интервал СО на основе оценки вектора стандартных отклонений $\sigma_{\mathbf{r}}$:

$$\sigma_{\mathbf{r}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{sqrt} \left(\text{diag} \left(\mathbf{A} \left(\mathbf{H}_1^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}_1 \right)^{-1} \mathbf{A}^T \right) \right), \quad (7)$$

где $\text{diag}(\dots)$ — функция извлекающая диагональ из квадратной матрицы в виде вектора, а $\text{sqrt}(\dots)$ — функция поэлементного извлечения квадратного корня. Матричные величины в (7) определяются свойствами элементов МИС, а множитель $1/\sqrt{N}$ — процессом съёмки и обработки МСИ. Количество исходных данных N для усреднения в (7) может быть увеличено, например, за счёт съёмки нескольких кадров или увеличения числа отсчётов, для которых СО априори одинаков.

Стандартное отклонение цветовых координат X, Y, Z оценивалось по формуле, полученной из (7) «переходом к базису» $\tilde{\mathbf{X}}$, являющемуся набором функций сопоставления цвета (ФСЦ) стандартного наблюдателя, приведённых к относительному колориметрическому виду для стандартного осветителя D50:

$$\sigma_{xyz} = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{sqrt} \left(\text{diag} \left(\tilde{\mathbf{X}}^T \mathbf{A} \left(\mathbf{H}_1^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}_1 \right)^{-1} \mathbf{A}^T \tilde{\mathbf{X}} \right) \right), \quad (8)$$

где $\mathbf{\sigma}_{XYZ}$ — вектор стандартного отклонения цветовых координат X, Y, Z , а матрица $\tilde{\mathbf{X}}$ рассчитывалась следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \frac{100}{\mathbf{d}_{50}^T \bar{\mathbf{y}}} \text{Diag}(\mathbf{d}_{50}^T) \mathbf{X}, \quad \mathbf{X} = [\bar{x} \quad \bar{y} \quad \bar{z}], \quad (9)$$

где \mathbf{d}_{50} — спектр осветителя D50, \mathbf{X} — матрица, столбцы которой содержат значения функций сопоставления цвета (ФСЦ) стандартного наблюдателя $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$.

Использование формулы (5) предварялось компенсацией фотометрических искажений МСИ: ненулевого «уровня чёрного», флуктуаций импульсного освещения, фотометрической неоднородности кадра (ФНК). Параметры компенсации определялись по настроечным изображениям: чёрному кадру (с закрытым объективом), МСИ равномерного поля, МСИ калибровочной шкалы из нескольких различных по светлоте нейтральных серых полей.

Уровень чёрного b определялся как среднее ТЗ в чёрном кадре $\langle t^{\text{чк}} \rangle$:

$$b = \langle t^{\text{чк}} \rangle. \quad (10)$$

При отсутствии чёрного кадра уровень чёрного b определялся как решение системы уравнений:

$$\left\langle t_i^{\text{кш}} \right\rangle = a_i r_i^{\text{кш}} + b, \quad \left\langle t_i^{\text{пп}} \right\rangle = a_i r_i^{\text{пп}} + b, \quad i = \overline{1, I}, \quad (11)$$

где $\langle t_i^{\text{кш}} \rangle$ — среднее ТЗ по выборке отсчётов МСИ в пределах i -го поля калибровочной шкалы из I полей, $\langle t_i^{\text{пп}} \rangle$ — среднее ТЗ по аналогичной выборке отсчётов МСИ равномерного поля, $r_i^{\text{кш}}, r_i^{\text{пп}}$ — расчётные доли светового потока, отражённого от i -го поля калибровочной шкалы, либо равномерного поля, a_i — неизвестный коэффициент, включающий локальную ФНК для i -го поля и, стыкующий размерности $r_i^{\text{кш}}, r_i^{\text{пп}}$ с $\langle t_i^{\text{кш}} \rangle, \langle t_i^{\text{пп}} \rangle$ и b . Система (11) избыточна, и b находился методом наименьших квадратов:

$$[a_1 \quad \dots \quad a_I \quad b]^T = \mathbf{V}^+ \left[\left\langle t_1^{\text{кш}} \right\rangle \quad \left\langle t_1^{\text{пп}} \right\rangle \quad \dots \quad \left\langle t_I^{\text{кш}} \right\rangle \quad \left\langle t_I^{\text{пп}} \right\rangle \right]^T, \quad (12)$$

где \mathbf{V}^+ — псевдообратная матрица системы (11).

Для коррекции флуктуаций мощности импульсного освещения может применяться линейный фотодатчик:

$$c = u^o / u^k, \quad (13)$$

где c — искомый поправочный коэффициент, u^o и u^k — уровни сигнала фотодатчика при съёмке опорного и корректируемого МСИ. В работе предложен вариант, основанный на том, что ТЗ для различных МСИ в точках с одинаковыми координатами должны быть также одинаковы, если они приходятся на неокрашиваемую поверхность, при этом в пределах кадра они могут меняться из-за ФНК. Для таких опорных точек справедлива система уравнений:

$$\left\langle t_i^o \right\rangle = c \left\langle t_i^k \right\rangle, \quad i = \overline{1, I} \quad (14)$$

где I — количество опорных точек, $\left\langle t_i^o \right\rangle$ — среднее ТЗ отсчётов из зоны в окрестности i -ой точки «опорного» МСИ, $\left\langle t_i^k \right\rangle$ — аналогичное значение из такой же точки в «корректируемом» МСИ. Система (14) избыточна, коэффициент c определялся методом наименьших квадратов:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^I \left\langle t_i^o \right\rangle \left\langle t_i^k \right\rangle}{\sum_{i=1}^I \left\langle t_i^k \right\rangle^2}. \quad (15)$$

Компенсация ФНК осуществлялась умножением ТЗ на индивидуальный коэффициент для каждого отсчёта f_{ij} :

$$f_{ij} = \left\langle t_{ij}^{\text{пн}} \right\rangle / t_{ij}^{\text{пнс}} \quad (16)$$

где i, j — индексы расположения отсчёта в МСИ, $\left\langle t_{ij}^{\text{пн}} \right\rangle$ — среднее по всему каналу МСИ равномерного поля, а $t_{ij}^{\text{пнс}}$ — ТЗ из МСИ равномерного поля, сглаженного усреднением по квадратному окну вокруг каждого отсчёта.

Спектральная калибровка МИС осуществлялась путём сопоставления на диаграмме расчётных и фактических ТЗ калибровочной шкалы (например, ССh). При этом определялись калибровочные коэффициенты, на которые умножались строки матрицы \mathbf{H} в (2). Одновременно анализировалось распределение шумов и рассчитывалась ковариационная матрица. Таким образом определялись все исходные данные для основных расчётных выражений (5)–(8).

Схема алгоритма реконструкции СО, разделённого на две части в соответствии с фазами работы, приведена на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, первая часть алгоритма служит для настройки МИС и выполняется однократно, а вторая — представляет собой основной рабочий цикл. Операции основного рабочего цикла выполняются для каждого контролируемого объекта (изделия).

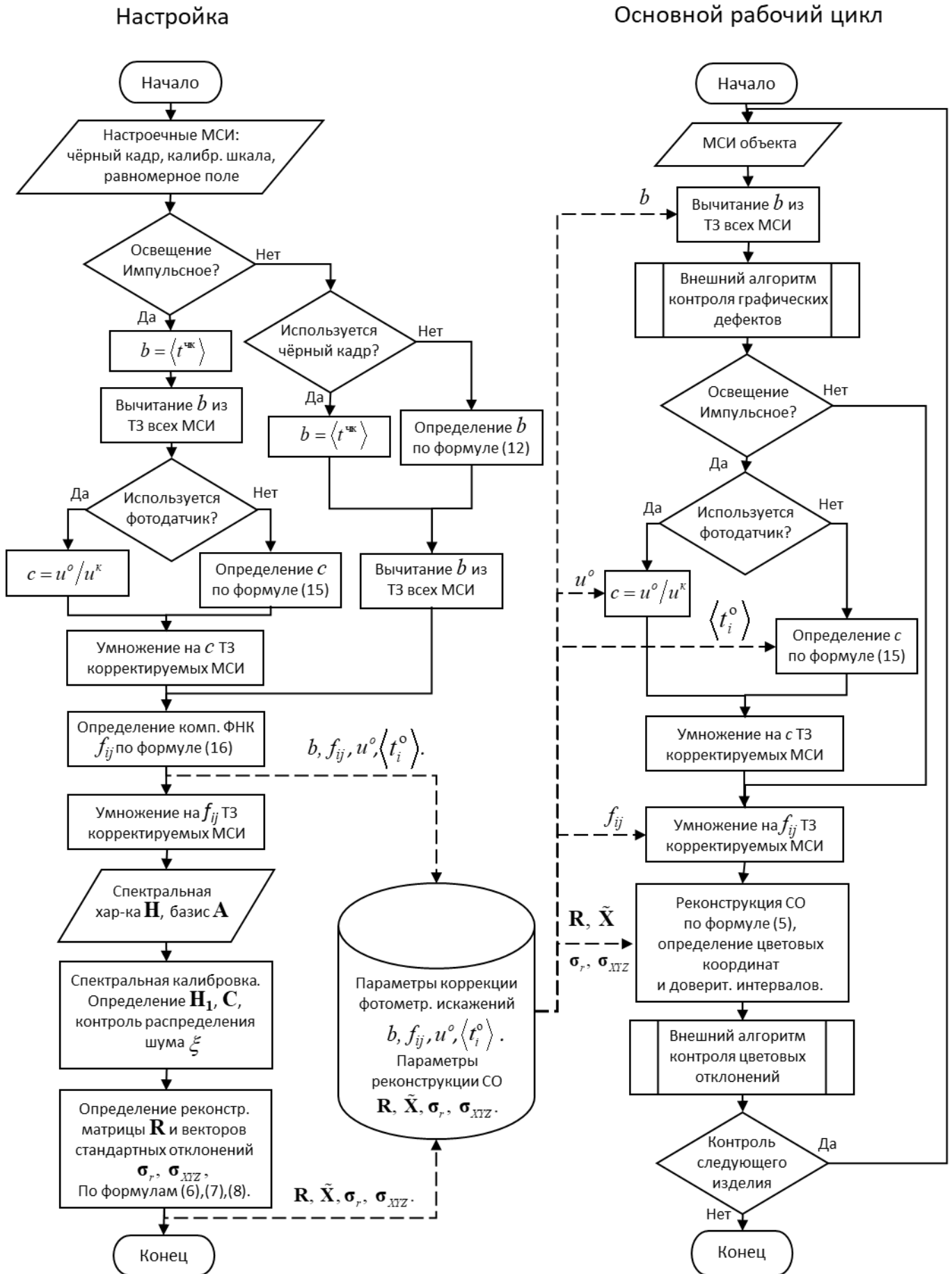


Рисунок 3. Алгоритм реконструкции СО в МИС (→ — управление, --- — данные).

Анализ разработанного алгоритма показал, что временная вычислительная сложность может быть асимптотически оценена как $O(L)$, где L — чёткость МСИ. Наиболее трудоёмкими операциями являются расчёт $\langle t_i \rangle$ и реконструкция СО (множители L имеют порядок $\sim 10^2$). Реконструкция СО может быть нужна не в каждом из L отчётов МСИ, а только в определённых точках или зонах контроля. Применение параллельных вычислений также может существенно ускорить работу алгоритма.

В третьей главе описана экспериментальная МИС, разработанная с целью апробации математического и алгоритмического обеспечения. Схема МИС представлена на рисунке 4, а.

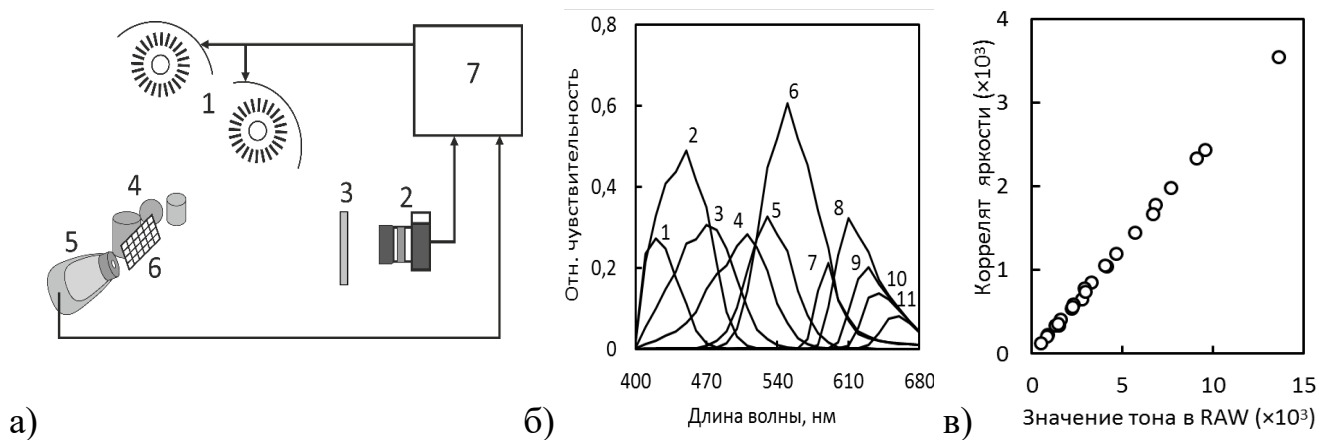


Рисунок 4 — Экспериментальная МИС. а) Элементы и схема МИС: 1 — управляемый источник освещения, 2 — цифровая фотокамера, 3 — система сменных светофильтров, 4 — объекты съёмки, 5 — спектрофотометр *il-Pro* (*X-Rite*), 6 — цветовая шкала, 7 — компьютер и программное обеспечение; б) ФСЧ 11 каналов МИС; в) Пример калибровочной диаграммы

Изображения регистрировались RGB камерой *NEX-5N* (*SONY*) через сменные светофильтры. В качестве объектов съёмки использовались оттиски цветовой тестовой шкалы (ТШ) из 1944 полей и стандартная цветовая шкала CCh. Спектральная облучённость в зоне съёмки, а также СО объектов эксперимента фиксировались спектрофотометром *il-Pro* (*X-Rite*). Во время эксперимента объект помещался в зону съёмки, затем производилось фотографирование с ручной сменой светофильтров. Полученные файлы RAW конвертировались в TIFF утилитой из открытой программной библиотеки *LibRaw*, и импортировались в среду MATLAB, где совмещались в одно МСИ. Затем производилась выборка тоновых значений из отсчётов в заданных зонах.

Все спектральные величины рассматривались как спектрональные для 29 зон шириной 10 нм в интервале от 400–680 нм. В экспериментальной МИС использовались 11 каналов (рисунок 4 б) и несколько вариантов освещения с различными

спектрами — естественное наружное освещение, имитатор стандартного осветителя D50, ксеноновая вспышка, галогенная лампа накаливания с интерференционным фильтром. Спектральная калибровка МИС производилась с помощью диаграммы (рисунок 4 в) по процедуре, описанной во второй главе. Вид зависимости на диаграмме говорит о линейном характере формирования данных в МИС.

Контроль распределения шумов ТЗ по графикам вероятность-вероятность показал, что для чёрного кадра (собственные шумы цифровой камеры) оно близко к нормальному, а в изображениях калибровочных полей на цветовых шкалах отклоняется от нормального и обладает более «тяжёлыми хвостами». Анализ результатов пробной реконструкции СО (5)–(7) показал, что количество случаев выхода значений реконструированного СО (5)–(6) за пределы доверительного интервала $\pm 3\sigma_r$ (7) незначительно превышает расчётное для нормального распределения и это отклонение можно признать несущественным. Таким образом были подтверждены: соответствие формирования данных в МИС модели (2), допустимость использования формул (5)–(7), корректность разработанного алгоритмического обеспечения.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований по выявлению факторов, влияющих на точность реконструкции СО при работе с образцами, моделировавшими промышленную продукцию. Реконструированные СО сравнивались с контрольными, измеренными спектрофотометром, путём расчёта их координат в цветовых пространствах XYZ , Lab и оценки цветового отклонения ΔE . Поскольку контрольные СО были известны для всех полей образцов, калибровка МИС проводилась в нескольких вариантах на основе различных калибровочных наборов полей (КНП).

Поверхность промышленной продукции, однотонно окрашенной по смесевой технологии, моделировалась стандартной шкалой CCh. При калибровке по шести нейтральным полям CCh, СО хроматических полей были определены с цветовыми отклонениями: $\Delta E_{\text{средн.}} = 1,39$ и $\Delta E_{\text{макс.}} = 2,69$ для сглаженного ступенчатого базиса, $\Delta E_{\text{средн.}} = 1,34$ и $\Delta E_{\text{макс.}} = 2,91$ для базиса ГК. Поскольку коридоры допусков по цветовому отклонению в большинстве стандартов составляют $\Delta E = 5,0$, этот результат был признан удовлетворительным.

Поверхность промышленной продукции, с нанесённым на неё изображением, моделировалась отпечатками ТШ, содержащими автотипную структуру из микро-точек, за счёт изменения площади которых осуществляется синтез цвета в полиграфии. Автотипная структура порождает муар в каналах МСИ, потенциально способный повлиять на точность определения средних тоновых значений полей ТШ. Контраст и частота муара изменялись масштабированием ТШ (до форматов А4, А5,

А6), при постоянном размере и разрешении ТШ на МСИ. Это позволило получить двукратное изменение пространственной частоты проекции автотипной структуры на сенсор камеры. Выраженность муара заметно возростала по мере уменьшения формата ТШ. Предполагалось, что одновременно будет снижаться точность определения цветowych координат.

Реконструкция спектров полей ТШ оказалась значительно менее точной по сравнению с ССh. Например, для ТШ формата А6 при калибровке по 24 полям ССh отклонения составили $\Delta E_{\text{средн.}} = 6,99$ и $\Delta E_{\text{макс.}} = 17,30$. При выборе КНП непосредственно из ТШ точность в большинстве случаев возростала, но оставалась невысокой, при этом влияние количества полей в КНП на точность реконструкции СО оказалось заметнее чем изменение формата. Таким образом, муар можно исключить из первоочередных факторов, влияющих на точность реконструкции СО.

С целью выяснения причин недостаточной точности реконструкции СО автотипных объектов, разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение было использовано для представления оценки случайной погрешности реконструкции СО в виде графиков доверительных интервалов, что позволило выделить систематическую часть погрешности реконструкции. Примеры построения доверительных интервалов представлены на рисунке 5.

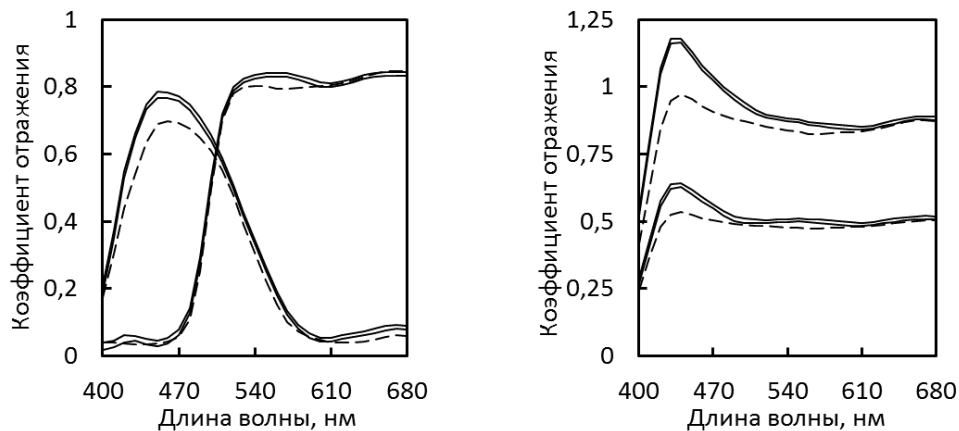


Рисунок 5 – Реконструированные СО ТШ в виде доверительных ($\pm 3\sigma$) интервалов (сплошные линии) и контрольные СО (пунктир)

Из графиков на рисунке 5 следует, что наибольшие искажения наблюдались в коротко- и средневолновой части спектров. Это можно объяснить влиянием второго (после автотипии) принципиального отличия ТШ от ССh — флуоресцентным отбеливателем в составе бумаги. Тогда регистрируемые МИС и контрольные спектров могли быть идентичными только при идентичности спектров осветителей в МИС и спектрофотометре *iPro*, что было технически нереализуемо в проведённых экспериментах. Частичным решением проблемы стала калибровка непосредственно по полям ТШ.

По результатам реконструкции для различных базисов и КНП, наилучшим признано сочетание КНП из 244 полей и базиса из шести ГК ($\Delta E_{\text{средн.}} = 4,5$ и $\Delta E_{\text{макс.}} = 11,21$). Для сглаженного ступенчатого базиса $\Delta E_{\text{средн.}} = 4,52$ и $\Delta E_{\text{макс.}} = 12,89$. Примеры реконструированных спектров приведены на рисунке 6.

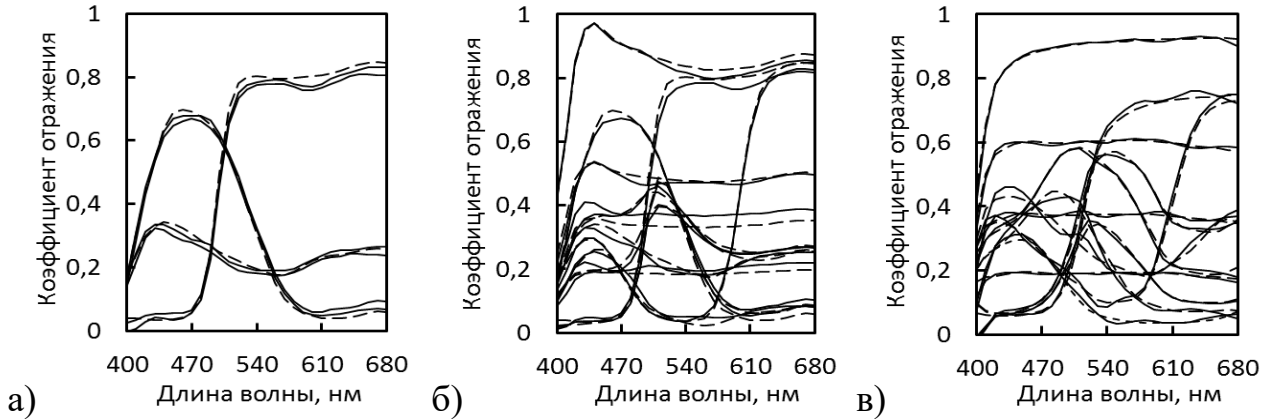


Рисунок 6 – Примеры реконструкции СО (базис из шести ГК). Сплошная линия — реконструированные спектры, пунктир — контрольные: а) ТШ (сплошные линии — доверительный интервал $\pm 3\sigma$), б) ТШ, в) ССh

В заключительной части главы обобщаются экспериментальные результаты, полученные в ходе исследования, приводятся ссылки на работы других авторов, с которыми они согласуются, сформулированы рекомендации по использованию разработанного математического и алгоритмического обеспечения в МИС.

Таким образом, цель работы достигнута — разработано и экспериментально апробировано математическое и алгоритмическое обеспечение реконструкции СО в МИС. Полученные результаты говорят о том, что МИС в состоянии обеспечить контроль допусков по цветовому отклонению, заданных стандартами. Полученные выражения для расчёта стандартного отклонения СО и цветовых координат позволяют выделить систематическую составляющую погрешности и оптимизировать параметры элементов при разработке высокоскоростных промышленных МИС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В процессе диссертационного исследования решены следующие задачи.

1. Проведён анализ проблемы промышленного контроля цвета с помощью МИС, в результате которого обоснована разработка МИС, обеспечивающих спектральный контроль с использованием алгоритмов реконструкции СО, обладающих минимальной вычислительной трудоёмкостью.

2. Разработан алгоритм реконструкции СО с минимально возможным количеством вычислительных операций, в котором реконструкция производится путём

умножения вектора ТЗ из МСИ размерности n на реконструирующую матрицу размерности $(m \times n)$, где n — количество каналов МИС, а m — количество спектральных зон СО. Получены аналитические выражения для расчёта стандартных отклонений СО и цветовых координат XYZ.

Предложен способ линейной аппроксимации СО на основе сглаженных ступенчатых базисов, позволяющий снизить размерность модели формирования данных в МИС без предварительного исследования контролируемой спектральной системы. Точность такой аппроксимации по цветовому отклонению в некоторых случаях сопоставима с методом ГК.

3. Разработана экспериментальная модульная МИС, соответствующая общепринятой линейной модели. Это позволило проверить разработанное математическое и алгоритмическое обеспечение путём реконструкции СО объектов, моделирующих промышленную продукцию.

4. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния автотипной структуры печатных оттисков на точность определения СО и координат цвета в МИС. Установлено, что влияние изменения пространственной частоты автотипной структуры на перечисленные величины незначительно. Анализ результатов проведённой серии экспериментов позволил предположить, что основной причиной систематической погрешности реконструкции СО являлось влияние флуоресцентного отбеливателя в запечатываемом материале.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в:

1. Уточнении базовой модели (1) с учётом явления флуоресценции;
2. Улучшение аппроксимации СО с помощью сглаженных ступенчатых базисов за счёт их оптимизации;
3. Разработка МИС с использованием спектрально-селективного освещения на основе хроматических светоизлучающих диодов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Арапов С.Ю.** Аппроксимация спектров отражения искусственно окрашенных поверхностей методом главных компонент / **С.Ю. Арапов, С.П. Арапова, И.С. Дубинин** // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия: Технические Науки. – 2019. – № 3 (63). – С. 68–80. (1,19 п. л. / 0,80 п. л.).
2. **Арапов С.Ю.** Считывание шкал цветового профилирования процесса печати мультиспектральной фотосъёмкой / **С.Ю. Арапов, И.С. Дубинин, С.П. Арапова,**

М.С. Солодова, А.Г. Тягунов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2017. – № 1. – С. 79–85. (0,78 п. л. / 0,33 п. л.).

3. Арапова С.П. Спектрально-колориметрическое управление светодиодами устройствами / С.П. Арапова, **С.Ю. Арапов**, И.С. Дубинин, М.С. Солодова, А.Г. Тягунов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2016. – № 4. – С. 61–68. (0,92 п. л. / 0,37 п. л.).

4. Arapova S.P. Hybrid Laboratory Light Source for Polygraphy Spectrally Close to Standard D Illuminant / S.P. Arapova, **S.Yu. Arapov**, A.G. Tyagunov // Light & Engineering. – 2016. – Vol. 24, № 2. P. 82–88. (0,81 п. л. / 0,53 п. л.). (Scopus, WoS).

5. Sergeev A.P. Qualimetric Researches of Educational Resources: Standardizing of Light Conditions in the Light Booth / A.P. Sergeev, D.A. Tarasov, **S.Yu. Arapov**, S.P. Arapova // Procedia – Social and Behavioral Sciences : 5th International Conference on New Horizons in Education (INTE 2014), June 25–27. – 2015. – Vol. 174. – P. 1285–1291. (0,81 п. л. / 0,21 п. л.). (WoS).

Свидетельство о регистрации программы:

6. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программный комплекс для синтеза мультиспектральных изображений и реконструкции усреднённых спектров отражения выбранных фрагментов плоских отражающих объектов / **Арапов С.Ю.** — № 2021665856; дата регистрации 04.10.2021; опублик. 04.10.2016 (Российская Федерация).

Другие публикации:

7. Arapova S.P. Examination of the Clarification Effect Under Colorimetric Object Illumination / S.P. Arapova, **S.Yu. Arapov**, D.A. Tarasov, A.P. Sergeev // Advances in Information Technologies, Telecommunication, and Radioelectronics / ed. Shabunin S.N., Syngellakis S. – Springer, 2020. – P. 65–71. (0,81 п. л. / 0,21 п. л.).

8. **Арапов С.Ю.** Линейная аппроксимация спектров отражения автотипных полиграфических оттисков в фиксированных базисах / **С.Ю. Арапов**, С.П. Арапова, Д.В. Ведрук, С.А. Москвичёв // Южно-Сибирский Научный Вестник. – 2019. – № 2 (26). – С. 133–138. (0,69 п. л. / 0,35 п. л.).

9. **Арапов С.Ю.** Учёт пространственной неравномерности освещения при обработке мультиспектральных изображений / **С.Ю. Арапов**, И.С. Дубинин, С.П. Арапова // Сборник статей III Международной научно-пр. конференции «Информация: передача, обработка, восприятие». – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 160–169. (1,06 п. л. / 0,70 п. л.).

10. **Арапов С.Ю.** Компенсация пространственной неравномерности и вариаций мощности импульсного освещения при мультиспектральной съёмке / **С.Ю. Арапов**, И.С. Дубинин, С.П. Арапова // Сборник статей III Международной научно-пр. конференции «Информация: передача, обработка, восприятие». – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 36–45. (1,06 п. л. / 0,70 п. л.).
11. **Арапов С.Ю.** Применение мультиспектральной фотосъёмки для считывания шкал цветового контроля процесса печати / **С.Ю. Арапов**, И.С. Дубинин, С.П. Арапова, М.С. Солодова // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (САИ-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. – С. 17–22. (0,69 п. л. / 0,35 п. л.).
12. **Арапов С.Ю.** Мультиспектральная фоторегистрация кларификационного эффекта при RGB-светодиодном освещении / **С.Ю. Арапов**, И.С. Дубинин, С.П. Арапова, С.А. Москвичёв // Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (САИ-2016): сборник научных трудов по материалам I Международной конференции. — Екатеринбург, 2016. – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2016. – С. 11–16. (0,69 п. л. / 0,35 п. л.).
13. **Арапов С.Ю.** Оценка погрешности реконструкции спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъёмки / **С.Ю. Арапов**, С.П. Арапова, И.С. Дубинин, А.П. Сергеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2015. – № 3. – С. 68–77. (1,16 п. л. / 0,58 п. л.).
14. **Арапов С.Ю.** Оценка применимости лампы Decostar 51 Cool Blue 50W 360 (Osram) в качестве специализированного источника излучения в полиграфии / **С.Ю. Арапов**, С.П. Арапова, Д.А. Тарасов // Светотехника. – 2015. – № 4. – С. 67–68. (0,23 п. л. / 0,15 п. л.).
15. Арапова С.П. Автоматизированный просмотрный комплекс для исследований цветопередачи при RGB-светодиодном освещении / С.П. Арапова, **С.Ю. Арапов**, М.С. Солодова, А.П. Сергеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 6. С. 3–11. (1,04 п. л. / 0,52 п. л.).
16. **Арапов С.Ю.** Восстановление спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъёмки / **С.Ю. Арапов**, И.С. Дубинин, С.П. Арапова, А.П. Сергеев // Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации: материалы международной научно-пр. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 21–33. (1,38 п. л. / 0,69 п. л.).
17. Сыдыхов А.Ш. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъёмки в стационарных зонах изображения / А.Ш. Сыдыхов, **С.Ю. Арапов**, С.П.

Арапова, А.П. Сергеев // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»: сборник докладов. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 179–185. (0,81 п. л. / 0,40 п. л.).

18. Шавкутенко Е.Н. Мультиспектральная фотосъёмка с помощью стандартной цифровой фотокамеры / Е.Н. Шавкутенко, **С.Ю. Арапов**, С.П. Арапова, Д.А. Тарасов // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления»: сборник докладов. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 127–134. (0,92 п. л. / 0,46 п. л.).

19. **Арапов С.Ю.** Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъёмки на основе стандартной цифровой камеры / **С.Ю. Арапов**, С.П. Арапова, А.Г. Тягунов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2014. – № 5. – С. 45–54. (1,16 п. л. / 0,77 п. л.).

20. **Арапов С.Ю.** Моделирование спектров отражения на основе базиса из функций типа интеграла ошибок / **С.Ю. Арапов**, Д.А. Тарасов, А.П. Сергеев, Ю.Н. Колмогоров // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 6. – С. 017–029. (1,38 п. л. / 0,69 п. л.).

21. Тарасов Д.А. Моделирование спектров отражения суперпозицией полиномов / Д.А. Тарасов, **С.Ю. Арапов**, Д.Р. Ямаева, А.Г. Тягунов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 5. – С. 059–066. (0,92 п. л. / 0,46 п. л.).