

На правах рукописи



Грачева Инесса Александровна

Алгоритмы обработки изображений на основе вероятностной гамма-  
нормальной модели

Специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Тула – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук,  
Копылов Андрей Валериевич

**Официальные оппоненты:**

Визильтер Юрий Валентинович,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», начальник подразделения

Рейер Иван Александрович,  
кандидат технических наук, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», научный сотрудник

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), г. Москва

Защита состоится « 11 » февраля 2020 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, 12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 и на сайте [http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Gracheva\\_IA/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Gracheva_IA/)

Автореферат разослан « 20 » декабря 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Соколова  
Марина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Широкий класс современных задач обработки изображений и компьютерного зрения допускает формальную постановку как задачу оценивания параметров соответствующих моделей данных, выбранных, исходя из условий конкретной задачи и априорных предположений о ее природе. В тоже время, в ряде задач оказывается возможным, помимо априорных предположений, использовать для оценки параметров дополнительную информацию, представленную в виде некоторого изображения, которое принято называть управляющим. Например, в задаче уточнения границ изображаемого объекта по грубому описанию (задаче альфа-матирования) в качестве обрабатываемого изображения выступает грубая маска области, в которой расположен объект интереса, результатом обработки является маска, соответствующая внешним контурам объекта, а в роли управляющего изображения используется цветное или полутонное изображение сцены. В задаче оценки карты рассеивания, для последующего удаления тумана на изображении, обрабатываемым изображением является изображение темного канала<sup>1</sup>, результатом обработки – карта рассеивания, а управляющим изображением – исходное цветное изображение с туманом. В задаче тонового отображения изображений с широким динамическим диапазоном (High Dynamic Range, HDR) обрабатывается карта интенсивностей, представленная в логарифмическом масштабе, или, в случае медицинских HDR DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) изображений, изображение, полученное в результате специального оконного преобразования, результат обработки представляет собой изображение со сжатым динамическим диапазоном (Low Dynamic Range, LDR), а управляющее – исходное HDR изображение.

Популярным в современной литературе классом моделей, используемых для решения рассматриваемого класса задач обработки изображений и обладающих свойством переноса структуры (Structure-Transferring Filtering), то есть, позволяющих извлекать дополнительную информацию о структуре данных из управляющего изображения, является сравнительно новый класс фильтров, к которому, в частности, относятся наведенный фильтр (Guided Filter) и объединенный билатеральный фильтр (Joint Bilateral Filter). Основная идея объединенной билатеральной и наведенной фильтрации заключается в том, что результат фильтрации и обрабатываемое изображение связаны линейной локальной моделью, коэффициенты которой оцениваются по управляющему изображению. Недостатком данного класса моделей является наличие артефактов.

Методы машинного обучения с извлечением дополнительной информации из данных также могут применяться для решения класса задач обработки изображений, популярность которых растет в связи с развитием нейронных сетей. Однако данные методы базируются на постановке задачи как задаче распознавания образов с учителем, в рамках которой требуется использование большого набора исходных обучающих данных, что не всегда возможно для некоторых

---

<sup>1</sup> Single image haze removal using dark channel prior / He K. [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 33 (12), 2011. P. 2341–2353.

задач обработки изображений. В частности, в задаче удаления тумана достаточно тяжело собрать большую базу парных изображений – с туманом и без – в качестве обучающей выборки. В этом случае для проведения экспериментального исследования обычно используют базы синтетических изображений.

Еще одним классом моделей, используемых для решения рассматриваемого класса задач обработки изображений, являются условные случайные поля (Conditional Random Fields) и, в частности, марковские случайные поля (Markov Random Fields), которые позволяют относительно просто учитывать структуру, извлеченную из управляющего массива, путем соответствующего задания вероятностных связей между элементами. Для этого оценивать параметры марковской модели необходимо не только по обрабатываемому, но и по управляющему изображению. Ключевым недостатком данного класса моделей является высокая вычислительная сложность.

Одним из средств борьбы с данным ограничением является использование нестационарной гамма-нормальной модели, предложенной в работе (Красоткина О., Копылов А., Моттль В., Марков М.) для решения задач оценивания временных рядов в экономике. Данная модель основана на байесовском подходе, в рамках которого исходные данные и результат обработки представляются в виде наблюдаемой и скрытой (марковской) компоненты двухкомпонентного случайного процесса. Вероятностные свойства данной модели полностью описываются нормальным и гамма распределениями. Данный подход имеет линейную вычислительную сложность относительно размера исходных данных, но его применение для обработки изображений с сохранением структуры требует значительной доработки.

Таким образом, создание новых методов, алгоритмов и программ на основе марковских моделей случайных полей, обладающих свойствами переноса структуры для решения задач обработки изображений, отличающихся как малой вычислительной сложностью, так и высоким качеством обработки, является актуальной темой диссертационного исследования.

**Цели и задачи.** Целью данного диссертационного исследования является разработка в рамках байесовского подхода метода, алгоритмов и комплекса программ на основе вероятностной гамма-нормальной модели изображения со свойствами переноса структуры для решения некоторых задач обработки изображений.

Задачами исследования являются:

1. Разработать алгоритмы решения ряда задач обработки изображений, таких как задача уточнения границ изображаемого объекта по грубому описанию (альфа-матирование), задача удаления тумана на изображении, задача тонового отображения HDR изображений, задача сжатия динамического диапазона медицинских HDR DICOM изображений. Для этого необходимо:

1.1. Расширить существующую вероятностную гамма-нормальную модель на случай изображений.

1.2. Разработать метод согласованного оценивания параметров вероятностной гамма-нормальной модели с сохранением заданной структуры зависимостей между элементами изображения.

1.3. Разработать модифицированный способ аппроксимации графа смежности элементов изображения, позволяющий учитывать диагональные связи между элементами изображения для получения более высокого качества обработки.

2. Разработать комплекс программ для решения рассматриваемых прикладных задач обработки изображений на основе разработанных алгоритмов с целью проведения экспериментального исследования по сравнению качества обработки и времени работы предлагаемых алгоритмов с существующими аналогами.

**Научная новизна.** Научная новизна данного диссертационного исследования заключается в следующих пунктах:

1. *Вероятностная гамма-нормальная модель изображения.* В данном диссертационном исследовании рассматриваемый класс задач обработки изображений в рамках байесовского подхода предлагается решать с использованием вероятностной гамма-нормальной модели двухкомпонентного случайного поля. Неизвестные значения параметров модельных распределений подлежат оцениванию вместе со значениями скрытых переменных, как множество независимых неотрицательных случайных величин, обратные значения которых априори распределены по гамма-закону. Математическое ожидание гамма-распределения степени точности (величина, обратная дисперсии) играет роль заданного общего параметра гладкости модели, а его дисперсия является дополнительным параметром, названным фактором нерегулярности.

2. *Метод обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры.* Данный метод предлагает оценивать факторы нерегулярности по некоторому известному для каждой задачи управляющему изображению. Извлеченные данные будут соответствовать информации о структуре взаимосвязей элементов изображения. Таким образом, оценка параметров модели производится на основе управляющего и обрабатываемого изображений так, что степень вероятностной связи элементов модели обрабатываемого изображения оказывается согласованной со структурой управляющего изображения.

Предлагаемый в данном диссертационном исследовании критерий при фиксированных параметрах скрытого поля и факторов нерегулярности представляет собой квадратичную парно-сепарабельную функцию, для оптимизации которой может быть применена эффективная в вычислительном плане параметрическая процедура на основе фильтрации-интерполяции Калмана с заменой решетчатого графа смежности элементов изображения совокупностью ациклических графов, имеющая линейную вычислительную сложность относительно количества элементов обрабатываемого изображения.

3. *Модифицированный способ аппроксимации графа смежности элементов изображения.* При использовании парно-сепарабельной оптимизации замена решетчатого графа смежности элементов изображения совокупностью ациклических графов, представляющих собой вертикальные и горизонтальные деревья, не позволяет учитывать диагональные связи между элементами. Это в свою очередь ведет к ухудшению качества обработки, что является критическим тре-

бованием, например, в задаче альфа-матирования, где необходимо восстановить тонкие структуры. Для преодоления данной проблемы предлагается модифицированный способ аппроксимации графа смежности элементов изображения последовательностью диагональных деревьев специального вида.

*4. Алгоритмы решения рассматриваемых задач обработки изображений.* На основе разработанных в данном диссертационном исследовании модели и метода предлагаются четыре быстродействующих алгоритма, которые решают рассматриваемые задачи обработки изображений. Все предлагаемые алгоритмы реализуются в математическом пакете MATLAB и объединяются в комплекс программ обработки изображений.

**Теоретическая и практическая значимость.** В данном диссертационном исследовании предлагается новый метод решения целого класса задач обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры. Были разработаны новые быстродействующие алгоритмы решения четырех прикладных задач и комплекс программ на основе предлагаемого метода. Результаты работы были использованы при выполнении научно-исследовательской работы по гранту РФФИ 16-07-01039 «Методы и алгоритмы обработки изображений и других видов упорядоченных данных на основе обучаемых марковских моделей».

При разработке новых методов и алгоритмов обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры был произведен анализ методов и алгоритмов, занимающие ведущие места по точности и быстродействию среди своего класса. В рамках диссертационного исследования все разработанные алгоритмы были реализованы в виде комплекса программных приложений на базе математического пакета MATLAB, по каждому алгоритму проведено теоретическое и экспериментальное сравнение с существующими методами и алгоритмами решения рассматриваемых задач. Области применения комплекса программ могут являться: системы компьютерного зрения, системы дорожного видео наблюдения, системы обработки и анализа медицинских изображений, теле-медицина, приложения по обработке изображений.

Разработанные в данном диссертационном исследовании метод и алгоритмы прошли апробацию в ходе региональных, всероссийских и международных конференций. Результаты работы использованы Московским исследовательским центром ООО «Техкомпания Хуавей», а также в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» на кафедре Информационной безопасности, что подтверждается соответствующими актами.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационного исследования использовались методы математического моделирования, численные методы решения задач, методы интеллектуального анализа данных, распознавания образов, компьютерного зрения и компьютерной графики.

Общей теоретической основой диссертационного исследования служит вероятностная гамма-нормальная модель изображения как относительно простое и достаточно удобное средство для формального выражения априорной информации, связанной с решаемыми задачами обработки изображений. Основой

предлагаемого метода обработки изображений служит методология представления исходного изображения в виде управляющего и обрабатываемого изображений, на основе которой часть параметров модели оцениваются по управляющему изображению, а часть по обрабатываемому, при этом полученные оценки оказываются согласованы между собой.

При решении рассматриваемых задач применялся математический пакет MATLAB, поскольку большинство аналогичных алгоритмов реализованы именно в этой системе.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Новая вероятностная гамма-нормальная модель изображения.
  2. Метод согласованного оценивания параметров предложенной модели с возможностью учета дополнительной информации о структуре обрабатываемого изображения.
  3. Параметрическая процедура парно-сепарабельной оптимизации целевой функции на основе модифицированного способа аппроксимации графа смежности элементов изображения, позволяющая учитывать диагональные связи между элементами изображения.
  4. Быстродействующие алгоритмы решения прикладных задач обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры:
    - 4.1 алгоритм удаления тумана на изображениях,
    - 4.2 алгоритм тонового отображения HDR изображений,
    - 4.3 алгоритм уточнения границ изображаемого объекта по грубому описанию (альфа-матирование),
    - 4.4 алгоритм сжатия динамического диапазона медицинских HDR DICOM изображений.
  5. Комплекс программ обработки изображений на основе вероятностной гамма-анормальной модели со свойствами переноса структуры.
- Степень достоверности и апробация результатов.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и международных стажировках в 2014 – 2019 гг.

#### Конференции:

«Интеллектуализация обработки информации»: 10-я международная конференция (Греция, о. Крит, 2014 г.), 11-я и 12-ая международные конференции (Испания, г. Барселона, 2016 г., Италия, г. Гаэта, 2018 г.);

«Математические методы распознавания образов»: 17-я и 18-ая Всероссийские конференции с международным участием (г. Светлогорск, Калининградская область, 2015 г., г. Таганрог, 2017 г.);

«Анализ изображений, сетей и текстов – АИСТ (“Analysis of Images Social Networks and Texts” – AIST)»: 5-ая и 6-ая международные конференции (Россия, г. Екатеринбург, 2016, 2017 гг.);

«Методы фотограмметрии и машинного зрения для анализа видеопоследовательностей в биометрических и медицинских приложениях» (ISPRS WG II/5 and WG II/10 International Workshop “Photogrammetric and computer vision tech-

niques for video surveillance, biometrics and biomedicine” – PSBB19): международная научно-техническая конференция (Россия, г. Москва, 2019 г.);

«Современные проблемы математики, механики и информатики»: региональная конференция (г. Тула, ТулГУ, 2015, 2017, 2018 гг.);

«Телекоммуникации, инновации и высокие технологии»: 25-ая юбилейная Азербайджанская международная выставка (г. Баку, Азербайджан, 2019г.).

#### Стажировки:

Международная летняя школа по компьютерному зрению (International Computer Vision Summer School – ICVSS, о. Сицилия, Италия, 2016 г.).

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертации результаты исследований получены лично автором под руководством научного руководителя. В публикациях, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежат основные результаты, либо результаты исследований соискателя используются как составная часть более общего метода.

**Публикации.** По теме диссертации были опубликованы 20 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, 4 статьи в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus, 1 статья и 8 публикаций тезисов докладов в сборниках трудов международных, всероссийских и региональных конференций. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 148 наименований. Общий объем диссертации составляет 131 страница машинописного текста, содержит 39 рисунков, 7 таблиц, 2 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность разработки методов и алгоритмов обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, выделены основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также приведены методология и методы исследования.

В **первой главе** приводится постановка задачи, описывается современное состояние соответствующей области научных исследований, рассматриваются базовые модели, а также некоторые современные методы и алгоритмы, которые решают рассматриваемые в рамках данного диссертационного исследования задачи обработки изображений, приводятся достоинства и недостатки этих методов и алгоритмов.

Во **второй главе** приводится описание математического аппарата обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели, при этом результат обработки может быть представлен как результат преобразования исходного изображения  $Y = (y_t, t \in T)$ , определенного на дискретном множестве



$T = \{\mathbf{t} = (t_1, t_2) : t_1 = 1, \dots, N_1, t_2 = 1, \dots, N_2\}$ , во вторичный массив данных  $X = (x_t, \mathbf{t} \in T)$ , который определен на том же множестве аргументов и принимает значения из некоторого подходящего множества, в зависимости от решаемой задачи. В рамках используемого в диссертационном исследовании байесовского подхода к решению задач обработки изображений анализируемое изображение и результат обработки рассматриваются как наблюдаемая  $Y = (y_t, \mathbf{t} \in T)$  и скрытая компоненты  $X = (x_t, \mathbf{t} \in T)$  двухкомпонентного случайного поля  $(X, Y)$ .

Вероятностные свойства поля  $(X, Y)$  полностью определяются совместной условной плотностью вероятности  $\Phi(Y | X, \delta)$ , которая имеет вид гауссовского распределения:

$$\Phi(Y | X, \delta) = \prod_{\mathbf{t} \in T} \sqrt{\frac{\delta_{\mathbf{t}}}{\pi}} e^{-\delta_{\mathbf{t}}(y_t - x_t)^2},$$

где  $\delta = (2\delta_{\mathbf{t}}, \mathbf{t} \in T)$  - степень точности.

А также совместным априорным распределением  $\Psi(X | \Lambda)$ , имеющим вид распределения Гиббса:

$$\Psi(X | \Lambda) = \frac{1}{Z} e^{-\sum_{(\mathbf{t}, \mathbf{t}') \in G} \lambda_{\mathbf{t}} (x_{\mathbf{t}} - x_{\mathbf{t}'})^2},$$

где  $\Lambda = (\lambda_{\mathbf{t}}, \mathbf{t} \in T)$  – скрытое поле факторов нерегулярности, элементами которого являются обратные значения степени точности;  $Z$  – нормализующая константа;  $G$  – граф соседства элементов изображения, имеющий вид решетки.

Элементы скрытого поля факторов нерегулярности  $\Lambda = (\lambda_{\mathbf{t}}, \mathbf{t} \in T)$  априори независимы и одинаково гамма-распределены  $\gamma(\lambda_{\mathbf{t}} | \mu, \eta) \propto (\lambda_{\mathbf{t}})^{\mu-1} e^{-\eta \lambda_{\mathbf{t}}}$  на положительной полуоси  $\lambda_{\mathbf{t}} \geq 0$ . Здесь  $\mu$  и  $\eta$  - структурные параметры, которые задают степень сглаживания изображения и избирательность соответственно. Математическое ожидание и дисперсия гамма-распределения вычисляются как отношения  $\mu / \eta$  и  $\mu / \eta^2$  соответственно.

Априорное распределение плотности  $G(\Lambda | \mu, \eta)$  скрытого поля факторов нерегулярности  $\Lambda = (\lambda_{\mathbf{t}}, \mathbf{t} \in T)$  имеет вид:

$$G(\Lambda | \mu, \eta) \propto \left( \prod_{\mathbf{t} \in T} \lambda_{\mathbf{t}} \right)^{\mu-1} e^{-\eta \sum_{\mathbf{t} \in T} \lambda_{\mathbf{t}}} = \exp \left[ (\mu - 1) \sum_{\mathbf{t} \in T} \ln \lambda_{\mathbf{t}} - \eta \sum_{\mathbf{t} \in T} \lambda_{\mathbf{t}} \right].$$

Байесовская оценка поля  $(X, \Lambda)$  сводится к решению следующей оптимизационной задачи:

$$(\hat{X}, \hat{\Lambda} | Y, \delta, \mu, \eta) = \arg \min_{X, \Lambda} J(X, \Lambda | Y, \delta, \mu, \eta),$$

$$J(X, \Lambda | Y, \delta, \mu, \eta) = \sum_{\mathbf{t} \in T} \delta_{\mathbf{t}} (y_{\mathbf{t}} - x_{\mathbf{t}})^2 + \sum_{(\mathbf{t}, \mathbf{t}') \in G} \lambda_{\mathbf{t}} (x_{\mathbf{t}} - x_{\mathbf{t}'})^2 + \eta \sum_{\mathbf{t} \in T} \lambda_{\mathbf{t}} + (1 - \mu\eta) \sum_{\mathbf{t} \in T} \ln \lambda_{\mathbf{t}},$$

Достоинством предлагаемой модели является простота ее настройки, как как она зависит только от двух параметров –  $\mu$  и  $\eta$ .

В **третьей главе** приводится описание нового метода обработки изображений на основе разработанной вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры. Также, в третьей главе приводится описание

модифицированного способа аппроксимации графа смежности элементов изображения, позволяющего учитывать диагональные связи между элементами изображения.

В современной литературе для решения рассматриваемого класса задач используются фильтры со свойствами переноса структуры, основная идея которых заключается в фильтрации обрабатываемого изображения с сохранением структуры, извлеченной из так называемого управляющего изображения. Прямое применение разработанной в главе 2 вероятностной гамма-нормальной модели не дает требуемого качества обработки по сравнению с существующими аналогами, однако, она может быть расширена и наделена свойством учета дополнительной информации о структуре данных.

Общая схема метода обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры представлена на рисунке 1. Результирующее изображение  $X = (x_t, t \in T)$  получается путем уточнения некоторого обрабатываемого изображения  $Y = (y_t, t \in T)$ , специфичного для каждой конкретной задачи, с использованием структуры, извлеченной из управляющего изображения  $X^g = (x_t^g, t \in T)$ .

При фиксированных значениях скрытого поля  $X = (x_t, t \in T)$  в общем байесовском критерии получаем оценку факторов нерегулярности  $\Lambda = (\lambda_t, t \in T)$

$$\hat{\lambda}_t = \frac{\mu\eta - 1}{\sum_{(t', t'') \in G} (x_t - x_{t'})^2 + \eta}, t \in T$$

Подставляя полученные оценки факторов нерегулярности  $\Lambda = (\lambda_t, t \in T)$  в целевую функцию, находим оценки поля  $X = (x_t, t \in T)$

$$\hat{X} = \arg \min_X J(X, \Lambda | \delta, \mu, \eta) = \arg \min_X \left[ \sum_{t \in T} \delta_t (y_t - x_t)^2 + \sum_{(t', t'') \in G} \lambda_{t'} (x_{t'} - x_{t''})^2 \right].$$

Такая оптимизация имеет линейную вычислительную сложность по отношению к размеру исходного изображения.

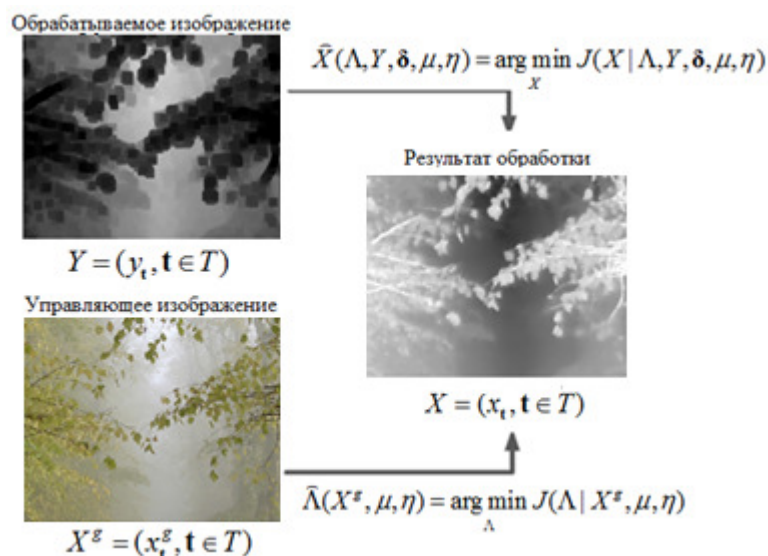


Рисунок 1 - Общая схема метода оценивания параметров вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры

В рамках данного подхода изображение представляется в виде графа смежности элементов изображения, как показано на рисунке 2. Для графов общего вида (рис. 2а) задача оценивания параметров модели является задачей класса NP. Чтобы избежать этого препятствия в работе (Моттль В., Блинов А., Копылов А., Костин А.), для нахождения значений скрытого поля, изображение представлялось в виде последовательности горизонтальных деревьев (рис. 2б), вертикальные связи в которых сохранялись только в одном столбце, и вертикальных деревьев (рис. 2в), горизонтальные связи в которых сохранялись только в одной строке. Если считать, что вершины вертикального и горизонтального деревьев соответствующие одному и тому же элементу изображения, соединены ребром с бесконечным штрафом на разницу значений скрытых переменных в вершинах данного ребра, то с каждым элементом изображения оказывается связан отдельный граф, учитывающий как вертикальные, так и горизонтальные связи (рис. 2г).

Однако такая процедура не позволяет учитывать диагональные связи между элементами изображения, что является критичным в таких задачах, как, например, задача альфа-матирования. Для преодоления этой проблемы и повышения качества восстановления был предложен модифицированный способ аппроксимации графа смежности элементов изображения, который предлагает учитывать диагональные связи между элементами изображения за счет использования леводиagonalных графов строк (рис. 2д) и праводиagonalных графов столбцов (рис. 2е).

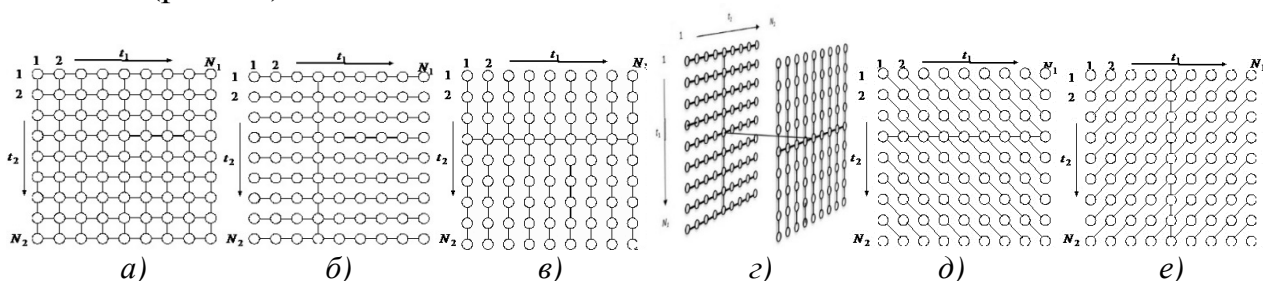


Рисунок 2 - Графы соседства элементов изображения: а) решетчатый граф смежности; б) горизонтальный граф; в) вертикальный граф; г) комбинация значений горизонтального и вертикального дерева; д) леводиagonalный граф строк; е) праводиagonalный граф столбцов

Процедура, использующая леводиagonalные и праводиagonalные деревья, позволяет учитывать, как горизонтальные и вертикальные связи между элементами, так и диагональные связи. Вычислительная сложность алгоритма при этом остается линейной относительно размера исходного изображения.

Полный алгоритм разработанного метода обработки изображений со свойствами переноса структуры на основе вероятностной гамма-нормальной модели приведен в тексте диссертации.

В четвертой главе рассматриваются особенности реализации алгоритмов обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры.

Так, в задаче оценивания карты рассеивания для последующего удаления тумана на изображении роль управляющего изображения  $X^s = (x_t^s, t \in T)$  играет изображение с туманом, а в роли обрабатываемого изображения  $Y = (y_t, t \in T)$  выступает изображение темного канала, которое представляет собой изображение с минимальными значениями интенсивностей среди трех цветовых каналов R, G, B на управляющем изображении. Результатом применения разработанного метода на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры является карта рассеивания  $X = (x_t, t \in T)$ , которая затем, совместно с управляющим изображением  $X^s = (x_t^s, t \in T)$  и значением атмосферного света (пиксель управляющего изображения с самым высоким значением интенсивности в темном канале), используются для получения результирующего изображения без тумана.

В задаче уточнения границ изображаемого объекта по грубому описанию (задача альфа-матирования) в роли управляющего изображения  $X^s = (x_t^s, t \in T)$  выступает изображение сцены, а в роли обрабатываемого  $Y = (y_t, t \in T)$  - маска объекта управляющего изображения, полученная с помощью грубой сегментации. Результат обработки  $X = (x_t, t \in T)$  представляет собой преобразование обрабатываемого изображения с помощью метода на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры, извлеченной из управляющего изображения, и модифицированного способа аппроксимации графа смежности элементов изображения, позволяющего учитывать диагональные связи между элементами изображения.

В задаче тонового отображения HDR изображений сначала управляющее HDR изображение разделяется на базовый и детальный слои. Для получения базового слоя используется метод на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры. В роли управляющего изображения  $X^s = (x_t^s, t \in T)$  здесь выступает HDR изображение, а в роли обрабатываемого  $Y = (y_t, t \in T)$  - карта интенсивностей HDR изображения, представленная в логарифмическом масштабе. Вычитание базового слоя из логарифмического дает детальный слой. После этого слабоконтрастный базовый слой и детальный слой объединяются с помощью оператора отображения тонов для получения карты тонов. И, наконец, производится обратное преобразование интенсивностей карты тонов для получения результирующего LDR изображения.

Задача сжатия динамического диапазона медицинских HDR DICOM изображений практически ничем не отличается от задачи тонового отображения HDR изображений. Отличие заключается в том, что в качестве обрабатываемого изображения используется изображение, полученное с помощью оконного преобразования из управляющего изображения. Карта тонов, в этом случае, является результирующим изображением со сжатым динамическим диапазоном.

Также в четвертой главе приведено описание программного комплекса обработки изображений для решения рассматриваемых задач обработки изображений на основе разработанных алгоритмов. Программный комплекс реализован в математическом пакете MATLAB в виде отдельных программ.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры. Экспериментальные исследования разработанных алгоритмов проводились с использованием стандартных методов оценивания качества изображений, таких как модифицированный критерий пикового отношения сигнала к шуму (Peak-Signal-Noise Ratio, PSNR), среднеквадратическая ошибка (Mean Square Error, MSE), средняя абсолютная ошибка (Mean absolute error, MAE), индекс структурного сходства (Structure Similarity, SSIM). Также в качестве оценки качества полученных результатов использовалась автоматическая оценка качества изображений NIMA (Neural Image Assessment), основанная на трех архитектурах нейронных сетей. Сравнение получившихся результатов с результатами существующих методов представлены на рисунке 3.

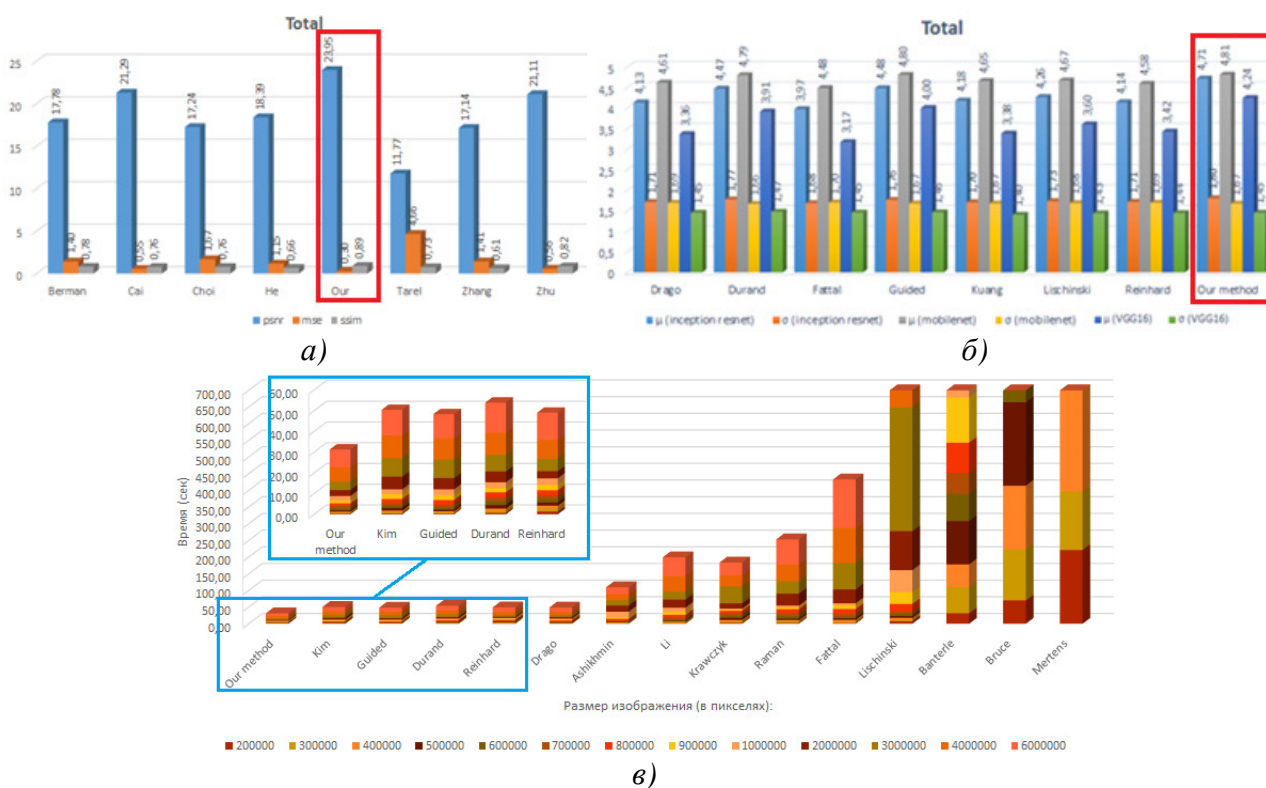


Рисунок 3 – Результаты экспериментального исследования по сравнению:  
 а) качества обработки алгоритмов удаления тумана на базе изображений HSTS;  
 б) качества обработки алгоритмов тонового отображения HDR изображений на базе изображений Anywhere Software; в) времени работы алгоритмов в зависимости от размера исходного изображения.

Методы и алгоритмы обработки изображений, разработанные в ходе диссертационного исследования, характеризуются значительной степенью новизны. Результаты работы разработанных алгоритмов обработки изображений, полученные в ходе экспериментального исследования, показали высокий уровень как по качеству обработки, так и по времени работы алгоритмов, который соответствует и, в некоторых случаях, превосходит по показателям лидирующие алгоритмы в данной области.

В заключении дана общая характеристика результатов работы.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе исследования получены следующие основные теоретические и практические результаты:

1. Систематизированы знания о современных методах и алгоритмах обработки изображений, методах оценивания качества результата обработки.

2. Расширена существующая вероятностная гамма-нормальная модель данных на случай изображения.

3. Разработаны и реализованы: метод обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели изображения со свойствами переноса структуры; модифицированный способ аппроксимации графа смежности элементов изображения, позволяющий учитывать диагональные связи между элементами.

4. Разработаны и реализованы алгоритмы обработки изображений на основе вероятностной гамма-нормальной модели со свойством переноса структуры, в частности, алгоритм удаления тумана на изображении, алгоритм уточнения границ изображаемого объекта по грубому описанию (альфа-матирование с использованием модифицированного способа аппроксимации графа смежности элементов изображения, алгоритм тонового отображения HDR изображений, алгоритм сжатия динамического диапазона медицинских HDR DICOM изображений.

5. Разработан и реализован комплекс программ обработки изображений на основе разработанных алгоритмов в математическом пакете MATLAB.

6. Проведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов обработки изображений; вычислены количественные оценки качества изображений (PSNR, MSE, MAE, SSIM, NIMA), полученных с помощью разработанных алгоритмов; произведено сравнение полученных оценок качества и времени работы алгоритмов с результатами современных методов обработки изображений.

Все полученные результаты прошли апробацию на научных и научно-технических всероссийских и международных конференциях с 2014 по 2019 гг.

Предложенные алгоритмы реализованы в виде отдельных программ в математическом пакете MATLAB 2015b, каждая из которых решает одну из рассмотренных задач обработки изображений. Для 3-х программ были получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** В рамках диссертационного исследования был частично показан потенциал использования марковских моделей при решении некоторых из рассматриваемого класса задач обработки изображений. Экспериментальные результаты показывают сопоставимый и даже превосходящий отечественные и мировые аналоги уровень по качеству обработки и времени работы алгоритмов, что делает возможным дальнейшие исследования и использование вероятностной гамма-нормальной модели со свойствами переноса структуры для решения других задач обработки изображений.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В 20-ТИ  
ПЕЧАТНЫХ РАБОТАХ:**

1. *Грачева И.А., Копылов А.В., Красоткина О.В.* Адаптивная процедура обобщенного сглаживания изображений на основе статистического подхода // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11, Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 390-401.
2. *Копылов А.В., Середин О.С., Кушнир О.А., Грачева И.А., Ларин А.О.* Устойчивое детектирование ладони на изображениях на основе комбинирования информации о цвете и форме // Известия ТулГУ. Технические науки, Вып.11, Ч.1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 24-39.
3. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Алгоритм передачи структуры объектов на изображении на основе модифицированного способа аппроксимации графа смежности // Известия ТулГУ. Технические науки, Вып.10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 30-39.
4. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Алгоритм сжатия динамического диапазона HDR а основе фильтрации с сохранением структуры // Известия ТулГУ. Технические науки, Вып.10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 83-93.
5. *Gracheva I., Kopylov A., Krasotkina O.* Fast global image denoising algorithm on the basis of nonstationary gamma-normal statistical model // Analysis of Images, Social Networks and Texts. Fourth International Conference, AIST 2015, Yekaterinburg, Russia, April 9-11, 2015. Communications in Computer and Information Science, Vol. 542, Springer, 2015. P. 71-82.
6. *Gracheva I., Kopylov A.* Image processing algorithms with structure-transferring properties on the basis of gamma-normal model // Analysis of Images, Social Networks and Texts. Fourth International Conference, AIST 2016, Yekaterinburg, Russia, April 7-9, 2016. Communications in Computer and Information Science, Vol. 542, Springer, 2016. P. 66-77.
7. *Kopylov A., Seredin O., Kushnir O., Gracheva I., Larin A.* Background-Invariant Robust Hand Detection Based on Probabilistic One-Class Color Segmentation and Skeleton Matching // Proceed. of the 7th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (ICPRAM 2018), 2018. P. 503-510.
8. *Gracheva, I. A. and Kopylov, A. V.* Tone Compression Algorithm for High Dynamic Range Medical Images // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W12, 2019. P. 87-95.
9. *Грачева И.А., Копылов А.В., Красоткина О.В.* Адаптивная процедура обобщенного сглаживания изображений на основе статистического подхода // Интеллектуализация обработки информации: 10-я Международная конф., Греция: Тезисы докладов.–М.: Торус-Пресс, 2014. С. 104-105.
10. *Грачева И. А., Копылов А. В.* Быстрые алгоритмы обработки изображений на основе гамма-нормальной модели скрытого поля // Машинное обучение и анализ данных. Т. 1, № 12. М.: Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2015. С. 1677-1685.
11. *Грачева И.А.* Алгоритм удаления тумана с изображений // Современные проблемы математики, механики, информатики: материалылы регион. науч. студ. конф.–Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 129-132.

12. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Быстрые алгоритмы обработки изображений на основе нестационарной гамма-нормальной модели // Математические методы распознавания образов: 17-я Всероссийская конф., г. Светлогорск: Тезисы докладов.—М.: Торус Пресс, 2015. С. 122-123.
13. *Копылов А.В., Середин О.С., Кушнир О.А., Грачева И.А., Ларин А.О.* Метод детектирования кисти руки на основе одноклассового классификатора и скелетных графов // Интеллектуализация обработки информации: 11-ая Международная конф., Испания: Тезисы докладов.—М.: Торус-Пресс, 2016. С.102-103.
14. *Грачева И.А.* Передача структуры объектов на изображении методом диагональной древовидной аппроксимации графа смежности элементов изображения // Современные проблемы математики, механики и информатики: материалы регион. науч. студ. конф.—Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С.160-164.
15. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Алгоритм обработки изображений на основе диагональной аппроксимации графа смежности элементов изображения // Математические методы распознавания образов: 18-я Всероссийская конф., г. Таганрог: Тезисы докладов.—М.: Торус-Пресс, 2017. С.80-81.
16. *Грачева И.А.* Быстрый алгоритм альфа-матирования изображений // Современные проблемы математики, механики и информатики: материалы регион. науч. студ. конф.—Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С.121-123.
17. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Алгоритм сжатия динамического диапазона HDR изображений на основе фильтрации с сохранением структуры // Интеллектуализация обработки информации: 12-ая Международная конф. Италия: Тезисы докладов.—М.: Торус-Пресс, 2018. С.102-103.
18. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Программа тонового отображения изображений с высоким динамическим диапазоном на основе нестационарной гамма-нормальной модели // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618516, 02.07.2019.
19. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Программа альфа-матирования изображений на основе модифицированного способа аппроксимации графа смежности // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618517, 02.07.2019.
20. *Грачева И.А., Копылов А.В.* Программа удаления тумана на изображениях на основе нестационарной гамма-нормальной модели // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019618688, 03.07.2019.

Подписано в печать --.--.2019.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 020А.

Тульский государственный университет 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ 300012, г. Тула, пр. Ленина, 97, а