

На правах рукописи



Сурин Владимир Анатольевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ  
КОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО  
МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ МОДУЛЕЙ

1.2.2. Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Челябинск – 2023

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Тырсин Александр Николаевич

Официальные оппоненты: Гергет Ольга Михайловна,  
доктор технических наук, профессор  
отделения информационных технологий  
Инженерной школы информационных  
технологий и робототехники ФГАОУ  
ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»

Шлеймович Михаил Петрович,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой  
автоматизированных систем обработки  
информации и управления, ФГБОУ ВО  
«Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»

Защита состоится «29» сентября 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.437.05 на базе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» и на сайте  
<https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243705-d-21229814/surin-vladimir-anatolevich>

Автореферат разослан «    » июля 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, профессор



Н.А. Манакова

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Формирование цифрового изображения производится с помощью цифровой фото- и видеотехники. Такая техника является измерительным оборудованием и имеет погрешности при измерении. В результате полученное цифровое изображение является суммой полезного сигнала и шума. Математически цифровое изображение представляет собой двумерную дискретную последовательность  $y_{ij}$ , которая состоит из суммы исходного незашумленного изображения  $f_{ij}$  и шумовой составляющей  $\eta_{ij}$ :  $y_{ij} = f_{ij} + \eta_{ij}$ . Повышение качества цифрового изображения – одна из важнейших задач цифровой обработки изображений. Ее решают, прежде всего, для улучшения визуального восприятия цифрового изображения, а также для последующего анализа отфильтрованных изображений. При этом сохранение границ контрастных объектов является важным фактом при последующем использовании многих алгоритмов обработки изображений. Задача анализа изображения возникает во многих областях науки, таких как компьютерное зрение, медицина, аэрофотосъемка и других. Зачастую такие задачи не могут быть корректно решены при обработке зашумленных изображений, например, при сжатии и кодировании изображений, повышении контраста и резкости.

В последнее время наблюдается повышение интереса к подавлению шумов в контрастных изображениях. В основном это связано с повышением плотности размещения светочувствительных сенсоров. Повышение разрешения при тех же или меньших физических размерах таких сенсоров приводит к повышению уровня шума. Однако при разработке методов подавления шума в цифровых контрастных изображениях имеется ряд проблем. Во-первых, часто используется модель зашумления в виде белого гауссовского шума с постоянной шумовой составляющей на всем изображении, модель импульсного шума либо их комбинации без проведения исследования распределения шума в реальном цифровом изображении. Во-вторых, шум и последующее сглаживание сильно влияют на контрастную границу объектов в изображении, размывая ее. В-третьих, не всегда уделяется внимание восстановлению контрастных границ в изображении. В-четвертых, разрабатываемые методы нередко настраиваются для работы с конкретными изображениями либо настройка проходит в «ручном» режиме. При этом не учитываются характеристики изображений, такие как уровень шума в изображении или величина контрастного перепада.

Комплексное решение обозначенных проблем может привести к улучшению результатов при подавлении шума на границах контрастных объектов. При разработке алгоритма подавления шума, представленного в работе, эти проблемы учитывались и были решены.

### **Степень разработанности темы**

Проблема подавления шума и цифровой фильтрации изображений стала активно изучаться в 60-х годах прошлого века, а с массовым внедрением цифровой техники становится все актуальнее. Значительный

вклад в разработку теории и алгоритмов цифровой обработки изображений внесли такие авторы как Б.В. Анисимов, Р. Вудс, Р. Гонсалес, Г. Дэ Ханн, А.А. Ланнэ, А.В. Оппенгейм, У. Прэтт, Г. Старк, Д.У. Тьюки, Я.А. Фурман, Т.С. Хуанг, М.И. Шлезингер, Б. Яне, В.В. Яншин, Л.П. Ярославский и др.

Ранее в основном использовались линейные методы фильтрации цифровых изображений. Это связано с простотой интерпретации и реализации таких методов. Однако Л.П. Ярославский указывает, что у линейных фильтров есть ряд существенных недостатков и они хорошо работают только в том случае, когда сигнал и аддитивная помеха независимы и имеют нормальное распределение.

Наряду с применением линейных методов предлагались различные нелинейные методы фильтрации, такие как медианная фильтрация, которая была предложена Д.У. Тьюки в 1961 году для анализа временных рядов. Она дает ряд преимуществ при подавлении шумов в цифровых изображениях, но также имеет и серьезные недостатки. Дальнейшее развитие медианной фильтрации привело к появлению различных модификаций, предложенных Е. Абреу, И. Питасом, Р. Чаном, С.С. Бухтояровым, которые в ряде случаев оказываются эффективными, но они недостаточно формализованы, и обычно требуют наличия дополнительной априорной информации.

С увеличением вычислительных мощностей ЭВМ нелинейная фильтрация стала использоваться все чаще. В области обработки изображения часто применяемыми классами фильтров, основанными на нелинейной фильтрации, стали: гомоморфные фильтры, морфологические фильтры, полиномиальные фильтры, фильтры на основе ранговой статистики, фильтры на основе нейронных сетей. В этой области стоит отметить работы таких авторов как И.В. Апальков, Д. Даджион, Ю. Лой, В.А. Волохов, А.В. Оппенгейм, Д. Летинен, Я. Мункберг, К. Чжан, В. Цзо.

Каждый из перечисленных классов фильтров имеет свои преимущества, недостатки и область применения. В особенности это касается фильтрации контрастных изображений, где наряду с общим улучшением визуального восприятия изображения после процедуры подавления шумов важно сохранять четкие края контрастных объектов.

Для решения этой проблемы применительно к контрастным изображениям можно адаптировать обобщенный метод наименьших модулей (ОМНМ), предложенный А.Н. Тырсиным в 2005 году для задач фильтрации выбросов. В этой задаче ОМНМ значительно выигрывает по сравнению с МНМ и медианной фильтрацией, а также устойчив к негауссовости распределения ошибок измерений и отсутствию корреляции переменных с ошибками измерений. Эти свойства ОМНМ будут при фильтрации шумовой составляющей на контрастной границе в изображениях. Но требуется провести модификацию метода для работы с цифровыми изображениями.

**Целью** работы является разработка и исследование метода моделирования цифровой обработки контрастных изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей и реализация разработанных алгоритмов в виде комплекса программ для практического применения.

Достижение поставленной цели потребовало решение следующих **задач**:

1. Обзор существующих моделей и методов обработки изображений.
2. Исследование свойств шума в цифровых контрастных изображениях и разработка системы компьютерного и имитационного моделирования цифровых изображений, учитывающие эти свойства.
3. Разработка метода цифровой фильтрации контрастных изображений.
4. Разработка алгоритмов, реализующих фильтрацию контрастных изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей для подавления шума и повышения четкости контрастных границ в цифровых изображениях.
5. Создание комплекса программ, реализующих разработанные алгоритмы.
6. Апробация программного комплекса на реальных данных и задачах фильтрации изображений в области медицины и компьютерного зрения.

### **Научная новизна**

*В области математического моделирования:* впервые разработана система компьютерного моделирования нелинейной фильтрации контрастных изображений на основе модификации обобщенного метода наименьших модулей, позволяющая учитывать негауссовость распределения шума и характеристики изображения в каждой его отдельной точке, такие как степень контрастности яркостного перепада и уровень шума. Проведенная сравнительная оценка среднего линейного отклонения яркости отфильтрованных зашумлённых изображений с идеальными показала преимущества разработанного метода при фильтрации цифровых контрастных изображений относительно линейных и медианных методов фильтрации.

*В области численных методов:* разработан оптимизационный алгоритм нахождения параметров модели нелинейной фильтрации, позволивший учитывать закономерности изменения текущих характеристик цифрового изображения. На основе имитационного моделирования он позволяет находить параметры для любой функции потерь, которая может быть использована в предложенном методе нелинейной фильтрации.

*В области комплексов программ:* разработан программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы и позволяющий исследовать их эффективность при подавлении шума в цифровых контрастных изображениях. Программный комплекс также позволяет использовать различные виды и размеры апертур и функций потерь при фильтрации изображений.

**Теоретическая** значимость работы заключается в разработке нового метода моделирования цифровой обработки контрастных изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей. Использование модифицированной выпукло-вогнутой функции потерь с варьированием параметров позволяет адаптироваться под изменение характеристик обрабатываемого изображения. Кроме того, в работе представлены уточнения модели шумообразования, касающиеся закона распределения шума в изображении и его поведения при разных уровнях яркости изображения.

**Практическая** значимость работы заключается в повышении качества фильтрации шумов в цифровых контрастных изображениях за счет

использования функции сглаживающего преобразования с варьированием параметров с учетом характеристик обрабатываемого изображения. Предложенный алгоритм нелинейной фильтрации зашумленных контрастных изображений ориентирован на практическое использование в составе систем повышения качества изображений. Разработанный программный комплекс является кроссплатформенным и может быть использован в составе систем обработки и анализа изображений в различных предметных областях. С помощью разработанного программного комплекса были решены задачи шумоподавления, повышения контраста, предобработки изображений в области медицины и компьютерного зрения.

Получены три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017662978 от 02.02.2018 г., № 2018619014 от 03.09.2018 г., № 2019662748 от 25.10.2019 г.

**Реализация и внедрение.** Результаты диссертационной работы и разработанный программный комплекс использованы при проведении госбюджетных научно-исследовательских работ в НИЦ «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН (г. Екатеринбург), а также при проведении исследовательских работ в АНО «Центр развития промышленных инноваций» (г. Челябинск).

**Методология и методы диссертационного исследования.** *Объектом исследования* являются цифровые контрастные изображения, полученные путем оцифровки аналогового сигнала. *Предметом исследования* является нелинейная фильтрация цифровых контрастных изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей.

При решении поставленных задач в работе использовались методы математического и имитационного моделирования, математической статистики, методы статистических испытаний Монте–Карло. Проводились натурные и вычислительные эксперименты. Программная реализация выполнялась с использованием языков программирования VBA и Python. Применялись современные подходы программирования.

**Приложения, выносимые на защиту** согласно специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

– *в рамках разработки, обоснования и тестирования эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий:* численный метод фильтрации зашумленных контрастных изображений на основе модифицированного обобщенного метода наименьших модулей; оптимизационный алгоритм нахождения параметров модели нелинейной фильтрации, позволивший установить закономерности их изменения в зависимости от локальных характеристик цифрового изображения; алгоритм построения области эффективной применимости разработанного метода в зависимости от характеристик контрастного изображения [1, 3, 4, 6];

– *в рамках реализации эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения*

*вычислительного эксперимента:* комплекс проблемно-ориентированных программ, позволяющий исследовать и осуществлять фильтрацию цифровых контрастных изображений на основе предложенного метода, с помощью которого решены несколько практических задач в области медицины и компьютерного зрения [7–9];

– *в рамках разработки систем компьютерного и имитационного моделирования алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей:* система имитационного моделирования зашумлённых контрастных изображений с учетом выявленных свойств шума при проведении натурального эксперимента; система компьютерного моделирования фильтрации контрастных изображений для проведения вычислительных экспериментов и исследования эффективности предложенных алгоритмов [1, 2, 5].

**Степень достоверности.** Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов обеспечены корректным использованием математического аппарата и методов математического моделирования; результатами натурального эксперимента; согласованностью результатов вычислительных экспериментов на модельных примерах и реальных данных; объемом апробации и представления этапов работы на научных конференциях и семинарах. Результаты, выносимые на защиту, опубликованы.

**Апробация работы.** Теоретические и практические результаты исследований докладывались на следующих конференциях: The 3th International Conference on Analysis of Images, Social Networks, and Texts (Екатеринбург, 2014), 8-я научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2016), XI Международная конференция «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур – ICAM'2016» (Екатеринбург, 2016), The 5th International Conference on Analysis of Images, Social Networks, and Texts (Екатеринбург, 2016), XII Российская конференция с международным участием «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур – ICAM'2018» (пос. Катунь, Алтайский край, 2018), Международная научная конференция «Киберфизические системы: проектирование и моделирование» (Санкт-Петербург, 2019). Результаты работы обсуждались на научных семинарах кафедры прикладной математики и программирования ЮУрГУ (Челябинск, 2016–2018), расширенном семинаре кафедры прикладной математики и программирования ЮУрГУ (Челябинск, 2019). Работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ № 17-01-00315а и № 20-41-660008.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе четыре публикации в рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ [1–4], три работы включены в наукометрические базы Web of Science и Scopus [1, 5, 6]; три программы для ЭВМ [7–9], зарегистрированные в Роспатенте. В совместных публикациях научному руководителю принадлежит постановка задач. Из работ,

выполненных в соавторстве, в диссертацию включены результаты, полученные лично автором.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Полный ее объем составляет 150 страниц, включая 88 рисунков, 17 таблиц, список литературы из 129 наименований, 2 приложения.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, описывается степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи работы, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы.

**В первой** главе представлен обзор существующих методов фильтрации цифровых изображений и их анализ применительно к контрастным изображениям. Первый параграф содержит описание математической модели цифрового изображения и причины возникновения шума при оцифровке изображения. Цифровое изображение состоит из суммы исходного сигнала и шума. Математическая модель представляет собой двумерную дискретную последовательность вида:  $y_{ij} = f_{ij} + \eta_{ij}$ ,  $i = [1:n]$ ,  $j = [1:m]$ , где  $f_{ij}$  – исходное незашумленное изображение;  $\eta_{ij}$  – шумовая составляющая;  $n$  и  $m$  – ширина и высота изображения, соответственно. Шумовая составляющая вносится несколькими факторами при оцифровке изображения, основным из которых является фотонный шум, имеющий изначально пуассоновское распределение. Во втором параграфе описано негативное влияние шума на зрительное восприятие зашумленного изображения, а также на результат в задачах обработки и анализа цифровых изображений. Было показано, что сохранение контрастных границ в изображении при подавлении шумов – важная задача как для визуального восприятия изображений, так и для их последующего анализа. В третьем параграфе описана математическая модель сглаживания изображений и дан обзор существующих методов, реализующих сглаживание. В общем случае математическая модель сглаживания имеет вид:

$$\hat{y}_{ij} = F_{(i,j) \in y} \{y_{lk} : U_{lk} \subset y\}, \quad i = [1:n], j = [1:m],$$

где  $\hat{y}_{lk}$  – сглаженные значения яркостей пикселей изображения размером  $n$  на  $m$  пикселей;  $F$  – некоторая функция сглаживающего преобразования;  $U_{lk}$  – некоторая окрестность сглаживаемой точки  $y_{ij}$ ;  $i$  и  $j$  – координаты пикселя в области  $y$ ;  $y_{ij}$  – фактические значения яркости пикселя.

Каждый из рассмотренных в работе методов фильтрации изображений имеет свою область применения. При анализе литературных источников выяснено, что ряд методов не применим для фильтрации контрастных изображений. А такие методы как, например, нейронные сети могут вносить существенные искажения в изображения.

Нейронные сети – наиболее развивающийся сегмент на текущий день, но результат работы нейронных сетей невозможно предсказать. Нейронная



сеть, по сути, частично придумывает изображение заново, поэтому может проявляться изменение цвета изображения и объекты которых и изображении изначально не существовало. А также нейронные сети требуют несоизмеримо больших вычислительных мощностей, чем любые другие методы подавления шума в изображениях.

Было предложено при подавлении шума в цифровых контрастных изображениях использовать обобщенный метод наименьших модулей (ОМНМ). За счет использования выпукло-вогнутых функций потерь можно повысить степень подавления шума и управлять фильтром при изменении характеристик изображения.

**Вторая** глава посвящена исследованию свойств шума в цифровых контрастных изображениях и разработке алгоритма нелинейной фильтрации на основе обобщенного метода наименьших модулей. В первом параграфе описывается проведенный натурный эксперимент, позволивший выявить механизм возникновения шума в цифровых изображениях. Был использован цифровой зеркальный фотоаппарат, с помощью которого получены снимки, содержащие светлые и темные области. Из снимков выбирались квадратные монотонные участки различной яркости. Полученные данные были проанализированы, что позволило адекватно моделировать зашумленные контрастные изображения, в частности, была выявлена негауссовость распределения аддитивного шума в цифровых контрастных изображениях, полученных с цифровых камер.

Второй параграф посвящен обоснованию выбора модели и функции сглаживающего преобразования, а также разработке оптимизационного численного алгоритма подбора параметров выбранной функции потерь. В общем виде нелинейная фильтрация цифровых изображений на основе ОМНМ применительно к цифровым изображениям имеет вид:

$$\hat{y}_{ij} = \arg \min_a \sum_{(l,k) \in U_{ij}} \rho_{\text{ОМНМ}}(|y_{lk} - a|), \quad i = [1:n], j = [1:m], \quad (1)$$

где  $\hat{y}_{ij}$  – сглаженные с помощью ОМНМ-фильтра значения яркостей пикселей изображения размером  $n$  на  $m$  пикселей;  $U_{ij}$  – некоторая окрестность сглаживаемой точки  $y_{ij}$ ;  $l$  и  $k$  – координаты пикселя в области  $U_{ij}$ ;  $y_{lk}$  – фактические значения яркости пикселя;  $a$  – искомый сигнал.

Был проведен численный эксперимент применительно к фильтрации сигналов на типовой модели «перепад + шум», в результате которого из нескольких функций была выбрана функция  $\rho_{\text{ОМНМ}0}(x) = \arctg(|x|)$  в роли функции потерь. Однако непосредственное использование этой функции не учитывает особенностей изображения, таких как дисперсия шума и степень контрастности перепада. Поэтому предложено использовать модифицированную функцию потерь вида:

$$\rho_{\text{ОМНМ}}(x) = \arctg(|x|^\alpha / \beta), \quad (2)$$

где  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$  – параметры, подбираемые на основе характеристик изображения, а именно:  $A$  – нижняя граница уровня яркости перепада;  $B$  – верхняя граница уровня яркости перепада;  $h = B - A$  – разница между верхней и нижней границами яркости перепада, то есть степень контрастности перепада;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение (уровень) шума в выбранной области изображения. Параметры наглядно представлены на диаграмме перепада на рисунке 1.

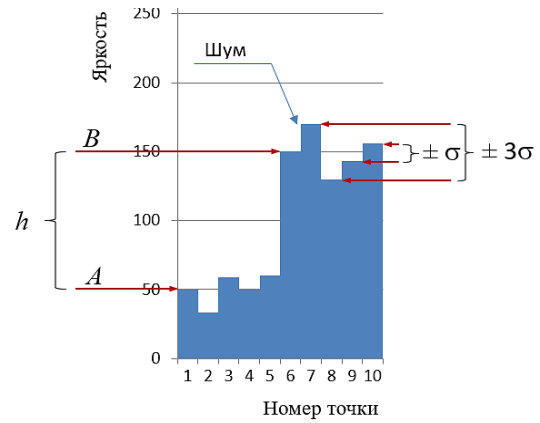


Рисунок 1 – Диаграмма контрастного перепада

Использование такой функции потерь (2) позволяет управлять результирующим значением на основе параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . Повысить эффективность работы ОМНМ-фильтра можно путем нахождения зависимости параметров функции потерь от вида перепада и характеристик изображения таким образом, чтобы результат фильтрации был близок к наилучшему для выбранной функции потерь. Мерой эффективности фильтрации будет служить среднее линейное отклонение:

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - f_i|, \quad (3)$$

где  $f_i$  – идеальные (без шума) значения яркости пикселей изображения,  $\hat{y}_i$  – значение яркости пикселей после фильтрации,  $n$  – число всех пикселей в изображении. Меньшее значение среднего линейного отклонения  $d$  будет указывать на более высокую эффективность сглаживания шумовой составляющей.

Было проведено исследование математической модели фильтрации контрастных изображений с использованием функции потерь (2) на основе имитационного и компьютерного моделирования. В результате чего был разработан оптимизационный численный алгоритм, позволивший подбирать такие функции  $\alpha = \alpha(\sigma, h, A)$ ,  $\beta = \beta(\sigma, h, A)$ :

$$\alpha = \begin{cases} 0.7, & A = 0, \\ 0.7 \cdot \left( \frac{3\sigma - A}{3\sigma} \right) + 1.6 \cdot \left( 1 - \frac{3\sigma - A}{3\sigma} \right), & 0 < A \leq 3\sigma, \\ 1.6, & A > 3\sigma, \end{cases} \quad \beta = 10 + \frac{\sigma \cdot h}{100}. \quad (4)$$

Характеристики изображения  $\sigma$ ,  $h$  и  $A$  рассчитываются непосредственно на основе обрабатываемого изображения. Для поиска параметров  $h$  и  $A$  строится карта градиентов, а уровень шума  $\sigma$  оценивается путем сравнения некоторого неконтрастного участка из карты градиентов с тем же участком обрабатываемого изображения.

В третьем параграфе приводится зависимость эффективности  $d$  от времени выполнения ОМНМ сглаживания для разных размеров апертур.

**Третья** глава посвящена описанию алгоритмов и программ цифровой фильтрации контрастных изображений на основе ОМНМ и исследованию эффективности применения ОМНМ-фильтрации на основе разработанных систем компьютерного и имитационного моделирования. В первом параграфе приводится структура и описание комплекса программ, разработанных в рамках выполнения данной работы. Во втором параграфе представлена процедура проведения натурального эксперимента. Указано использованное оборудование и объект съемки. Приведено обоснование использования альтернативной цветовой модели HSV для обработки изображений. Получены характеристики распределения шума в цифровом контрастном изображении, снятого на цифровую зеркальную камеру. В третьем параграфе приведено описание реализации компьютерного моделирования зашумленных перепадов, и проведено исследование эффективности подавления шума ОМНМ-фильтром на наборе контрастных перепадов. Описаны численные эксперименты, позволившие подтвердить эффективность фильтрации контрастных перепадов реализованным фильтром в сравнении с некоторыми другими фильтрами. Проводилась оценка эффективности работы различных фильтров на ряде смоделированных контрастных перепадах с несколькими уровнями зашумления на каждом (таблица 1).

**Таблица 1.** Результаты сравнения фильтров: 1 – линейное усреднение; 2 – медианный фильтр; 3 – ОМНМ-фильтр на основе функции потерь (1); 4 – сглаживание на основе функции потерь Мешалкина с  $\lambda = 1$ ; 5 – ОМНМ-фильтр на основе функции потерь (2)

Уровень шума		$\sigma = 10$					$\sigma = 30$				
Фильтр		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Перепад, А-В	0-30	7,27	4,65	3,97	3,49	2,72	9,62	8,49	7,85	8,11	7,11
	0-60	13,21	4,24	5,36	6,48	2	15,64	11,12	9,64	13,25	9,47
	0-120	25,2	3,73	8,94	10,57	1,1	27,65	11,24	11,39	18,57	5,58
	0-180	37,21	3,02	12,29	12,91	1,05	39,57	9,03	15,56	17,41	3,39
	0-240	49,21	2,54	17,94	17,45	1,04	51,63	7,71	20,59	19,7	3,37
	60-90	6,23	2,9	2,2	2,88	1,3	5,84	6,07	5,08	7,69	5,17
	60-120	12,01	2,9	3,49	4,6	0,36	12,02	8,07	6,77	10,36	6,16
	60-180	24,01	2,14	10,03	11,6	0,08	24,06	6,46	10,82	13,02	2,94
	60-240	36	1,68	27,13	27,08	0,02	36,03	5,03	28,7	31,37	1,13
	120-150	6,11	1,97	2,16	2,36	0,7	6,3	5,76	5,56	4,58	4,52
	120-180	12,01	1,68	4,19	4,94	0,14	12	5,02	5,2	6,1	3,17
	120-240	24	1,2	17,41	17,1	0,04	24	3,63	18,77	19,98	0,82

На основе результатов проведенных вычислительных экспериментов была выявлена область эффективной применимости разработанного фильтра. Величина среднего линейного отклонения  $d$  при ОМНМ-фильтрации уменьшается с увеличением величины перепада  $h$  при неизменном уровне шума  $\sigma$ . С увеличением  $\sigma$  оценка  $d$  увеличивается при неизменном  $h$ . Таким образом, чем выше величина  $h$  обрабатываемого перепада (выше контраст), тем больше преимущество ОМНМ-фильтрации в сравнении с медианной фильтрацией. При уменьшении контраста или уменьшении уровня шума  $\sigma$  выигрыш уменьшается. ОМНМ-фильтр эффективнее медианного фильтра, если величина контрастного перепада  $h \geq \sigma$ .

В четвертом параграфе приведены алгоритм фильтрации контрастных изображений и схемы отдельных алгоритмов, представленных в первом параграфе данной главы. Алгоритм фильтрации подразумевает следующие:

**Шаг 1.** Поиск уровня шума  $\sigma$  в изображении.

**Шаг 2.** Создание карты примерного расположения границ контраста.

**Шаг 3.** Создание карты градиентов.

**Шаг 4.** Запуск цикла обработки пикселей изображения, где для каждого пикселя повторяется набор шагов:

**Шаг 4.1.** Выбор параметров  $A$ ,  $B$  и  $h$  из карты градиентов в соответствии с апертурой.

**Шаг 4.2.** Расчёт параметров  $\alpha = \alpha(\sigma, h, A)$ ,  $\beta = \beta(\sigma, h, A)$  по формуле (4).

**Шаг 4.3.** ОМНМ-фильтрация на основе рассчитанных параметров  $\alpha$  и  $\beta$  и функции потерь (2).

В параграфе также указаны особенности выбора параметров апертуры.

**Четвертая** глава посвящена использованию ОМНМ-фильтра для удаления шумов в смоделированных и реальных изображениях, а также применению разработанного фильтра для решения практических задач в области медицины и компьютерного зрения. В первом и втором параграфе описаны эксперименты по фильтрации смоделированных и реальных контрастных изображений, а также результаты сравнения с другими фильтрами. Зашумленный фрагмент одного из использованных изображений и результат его фильтрации представлены на рисунке 2.

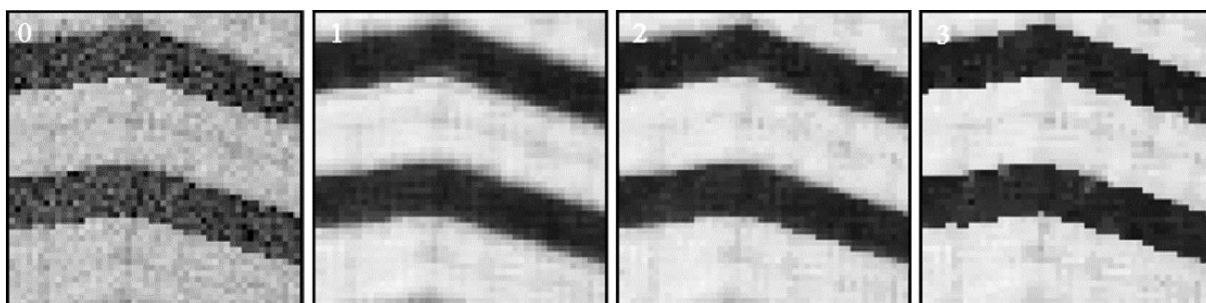


Рисунок 2 – Исходное зашумленное изображение – 0; после фильтрации: 1 – линейным усреднением, 2 – медианой, 3 – ОМНМ-фильтром на основе функции потерь (2)

При работе с реальными изображениями преимущество ОМНМ-фильтра над медианной фильтрацией на основе оценки  $d$  составило 3–19%. На модельных изображениях ОМНМ-фильтр показал двукратное преимущество, ввиду высокой контрастности моделируемых изображений.

В третьем параграфе рассмотрены прикладные задачи. Приведен пример частичного восстановления контуров контрастных объектов на дефектном изображении при рентгеноскопии. Рассмотрим оцифрованные снимки кисти животного. Один из снимков имеет приемлемую резкость и граница кости различима, второй снимок сделан с расфокусировкой и граница кости размыта. Применение разработанного фильтра позволило частично восстановить контрастную границу кости именно на том месте, где она находилась изначально (рисунок 3). Фильтр применялся к изображению по центру.

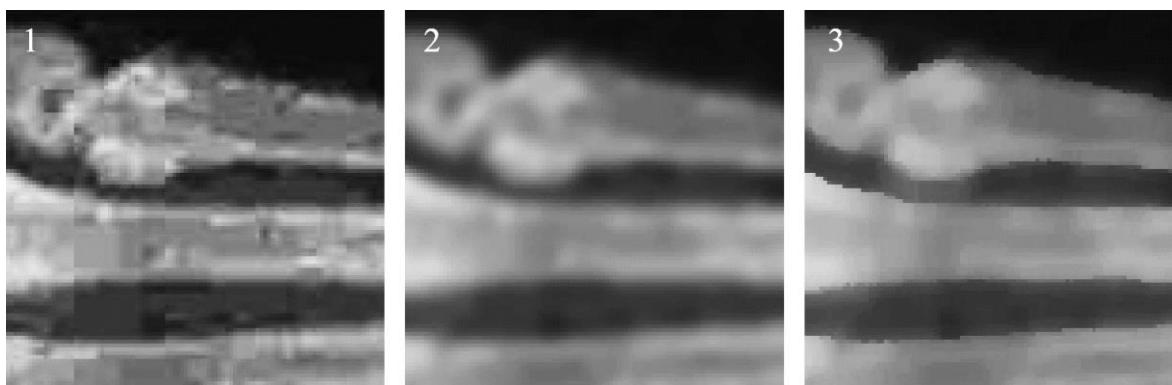


Рисунок 3 – Изображение: 1 – в фокусе, 2 – не в фокусе, 3 – не в фокусе после ОМНМ-фильтрации

Используя свойство восстановления границ ОМНМ-фильтрации, также была решена задача повышения контрастности снимков флюорографии (ФОГ). Оцифрованные снимки ФОГ часто имеют низкую контрастность и содержат характерные для флюорографии шумы, имеющие некоторую структуру. Часто требуется повысить контраст и резкость полученного снимка. Однако процедура повышения резкости усиливает присутствующий на снимке шум. Использование ОМНМ-фильтрации в таком случае может подавить шум, не размывая при этом границы контрастных объектов (рисунок 4).

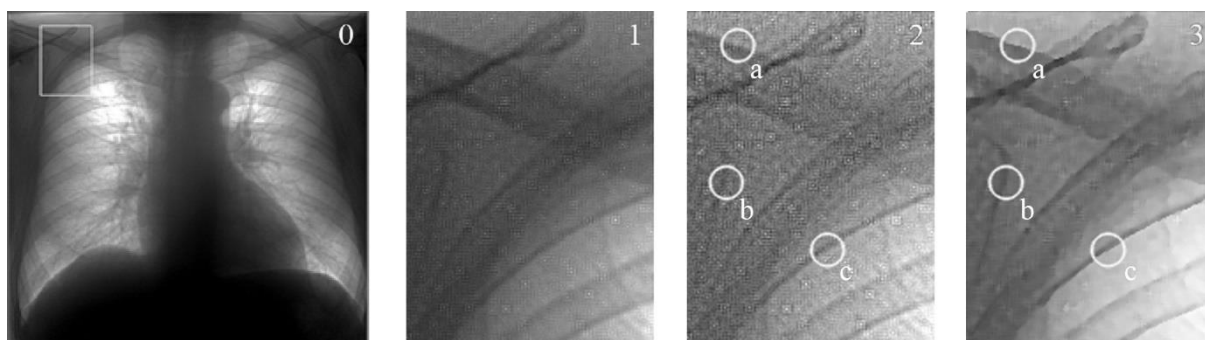


Рисунок 4 – Изображение: 0 – исходное, 1 – фрагмент исходного, 2 – после процедуры повышения контраста, 3 – после повышения контраста и ОМНМ-фильтрации

Так как контраст на изображениях с ФОГ, как правило, невысок, то следует использовать апертуру типа крест или квадрат с минимальным размером. Это позволит удалить шум и сохранить мелкие детали на изображении. Хотя и в этом случае мелкие детали размером в половину апертуры могут быть утеряны, но то же самое происходит, например, и при медианной обработке.

Для численной оценки повышения контраста построены графики яркости (рисунок 5) пикселей на перепаде для выделенных областей (a, b и c). На графике ступенчатой гистограммой показана яркость пикселей на единичном срезе, а линией показана усредненная яркость по нескольким срезам. Граница перепада в данном случае находится на границе пятого и шестого пикселей, следовательно, контрастом будет считаться модуль разности яркостей для этих пикселей. Во всех рассмотренных случаях контраст на перепаде яркости повысился.

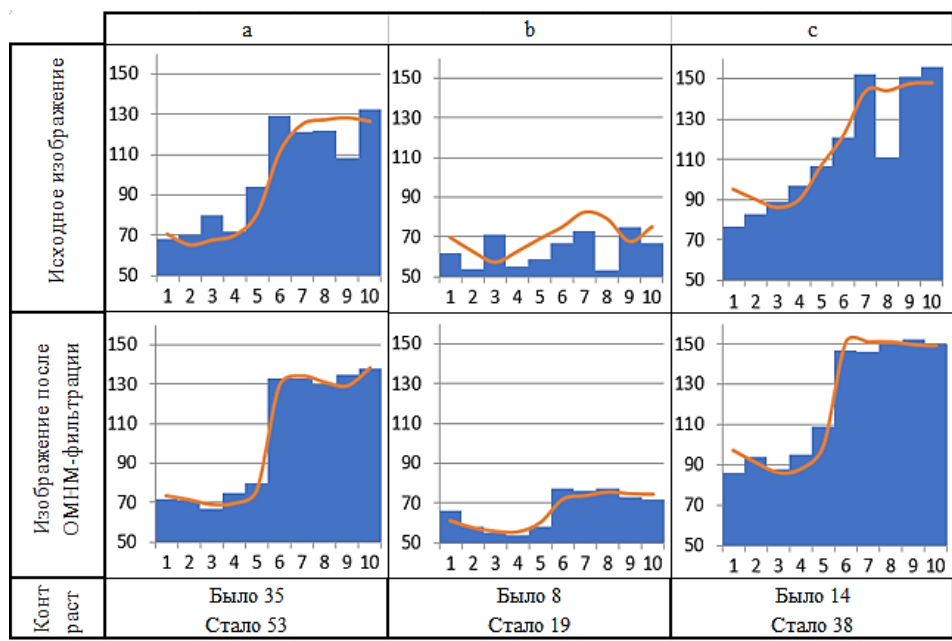


Рисунок 5 – График яркости пикселей на контрастных перепадах

То же свойство ОМНМ-фильтрации позволяет решать задачи фильтрации изображений в области технического зрения. В технических системах для ориентации в пространстве используются маркеры различного вида, например, маркеры ArUco. С их помощью можно определить положение маркера относительно камеры, которая производит съемку. Однако при плохом освещении на изображении появляется шум и из-за высокой длительности экспонирования кадра может возникнуть смазанная картина. Это приводит к тому, что контраст на границе объектов уменьшается, и границы растекаются, т. е. алгоритм не может обнаружить маркер (рисунок 6-1). ОМНМ-фильтр позволяет частично восстановить информацию о контрастных границах, после чего тот же алгоритм поиска маркера на изображении находит и идентифицирует маркер (рисунок 6-2).

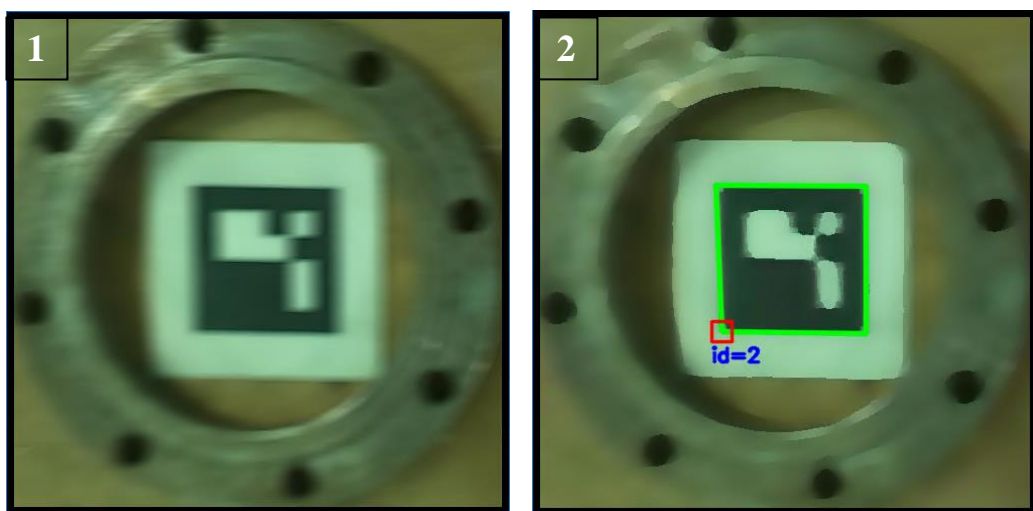


Рисунок 6 – 1) кадр со смазом без обработки (маркер не обнаружен);  
2) обработанный ОМНМ-фильтром кадр (маркер обнаружен и идентифицирован)

Другим примером в области компьютерного зрения является сегментация изображений. В работе продемонстрирован эффект применения ОМНМ

фильтрации для зашумленного контрастного изображения перед использованием метода кластеризации  $k$ -средних. В результате работы алгоритма  $k$ -средних на изображении прошедшим процедуру фильтрации выделяется на порядок меньше отдельных кластеров, что является положительным результатом. Рассмотрена также задача выделения отдельных клеток и клеточных структур с помощью сегментации. Получены более четкие паттерны при гистограммном анализе после применения ОМНМ-фильтра к зашумленному изображению.

### **Заключение**

В диссертационной работе подведены итоги выполненного исследования, а именно: 1) выявлено, что во многих случаях при разработке методов шумоподавления считают распределение шума подчиненным гауссовскому закону распределения, не проводя исследования шума и не принимая в расчет особенности цифровых изображений; 2) разработаны системы имитационного и компьютерного моделирования, основой для которых послужили результаты натурального эксперимента, выявивший негауссовость распределения шума в цифровых контрастных изображениях; 3) разработан новый метод цифровой фильтрации контрастных изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей, где в качестве сглаживающего преобразования предложено использовать выпукло-вогнутую функцию с двумя параметрами; 4) разработан алгоритм нелинейной фильтрации на основе обобщенного метода наименьших модулей и показана его эффективность при подавлении шума в цифровых контрастных изображениях; 5) на основе предложенных алгоритмов разработан программный комплекс, позволяющий производить сглаживание полноцветных изображений, а также давать сравнительную оценку эффективности разработанного метода с другими методами сглаживания; б) с помощью разработанного программного комплекса решены задачи подавления шума, повышения контрастности, восстановления границ размытых объектов, гистограммного анализа, сегментации изображений в области медицины и компьютерного зрения.

В результате диссертационной работы разработан численный метод для фильтрации цифровых контрастных изображений. Он позволяет учитывать характеристики цифрового изображения в каждой локальной точке и подавлять шум, сохраняя при этом контрастную границу объектов. Метод может быть адаптирован к различным классам изображений и реализован для решения задач обработки цифровых изображений в различных областях научных знаний, что подтверждается успешно решенными задачами в области медицинских изображений и в системах компьютерного зрения.

### **Основные публикации автора по теме диссертации**

Статьи, опубликованные в ведущих российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, и в рецензируемых научных журналах и изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science:



1. Сурин, В.А. Модель нелинейного фильтра для цифровой обработки контрастных изображений / В.А. Сурин, А.Н. Тырсин // Автометрия. – 2018. – Т. 54, No. 2. – С. 54-62. (ВАК; Scopus; Web of Science)

2. Surin, V. A. Nonlinear filtering of noisy contrast images based on the generalized method of the least absolute values / V. A. Surin, A.N. Tyrsin // Journal of Computational and Engineering Mathematics. – 2018. – Vol. 5, № 2. – P. 58-69. (ВАК; MathSciNet, zbMATH)

3. Сурин, В.А. Применение обобщенного метода наименьших модулей в задачах обработки и анализа изображений / В.А. Сурин, А.Н. Тырсин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – №2. – С. 45-55. (ВАК)

4. Сурин, В.А. Об обработке зашумленных контрастных изображений / Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2021. – Т. 13. – С. 14-21. (ВАК; zbMATH)

5. Tyrsin, A.N. Non-Linear Filtering of Images on the Basis of Generalized Method of Least Absolute Values / A.N. Tyrsin, V.A. Surin // CEUR Workshop Proceeding. – 2014. – Vol. 1197. – P. 41–47. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1197/paper7.pdf> (Scopus)

6. Surin, V. A. Research of properties of digital noise in contrast images / V. A. Surin, A. N. Tyrsin // CEUR Workshop Proceeding. – 2016. – Vol. 1710. – P. 340–348. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1710/paper34.pdf> (Scopus)

#### **Свидетельства о регистрации программ**

7. Тырсин, А.Н. Программа подавления шума в контрастных изображениях на основе обобщенного метода наименьших модулей: свидетельство № 2018611634 / Тырсин А.Н., Сурин В.А.; правообладатель Тырсин Александр Николаевич. – 2017662978; заявл. 12.12.2017; зарегистр. 02.02.2018, реестр программ для ЭВМ.

8. Сурин, В.А. Фильтр на основе обобщенного метода наименьших модулей для подавления шума в модельных и реальных контрастных изображениях: свидетельство №2018619014 / Сурин В.А.; правообладатель Сурин Владимир Анатольевич. – 2018619014; заявл. 21.08.2018; зарегистр. 03.09.2018, реестр программ для ЭВМ.

9. Сурин, В.А. Предобработка цифровых изображений на основе обобщенного метода наименьших модулей для последующей сегментации №2019663922 / Сурин В.А.; правообладатель Сурин Владимир Анатольевич. – 2019662748; заявл. 08.10.2019; зарегистр. 25.10.2019, реестр программ для ЭВМ.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 21.07.2023. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ 276/279.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.