

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»

На правах рукописи



ОРАЗАЕВ АНЗОР РУСЛАНОВИЧ

МОДЕЛИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ,
ИСКАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ШУМОМ

Специальность: 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук, доцент
Ляхов Павел Алексеевич

Ставрополь – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ	18
1.1 Анализ проблемы искажения цифровых изображений и видео	18
1.2 Анализ моделей и методов восстановления изображений и видео от импульсного шума	31
1.3 Постановка задачи исследования	50
1.4 Выводы по первой главе.....	52
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВИДЕО ОТ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА.....	54
2.1 Математическая модель очистки изображений и видео от полярного импульсного шума	54
2.2 Очистка изображений и видео от случайного импульсного шума	72
2.2.1 Вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображения.....	76
2.2.2 Математическая модель очистки изображений и видео от случайного импульсного шума.....	83
2.3 Математическая модель очистки изображений и видео, переданных по двоичному симметричному каналу связи с ошибками	89
2.4 Выводы по второй главе.....	97
ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВИДЕО ОТ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА.....	99

3.1 Компьютерное моделирование очистки изображений и видео от полярного импульсного шума.....	99
3.2 Компьютерное моделирование очистки изображений и видео от случайного импульсного шума	112
3.3 Вычислительный эксперимент очистки изображений и видео, переданных по двоичному симметричному каналу связи с ошибками	128
3.4 Практические рекомендации по восстановлению цифровых изображений, искаженных импульсным шумом.....	137
3.5 Выводы по третьей главе	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
Обозначения и сокращения	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	144
Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационного исследования	161
Приложение Б. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение	163
Приложение В. Расчетная таблица критерия хи-квадрат для определения равномерности расположения искаженных пикселей при воздействии полярного импульсного шума на изображение	167
Приложение Г. Расчетная таблица критерия хи-квадрат для определения равномерности расположения искаженных пикселей при воздействии случайного импульсного шума на изображение.....	169
Приложение Д. Листинг программного модуля восстановления изображения, искаженного полярным импульсным шумом	171
Приложение Е. Листинг программного модуля восстановления видео, искаженного полярным импульсным шумом.....	173

Приложение Ж. Листинг программного модуля генерации случайного импульсного шума на изображении и последующее восстановление	177
Приложение И. Листинг программного модуля генерации случайного импульсного шума на видео и последующее восстановление	180
Приложение К. Листинг программного модуля очистки изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками	186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Во многих областях науки и техники преобладает информация, представленная в виде цифровых изображений. В последнем десятилетии с повсеместным развертыванием беспроводных сетей произошло беспрецедентное увеличение количества передаваемых данных в виде изображений и видео. Среди всего трафика мобильных данных видеоданные преобладают более чем на три четверти [1]. Более половины населения планеты владеют смартфонами с фотокамерой. При этом количество устройств, подключенных к интернету, в настоящее время, превышает численность населения мира в три раза, и их число непрерывно возрастает [48]. Изображения, как одна из форм представления информации, которые передаются в виде сообщений по каналам связи, подвержены помехам. При передаче или регистрации фото и видеоданных важно сохранить информацию в неискаженном виде, так как шум может привести к утрате важной информации, а также негативным последствиям для здоровья человека [98]. Отсутствие помех на изображениях и видео также очень важно в сфере правопорядка. В России на тысячу человек приходится сто камер видеонаблюдения. Больше видеокамер установлено только в США и в Китае. Примерно 30% российских камер установлены за счёт государства (школы, дороги, больницы и др.). Примерно 60% установлены коммерческими организациями для предотвращения краж, обеспечения безопасности и для других целей. Остальной процент установлен физлицами. Большая часть из этих видеокамер транслирует информацию онлайн [128]. Ошибки при фоторегистрации дорожных камер могут допустить ошибки при автоматическом распознавании автомобильного номера или неверно считать дорожное событие. А искажения видеозаписи с камеры видеонаблюдения может препятствовать опознанию личности преступника [83].

В различных электронных устройствах помехи могут создавать любые другие находящиеся поблизости подключенные к электрической сети устройства из-за того, что они являются источником электромагнитных волн [89]. Длинные

внешние силовые и интерфейсные кабели работают как антенны, излучающие во внешнюю среду помехи, которые создаются подключенной в электрическую сеть аппаратурой [140]. Это негативно влияет на работу беспроводных сетей Wi-Fi, радиоаппаратуры и точных приборов. При этом качество передачи данных по каналу связи зависит от уровня сигнала и загруженности сетей [120]. Для снижения возможности появления помех при передаче данных используются ферритовые фильтры, экранированные и коаксиальные кабели. Устройства, работающие на высоких частотах, экранируются металлическим корпусом [146].

Вторым по величине источником ухудшения сигнала, после воздействия межсимвольной интерференции, является импульсного шума. В уличных условиях, примерно в 23% случаях, импульсный шум генерируется системами зажигания транспортных средств и промышленным оборудованием [34]. Импульсный шум в помещениях возникает в коммутационных процессах в электрических схемах, помехах, создаваемых окружающей радиоэлектронной аппаратурой, бытовой техникой, а также процессах электрических разрядов. В зависимости от состояния канала связи, состояния регистрирующего устройства и сцены, импульсный шум может привести к потере информации об объекте [9, 11, 12, 13]. В системах видеонаблюдения, спутниковых системах, а также в медицинском оборудовании, при помощи которого регистрируют изображения или ведут видеосъемку, искажение или потеря информации является наиболее критичной. Цифровые изображения и видео подвержены воздействию полярного импульсного шума, под воздействием которого отсчеты многомерных сигналов принимают минимальное и максимальное значения яркости, и случайного импульсного шума, которому свойственно случайное распределение помех по передаваемой цифровой информации с принятием данными случайных значений [121]. Методы и алгоритмы нелинейной фильтрации для подавления импульсного шума позволяют восстановить утраченную информацию. Наиболее простым методом нелинейной фильтрации является медианная фильтрация, основным недостатком которой является эффект размытия изображений. Методы снижения последствий появления импульсных шумов в канале связи, такие как,

ретрансляция, использование кода Рида-Соломона, чередование и применение механизма прямой коррекции ошибок имеют свои недостатки, которые увеличивают нагрузку в сети [58]. Значительный вклад в развитие нелинейной фильтрации цифровых изображений внесли многие отечественные и зарубежные исследователи: R. Gonzalez, R. Woods, Н.И. Червяков, А. Bovik, В.А. Сойфер, Н. Н. Красильников, И.С. Грузман, Б.В. Анисимов, W. Pratt, W. Burger, С.Т. Lu, Z. Wang, Н. Hwang, V.R. Vijaykumar, Y. Dong, X. Xiao, R. Garnett, A. Fabijanska, R. H. Chan, С. Hu, М. Nikolova и другие. Недостатки известных моделей и методов по снижению вероятности возникновения ошибок при передаче изображений и видео по каналам связи и методов восстановления искаженных изображений и видео приводят к необходимости повышения качества очистки цифровых фото и видеоданных от импульсного шума. Современные методы либо не используют предварительный этап детектирования импульсных значений, либо сильно размывают изображения. В некоторых случаях, при высокой интенсивности шума на изображении некоторые методы не справляются с задачей восстановления. Таким образом, образуется **противоречие в практике** – низкое визуальное качество восстановления видеосигнала, искаженного действием импульсного шума, при использовании известных моделей и методов. Получить эталонное Качество восстановления в известных моделях оценивается, в том числе, при помощи метрики пиковое отношения сигнала к шуму (PSNR). Из чего можно сформулировать **противоречие в науке** – известные модели и методы восстановления видеосигнала, искаженного действием импульсного шума, не позволяют достичь высокого качества обработки, измеренного метрикой PSNR.

Цель работы – повышение качества восстановления изображений и видео, искаженных в результате воздействия полярного или случайного импульсного шума.

Объект исследования – изображения и видео, искаженные в результате воздействия импульсного шума.

Предмет исследования – методы восстановления изображений и видео, искаженных в результате воздействия импульсного шума.

Научная задача – разработка методов очистки изображений и видео, искаженных в результате воздействия полярного или случайного импульсного шума, при использовании которых достигается более высокое качество восстановления цифровых данных по сравнению с известными методами.

Для решения поставленной общей научной задачи произведена ее декомпозиция на ряд частных задач:

1. Разработка модели очистки изображений и видео от полярного импульсного шума, основанной на адаптивной медианной фильтрации с использованием функции Лоренца.
2. Разработка вычислительного метода оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности в локальном окне.
3. Разработка модели очистки изображений и видео от случайного импульсного шума с использованием вычислительного метода оценки сходства между пикселями.
4. Разработка системы компьютерного моделирования для сравнения разработанных и существующих моделей очистки изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума.
5. Разработка комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента по очистке изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе научных задач использованы методы цифровой обработки изображений и видео, теории фильтрации цифровых сигналов, теории вероятности и статистики, математического моделирования, линейной алгебры, а также методы математического и компьютерного моделирования в программной среде Matlab.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель восстановления изображений и видео, искаженных полярным импульсным шумом на основе адаптивной медианной фильтрации с использованием функции Лоренца.

2. Вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности в локальном окне.

3. Математическая модель восстановления изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом с использованием вычислительного метода оценки сходства между пикселями в локальном окне для определения импульсных значений.

4. Система компьютерного моделирования для сравнения разработанных и существующих моделей очистки изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума, реализованная в программной среде Matlab.

5. Программный комплекс для проведения вычислительного эксперимента по очистке изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума, разработанный в программной среде Matlab.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе теоретических результатов и формулируемых на их основе выводов обеспечивается строгостью производимых математических выкладок. Справедливость выводов относительно эффективности предложенных методов подтверждена результатами моделирования очистки изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные модели, методы, система компьютерного моделирования и программный комплекс использованы для определения и восстановления изображений и кадров видео, подверженных воздействию полярного и случайного импульсного шума, генерируемого бытовой техникой, системами зажигания транспортных средств, промышленным оборудованием, или вызванных помехами в процессах электрических разрядов. Результаты моделирования восстановления изображений и видео разработанным методом демонстрируют повышение качества восстановления в сравнении с современными известными методами и могут быть использованы для восстановления поврежденной на изображениях и видео информации.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработаны модели восстановления изображений и видео, искаженных полярным импульсным шумом, отличающиеся от известных моделей использованием адаптивной медианной фильтрации и функции Лоренца.
2. Разработан вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности внутри локального окна.
3. Разработаны модели восстановления изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом, отличающиеся от известных моделей использованием вычислительного метода оценки сходства между пикселями в локальном окне для определения искаженных значений.
4. Разработана система компьютерного моделирования для сравнения разработанной и существующих моделей очистки изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума, которая продемонстрировала повышение качества восстановления до 20,82 дБ с использованием метрики «пиковое отношение сигнал к шуму».
5. Разработан программный комплекс для проведения вычислительного эксперимента по очистке изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума в программной среде Matlab.

Моделирование и вычислительный эксперимент проводились с использованием современного математического пакета Matlab версий R2016a - R2021b с подключением модулей Image Processing Toolbox, Signal Processing Toolbox, Computer Vision Toolbox, Matlab Graphics, Matlab Mathematics.

Результаты исследования соответствуют следующим направлениям исследования паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: 6 – «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей (технические науки)», а именно, разработана система компьютерного моделирования для сравнения разработанных и существующих моделей очистки

изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума;

8 – «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», а именно, проведено комплексное исследование проблемы по восстановлению изображений и видео от полярного или случайного импульсного шума с применением моделирования в программной среде Matlab;

9 – «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки)», а именно, поставлен и проведен численный эксперимент, выполнен статистический анализ результатов восстановления изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума.

Внедрение. Результаты диссертационного исследования использованы в проектах ООО «Онлайн патент» (Акт от 03.05.2023(Приложение А)), в системе обработки видеoinформации тепловизионной камеры беспилотного летательного аппарата компании ООО «Стилсофт» (Акт от 03.05.2023(Приложение А)), при проведении научно-исследовательских работ в рамках проекта № 2.6035.2017/БЧ «Разработка математических моделей и методов снижения энергопотребления в системах мобильной связи на основе системы остаточных классов», проекта РФФИ 19-07-00130 «Экономичные средства интеллектуального анализа визуальной информации на основе сверточных нейронных сетей», гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук «Аппаратные ускорители с параллельными масштабированными вычислениями для обработки трехмерных медицинских изображений» МК-371.2022.4, проекта «Северо-Кавказский центр математических исследований», Северо-Кавказский федеральный университет, соглашения №. 075-02-2021-1749, №. 075-02-2022-892 и №075-02-2023-938 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, а также проекта РНФ 23-71-10013 "Перспективные методы интеллектуальной обработки сигналов на основе глубоких нейронных сетей и модулярных вычислений".

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в нефтегазовом деле» (Уфа, 2017), Межвузовская научно-практическая конференция, посвященная 30-летию Ставропольского филиала Краснодарского университета МВД России (Ставрополь, 2017), V-й ежегодная научно-практическая конференция Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону» (Ставрополь, 2017), Международная конференция «IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) 2017» (Новосибирск, 2017), Международная конференция «IEEE International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)» (Москва, 2019), Международная конференция «IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)» (Санкт-Петербург, 2019), Международная конференция «IEEE 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing» (MECO)» (Черногория, Будва, 2022), Научно-исследовательский семинар «Математическое моделирование вычислительных процессов и систем» с темой доклада «Методы и алгоритмы высококачественного восстановления цифровых изображений искаженных импульсным шумом» (Ставрополь, 2022), Международная конференция «International Conference on Mathematics and its Applications in new Computer Systems» (Ставрополь, 2022), Международная конференция «Actual Problems in Applied Mathematics and Computer Science» (Ставрополь, 2022), III Международная научная конференция «Современные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (п. Эльбрус, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ в журналах и трудах конференций, из них 4 работы – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 9 работ внесены в библиографическую и реферативную базу данных Scopus, 6 публикации

проиндексированы в национальной библиографической базе данных научного цитирования РИНЦ. Получен 1 патент Российской Федерации на изобретение и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации результаты получены при непосредственном участии автора. Личным авторским вкладом являются проведенный анализ видов шума, возникающего на цифровых изображениях, и методов очистки от них; разработанная модель очистки изображений и видео от полярного импульсного шума, основанная на адаптивной медианной фильтрации с использованием функции Лоренца, позволяющая получить высокое качество восстановления; выведенные формулы вычислительного метода оценки сходства пикселей изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности внутри локального окна; разработанная модель очистки изображений и видео от случайного импульсного шума, основанная на вычислительном методе оценки сходства пикселей; экспериментальное исследование разработанных моделей восстановления изображений и видео и их сравнение с известными аналогами, искаженных полярным и случайным импульсным шумом, с известными методами; экспериментальное исследование разработанных моделей восстановления изображений и видео и их сравнение с известными аналогами, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками и её сравнение с известными моделями.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и 9 приложений. Работа содержит 62 рисунка и 26 таблиц. Список использованных источников насчитывает 150 наименований. В диссертации принята двойная нумерация формул, рисунков и таблиц: первая цифра указывает номер главы, вторая – порядковый номер рисунка, таблицы или формулы внутри данной главы.

Первая глава посвящена анализу видов шума, возникающего на цифровых изображениях, и методам очистки от них. Проанализированы случаи возникновения импульсного шума при регистрации изображений и при передаче

по каналам связи. Продемонстрировано поведение импульсного шума, представлены его характеристики, представление импульса во временной области в канале связи. Проведен анализ существующих моделей, методов очистки изображений от импульсного шума, которые можно разделить на методы детектирования импульсных помех и методы восстановления искаженных пикселей.

Рассмотрены современные методы, основанные на статистических, нейросетевых, пространственных подходах, а также методы, основанные на нечетких множествах. Существенным недостатком известных методов является низкое качество восстановления, связанное с недостаточным количеством детектированных импульсов на искаженном изображении, которое зависит от модели импульсного шума и интенсивности шума в кадре. Также, современные методы, направленные на исправление искаженных пикселей, либо не используют предварительный этап детектирования импульсных значений, либо сильно размывают изображения. В некоторых случаях при высокой интенсивности шума на изображении известные методы не справляются с задачей восстановления. Проблема нейросетевых подходов для очистки изображений связана с тем, что из-за выбранной архитектуры, на которой обучалась сеть, некоторые изображения со сложными сценами могут восстановиться неэффективным образом, а также реализация данных методов может являться слишком затратной с точки зрения программных и временных ресурсов. Сформулирована математическая постановка задачи, а также сформулирована основная задача исследования: разработка методов очистки изображений и видео, искаженных в результате воздействия полярного или случайного импульсного шума, при использовании которых достигается более высокое качество восстановления цифровых данных по сравнению с известными методами, произведена ее декомпозиция на ряд частных задач.

Вторая глава посвящена разработке моделей очистки изображений и видео от полярного, а также случайного импульсного шума, где помехи принимают случайные значения и случайным образом расположены на

изображении. Важным условием при разработке модели полярного импульсного шума является восстановления поврежденных пикселей, так как их расположение заранее известно, потому что при воздействии полярного импульсного шума, импульсы принимают максимальное и минимальное по яркости значения. Для качественного результата восстановления предложено преобразование результата медианной фильтрации на основе распределения Лоренца с использованием альтернативных масок, рассчитанных по метрике Евклида. Представлена схема реализации разработанной модели очистки изображений от полярного импульсного шума.

При восстановлении изображений, искаженных случайным импульсным шумом, важной задачей является детектирование импульсных значений. Для решения задачи детектирования разработан вычислительный метод оценки сходства между пикселями. Для получения качественного результата восстановления изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом вычислительный метод оценки сходства был основан на параметре отличия яркостей пикселей и параметре геометрической удаленности. На основе вычислительного метода разработана модель восстановления изображений и видео.

Предложено использовать разработанную модель для восстановления изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками. Показано, что помехи, вызванные ошибками при передаче по двоичному симметричному каналу связи схожи с искажениями, вызванными случайным импульсным шумом, что показано при помощи критерия χ^2 . Также с помощью критерия χ^2 показано, что распределение искаженных значений на изображениях, подверженных воздействию полярного или случайного импульсного шума, а также на изображениях, искаженных в результате передачи по двоичному симметричному каналу связи, является равномерным.

В третьей главе описана реализация математических моделей очистки изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума в виде

компьютерной модели и комплекса программ. Проведено моделирование восстановления изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками при помощи математического пакета Matlab. Сравнение разработанных моделей восстановления изображений от полярного импульсного шума с известными моделями демонстрирует повышение качества результата восстановления, рассчитанного по метрике PSNR до 20,34 дБ.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные теоретические выводы исследований, а также описаны полученные практические результаты.

В приложениях представлены акты о внедрении результатов диссертационного исследования, копии свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и патента на изобретение, расчетные таблицы, листинг разработанных программных модулей комплекса.

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю – кандидату физико-математических наук, заведующему кафедрой математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета Павлу Алексеевичу Ляхову. Доктору технических наук, заслуженному деятелю науки и техники РФ, академику МАИ, создателю и руководителю научной школы «Нейроматематика, модулярные нейрокомпьютеры и высокопроизводительные вычисления», почётному профессору Северо-Кавказского федерального университета Николаю Ивановичу Червякову. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов и проектов: «Разработка математических моделей и методов снижения энергопотребления в системах мобильной связи на основе системы остаточных классов» № 2.6035.2017/БЧ (руководитель Н.И. Червяков), РФФИ 19-07-00130 «Экономичные средства интеллектуального анализа визуальной информации на основе сверточных нейронных сетей» (руководитель П.А. Ляхов), гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук «Аппаратные ускорители с параллельными масштабированными вычислениями для обработки трехмерных медицинских изображений» МК-371.2022.4 (руководитель Н.Н. Нагорнов),

Северо-Кавказского центра математических исследований, Северо-Кавказский федеральный университет, соглашения №. 075-02-2021-1749, №. 075-02-2022-892 и №075-02-2023-938 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (руководитель А.А. Алиханов), а также проекта РНФ 23-71-10013 "Перспективные методы интеллектуальной обработки сигналов на основе глубоких нейронных сетей и модулярных вычислений" (руководитель П.А. Ляхов).

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1.1 Анализ проблемы искажения цифровых изображений и видео

Наибольшую часть информации человек воспринимает при помощи зрения. На сегодняшний день, с целью предоставления человеку полученных данных в виде информации, которую можно извлечь и проанализировать, большая нагрузка отводится техническим системам обработки и анализа видеoinформации [37]. В современном мире существует множество областей, таких как системы наблюдения, телевизионное вещание, медицина, полиграфия, интернет и так далее, где исходные данные поступают в виде цифровых изображений.

Цифровые изображения $F(i, j)$ представляются в виде матрицы элементов, которые являются значениями яркостей пикселей, а i и j – координаты в пространстве. За начало координат отвечает левый верхний угол изображения, где $(i, j) = (0, 0)$. На рисунке 1.1а приведено 8-битное изображение в оттенках серого, на рисунке 1.1б приведено матричное представление фрагмента изображения, в данном случае яркость пикселя в начале координат $(0, 0)$ равна 232 [25].



а)

232	235	234	231	229	228	226
223	226	228	226	226	223	222
211	216	219	221	223	224	225
208	213	216	219	223	227	228
205	208	210	212	217	223	224
204	203	202	205	210	216	218
206	203	201	204	208	210	210

б)

Рисунок 1.1 – Представление изображения: а) двумерное изображение в оттенках серого; б) матричное представление фрагмента изображения

Значения яркостей пикселей зависят от разрядности изображения и определяют уровень серого цвета. Например, для 8-битного изображения пиксель с минимальным значением яркости 0 будет черного цвета, а максимальный по яркости со значением 255 будет белого цвета.

Серия изображений, сменяющих друг за друга и создающих эффект движения, называется видео [19]. Одно неподвижное изображение в видео также называют кадром. Количество кадров, представленных в одной секунде видео характеризуют частоту кадров. Чем больше кадров в одной секунде видео, тем плавнее эффект движения в кадре [21].

Изображения возникают с помощью сенсора или совокупности сенсоров, которые регистрируют сигнал. Сигнал может быть получен, например, в результате взаимодействия источника освещения с элементами изображаемой сцены. Чаще всего изображения регистрируются с помощью матрицы сенсоров, которая находится в большинстве цифровых камер [2]. Цифровые видеокамеры снимают с различной частотой кадров, обычно это 30 или 60 кадров в секунду. Также существуют специальные камеры, которые могут снимать с частотой более 1000 кадров в секунду.

Большинство сенсоров формируют аналоговый сигнал, который необходимо преобразовать в цифровую форму с помощью процессов дискретизации и квантования. Квантование – это представление амплитуды значениями из конечного множества, а дискретизация – это представление координат в виде конечного множества отсчетов. Существует множество факторы, при которых во время работы сенсоров возникают шумы на изображениях [17]. К ним относятся как различные внешние условия, так и качество самих сенсоров. При получении изображения с помощью фотокамер шум может возникнуть из-за недостаточного уровня освещенности [6].

Шум на цифровом изображении может возникать как во время процесса получения, так и во время процесса передачи по каналам связи. На рисунке 1.2 продемонстрирован процесс искажения и восстановления изображения. В процессе

искажения на исходное изображение $F(i, j, k)$ действует некоторый оператор зашумления Θ , что после добавления шума определенной модели дает зашумленное изображение $\Theta(F(i, j, k))$. Задача восстановления состоит в получении изображения максимально приближенного к исходному по некоторой информации из искаженного изображения, относительно оператора зашумления и некоторой информации относительно определенной модели шума. Для решения этой задачи на зашумленное изображение $\Theta(F(i, j, k))$ действует оператор восстановления Ξ .

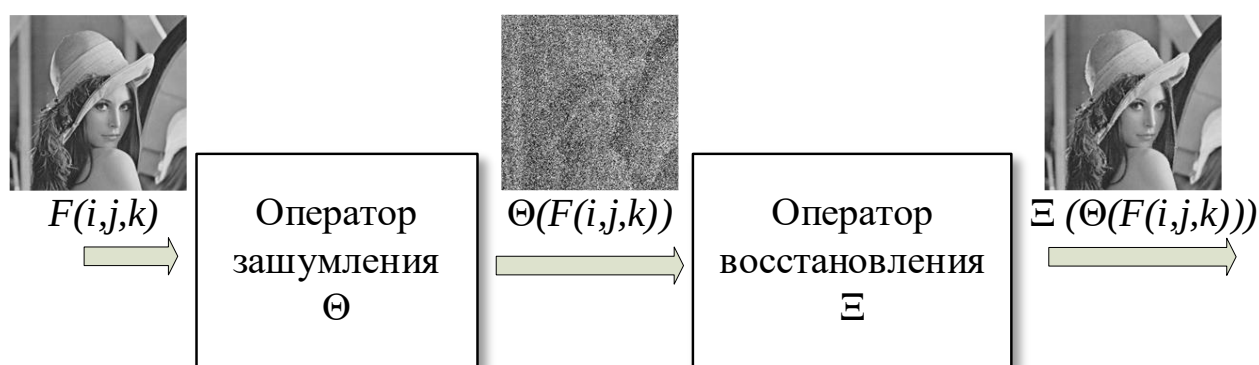
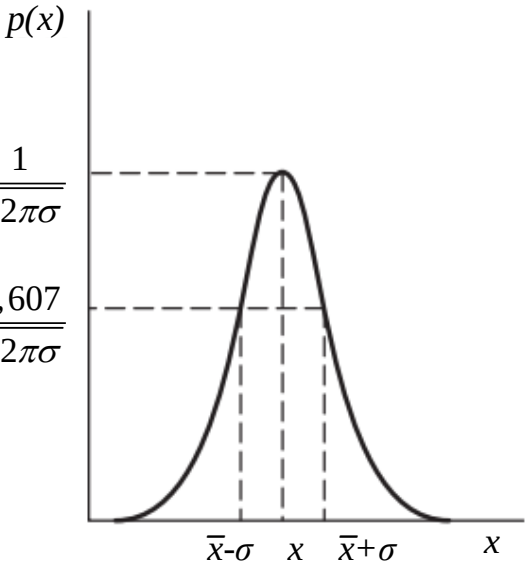
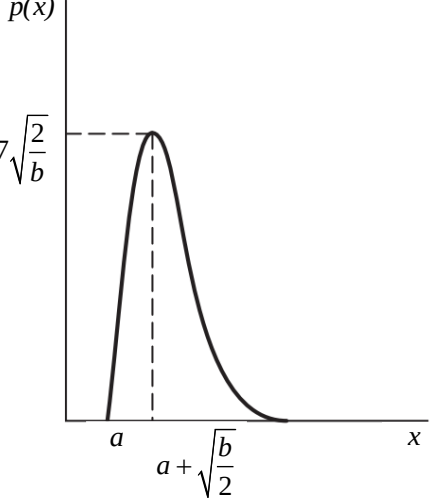


Рисунок 1.2 – Процесс зашумления и восстановления изображений и видео

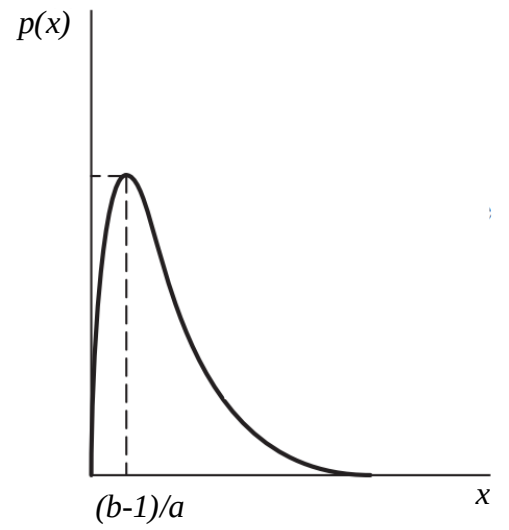
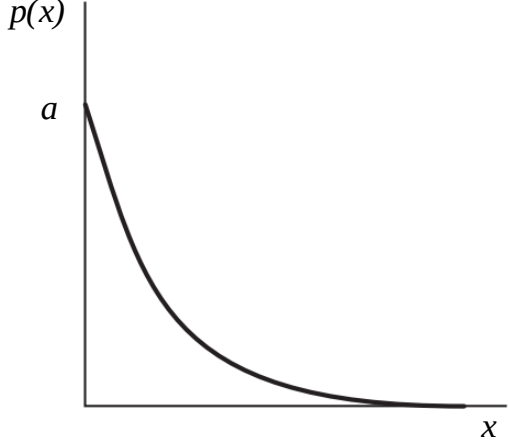
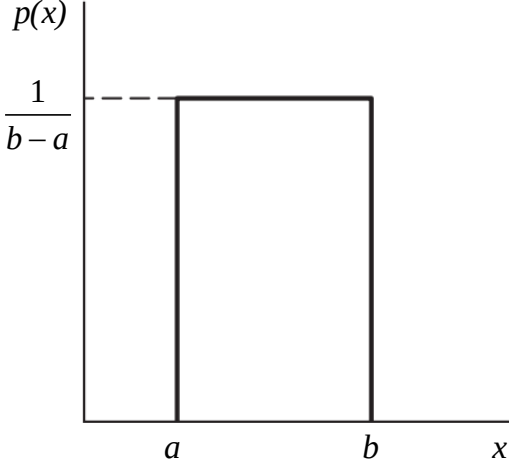
Существуют различные типы шумового воздействия. Основные из них представлены в таблице 1.1 [66]. В зависимости от характера воздействия на сигнал различают аддитивный и мультипликативный тип шума. Аддитивные помехи проявляют себя независимо от сигнала. Действия сигнала и аддитивной помехи складываются. Мультипликативная помеха возникает только при наличии сигнала. Её действие проявляется в нерегулярном изменении уровня сигнала. Действия сигнала и мультипликативной помехи перемножаются.

В таблице 1.1 представлены функции плотности распределения для различных типов шума на изображениях, где x – значение яркостей пикселей; a и b – константы, определяющие параметры шума; P_a и P_b – вероятности возникновения a и b , соответственно; σ – среднеквадратичное отклонение; σ^2 – дисперсия x .

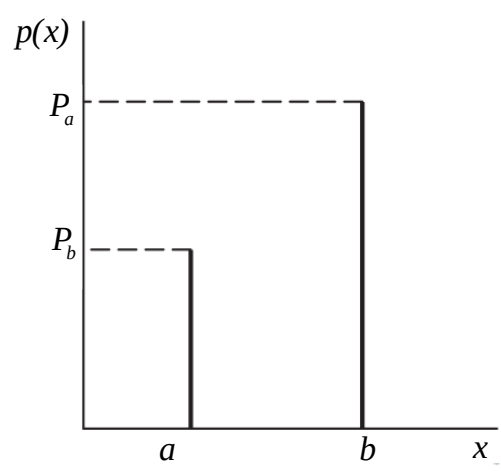
Таблица 1.1 – Функции плотности распределения для различных типов шума на изображениях

Тип шума	Функция плотности распределения	График плотности распределения вероятностей
Гауссов шум	$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2}$	
шум Рэлея	$p(x) = \begin{cases} \frac{2}{b}(x-a)e^{-(x-a)^2/b} & \text{при } x \geq a, \\ 0 & \text{при } x < a. \end{cases}$ $\bar{x} = a + \sqrt{\pi b / 4},$ $\sigma^2 = \frac{b(4 - \pi)}{4}.$	

Продолжение таблицы 1.1

Тип шума	Функция плотности распределения	График плотности распределения вероятностей
шум Эрланга	$p(x) = \begin{cases} \frac{a^b x^{b-1}}{(b-1)!} e^{-ax} & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0. \end{cases}$ $\bar{x} = b / a$ $\sigma^2 = b / a^2$	
экспоненциальный шум	$p(x) = \begin{cases} a e^{-ax} & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0. \end{cases}$ $\bar{x} = 1 / a$ $\sigma^2 = 1 / a^2$	
равномерный шум	$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$ $\bar{x} = \frac{a+b}{2}$ $\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$	

Продолжение таблицы 1.1

Тип шума	Функция плотности распределения	График плотности распределения вероятностей
импульсный шум	$p(x) = \begin{cases} P_a & \text{при } x = a; \\ P_b & \text{при } x = b; \\ 1 - P_a - P_b & \text{в остальных.} \end{cases}$	

В рамках данного диссертационного исследования рассматривается воздействие импульсного шума на изображения и видео, так как его воздействие приводит к значительному искажению информации.

Коммутационные процессы в электрических схемах, помехи, создаваемые окружающей радиоэлектронной аппаратурой, а также процессы электрических разрядов приводят к возникновению импульсного шума [3]. Импульсный шум — это взрывное шумовое событие, обычно электромагнитного происхождения, с потенциально высокой амплитудой (мощностью), но ограниченной по продолжительности. Импульсный шум характеризуется статистически его амплитудами, длительностью, временем прибытия и частотным спектром. Причины импульсного шума многообразны и могут быть введены в цикл либо техногенными и/или естественными электромагнитными явлениями:

а) Электромагнитные соединения сигналов от проводов витой пары (используемых для проводки домашних линий электропередач), связанных с системой цифровой абонентской линии (DSL);

б) Электрооборудование, используемое в домашних условиях, такое как фены, пылесосы, выключатели света и диммеры;

в) Изменения атмосферных условий, такие как удары молнии, которые влияют на сигнал в кабеле доступа;

Импульсные шумовые события демонстрируют широкий спектр длительностей, амплитуд и времени между прибытиями. Хотя было предпринято несколько попыток охарактеризовать различные распределения, импульсный шум остается, по сути, случайным событием, которое не может быть поглощено при стационарной битовой нагрузке модемов. Тем не менее, для целей инженерии и стандартизации введены широкие категории импульсного шума, обычно называемые разработанными аббревиатурами «REIN» (повторяющийся электрический импульсный шум) и «SHINE» (одиночное событие импульсного шума высокого уровня) [86]. События REIN происходят с предсказуемой частотой, которая в два раза превышает частоту тока сети переменного тока. Например, в Северной Америке события REIN ожидаются на частоте 120 Гц (переменный ток составляет 60 Гц). В Европе и других регионах события REIN ожидаются на частоте 100 Гц (переменный ток составляет 50 Гц). Данная корреляция с циклом переменного тока указывает на то, что события REIN, как правило, вызваны электрическим оборудованием, подключенным к электросети. Ожидается, что с этой связью события REIN будут преобладать в домашней среде. Амплитуду и продолжительность импульсов REIN трудно охарактеризовать и показать большие вариации. SHINE – это универсальная категория для изолированных импульсов, которые не предсказуемы во время их прибытия. SHINE включают в себя широкий спектр амплитуд и длин.

Импульсный шум не является стационарным шумом, и модемы требуют специального подхода для смягчения последствий импульсного шума. С самого начала технологии ассиметричной DSL и высокоскоростной DSL включали механизмы прямой коррекции ошибок (FEC) в шумовой среде с импульсивным шумом. Альтернативным подходом к устранению последствий импульсного шума в системах DSL является использование методов ретрансляции, которые предлагают некоторые преимущества и компромиссы по сравнению с подходами FEC. Ретрансляция является ключевым элементом «Рекомендации МСЭ-Т,

G.998.4» [74]. Именно этот стандарт определяет ретрансляцию как альтернативный инструмент для усиления защиты от импульсного шума. До введения ретрансляции внешний код Рида-Соломона был также основным методом, используемым для защиты от импульсного шума в ADSL и VDSL.

Хотя технология FEC и чередования обеспечивает эффективный механизм защиты от импульсного шума, она имеет ряд недостатков. Чередование, необходимое для «распространения» байтов, приводит к дополнительной задержке в потоке данных, которая может быть неприемлемой для служб, чувствительных к задержкам. Кроме того, защита от импульсного шума требует фиксированной избыточности для каждого кодового слова. Эта избыточность вводится независимо от возникновения импульсного шума. Чем длиннее максимальная длина импульса, для которой требуется защита, тем выше будут накладные расходы. Для длинных импульсов при строгих максимальных требованиях к задержке накладные расходы могут подниматься до 50%, даже если наихудший импульс возникает нечасто. Защита от импульсного шума с использованием FEC и чередования лучше всего подходит для часто встречающихся импульсов короткой и средней продолжительности. REIN был бы хорошим примером такой импульсной шумовой среды.

FEC и чередование полагаются на корректирующие возможности, присущие схеме кодирования DSL [109]. Ретрансляция – известная альтернатива коррекции ошибок, которая давно используется в ряде других систем связи. В случае ретрансляции данные передаются блоками, которые структурированы таким образом, чтобы позволить получателю обнаружить правильное получение блока. Когда приемник обнаруживает поврежденный блок, он сообщает об этом повреждении передатчику. Затем передатчик может повторно передать тот же блок. Приемник отвечает за буферизацию любых непоследовательных блоков до тех пор, пока не будет получен блок ретрансляции. Аналогичным образом, передатчик отвечает за хранение любых блоков, которые не были признаны приемником; блокировки, которые впоследствии могут иметь право на запросы на ретрансляцию. Протокол для подтверждения приема блоков данных может быть

положительным или отрицательным подтверждением, либо комбинацией того и другого.

Ретрансляция обладает следующим преимуществом: накладные расходы на коррекцию пакетов, на которые влияет импульсный шум, используются только тогда, когда импульсный шум действительно возникает [108]. При отсутствии импульсного шума ретрансляция не влечет за собой накладных расходов и может работать при полном объеме данных. Одним из недостатков ретрансляции является присущий ему джиттер в скорости передачи данных. Это означает, что входящий поток данных прерывается всякий раз, когда пакет необходимо повторно передать, чтобы исправить пакет, который был неправильно получен с первой попытки. Также максимальная скорость передачи данных, которая может быть достигнута системой, зависит от размера буферов передачи и приема. Либо, наоборот, максимальная скорость передачи данных наложит определенный минимальный размер буфера.

При исследовании влияния импульсного шума на передачу данных возникают два основных вопроса: когда происходят импульсные события; насколько сильны эти импульсы. Чтобы ответить на первый вопрос, определим характеристики тремя параметрами: шириной импульса t_w , временем наступления t_{arr} и импульсным расстоянием t_d . На второй вопрос можно ответить, анализируя амплитуды импульсов, энергию импульса и мощность, или определяя спектральную плотность мощности. На рисунке 1.3 показано представление некоторых выборочных импульсов вместе с характерными параметрами амплитуды импульса $A_i = \max \{A_i^+, A_i^-\}$, ширина импульса t_w и время прихода t_{arr} . Импульсные события представлены в пунктирных прямоугольниках. Расстояние между двумя импульсными событиями описывается импульсным расстоянием t_d .

$$t_w + t_d = t_{arr,i+1} - t_{arr,i} \quad (1.1)$$

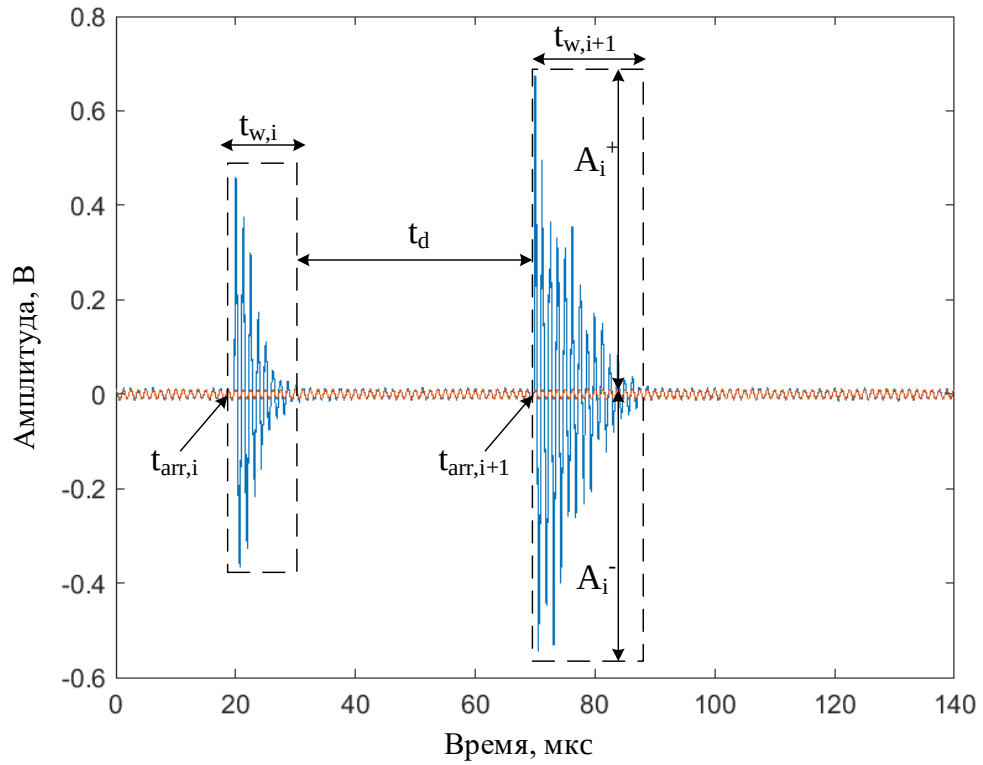


Рисунок 1.3 – Представление импульса во временной области в канале связи

С помощью обобщенной импульсной функции $\text{imp}(t)$ с единичной амплитудой и единичной шириной последовательность импульсов $n_{\text{imptrain}}(t)$ может быть описана как

$$n_{\text{imptrain}}(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \text{imp}\left(\frac{t - t_{\text{arr},i}}{t_{w,i}}\right), \quad (1.2)$$

где параметры A , t_w и t_{arr} – случайные величины, статистические свойства которых можно исследовать путем измерений. Из введенных выше первичных параметров импульса можно вывести некоторые вторичные параметры, полезные для характеристики сценария импульсного шума и его поведения во времени. Частота импульсов

$$r_{\text{imp}} = \frac{N_{\text{imp}}}{T_{\text{win}}} \quad (1.3)$$

получается из числа импульсов N_{imp} , происходящих в окне наблюдения T_{win} . При правильном выборе ширины окна наблюдения T_{win} можно охарактеризовать текущую частоту импульсных событий количеством импульсов в секунду.

Фактически, значение возмущенного времени можно получить из коэффициента возмущения (KB), который определяется отношением суммы ширин всех импульсов, возникающих в течение окна наблюдения T_{win} , к длине окна, т.е.

$$KB = \frac{\sum_{i=1}^{N_{imp}} t_{w,i}}{T_{win}}. \quad (1.4)$$

Анализ энергии и мощности импульса в сети описан в работе [148].

Помимо искажения сигнала из-за частотно-зависимых потерь в кабеле и многолучевого распространения, шум является наиболее важным фактором, ухудшающим высокоскоростную передачу данных по сетям электропередач. Из-за значительного увеличения мощности шума при возникновении импульсных событий существует значительная вероятность битовых или пакетных ошибок. В частности, при высокоскоростной передаче данных пакетные ошибки влияют на многие последовательные биты. Анализ поведения импульсных событий во времени показывает, что ширина типичных импульсов редко превышает несколько сотен микросекунд. Кроме того, коэффициент возмущения в основном ниже 1%. Однако пакетные события могут иногда превышать 10 мс и вызывать соответствующие ошибки.

Импульсный шум возникает также при передаче данных по линиям электропередач. При передаче данных в широкополосной связи данные передаются со скоростью в диапазоне нескольких мегабит в секунду [79]. Также для этого требуются выделенные системы, которые способны справляться с негативными свойствами канала. Конструкция схем модуляции и кодирования, адаптированных к каналу линии электропередачи, требует детального знания свойств канала в частотных диапазонах, превышающих 20 МГц. Наиболее важными свойствами сетей линий электропередачи, снижающими производительность высокоскоростной связи, являются искажение сигнала из-за частотно-зависимых потерь в кабеле, многолучевое распространение и шум. В отличие от многих других каналов связи, шум в среде линий электропередач не может быть описан моделью аддитивного белого гауссовского шума [100]. В диапазоне частот от

нескольких сотен килогерц до 20 МГц в линиях электропередач в основном преобладают узкополосные помехи и импульсивные шумы. В частности, импульсный шум вносит значительную дисперсию времени в канал линии электропередачи.

Из базового подхода можно определить пять общих классов шума.

1) Цветной фоновый шум с относительно низкой спектральной плотностью мощности, меняющийся в зависимости от частоты. Этот тип шума в основном вызван суммированием многочисленных источников шума малой мощности. Его спектральная плотность мощности изменяется с течением времени в минутах или даже часах.

2) Узкополосные шумы, преимущественно синусоидальные сигналы с модулированными амплитудами, вызванные попаданием радиовещательных станций. Уровень обычно меняется в зависимости от времени суток.

3) Периодический импульсный шум, асинхронный с частотой сети, с частотой повторения от 50 до 200 кГц, с дискретным линейчатым спектром, расположенным в соответствии с частотой повторения импульсов. Этот тип шума в основном вызван импульсными источниками питания.

4) Периодический импульсный шум синхронный с частотой сети с частотой повторения 50 или 100 Гц (в Европе). Импульсы имеют короткую продолжительность (несколько микросекунд) и имеют спектральную плотность мощности, которая уменьшается с частотой. Этот тип шума вызывается источниками питания, происходящего синхронно с циклом сети.

5) Асинхронный импульсный шум, вызванный переходными процессами переключения в сети. Импульсы имеют продолжительность от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд со случайным появлением. Спектральная плотность мощности этого типа шума может достигать значений более чем на 50 дБ выше фонового шума.

Свойства шумов типов 1-3 обычно остаются неподвижными в течение нескольких секунд и минут, или иногда даже в течение нескольких часов, и могут быть сведены к фоновому шуму. Типы шума 4 и 5 являются временными

вариантами с точки зрения микросекунд до миллисекунд. Во время возникновения таких импульсов, при передаче данных происходят битовые ошибки.

Импульсный шум также возникает при передаче в каналах связи без кодирования [64]. Такие каналы связи являются решением проблемы, возникшей из-за преобладания беспроводных сетей и появления различных мобильных устройств, и присущая традиционной структуре видеосвязи, разработанной в соответствии с теоремой разделения Шеннона. Проблема заключается в отсутствии гибкости при обработке неоднородности каналов и пользователей. Теорема Шеннона предполагает, что кодирование источника и кодирование канала можно проектировать и оптимизировать отдельно [70]. В последние десятилетия сторонники исходного кодирования приложили усилия для устранения избыточности исходного изображения посредством прогнозирования, преобразования, квантования и энтропийного кодирования, чтобы представить данные с минимальным количеством бит. В результате каждый бит закодированного потока данных имеет решающее значение для успешного декодирования [60]. Следовательно, во время передачи изображений и видео необходимо введение канального кодирования для защиты каждого отдельного бита и исправления любых возможных ошибок. В настоящее время такой подход широко применяется в цифровой видеосвязи. Однако с преобладанием беспроводных сетей и появлением различных мобильных устройств возникает проблема, присущая традиционной структуре видеосвязи, разработанной в соответствии с теоремой разделения Шеннона, а именно, отсутствие гибкости при обработке неоднородности каналов и пользователей [49]. Одним из современных решений данной проблемы стала схема передачи без кодирования SoftCast, продемонстрировавшая большой потенциал для беспроводной передачи видео [78]. В отличие от обычных подходов, SoftCast обрабатывает входные изображения только с помощью серии преобразований, при этом передача не кодируется и может искажаться в зависимости от состояния канала [139]. В работе [77] предложены схемы передачи видео без кодирования, идея которых заключается в отсутствии использования процессов квантования, энтропийного и канального

кодирования, и в использовании трехмерного дискретного косинусного преобразования для декорреляции источника видео. В работе [71] предлагается еще один метод передачи некодированного видео MUcast, который сначала получает среднеквадратичную ошибку (MSE) между переданными и принятыми видеоданными, как функцию назначения канала и распределения мощности. Затем формирует назначение многопользовательских каналов и распределение мощности как задачу оптимизации. Искажение передаваемых изображений и видео в перечисленных работах соответствует характеристикам случайного импульсного шума, который рассматривается в данной работе [5].

В данной работе рассматривается восстановление изображений и видео, которые уже подверглись искажению. А также изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками. Вопрос устранения импульсов в каналах связи не рассматривается. В пункте 1.2 будут рассмотрены современные известные методы восстановления изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума.

1.2 Анализ моделей и методов восстановления изображений и видео от импульсного шума

Пространственная фильтрация является одним из возможных методов устранения импульсного шума на изображении [14]. Наиболее известным фильтром из основанных на порядковых статистиках, является медианный фильтр [40]. Наиболее простым нелинейным фильтром для очистки изображений от импульсного шума является стандартный медианный фильтр (СМФ). Фильтрация на основе СМФ осуществляется посредством движения окна (маски фильтра) вдоль последовательности дискретных отсчетов с присваиванием медианы массива значений внутри маски результирующему отсчету сигнала. При выполнении медианной фильтрации для пикселя изображения необходимо сначала

упорядочить по возрастанию значения пикселей внутри окрестности, затем найти значение медианы, и присвоить полученное значение обрабатываемому элементу. Так, для окрестности 3×3 элементов медианой будет пятое значение по величине, для окрестности 5×5 – тринадцатое значение. На рисунке 1.4 представлен пример получения пикселя изображения при применении медианного фильтра с маской 3×3 .

81	132	40
144	0	129
69	139	135

→

132

Исходный массив значений:

$\{81, 132, 40, 144, 0, 129, 69, 139, 135\}$

Упорядоченный по возрастанию массив:

$\{0, 40, 69, 81, 132, 135, 139, 144\}$

Рисунок 1.4 – Пример получения пикселя изображения после применения медианного фильтра с окном 3×3

При вычислении медианы значение в самой точке (в центре окрестности) также учитывается. Медианные фильтры особенно эффективны при наличии полярного импульсного шума. Их широкая популярность обусловлена приспособленностью к подавлению некоторых видов случайных шумов. Кроме того, они приводят к меньшему размытию в сравнении с линейными сглаживающими фильтрами того же размера. Тем не менее размытие изображений является основным недостатком медианной фильтрации. Как одно из решений снижения этого негативного эффекта были разработаны фильтры с весовыми коэффициентами, где путем выбора веса элементов фильтра можно получить желаемый уровень сглаживания [84]. Поиск медианы при вычислении результата работы фильтра осуществляется по массиву, который состоит из суммы всех элементов окна и весом центрального элемента минус 1, так как один раз центральный элемент был учтен как элемент окна обработки. Например, в работе

[23, 26, 57] продемонстрировано восстановление изображений от полярного импульсного шума с применением медианных фильтров с взвешенными центральными элементами. Показано влияние вероятности получения неискаженных пикселей и искажения функции распределения пикселей изображения на результат обработки. Также показано, что при решении задачи восстановления полярного импульсного шума размер маски фильтра зависит от интенсивности шума на изображениях. А именно, чем выше интенсивность шума на изображениях, тем больший размер маски фильтра нужен для его подавления. Если рассматривать медианный фильтр с маской размером $2L_{wc} + 1$ и весом центрального элемента $2K_{wc} + 1$, то нахождение медианы при вычислении результата фильтрации осуществляется внутри массива, состоящего из $2L_{wc} + 2K_{wc} + 1$ элементов. Если центральный пиксель фрагмента изображения, к которому применена медианная фильтрация с взвешенным центральным элементом имеет минимальное значение 0, то для того, чтобы результатом работы фильтра был 0 необходимо и достаточно, чтобы среди оставшихся $2L_{wc}$ пикселей части изображения не менее $(2L_{wc} - 2K_{wc} - 1) / 2$ пикселей имели значения 0. Так как количество пикселей является целым числом, то данное требование можно заменить на требование равенства нулю не менее $L_{wc} - K_{wc}$ пикселей фрагмента изображения. Если центральный пиксель фрагмента изображения, к которому применен медианный фильтр с взвешенным центральным элементом имеет, отличное от нуля значение, то для того, чтобы результатом работы фильтра был 0 необходимо и достаточно, чтобы среди оставшихся $2L_{wc}$ пикселей фрагмента изображения не менее $(2L_{wc} + 2K_{wc} + 1) / 2$ пикселей имели нулевые значения. Поскольку количество пикселей является целым числом, то данное требование можно заменить на требование равенства нулю не менее $L_{wc} + K_{wc} + 1$ пикселей фрагмента изображения. Таким образом, вероятность получения 0 в качестве результата работы медианного фильтра с взвешенным центральным элементом равна:

$$\begin{aligned} \text{вероятность}\{Y(i, j) = 0\} = & \frac{p}{2} \sum_{i=L_{wc}-K_{wc}}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i} + \\ & + \left(1-\frac{p}{2}\right) \sum_{i=L_{wc}+K_{wc}+1}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

В случае модели импульсного шума с равной вероятностью появления белых и черных пикселей используется аналогичная формула для вероятности получения некоторой N_{wc} в качестве результата работы медианного фильтра с взвешенным центральным элементом:

$$\begin{aligned} \text{вероятность}\{Y(i, j) = N_{wc}\} = & \frac{p}{2} \sum_{i=L_{wc}-K_{wc}}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i} + \\ & + \left(1-\frac{p}{2}\right) \sum_{i=L_{wc}+K_{wc}+1}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Из формул (1.5) и (1.6) можно найти вероятности получения искаженного и неискаженного результата работы медианного фильтра с взвешенным центральным элементом, соответствующего получению 0 или N на выходе фильтра и неискаженного результата работы медианного фильтра с взвешенным центральным элементом соответствующего получению значений, отличных от 0 или N на выходе фильтра.

$$\begin{aligned} \text{вероятность}\{Y(i, j) - \text{"искажен"}\} = & p \sum_{i=L_{wc}-K_{wc}}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i} + \\ & + (2-p) \sum_{i=L_{wc}+K_{wc}+1}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} \text{вероятность}\{Y(i, j) - \text{"не искажен"}\} = & 1 - p \sum_{i=L_{wc}-K_{wc}}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i} - \\ & - (2-p) \sum_{i=L_{wc}+K_{wc}+1}^{2L_{wc}} C_{2L_{wc}}^i \left(\frac{p}{2}\right)^i \left(1-\frac{p}{2}\right)^{2L_{wc}-i}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

В работе [20, 26] показано, что в различных случаях с ростом коэффициента K_{wc} вероятность получения неискаженного пикселя изображения уменьшается.

Еще одним способом снижения эффекта размытия медианной фильтрации являются адаптивные медианные фильтры [10, 119]. На рисунке 1.5 представлена схема работы адаптивной медианной фильтрации. Схема включает в себя переключающий механизм, который принимает решение о необходимости применения медианной фильтрации к пикселям изображения. Медианная фильтрация применяется в зависимости от того, является ли пиксель искаженным.

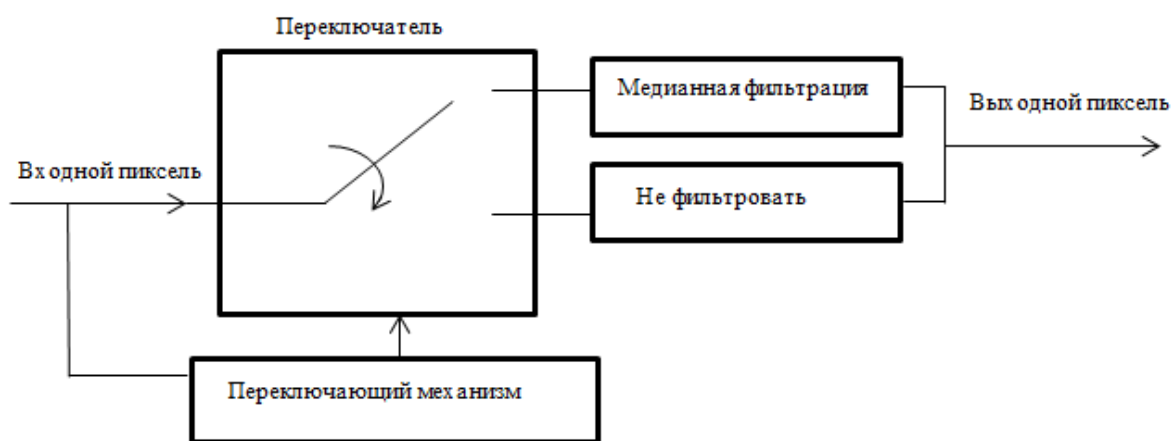


Рисунок 1.5 – Схема работы адаптивной медианной фильтрации

На рисунке 1.6 представлен пример работы адаптивной медианной фильтрации, где в отличие от рисунка 1.4 значения, которые при воздействии полярного импульсного шума не были искажены, после обработки адаптивным медианным фильтром сохранили свои значения.

161	163	163	162	159	0	163	163	162	0	163	163	163	162	161
161	162	162	161	159	255	162	162	161	0	162	162	162	161	161
162	162	162	161	160	162	255	255	161	0	162	162	162	161	161
164	163	161	161	161	164	163	255	255	255	164	163	161	160	161
163	161	159	159	160	163	255	159	0	0	163	163	163	162	161
а)					б)					в)				

Рисунок 1.6 – Пример работы адаптивного медианного фильтра:

- а) фрагмент оригинального изображения; б) фрагмент изображения, искаженного полярным импульсным шумом; в) фрагмент искаженного изображения, восстановленный адаптивным медианным фильтром.

В работе [133] разработан метод адаптивной медианной фильтрации, предлагающий увеличивать маску медианного фильтра до тех пор, пока не будет получено приемлемое значение результата. В работе [72] для получения приемлемых значений результат применяется итеративный подход к восстановлению изображений адаптивным медианным фильтром. В работе [130] изображение восстанавливается при помощи масок фильтра большого размера, а результат восстановления рассчитывается при помощи функции влияния удаленности пикселей внутри маски фильтра. В работе [96] продемонстрирована работа метода обработки изображений, которая основана на двухступенчатой процедуре формирования взвешенных сумм, вычисляемых по вариационному ряду незашумленных пикселей внутри маски фильтра. Также, подход адаптивной медианной фильтрации используется в работе [22], где предлагается новый подход к адаптивной медианной очистке изображений от полярного импульсного шума. Используются маски фильтра из 4 элементов, но при этом, подход итеративный, а также результат обработки основан на функции распределении Лоренца. Некоторые из адаптивных и переключающихся подходов для очистки изображений от импульсного шум были применены для задачи очистки видеоданных от импульсных помех [21, 38].

Для адаптивного подхода при использовании медианной фильтрации изображений необходимо предварительно определить какие пиксели подлежат фильтрации. Для этого были разработаны методы детектирования импульсных значений изображений. Методы детектирования импульсного шума используют множество различных подходов, чтобы определить, является ли данный пиксель импульсом. Данные подходы значительно различаются по сложности. Наиболее базовые детекторы импульсов основаны на методах двух состояний. Основная цель этих методов состоит в нахождении пикселей, имеющих значительные выбросы по сравнению со своими соседями внутри маски фильтра. Одним из самых простых и интуитивно понятных методов является сравнение интенсивности пикселя со средней интенсивностью в его окрестностях [124]. Детекторы двух состояний, с

обучением или без него, скорее всего, не смогут обнаружить помехи, которые не сильно изменили свои значения в результате воздействия импульсного шума, поскольку они заданы на поиск исключительно больших выбросов. В связи с этим, после обработки изображений с использованием данных детекторов на них остается зернистость.

В работе [63] предлагается рассмотреть билатеральный фильтр для сглаживания или очистки изображений от гауссова шума [33, 97, 129] в качестве детектора для обнаружения импульсных значений на изображении. Основная идея заключается в том, что билатеральный фильтр вычисляет средневзвешенное значение по некоторой окрестности и зависит от расстояния между пикселями и разницы яркости между пикселями. Сходство между любыми двумя пикселями можно задать следующим образом:

$$\lambda(x_{i,j}, x_{a,b}) = \exp\left(-\frac{R^2(x_{i,j}, x_{a,b})}{2\psi_\lambda^2}\right), x_{a,b} \in A_{x_{i,j}}, \quad (1.9)$$

$$\eta(x_{i,j}, x_{a,b}) = \exp\left(-\frac{(x_{i,j} - x_{a,b})^2}{2\psi_\eta^2}\right), \quad (1.10)$$

$$\theta(x_{i,j}, x_{a,b}) = \lambda(x_{i,j}, x_{a,b}) \cdot \eta(x_{i,j}, x_{a,b}), \quad (1.11)$$

где $\lambda(x_{i,j}, x_{a,b})$ – параметр геометрического расстояния $R(x_{i,j}, x_{a,b})$, а $\eta(x_{i,j}, x_{a,b})$ – параметр влияния разницы яркостей между пикселями; (i, j) и (a, b) – координаты пикселей в локальной области A ; ψ_λ и ψ_η описывают среднеквадратичные отклонения коэффициентов $\lambda(x_{i,j}, x_{a,b})$ и $\eta(x_{i,j}, x_{a,b})$, соответственно. Далее вычисляется сумма значений θ

$$\zeta_{x_{i,j}} = \sum_{x_{a,b} \in \Omega_{x_{i,j}}} \theta(x_{i,j}, x_{a,b}). \quad (1.12)$$

После чего формируется карта зашумленных пикселей $g_{i,j}$, определяемая порогом T :

$$g_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{если } \zeta_{x_{i,j}} < T; \\ 1, & \text{если } \zeta_{x_{i,j}} \geq T. \end{cases} \quad (1.13)$$

Значение T подбирается экспериментально, на основе эмпирического анализа результатов работы детектора.

В работе [63] также предлагается подход для детектирования искажений на изображениях, искаженных импульсным шумом, основанный на билатеральной фильтрации [43]. Оценка сходства пикселей в данном методе основана на коэффициентах разности геометрического расстояния и разности яркостей пикселей билатерального фильтра, умноженных на введенный параметр определения ранговых абсолютных разностей (ROAD), которая рассчитывается по формулы 1.14:

$$\text{ROAD}_4(x) = \sum_{i=1}^4 r_i(x) \quad (1.14)$$

Данная формула подразумевает сумму абсолютной разницы первых четырех элементов внутри маски фильтра. На рисунке 1.7 приведен пример вычисления параметра ROAD:

$\begin{pmatrix} 213 & 171 & 88 \\ 216 & 186 & 107 \\ 218 & 202 & 139 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 27 & 15 & 98 \\ 30 & - & 79 \\ 32 & 16 & 47 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 27 & 15 & 98 \\ 30 & - & 79 \\ 32 & 16 & 47 \end{pmatrix}$
Оригинальный фрагмент	Абсолютная разность
$r_1 = 15, r_2 = 16$	$15 + 16 + 27 + 30 = 88$
$r_3 = 27, r_4 = 30$	

Рисунок 1.7 – Демонстрационный пример получения параметра ROAD в работе [63]

В работе [59] представлена схема обнаружения импульсного шума, основанная на идее поиска в изображении локальных экстремумов интенсивности

для обнаружения искаженных пикселей. Поиск осуществляется в областях, определяемых маской фильтра, которая попиксельно проходит через изображение. В каждом окне определяются локальные минимумы и максимумы интенсивности. Расположение локальных экстремумов интенсивности отмечается увеличением соответствующих значений на картах локальных экстремумов. На рисунке 1.8 представлена схема обнаружения импульсного шума из работы [59].

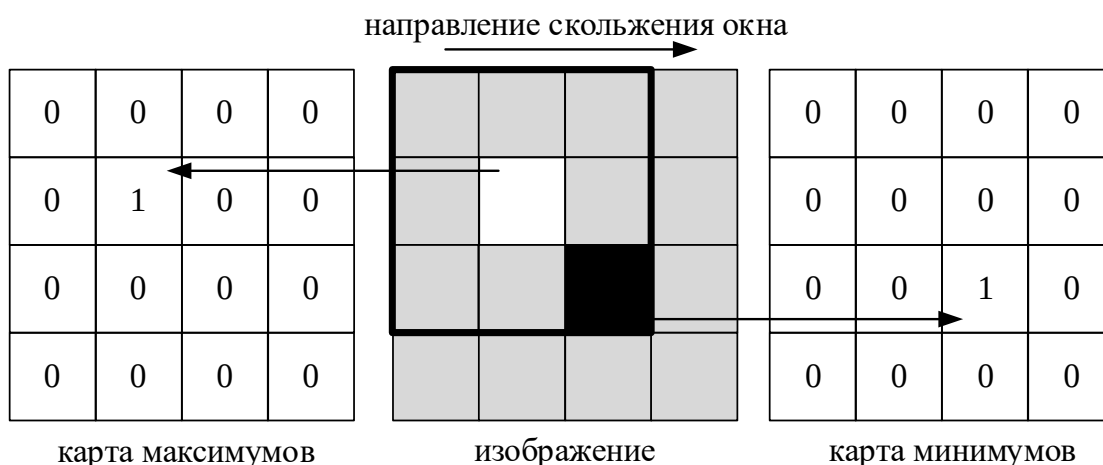


Рисунок 1.8 – Построение карт локальных экстремумов интенсивности с использованием окна размером 3×3 [59]

Полные карты локальных экстремумов на примере рисунка 1.8 представлены на рисунке 1.9.

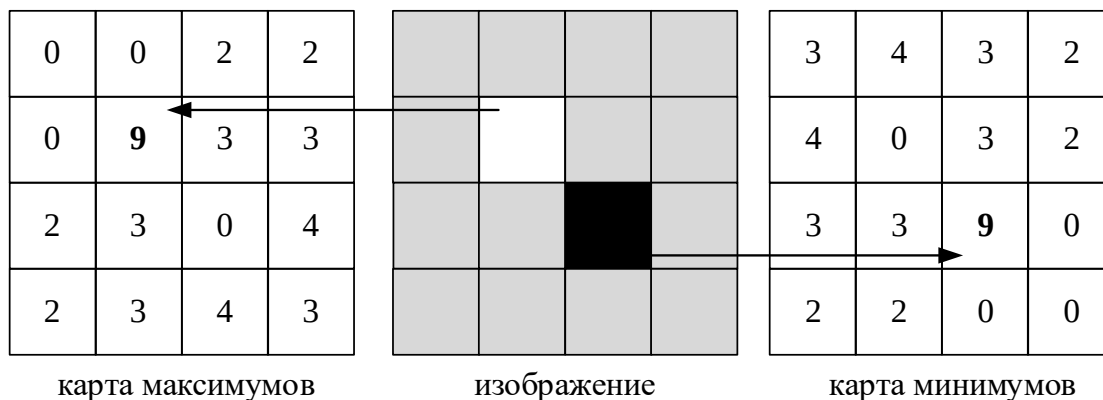


Рисунок 1.9 – Полные карты локальных экстремумов на примере с рисунка 1.8

Для окна размером $n \times n$ каждый пиксель можно рассматривать как локальный экстремум интенсивности n^2 раз. Можно предположить, что значения на картах экстремумов определяют «силу экстремума». Чем сильнее экстремум, тем больше раз пиксель определялся как экстремум в рассматриваемых окрестностях. В представленной реализации пиксель считается зашумленным, если он оказывается локальным экстремумом в количестве n^2 окон. В частности, значение n^2 на карте минимумов должно указывать на расположение темных точек. Аналогично, значение n^2 на карте максимумов должно указывать на положение светлой точки. Далее, при помощи порогового значения можно решить, является ли пиксель импульсом. В примере на рисунке 1.9 при нахождении локальных экстремумов в количестве 9 раз данные пиксели определены как импульсные помехи.

В работе [54] основополагающая идея заключается в усилении различий между искаженными и неискаженными пикселями в ROAD для большей точности обнаружения шума. В методе используется новая статистика на первом этапе из двух метода [41, 42] для обнаружения шумных пикселей. На втором этапе используется метод регуляризации с сохранением краев из работ [102, 103]. Для импульсного шума со случайным значением некоторые значения искаженных пикселей могут быть близки к значениям своих соседей. В этом случае значение ROAD пикселя может быть недостаточно большим, чтобы его можно было отличить от пикселей без шума. Таким образом, один из способов улучшить статистику ROAD заключается в нахождении способа увеличения этих значений ROAD при недопуске значительного увеличения малых значений ROAD. Для реализации этого подхода в работе [54] вводится логарифмическая функция абсолютной разницы:

$$\tilde{D}(x_{i,j}) = \log |x_{i+a,j+b} - x_{i,j}|, \quad \forall (a,b) \in A_N^0 \quad (1.15)$$

где (i, j) и (a, b) – координаты пикселей; A – маска фильтра. Для сохранения значения динамическом диапазоне $[0, 1]$ используется усечение и линейное преобразование

$$D(x_{i,j}) = 1 + \max \left\{ \log |x_{i+a,j+b} - x_{i,j}| - 5 \right\} / 5, \quad \forall (a,b) \in A_N^0 \quad (1.16)$$

Оценка сходства в работе [54] определяется по формуле 1.17 и называется ранговой логарифмической разницей (ROLД):

$$\text{ROLD}_m(x_{i,j}) = \sum_{k=1}^m D_k(x_{i,j}). \quad (1.17)$$

Искажение пикселя определяется при помощи некоторого порога T .

Для преодоления недостатков существующих фильтров полярного импульсного шума предлагается адаптивный вероятностный фильтр. Для изображения он обнаруживает помехи на основе характеристики минимальных и максимальных значений интенсивности изображений, а также распределения шума. Если свободная от шума интенсивность в окрестности повторяется с определенной вероятностью, то свободная от шума интенсивность с наибольшей повторяющейся частотой используется для удаления шума на основе статистической значимости. В противном случае для удаления шума используется медиана соседних пикселей без шума.

В работе [44] предлагается адаптивный вероятностный фильтр, обнаруживающий полярный импульсный шум на основе характеристики минимальных и максимальных значений интенсивности изображений, а также распределения шума. Если интенсивность неискаженных значений в окрестности повторяется с определенной вероятностью, то данная интенсивность с наибольшей повторяющейся частотой используется для удаления шума на основе статистической значимости. В противном случае для удаления шума используется медиана соседних пикселей без шума.

В работе [136] также вводится статистика для определения сходства между соседними пикселями. Определение, является ли пиксель шумным или нет, делается согласно подсчету количества пикселей с аналогичной интенсивностью в его окрестностях. Однако учет только разницы интенсивностей приведет к тому, что любые два пикселя с очень близкими яркостями, но расположенными в дальних областях изображения, будут рассматриваться как похожие пиксели, что явно

нецелесообразно в задаче обнаружения импульсного шума. Поэтому геометрическое расстояние и интенсивность различных соотношений между пикселями также приняты во внимание. Исходя из этого, концепция сходства между любыми двумя пикселями в работе [136] задается при помощи коэффициентов билатерального фильтра, представленных в формулах 1.9-1.11. Согласно утверждению авторов, сумма значений θ обычно попадают в интервал $[0, 2,5]$ с небольшим количеством выбросов, принимающих значения больше 2,5. Поэтому для ограничения θ в области $[0, 1]$ принимается следующая нормализация:

$$LCI = \begin{cases} 1, & \theta > 2.5 \\ \frac{\theta}{2.5}, & \theta \leq 2.5 \end{cases}, \quad (1.18)$$

где LCI – это статистика, которую можно использовать для указания локального консенсуса между рассматриваемым центральным пикселем и его окрестностями. Также различные подходы детектирования импульсных помех, основанные на пространственной фильтрации представлены в работах [95], [138] [147] и [123].

Один из современных подходов для очистки изображений от шума основан на использовании автоэнкодеров, которые учатся выполнять эффективное представление или кодирование заданного набора данных путем уменьшения размеров с использованием обучения без учителя. Авторы работы [137] предлагают комбинацию разреженного кодирования и глубоких нейронных сетей, предварительно обученных с помощью шумоподавляющих автоэнкодеров (ША). Один ША используется в качестве основного блока и обучается минимизировать потери при восстановлении между исходным изображением и его аппроксимацией, как определено сигмоидной функцией активации. Другой ША можно обучить следовать за ранее обученным, используя в качестве входных данных вывод скрытого слоя первого ША; создание многоуровневого ША [131]. Авторы исследования [137] предлагают 5-слойный многоуровневый разреженный ША для шумоподавления изображений со скрытыми слоями, размер которых пропорционален входным данным. Данная реализация претендует на получение

лучшего результата, чем смесь байесовских методов наименьших квадратов и шкалы Гаусса BLS-GSM [107].

Еще одним из подходов к фильтрации сигналов, в том числе очистке изображений от импульсного шума, является использование нечетких фильтров [24]. Некоторые из нечетких фильтров основаны на переключении, например, в работе [141] фильтр с нечетким переключением (AFSF) состоит из 3 блоков: обнаружение импульсного шума; оценка пикселей; модификация пикселей. Блок обнаружения сворачивает изображение с помощью четырех операторов Лапласа 5×5 и использует минимальное абсолютное значение операторов для обнаружения импульсного шума. Следовательно, если рассматриваемый пиксель зашумлен, его минимальное абсолютное значение велико, а если нет шума, края или плоской области, его минимальное абсолютное значение должно быть небольшим. Блок оценки удаляет все пиксели, для которых значение одной четверти соседних пикселей в выбранном окне равно одной четверти максимального или минимального значения выбранного окна, и вычисляет количество оставшихся пикселей. Если это число равно нулю, а размер окна равен 3×3 , размер окна увеличивается до 5×5 , и процесс повторяется. Если оно больше нуля, вычисляется среднее значение оставшихся пикселей. Если он равен нулю, вычисляется среднее значение четырех пикселей вокруг центрального пикселя. Блок модификации определяет функцию принадлежности на основе так называемой S-функции. Наконец, выход AFSF определяется через уравнение

$$x_{i,j} = [1 - \bar{\alpha}(x, y)] \bar{y}(x, y) + \bar{\alpha}(x, y) \cdot \text{median}(x, y), \quad (1.19)$$

где $\bar{\alpha}$ – функция принадлежности. Следовательно, если $\bar{\alpha}$ равно 0, обрабатываемый пиксель считается свободным от шума. Если $\bar{\alpha}$ равен 1, он считается зашумленным. Если $\bar{\alpha}$ между 0 и 1, он немного искажен.

Существуют нечетки фильтры, которые определяют функцию принадлежности на основе градиентов по разным направлениям. Предложенный в [118] метод обнаружения и подавления нечетких импульсных помех состоит из фазы обнаружения и фазы фильтрации. На этапе обнаружения определяются

нечеткие правила для значений нечеткого градиента в восьми различных направлениях (север, северо-восток, восток, юго-восток, юг, юго-запад, запад и северо-запад). Определена треугольная функция принадлежности, и на ее основе и значениях нечеткого градиента могут быть обнаружены зашумленные пиксели [52]. Затем обнаруженные зашумленные пиксели добавляются к гистограмме уровня шума, и только если самый большой столбец гистограммы больше или равен предварительно определенному порогу (приблизительный интервал: [2,5, 10]), изображение считается зашумленным и требует фильтрации. Фаза фильтрации определяет трапецевидную функцию принадлежности на основе нечеткого набора импульсных помех, параметры которой оцениваются на основе методов, описанных в [149]. Данная функция принадлежности используется для фильтрации зашумленных пикселей посредством итеративного нечеткого усреднения соседних пикселей. Результаты показывают, что данный метод работает лучше фильтров, использующих нечеткие правила вывода, такие как нечеткое правило интерференции с фильтром другого действия (FIRE) [113], двухступенчатый фильтр FIRE [114], кусочно-линейный фильтр FIRE [112,1115], медианные или средние нечеткие фильтры, такие как нечеткий медианный фильтр [30, 31], адаптивное взвешенное нечеткое среднее [91, 92], асимметричный треугольный медианный нечеткий фильтр [111], нечеткие фильтры на основе управления, такие как фильтр на основе итеративного нечеткого управления (IFCF) и его модификации (т.е. модифицированный IFCF, расширенный IFCF, сглаживающий IFCF, повышающий и сглаживающий FCF, FCF с фиксированной точкой, адаптивный с фиксированной точкой FCF и адаптивный средний FCF [61], адаптивный нечеткий фильтр гистограммы [132] и фильтр на основе нечеткого подобия [83]. Нечеткие фильтры обнаружения градиента [127] используют набор функций принадлежности, определенных с помощью градиентов, для улучшения шумоподавления пикселей и сохранения границ. Функции принадлежности на основе градиента и их параметры (0° , 45° , 90° , 135°) [56, 142] настроены на определение ориентации пикселей по краям и с их помощью в движущемся окне получают очищенные от шума пиксели. Авторы [113] предлагают нечеткий

фильтр, который обнаруживает зашумленные пиксели на основе различий в интенсивности между соседними пикселями и соответствующим образом корректирует их. Данный метод использует треугольную функцию принадлежности с двумя параметрами как для задачи обнаружения искажений, так и для задачи исправления пикселя. Каждое нечеткое правило имеет определенный шаблон соседних пикселей.

Среди нечетких фильтров также встречаются фильтры на основе гистограммы, как например в работе [135], где фильтр состоит из фазы нечеткого обнаружения, за которой следует фаза отмены. Шумные пиксели идентифицируются на этапе детектирования с помощью гистограмм, если они содержатся в пределах его пиков. Рассчитывается минимальное абсолютное расстояние между обрабатываемым пикселем и соседними с ним пикселями в движущемся окне. На его основе определяется функция принадлежности и предлагаются два порога [93]. Выход фильтра, определенного, в фазе отмены (1.15), $\bar{\alpha} = 0$ для незашумленных пикселей, $\bar{\alpha} = 1$ для полностью зашумленных, а для $0 \leq \bar{\alpha} \leq 1$ пиксель содержит некоторый шум и его заменяющее значение являются линейной комбинацией самого себя и медианы. Этот фильтр обеспечивает лучшее качество работы, чем фильтры на основе порядка рангов [29], взвешенные нечеткие средние фильтры, фильтр на основе информации об уровне гомогенности [106] и медианный фильтр с тремя состояниями [45].

Существуют также подходы для очистки изображений от импульсного шума, основанные на сверточных нейронных сетях (СНС) [16, 18, 68, 104, 120]. СНС – это глубокие искусственные нейронные сети с прямой связью, которые используют разновидность многослойных персептронов и предварительную обработку. Нейронная сеть, представленная в [46], использует обучение с учителем для получения модели динамической нелинейной диффузии реакции с параметрами, зависящими от времени. Предлагаемая итеративная модель нелинейной диффузии использует разницу между реакцией и диффузией.

Метод, предложенный в [117], аналогичен сверточной нейронной сети с обратной связью, представленной в [76], где каждая итерация (стадия)

предлагаемого процесса диффузии использует сверточные операции набора линейных фильтров и, таким образом, может рассматриваться как сверточная сеть. Данный метод также использует «жадную» фазу предварительного обучения [35, 101] в качестве хорошей инициализации для последующего совместного обучения [117], где функция стоимости минимизируется на всех итерациях в качестве предварительного обучения. Оба этих метода обучения используют алгоритм на основе градиента, представленный в [94]. Метод представленный в работе [41], претендует на лучшую производительность, чем сопоставление блоков и 3D-фильтрация [51], обученное одновременное разреженное кодирование [99], смеси ожидаемых логарифмических правдоподобия и гауссовых ошибок [150], оптимизации Марковских случайных полей [46], поля дерева регрессии [80], каскад полей усадки [117], минимизация взвешенной ядерной нормы [67], активное случайное поле [32] и оптимизационно-градиентный спуск [53].

Сверточная нейронная сеть, представленная в [145], состоит из 7 слоев, где в начале используется расширенная свертка с нелинейной функцией активации (ReLU), за которой следует расширенная свертка, пакетная нормализация и заканчивается снова расширенной сверткой. Расширенный фильтр используется для увеличения рецептивного поля до 33×33 и увеличения глубины сети. Такое увеличение легко улавливает контекстную информацию, тем самым способствуя восстановлению изображения. Пакетная нормализация и остаточное обучение используются для увеличения скорости обучения и более быстрого преобразования модели. Авторы также используют небольшие обучающие выборки из 400 изображений набора данных сегментации Беркли с нулевым дополнением, чтобы избежать граничных артефактов. Используемая функция потерь для остаточного обучения основана на функции оптимизатора адаптивной оценки момента из [85].

Метод шумоподавления, представленный в [110], использует TensorFlow (популярную библиотеку Python для машинного обучения [29]) для реализации полностью традиционной нейронной сети с 20 слоями. Он обучен с использованием 160 пакетов изображений размером 128×128 . Каждый уровень имеет 63 ядра 3×3 и пересылает свои результаты через слои ReLU на следующий

уровень вверх по цепочке. Кроме того, каждый слой создает дополнительный результат свертки (с использованием ядра 3×3), который добавляется вместе с результатом всех других слоев и входным изображением для получения результатов с шумоподавлением. Однако, поскольку они выполняют шумоподавление для конкретных классов, авторы используют классификаторы, предварительно обученные на VGG16 [122], чтобы оценить, к какому классу относится зашумленное изображение, прежде чем его можно будет адекватно отфильтровать.

Метод глубокой сверточной нейронной сети, представленный в [81], можно рассматривать как обобщение работы [17], которое: обеспечивает более легкое обучение, заменяя функцию влияния моделью обучения с ReLU [87]; увеличивает архитектурную глубину (количество слоев свертки) для улучшения возможностей моделирования изображений; сочетает нормализацию пакетов для повышения производительности [50]. В такой модели используется функция потерь среднеквадратичной ошибки и три типа слоев: сверточный с функцией активации ReLU в качестве первого слоя для создания 64 карт признаков, сверточный с пакетной нормализацией и функцией активации ReLU (уровни со 2 по $D-1$, где D — количество слоев) с пакетной нормализацией [73] и чистым сверточным слоем (последний слой) для восстановления вывода. Для уменьшения граничных артефактов из-за несоответствия размеров между различными входными изображениями входное изображение дополняется нулями перед первым этапом свертки. Остаточное обучение и пакетная нормализация связаны с гауссовскими распределениями и могут дополнять друг друга при наличии гауссовского шума. Предлагаемая интеграция имеет такие преимущества, как более низкая скорость сходимости остаточного обучения с пакетной нормализацией, более быстрое обучение и повышение производительности. Метод [81] обеспечивает лучшую производительность, чем метод [47] и многоуровневый персептрон [39]. Он также может быть использован при создании единой модели для нескольких задач шумоподавления изображения.

В данном пункте перечислены известные методы очистки от импульсного шума, направленные на решение одной из двух подзадач, восстановления изображений от импульсного шума: детектирование импульса и восстановление искаженного пикселя. Результаты восстановления известными моделями представлены на примере обработки видео от полярного импульсного шума. На рисунке 1.10 представлены результаты обработки видеоданных, искаженных полярным импульсным шумом известными моделями. Современные методы направлены на решение задачи детектирования импульсных пикселей и используют разные подходы для выявления искаженных значений. Но стоит отметить, что такие методы определяют некоторый процент от всех импульсов на искаженном изображении, который зависит от модели импульсного шума и интенсивности шума в кадре. Современные методы либо не используют предварительный этап детектирования импульсных значений, либо сильно размывают изображения. В некоторых случаях, при высокой интенсивности шума на изображении некоторые методы не справляются с задачей восстановления, что видно из рисунка 1.10.

Результаты обработки видеоданных известными моделями приводят к **противоречию в практике** – низкое визуальное качество восстановления видеосигнала, искаженного действием импульсного шума, при использовании известных моделей и методов.

В таблице 1.2 качество восстановления выражено при помощи характеристики пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR). Характеристика PSNR означает соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего значения сигнала.

Так как сигналы в основном имеют широкий динамический диапазон, то PSNR измеряется в децибелах и вычисляется следующим образом:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right), \quad (1.20)$$

где MSE – среднеквадратическая ошибка, вычисляемая по формуле

$$MSE = \frac{\sum_i \sum_j \sum_k (\Theta(F(i, j, k)) - F(i, j, k))^2}{D_1 \cdot D_2 \cdot D_3}, \quad (1.21)$$

где D_1 , D_2 и D_3 ширина, высота и количество кадров видео, соответственно.

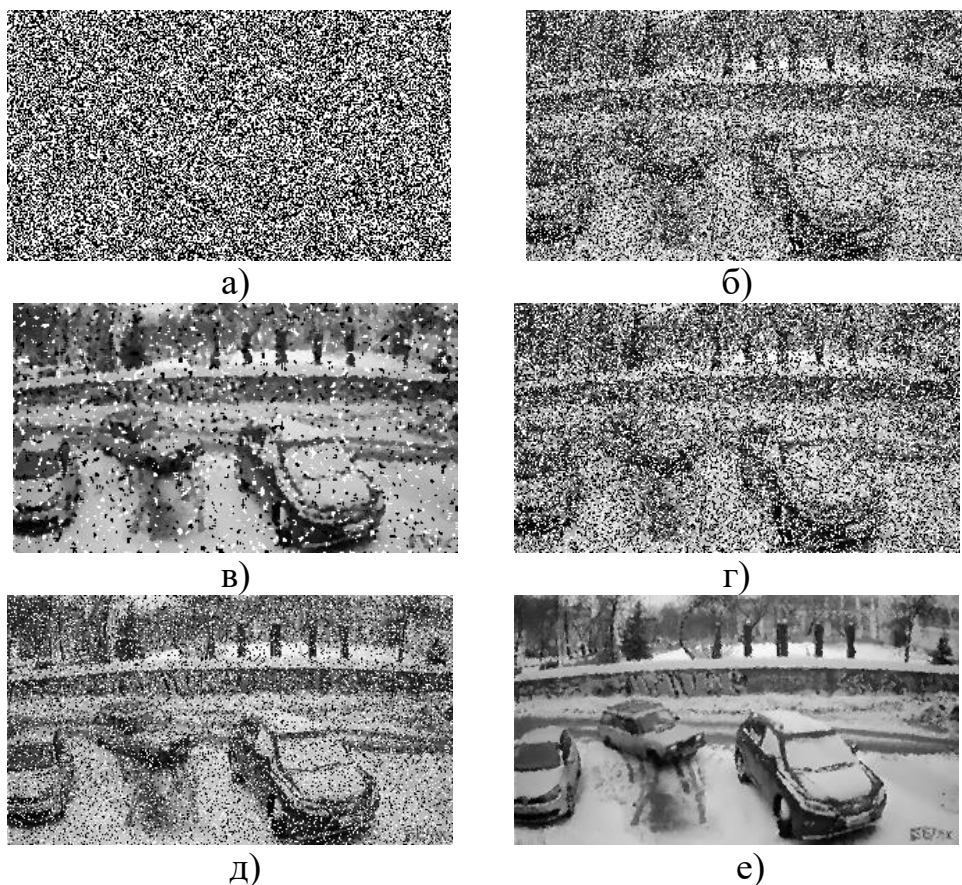


Рисунок 1.10 – Обработка видеоданных, искаженных полярным импульсным шумом: а) кадр видео, вероятность искажения пикселя 50%; результаты восстановления методами: б) [66]; в) [72]; г) [131]; д) [135]; е) [96];

Таблица 1.2 – Значения PSNR для различных моделей очистки видеоданных от полярного импульсного шума, дБ

Вероятность возникновения полярного импульсного шума	Известные модели				
	[66]	[72]	[131]	[135]	[96]
0,01	24,322	32,787	38,227	37,490	37,482
0,10	23,532	18,588	24,988	31,765	31,716
0,25	21,039	12,426	17,227	27,674	27,599
0,50	14,109	8,454	11,220	23,653	23,594

Из низких значений PSNR полученных в результате очистки изображений и кадров видео от импульсного шума следует **противоречие в науке** – известные модели и методы восстановления видеосигнала, искаженного действием импульсного шума, не позволяют достичь высокого качества обработки, измеренного метрикой PSNR.

Проблема нейросетевых подходов для очистки изображений связана с тем, что из-за выбранной архитектуры, на которой обучалась сеть, некоторые изображения со сложными сценами могут восстановиться неэффективным образом. Также реализация нейросетевых методов не всегда оправдана в силу высоких требований к вычислительным ресурсам.

1.3 Постановка задачи исследования

Анализ современных подходов к очистке изображений и видео от шума показал, что нейросетевые подходы являются вычислительно сложными и не гарантируют полного восстановления искаженной информации, а использование методов, основанных на пространственной фильтрации, не позволяет достичь высокого качества восстановления. В связи с этим можно сформулировать цель исследования, заключающуюся в повышении качества восстановления изображений и видео, искаженных в результате воздействия полярного или случайного импульсного шума. Эффективность разрабатываемых моделей и методов оценивается на основе использования общепринятых математических характеристик. Математическая постановка задачи формулируется следующим образом:

$$\begin{cases} Q(Q_{\text{PSNR}}, \Xi, \Theta) \rightarrow Q_{\text{max}}, \\ Q_{\text{PSNR}} = \text{PSNR}(F(i, j, k), \Xi(\Theta(F(i, j, k)))), \\ 0,01 \leq p_{\text{п}} \leq 0,5, \\ 0,1 \leq p_{\text{с}} \leq 0,5, \\ 0,01 \leq p_{\text{к}} \leq 0,1, \end{cases} \quad (1.23)$$

где Q – качество восстановления изображения или кадра видео; $F(i, j, k)$ – исходное изображение или кадр видео; Ξ – оператор восстановления изображения; i, j – координаты пикселя изображения; k – номер кадра видео, для отдельного изображения $k = 1$, и в дальнейшем третья координата не используется, то есть для изображений обозначается как $F(i, j)$; Θ – оператор зашумления изображения; индекс «п» означает искажение полярным импульсным шумом, индекс «с» искажение случайным импульсным шумом, индекс «к» означает искажение изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками; p – вероятность искажения соответствующим индексом шумом. Границы $p_{\text{п}}$, $p_{\text{с}}$, $p_{\text{к}}$ выбраны в соответствии со стандартном сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи G.998.4 от 11.2018 [74].

На основе проведенного анализа и сформулированной в форме системы (1.20) математической задачи исследования сформулируем научную задачу диссертационного исследования. Научная задача – разработка методов очистки изображений и видео, искаженных в результате воздействия полярного или случайного импульсного шума, при использовании которых достигается более высокое качество восстановления цифровых данных по сравнению с известными методами. Для решения поставленной общей научной задачи произведена ее декомпозиция на ряд частных задач:

1. Разработка модели очистки изображений и видео от полярного импульсного шума, основанной на адаптивной медианной фильтрации с использованием функции Лоренца.

2. Разработка вычислительного метода оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности в локальном окне.
3. Разработка модели очистки изображений и видео от случайного импульсного шума с использованием вычислительного метода оценки сходства между пикселями.
4. Разработка системы компьютерного моделирования для сравнения разработанных и существующих моделей очистки изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума.
5. Разработка комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента по очистке изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума.

1.4 Выводы по первой главе

1. Описаны способы получения изображений и видеоданных, а также процесс их искажения при воздействии шума в результате передачи по каналам связи или во время регистрации изображений. Также описаны различные типы шумового воздействия.
2. Проанализировано влияние импульсного шума на качество изображений и видео. Перечислены способы возникновения импульсного шума, представлены два основных типа в канале связи: повторяющийся электрический импульсный шум и одиночное событие импульсного шума высокого уровня. Продемонстрировано поведение импульса во временной области, а также представлены характеристики импульса в сети.
3. Изложен аналитический обзор методов снижения последствий появления импульсов в канале связи, таких как, ретрансляция, использование кода

Рида-Соломона, чередование и применение механизма прямой коррекции ошибок, а также перечислены недостатки каждого из перечисленных методов.

4. Проведен анализ существующих методов для решения задачи очистки изображений и видео от импульсного шума, которые можно разделить на методы детектирования импульсных помех и методы восстановления искаженных пикселей. Описаны современные методы, основанные на статистических, нейросетевых, пространственных подходах, также методы, основанные на нечетких множествах. Перечислены недостатки этих методов.

5. Сформулировано противоречие в практике, заключающееся в низком визуальном качестве восстановления видеосигнала, искаженного действием импульсного шума, при использовании известных моделей и методов. Также сформулировано противоречие в науке, заключающееся в том, что известные модели и методы восстановления видеосигнала, искаженного действием импульсного шума, не позволяют достичь высокого качества обработки, измеренного метрикой PSNR.

6. Сформулирована основная задача исследования, заключающаяся в повышении качества восстановления изображений и видео, искаженных в результате воздействия полярного или случайного импульсного шума, определяемого метрикой PSNR. Проведено разбиение основной задачи на ряд частных задач.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВИДЕО ОТ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА

2.1 Математическая модель очистки изображений и видео от полярного импульсного шума

Представим цифровое изображение как набор пикселей со значениями интенсивности $F(i, j)$, в которых координаты (i, j) изменяются по некоторому подмножеству Z^2 , где Z – множество целых чисел. Существует несколько моделей импульсного шума, возникающего на изображении. Импульсный шум, в зависимости от ситуации, может быть полярным или случайнзначным [90]. Также требует отдельного рассмотрения случай искажения изображения при передаче через двоичный симметричный канал с ошибками, имеющий сходство со свойствами случайнзначного шума.

Импульсные помехи на изображении достаточно точно описываются моделью случайных бинарных событий. Действие импульсной помехи проявляется как полное замещение истинной яркости (цвета) некоторого элемента изображения помеховой яркостью [55]. Основной характеристикой импульсных помех является их плотность шума или вероятность возникновения шума. Модель полярного импульсного шума задается выражением

$$\Theta_{\text{п}}(F(i, j)) = \begin{cases} 0, & \text{с вероятностью } p_0; \\ F(i, j), & \text{с вероятностью } 1 - p_0 - p_{255}; \\ 255, & \text{с вероятностью } p_{255}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где $F(i, j)$ – исходное изображение или кадр видео; $\Theta_{\text{п}}$ – оператор зашумления изображения полярным импульсным шумом; индекс «п» означает искажение полярным импульсным шумом; i, j – координаты пикселя изображения; p_0 –

вероятность искажения пикселя значением 0; p_{255} – вероятность искажения пикселя значением 255. Причем $p_0 + p_{255} = p_{\pi}$.

Задача очистки изображений от импульсного шума состоит из двух подзадач: подзадачи детектирования импульсной помехи и подзадачи восстановления сигнала. Из-за природы импульсного шума наиболее подходящим методом для удаления импульсов являются нелинейные фильтры. Для модели полярного импульсного шума не ставится задача обнаружения импульсных помех, так как искаженные пиксели принимают строго максимальные и минимальные значения яркостей. Для 8-битных изображений такими являются 0 и 255. В разработанной модели для получения наилучшего результата очистки изображений от полярного импульсного шума внимание сосредоточено на задаче восстановления пикселя. Исходя из этого постановка первой научной задачи заключается в повышении качества изображений или видео, искаженных полярным импульсным шумом, рассчитанного метрикой пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR):

$$\begin{cases} Q(Q_{\text{PSNR}}, \Xi_{\pi}, \Theta_{\pi}) \rightarrow Q_{\max}, \\ Q_{\text{PSNR}} = \text{PSNR}(F(i, j, k), \Xi_{\pi}(\Theta_{\pi}(F(i, j, k)))), \\ 0,01 \leq p_{\pi} \leq 0,5, \end{cases} \quad (2.2)$$

где Q – качество восстановления изображения или кадра видео, индекс «п» означает искажение полярным импульсным шумом; p – вероятность искажения соответствующим индексом шумом.

На рисунке 2.1 приведен пример зашумления изображения полярным импульсным шумом, на рисунке 2.1в расположение импульсных помех на изображении искаженным полярный импульсный шум с интенсивностью 25% (рисунок 2.1б), а также распределение яркостей искаженных пикселей на изображении (рисунок 2.1г).

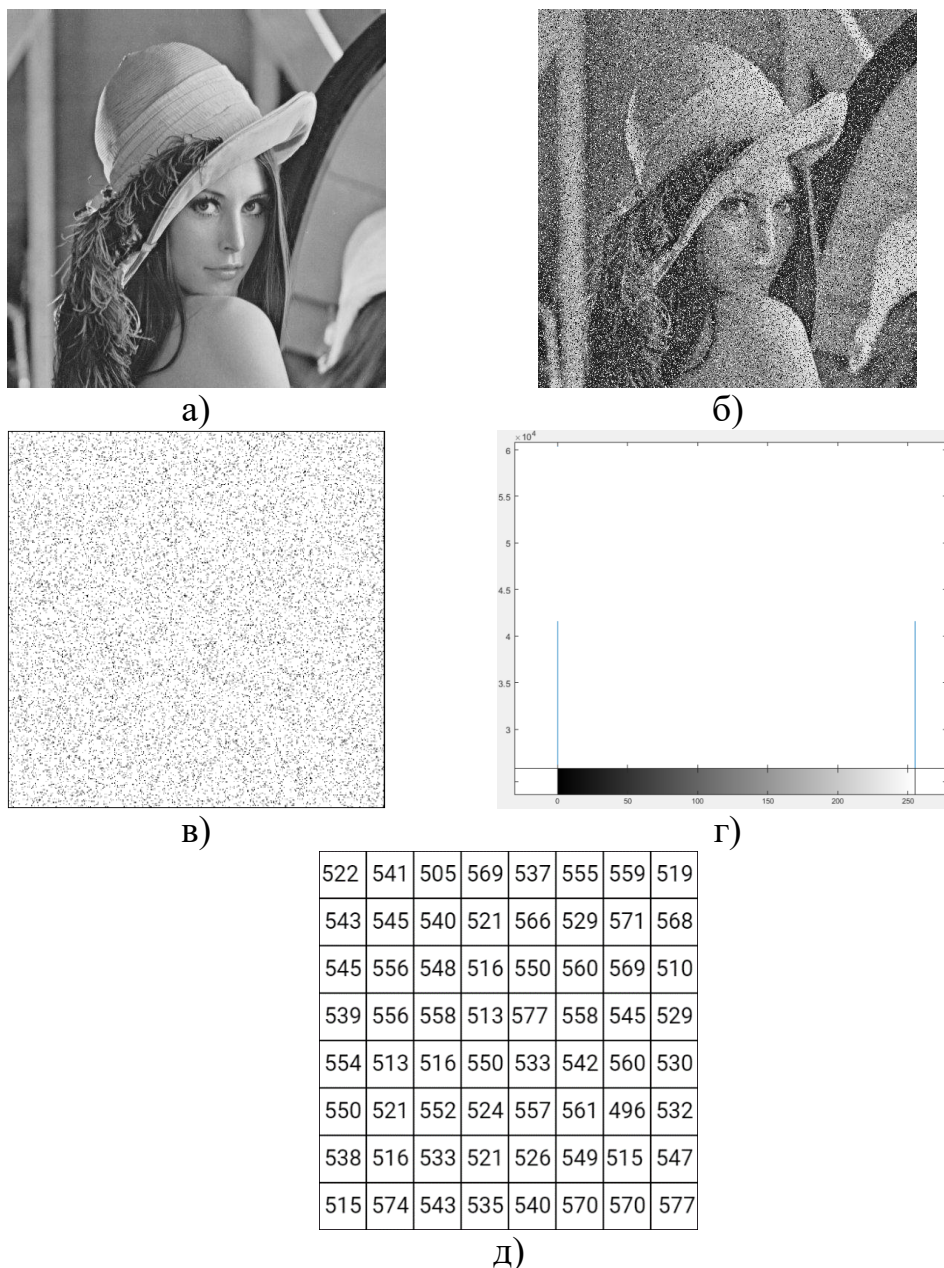


Рисунок 2.1 – Пример зашумления изображения полярным импульсным шумом.

а) исходное изображение; б) изображение, зашумленное с интенсивностью 25%;

в) расположение импульсов на изображении;

г) распределение яркости пикселей импульсных помех; д) частота встречаемых импульсов в 64 равных участках изображения

Для определения равномерности распределения импульсных помех на изображении необходимо рассчитать критерий Пирсона или критерий χ^2 («хи квадрат»), который можно представить как сумму квадратов разностей между

эмпирическими и теоретическими частотами, деленных на соответствующие теоретические частоты:

$$\chi^2 = \sum \frac{(h - h')^2}{h'}, \quad (2.3)$$

где h – эмпирические частоты, h' – теоретические частоты.

На рисунке 2.1д представлен фрагмент исходного изображения (рисунок 2.1а), разделенного на 64 равных участка. Составим для изображения 2.1д расчётную таблицу (Приложение В), для определения равномерности расположения импульсных помех на изображении. Сумма значений $\frac{(h - h')^2}{h'}$ из таблицы (Приложение В) равна 0,0018. Далее необходимо умножить χ^2 на общее количество искаженных пикселей. В результате получено значение 46,3658. По таблице критических точек распределения χ^2 , по уровню значимости равной 0,9 и числу степеней свободы равной 63, находим $\chi_{кр}^2(0,9, 63) = 49,1105$ [65]. Далее необходимо сравнить χ^2 с обратной кумулятивной функцией распределения $\chi_{кр}^2$. Сравнение $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ показывает, что с данным уровнем значимости расположение импульсных помех на изображении является равномерным.

Пространственная фильтрация является одним из возможных эффективных методов восстановления импульсного шума на изображении. Наиболее известным из фильтров, основанных на порядковых статистиках, является стандартный медианный фильтр (СМФ). Действие этого фильтра, как следует из его названия, состоит в замене значения в точке изображения на медиану значений яркости в окрестности этой точки. В разработанной модели используется принцип движения скользящего окна, а также используется значения медианы в локальном окне для расчёта нового значения для пикселя, искаженного импульсной помехой. Главным недостатком СМФ является размытие обрабатываемого изображения. Качественным решением снижения этого негативного эффекта является адаптивная медианная фильтрация. При адаптивной медианной фильтрации

исправления вносятся только для тех пикселей, которые идентифицированы как искаженные помехой [62].

В разработанной модели очистки изображений от полярного импульсного шума для расчета нового значения для искаженного пикселя вводится оценка на основе распределения Лоренца, вычисляемая следующим образом. Пусть при обработке искаженного пикселя $F(i, j)$ локальным окном A сформирован массив $\{\Theta_{\Pi}^{(c)}(F(i, j)) | 0 < \Theta_{\Pi}(F(i, j)) < 255, (i, j) \in A\}$, состоящий из неискаженных пикселей m_n . Для каждого пикселя m_n рассчитаем величину

$$d_n = \Theta_{\Pi}(F(i, j) - \text{median}\{\Theta_{\Pi}^{(n)}(F(i, j)) | 0 < \Theta_{\Pi}(F(i, j)) < 255, (i, j) \in A\}). \quad (2.4)$$

Для каждого d_n найдем значение функции Лоренца по формуле

$$\psi(d_n) = \frac{2d_n}{2\sigma^2 + d_n^2}, \quad (2.5)$$

где σ – уровень отклонения, зависящий от дисперсии изображения. Для каждого $\psi(d_n)$ рассчитываем

$$\varphi(d_n) = \begin{cases} \frac{\psi(d_n)}{d_n}, & \text{если } d_n \neq 0, \\ 0, & \text{если } d_n = 0, \end{cases} \quad (2.6)$$

Исправленному значению пикселя присваивается значение

$$\Xi_{\Pi}(\Theta_{\Pi}(F(i, j))) = \frac{\sum_n m_n \varphi(d_n)}{\sum_n \varphi(d_n)}. \quad (2.7)$$

Процедура останавливается после N -ой итерации, на которой не осталось искаженных пикселей. Исходя из формул 2.4-2.7 разработанная модель очистки изображений от полярного импульсного шума может быть представлена как:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Xi_{\Pi}(\Theta_{\Pi}(F(i, j))) = \frac{\sum_n m_n \varphi(d_n)}{\sum_n \varphi(d_n)}, \\ \varphi(d_n) = \begin{cases} \frac{\psi(d_n)}{d_n}, & \text{если } d_n \neq 0, \\ 0, & \text{если } d_n = 0, \end{cases} \\ \psi(d_n) = \frac{2d_n}{2\sigma^2 + d_n^2}, \\ d_n = \Theta_{\Pi}(F(i, j) - \text{median}\{\Theta_{\Pi}^{(n)}(F(i, j)) \mid 0 < \Theta_{\Pi}(F(i, j)) < 255, (i, j) \in A\}, \\ A = \{(i, j) \mid \sqrt{(i-a)^2 + (j-b)^2} \leq R\}. \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Функция Лоренца определена и непрерывна на всей числовой оси. Функция является нечетной, так как $\psi(-d_n) = -\psi(d_n)$. Так как $\psi(0) = 0$, то функция проходит через начала координат. Горизонтальная асимптота функции Лоренца описывается уравнением $\psi = 0$. Первая производная функции Лоренца имеет вид:

$$\left(\frac{2d_n}{2\sigma^2 + d_n^2} \right)' = \frac{4\sigma^2 - 2d_n^2}{(2\sigma^2 + d_n^2)^2}. \text{ Критические точки первого рода } d_{n,2} = \pm\sqrt{2}\sigma. \text{ В таблице}$$

2.1 приведены интервалы возрастания (убывания) данной функции, а также точки максимума и минимума. Функция Лоренца имеет следующие экстремумы:

$$\psi_{\max} = \psi(\sqrt{2}\sigma) = \frac{\sqrt{2}}{2\sigma}, \quad \psi_{\min} = \psi(-\sqrt{2}\sigma) = -\frac{\sqrt{2}}{2\sigma}.$$

Вторая производная функции Лоренца имеет вид:

$$\left(\frac{2d_n}{2\sigma^2 + d_n^2} \right)'' = \frac{4d_n(-12\sigma^2 + d_n^2 - 4\sigma^2 d_n^2)}{(2\sigma^2 + d_n^2)^4}.$$

Критические точки второго рода: $d_{n,2} = \pm\sqrt{6}\sigma$, $d_{n,3} = 0$. В таблице 2.2 приведены интервалы выпуклости и точки перегиба функции Лоренца.

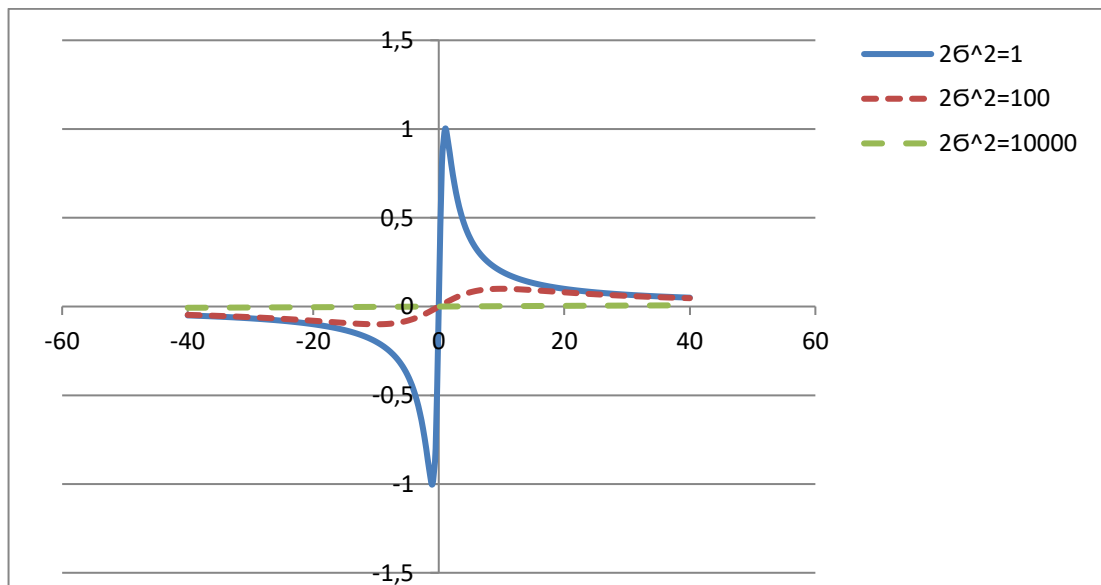
Таблица 2.1. – Интервалы возрастания (убывания) функции Лоренца

	$(-\infty; -\sqrt{2}\sigma)$	$-\sqrt{2}\sigma$	$(-\sqrt{2}\sigma; \sqrt{2}\sigma)$	$\sqrt{2}\sigma$	$(\sqrt{2}\sigma; +\infty)$
$\psi'(d_n)$	-	0	+	0	-
$\psi(d_n)$	$\searrow$	min	$\nearrow$	max	$\searrow$

Таблица 2.2. – Интервалы выпуклости и точки перегиба функции Лоренца

	$(-\infty; -\sqrt{6}\sigma)$	$-\sqrt{6}\sigma$	$(-\sqrt{6}\sigma; 0)$	0	$(0; \sqrt{6}\sigma)$	$\sqrt{6}\sigma$	$(\sqrt{6}\sigma; +\infty)$
$\psi''(d_n)$	-	0	+	0	-	0	+
$\psi(d_n)$	выпуклость вверх	точка перегиба а	выпуклост ь вниз	точка перегиба а	выпуклост ь вверх	точка перегиба а	выпуклост ь вниз

На рисунке 2.2 показаны графики функции Лоренца для различных значений $2\sigma^2$.

Рисунок 2.2 – Графики функции Лоренца для различных значений $2\sigma^2$

Пусть $\{\{y_{i,j}^{(0)}\}, \{y_{i,j}^{(1)}\}, \dots, \{y_{i,j}^{(n)}\}\}, \dots$ – последовательность изображений в оттенках серого, а $\{\{g_{i,j}^{(0)}\}, \{g_{i,j}^{(1)}\}, \dots, \{g_{i,j}^{(n)}\}\}, \dots$ – последовательность карт

искаженных пикселей, в которых значения $g_{i,j}^{(n)}$ определяются в зависимости от наличия искажения в пикселе $y_{i,j}^{(n)}$ следующим образом:

$$g_{i,j}^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{если } y_{i,j}^{(n)} \text{ не искажен;} \\ 1, & \text{если } y_{i,j}^{(n)} \text{ искажен.} \end{cases} \quad (2.9)$$

В последовательности изображений в оттенках серого $\{y_{i,j}^{(0)}\}$ используется для обозначения пикселей в исходном зашумленном изображении. Используем $\{y_{i,j}^{(n)}\}$ для обозначения значения пикселя в позиции i после n -ой итерации. В последовательности карт искаженных пикселей $\{g_{i,j}^{(n)}\}$ значение $g_{i,j}^{(n)} = 0$ означает, что пиксель с координатами (i, j) не искажен, а $g_{i,j}^{(n)} = 1$ означает, что пиксель с координатами (i, j) искажен и его требуется подвергнуть фильтрации. На n -й итерации ($n = 1, 2, \dots$) для каждого $g_{i,j}^{(n-1)} = 0$, соответствующего неискаженному пикселю $y_{i,j}^{(n-1)}$, нужно выполнить присваивание $y_{i,j}^{(n)} = y_{i,j}^{(n-1)}$. Массив неискаженных пикселей M формируется следующим образом. Просматривается множество координат

$$A = \{(i-1, j-1), (i-1, j), (i-1, j+1), (i, j-1), \\ (i, j+1), (i+1, j-1), (i+1, j), (i+1, j+1)\}, \quad (2.9)$$

соответствующее маске фильтра размером 3×3 . Если какие-то из элементов множества A принимают недопустимые значения (выходят за границы изображения), то для соответствующих координат в массив M не добавляется ничего. Если оно равно 0, то в массив M добавляется элемент m_c , равный значению пикселя с соответствующей координатой из изображения $y^{(n-1)}$. Если в результате просмотра всех элементов множества A оказалось, что массив M остался пустым, то необходимо присвоить $g_{i,j}^{(n)} = 1$ (означающее, что пиксель с координатами (i, j) остался искаженным). Если в массиве M есть хотя бы один элемент, то необходимо найти его медиану $\text{median } M$, а также присвоить $g_{i,j}^{(n)} = 0$. Далее, для

массива M необходимо рассчитать значение $y_{i,j}$ по формулам 2.4-2.7 и присвоить его пикселю $y_{i,j}^{(n)}$. Процедура останавливается после N -ой итерации, на которой не осталось искаженных пикселей, то есть

$$\sum_i \sum_j g_{i,j}^{(N)} = 0 \quad (2.11)$$

Изображение $\{y_i^{(N)}\}$ считается восстановленным выходным изображением.

В разработанной модели (формула 2.8) предлагается использовать Евклидову метрику (L_2) для построения масок адаптивного медианного фильтра с «круглой» формой. Метрика L_2 отражает интуитивные свойства расстояния между точками и наиболее удобна для зрительного восприятия результата обработки [75]. Расстояние $R(F(i, j), F(a, b))$ между пикселями $F(i, j)$ и $F(a, b)$ в метрике L_2 определяется по формуле

$$R(F(i, j), F(a, b)) = \sqrt{(i - a)^2 + (j - b)^2}. \quad (2.12)$$

Используем маску фильтра, представляющую собой множество пикселей, координаты которых удалены от центрального пикселя на расстояние, не большее некоторого, наперед заданного значения R . Множество A в разработанной модели состоит из 4 элементов, что приводит к обработке массива неискаженных пикселей, содержащего до 4 элементов. Маска фильтра в разработанной модели представлена на рисунке 2.3. Однако, на практике оказывается, что для обработки импульсного шума с низким значением p_{Π} нет необходимости анализировать столь большую окрестность, а при обработке импульсного шума с высокими значениями p_{Π} лучшее качество может быть достигнуто при анализе увеличенной окрестности пикселя за одну итерацию.

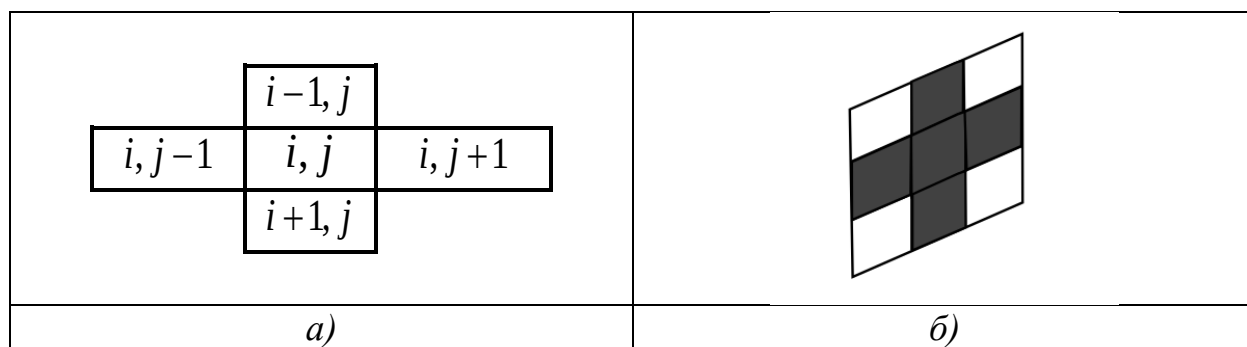


Рисунок 2.3 – Маска фильтра в разработанной модели: а) матричное представление; б) графическое представление

Для учета особенностей адаптивной медианной фильтрации импульсного шума различной интенсивности предлагается использовать следующий метод, отличительной особенностью которого являются другие формы и размеры масок для формирования множества A . На рисунке 2.4 показана схема расположения окрестных пикселей с подписанными значениями квадратов расстояния R^2 до центрального пикселя, который подписан как x .

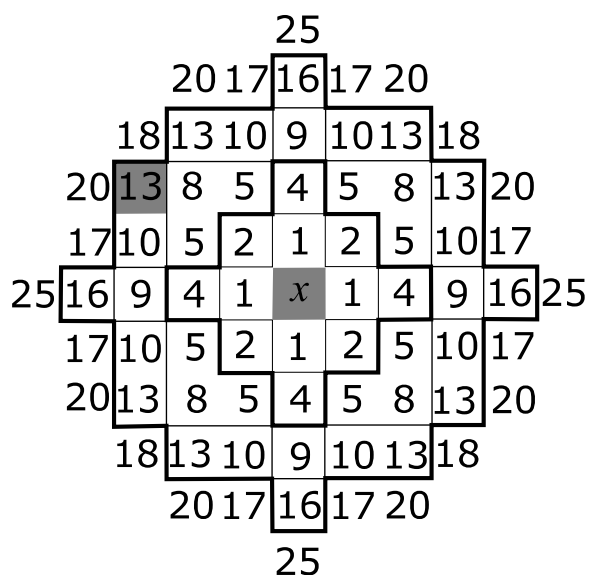


Рисунок 2.4 – Значения R^2 для пикселей из окрестности центрального пикселя, подписанного x

В таблице 2.3 предложены значения R^2 для построения масок адаптивного медианного фильтра, обеспечивающие лучшее очищения изображения от импульсного шума, полученные экспериментальным путем. Из таблицы 2.3 видно, что для шумов

с $p_{\pi} \leq 0,75$ достаточно использовать маску, охватывающую лишь по одному пикселю сверху, снизу, слева и справа. Это позволяет ускорить процесс расчета медианы и формул (2.4-2.6) на практике, за счет необходимости обработки массива из 4 элементов вместо массива из 8 элементов в первой предложенной модели. Например, на рисунке 2.4, для локального окна A радиуса $R=4$ расстояние между центральным пикселем x и выделенным пикселем равно $\sqrt{13}$.

Таблица 2.3 – Величина R^2 для расчёта окна во второй предложенной модели

Уровень шума	R^2
$0 < p_{\pi} \leq 0,75$	1
$0,75 < p_{\pi} \leq 0,9$	2
$0,9 < p_{\pi}$	5

На рисунке 2.5 представлены различные метрики расчета расстояний. Видно, что метрика L_2 более «круглая» и сложная при расчете расстояний, и является наиболее приближенной к восприятию визуальной информации человеческим зрением [144].

На рисунке 2.6 представлена схема реализации разработанной модели очистки изображений от полярного импульсного шума. На вход схемы поступает зашумленное изображение. Далее следует условие: задача детектирования пикселя ограничена условием равенства значениям 0 и 255, при выполнении условия выполняется процесс восстановления пикселя адаптивной медианной фильтрацией, в противном случае пиксель остается неизменным для восстановленного изображения.

				4				
				4	3	4		
			4	3	2	3	4	
		4	3	2	1	2	3	4
4	3	2	1	x	1	2	3	4
		4	3	2	1	2	3	4
			4	3	2	3	4	
				4	3	4		
				4				

$$L_1 = |i - a| + |j - b|$$

а)

4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	3	3	3	3	3	3	3	4
4	3	2	2	2	2	2	3	4
4	3	2	1	1	1	2	3	4
4	3	2	1	x	1	2	3	4
4	3	2	1	1	1	2	3	4
4	3	2	2	2	2	2	3	4
4	3	3	3	3	3	3	3	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4

$$L_\infty = \max(|i - a|, |j - b|)$$

б)

				4				
			$\sqrt{13}$	$\sqrt{10}$	3	$\sqrt{10}$	$\sqrt{13}$	
		$\sqrt{13}$	$\sqrt{8}$	$\sqrt{5}$	2	$\sqrt{5}$	$\sqrt{8}$	$\sqrt{13}$
		$\sqrt{10}$	$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	$\sqrt{10}$
4	3	2	1	x	1	2	3	4
		$\sqrt{10}$	$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$	$\sqrt{10}$
		$\sqrt{13}$	$\sqrt{8}$	$\sqrt{5}$	2	$\sqrt{5}$	$\sqrt{8}$	$\sqrt{13}$
		$\sqrt{13}$	$\sqrt{10}$	3	$\sqrt{10}$	$\sqrt{13}$		
				4				

$$L_2 = \sqrt{(i - a)^2 + (j - b)^2}$$

в)

Рисунок 2.5 – Метрики расчета расстояний: а) городской квартал; б) шахматная доска; в) метрика Евклида

При адаптивной медианной фильтрации формируется массив неискаженных пикселей внутри маски фильтра для пикселей, которые являются импульсными помехами. Внутри этого массива получаем новое значение пикселя с использованием функции Лоренца. Процесс является итеративным и выполняется

до тех пор, пока не останется искаженных пикселей. На выходе схемы получаем восстановленное изображение.

На рисунке 2.7 приведен пример восстановления изображения разработанной моделью. На рисунке 2.7а представлено исходное изображение. В результате воздействия полярного импульсного шума было получено искаженное изображение, представленное на рисунке 2.7б. В результате восстановления искаженного изображения разработанной моделью было получено изображение 2.7в, которое визуально сохранило детали объектов 2.7а.

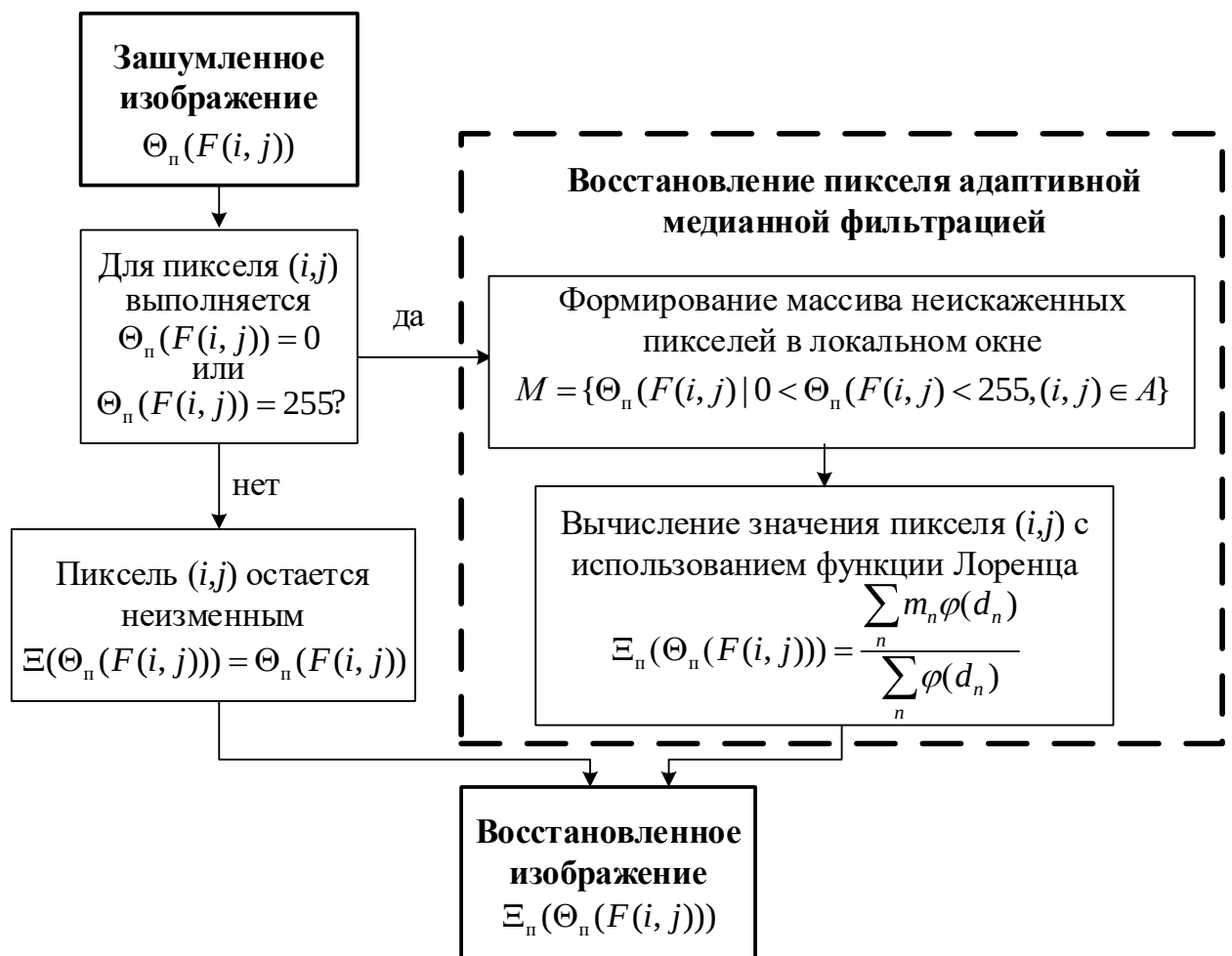


Рисунок 2.6 – Схема реализации разработанной модели очистки изображений от полярного импульсного шума

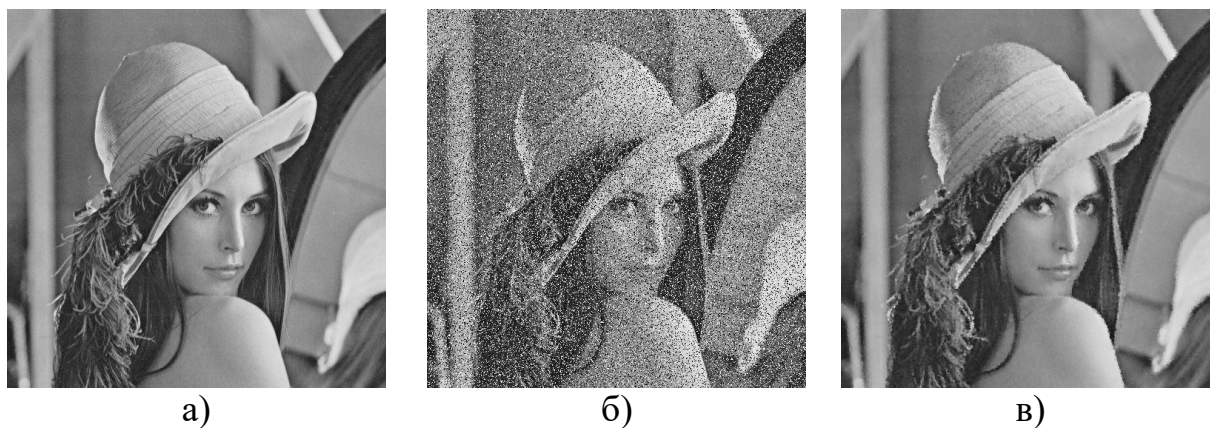


Рисунок 2.7 – Пример зашумления изображения полярным импульсным шумом:

а) исходное изображение; б) зашумленное изображение с вероятностью искажения, $p_{\text{ш}} = 0,25$ в) результат восстановления изображения, при помощи разработанной модели

Рассмотрим пример восстановления пикселя при помощи формул 2.4-2.7.

Пример 2.1. Пусть задан фрагмент изображения размером 3×3 с импульсным значением 255 в центре окна.

$$\begin{pmatrix} 100 & 0 & 100 \\ 120 & 255 & 110 \\ 255 & 135 & 140 \end{pmatrix}.$$

Карта искаженных пикселей приобретает следующий вид, где 1 импульсное значение, 0 – неискаженный пиксель:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Формируется массив соседних пикселей

$$\{100, 0, 100, 120, 110, 255, 135, 140\}.$$

Массив неискаженных соседних пикселей принимает следующий вид:

$$\{100, 100, 120, 110, 135, 140\}.$$

Производится упорядочивание и вычисление медианы массива:

$$\{100, 100, 110, 120, 135, 140\},$$

Медиана массива равна 115. Для каждого пикселя m_n рассчитаем величину d_n по формуле (2.4) и получим:

$$d_n = \{-15, -15, -5, 5, 20, 25\}.$$

Затем для каждого d_n значение функции Лоренца вычисляется по формуле

$$\psi(d_n) = \frac{2d_n}{2\sigma^2 + d_n^2}, \text{ где } \sigma \text{ представляет собой уровень отклонения. Предположим,}$$

$\sigma = 10$, тогда:

$$\psi(d_1) = \frac{2(-15)}{2 \cdot 10^2 + (15)^2} \approx -0,0706,$$

$$\varphi(d_1) = \frac{-0,071}{-15} \approx 0,0047.$$

Значения φ для остальных d_n рассчитывается аналогичным образом.

Исправленному пикселю присваивается значение:

$$\Xi_n(\Theta_n(F(i, j))) = \frac{\sum m_n \varphi(d_n)}{\sum_n \varphi(d_n)} \approx 114,5780.$$

В отличие от изображений с двумя координатами для видео вводится новая координата k – номер кадра. В этом случае значения яркости пикселей обозначаются как $F(i, j, k)$. Наличие серии изображений позволяет изменить маску фильтра в разработанной модели для очистки видео от полярного импульсного шума. Возможные виды масок представлены на рисунке 2.8. В данных масках фильтра для расчета нового значения для искаженного пикселя вводится оценка на основе распределения Лоренца, задействуются пиксели из предыдущего и следующего кадров видео. В случае, если в видео рассматривается первый кадр, маска фильтра состоит из пикселей текущего и следующего кадров. Для последнего кадра видео маска фильтра состоит из предыдущего и текущего кадров.

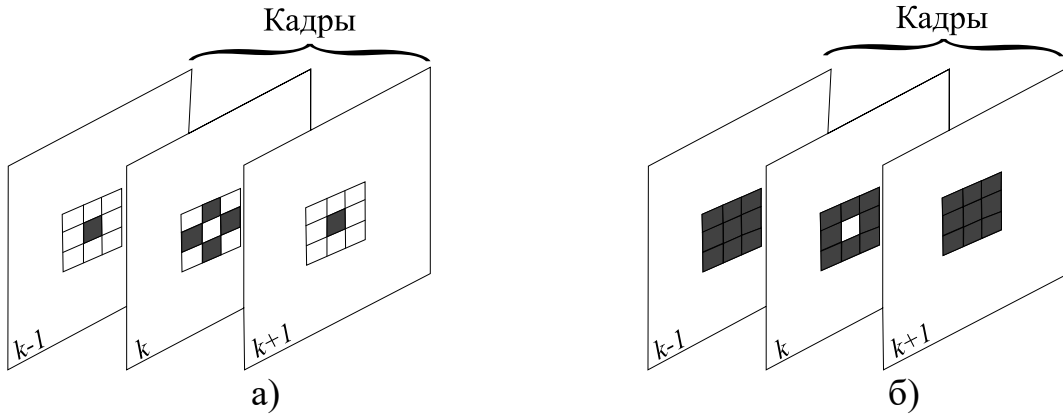


Рисунок 2.8 – Виды масок адаптивного медианного фильтра.

($k-1$ – предыдущий кадр; k – текущий кадр; $k+1$ – следующий кадр)

В данном случае множество A имеет вид

$$A_{+} = \left\{ y_{i,j,k-1}^{(n-1)}, y_{i-1,j,k}^{(n-1)}, y_{i,j-1,k}^{(n-1)}, y_{i,j+1,k}^{(n-1)}, y_{i+1,j,k}^{(n-1)}, y_{i,j,k+1}^{(n-1)} \right\} \quad (2.12)$$

для маски из рисунка 2.8а и

$$\begin{aligned} A_{\square} = \{ & y_{i-1,j-1,k-1}^{(n-1)}, y_{i-1,j,k-1}^{(n-1)}, y_{i-1,j+1,k-1}^{(n-1)}, y_{i,j-1,k-1}^{(n-1)}, y_{i,j,k-1}^{(n-1)}, \\ & y_{i,j+1,k-1}^{(n-1)}, y_{i+1,j-1,k-1}^{(n-1)}, y_{i+1,j,k-1}^{(n-1)}, y_{i+1,j+1,k-1}^{(n-1)}, y_{i+1,j,k}^{(n-1)}, \\ & y_{i+1,j+1,k}^{(n-1)}, y_{i,j+1,k}^{(n-1)}, y_{i,j-1,k}^{(n-1)}, y_{i-1,j-1,k}^{(n-1)}, y_{i-1,j,k}^{(n-1)}, y_{i-1,j+1,k}^{(n-1)}, \\ & y_{i-1,j,k+1}^{(n-1)}, y_{i-1,j+1,k+1}^{(n-1)}, y_{i-1,j+1,k}^{(n-1)}, y_{i,j-1,k}^{(n-1)}, y_{i,j-1,k+1}^{(n-1)}, \end{aligned} \quad (2.13)$$

для маски из рисунка 2.8б.

Если какие-то из элементов множества A принимают недопустимые значения (выходят за границы видеоданных), то для соответствующих координат в массив M не добавляется ничего. Для оставшихся элементов множества A проверяется значение $g^{(n-1)}$ с соответствующей координатой в карте искаженных пикселей. Если оно равно 1, то в массив M не добавляется ничего, если оно равно 0, то в массив M добавляется элемент m_i , равный значению пикселя с соответствующей координатой из видео $y^{(n-1)}$. Если в результате просмотра всех элементов множества A оказывается, что массив M остается пустым, то необходимо присвоить $g_{i,j,k}^{(n)} = 1$ (означающее, что пиксель с координатами (i, j, k)

остался искаженным). Если в массиве M есть хотя бы один элемент, то необходимо присвоить $g_{i,j,k}^{(n)} = 0$, а также найти его медиану $\text{median } M$. Если массив M состоит из нечётного числа элементов, то медиана $\text{median } M$ равна элементу с номером $(\mu+1)/2$ для упорядоченного по возрастанию (убыванию) массива M . Если массив M состоит из чётного числа элементов, то медиана $\text{median } M$ равна среднему арифметическому элементов с номерами $\mu/2$ и $\mu/2+1$ для упорядоченного по возрастанию (убыванию) массива неискаженных пикселей.

Для восстановления искаженного пикселя видео предлагается использовать один из двух способов. Первый способ восстановления заключается в непосредственном присваивании этому пикселю значения медианы:

$$y_{i,j,k}^{(n)} = \text{median } M. \quad (2.15)$$

Использование формулы (2.15) для восстановления искаженного пикселя на одном из изображений видеомассива далее по тексту будем обозначать AM . Второй способ восстановления основан на оценке искаженного пикселя с использованием распределения Лоренца по формулам (2.3-2.5). Подробно формулы представлены в работе [4, 23, 27]. Исправленному значению пикселя присваивается значение

$$y_{i,j,k}^{(n)} = \frac{\sum_c m_c \varphi(d_c)}{\sum_c \varphi(d_c)}. \quad (2.16)$$

Использование формул (2.15-2.16) для восстановления искаженного пикселя видеомассива далее по тексту будем обозначать AML . Процедура восстановления видео останавливается после N -ой итерации, на которой не осталось искаженных пикселей, то есть

$$\sum_i \sum_j \sum_k g_{i,j,k}^{(N)} = 0. \quad (2.17)$$

Видеомассив $y^{(N)}$ считается восстановленным выходным видео.

Схема адаптивной медианной фильтрации для обработки видео, искаженного полярным импульсным шумом, представлена на рисунке 2.9. В отличие от схемы

на рисунке 1.5, для обработки видео разработанным методом на вход схемы подается 3 последовательных кадра видео.

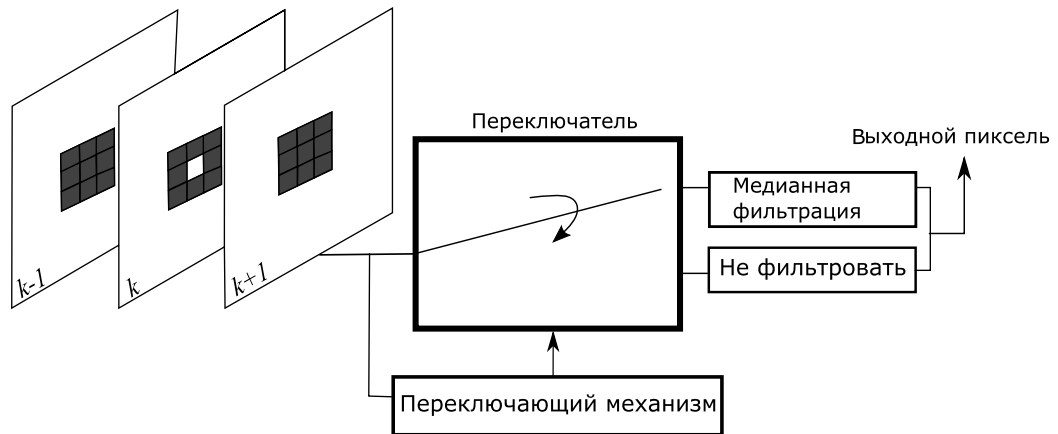


Рисунок 2.9 – Схема работы адаптивного медианного фильтра для обработки видеоданных

Возможны четыре различные модификации алгоритмических блоков предложенной модели [22].

1. Использование маски фильтра, изображенной на рисунке 2.8а, в сочетании с восстановлением пикселя медианной фильтрацией. Далее будем обозначать такой вариант предложенной модели как $AM+$.

2. Использование маски фильтра, изображенной на рисунке 2.8а, в сочетании с восстановлением пикселя по формуле (2.15). Далее будем обозначать такой вариант предложенной модели как $AML+$.

3. Использование маски фильтра, изображенной на рисунке 2.8б, в сочетании с восстановлением пикселя медианной фильтрацией. Далее будем обозначать такой вариант предложенной модели как $AM\Box$.

4. Использование маски фильтра, изображенной на рисунке 2.8б, в сочетании с восстановлением пикселя по формуле (2.16). Далее будем обозначать такой вариант предложенной модели как $AML\Box$.

В данном пункте была описана разработанная модель, позволяющая очищать от помех изображения и видео, искаженные полярным импульсным шумом. Решена

задача восстановления искаженных пикселей при помощи функции Лоренца, основанной на расчете внутри локального окна, рассчитанного по Евклидовой метрике. Применение восстановления только для искаженных пикселей позволило снизить негативные эффекты фильтрации. Численная оценка показателя качества разработанной модели будет показана в пункте 3.1. Далее будет показано решение задачи восстановления изображений и видео случайного импульсного шума, где важным является решение задачи детектирования импульсных помех. В задаче очистки полярного импульсного шума необходимости решения задачи детектирования нет, так как положение искаженных пикселей заранее известно.

2.2 Очистка изображений и видео от случайного импульсного шума

В отличие от задачи восстановления полярного импульсного шума, где важнейшей задачей является восстановление искаженного пикселя, для задачи восстановления случайного импульсного шума на передний план выходит задача детектирования импульсов, так как искаженные пиксели принимают случайные значения и случайным образом расположены на изображении. Модель случайного импульсного шума можно описать как

$$\Theta_c(F(i, j)) = \begin{cases} V(i, j), & \text{с вероятностью } p_c; \\ F(i, j), & \text{с вероятностью } 1 - p_c; \end{cases} \quad (2.18)$$

где $F(i, j)$ – исходное не зашумлённое изображение; p_c – вероятность искажения пикселей; $V(i, j)$ – случайные значения импульсного шума, не зависящие от $F(i, j)$, и подчиняющиеся закону равномерного распределения от 0 до 255 (для 8-битного изображения). Геометрическое распределение искаженных пикселей также предполагается равномерным по всему изображению. Изображение, подвергнутое такому шуму, характеризуется случайной заменой некоторых значений пикселей

исходного изображения случайными значениями. При этом остальные пиксели остаются неизменными.

На рисунке 2.10 представлено распределение яркостей пикселей и расположение импульсных помех на изображении «Лена», искаженном данной моделью импульсного шума. Из рисунка видно, что при сравнении фрагментов изображения 2.10а и 2.10в, их распределения яркостей пикселей продемонстрированных на рисунках 2.10б и 2.10г, соответственно, различаются. В гистограмме искаженного изображения встречаются значения яркости, которые отсутствуют в оригинальном изображении и явно являются импульсными помехами. На рисунке 2.10д продемонстрировано распределение импульсных помех на изображении, а на рисунке 2.10е представлено распределение яркости искаженных пикселей. Для того, чтобы показать, что расположение импульсных помех и их распределение яркостей равномерное, необходимо рассчитать критерий Пирсона или критерий χ^2 представленный на формуле (2.3).

На рисунке 2.10ж представлен фрагмент исходного изображения (рисунок 2.10а), разделенного на 64 равных участка. Составим для изображения 2.10ж расчётную таблицу (Приложение Г) для определения равномерности расположения импульсных помех на изображении. Для этого рассчитаем

$\chi_0^2 = \frac{(h - h')^2}{h'}$ × количество искаженных пикселей. В результате получаем значение

47,53. По таблице критических точек распределения χ^2 , по уровню значимости равной 0,9 и числу степеней свободы равной 63, находим $\chi_{кр}^2(0,1; 63) = 49,1105$ [65].

Далее необходимо сравнить χ_0^2 с обратной кумулятивной функцией распределения $\chi_{кр}^2$. Как и в случае с распределением полярного импульсного шума на изображение, сравнение $\chi_0^2 < \chi_{кр}^2$ показывает, что с данным уровнем значимости расположение импульсных помех при воздействии случайного импульсного шума на изображении является равномерным.

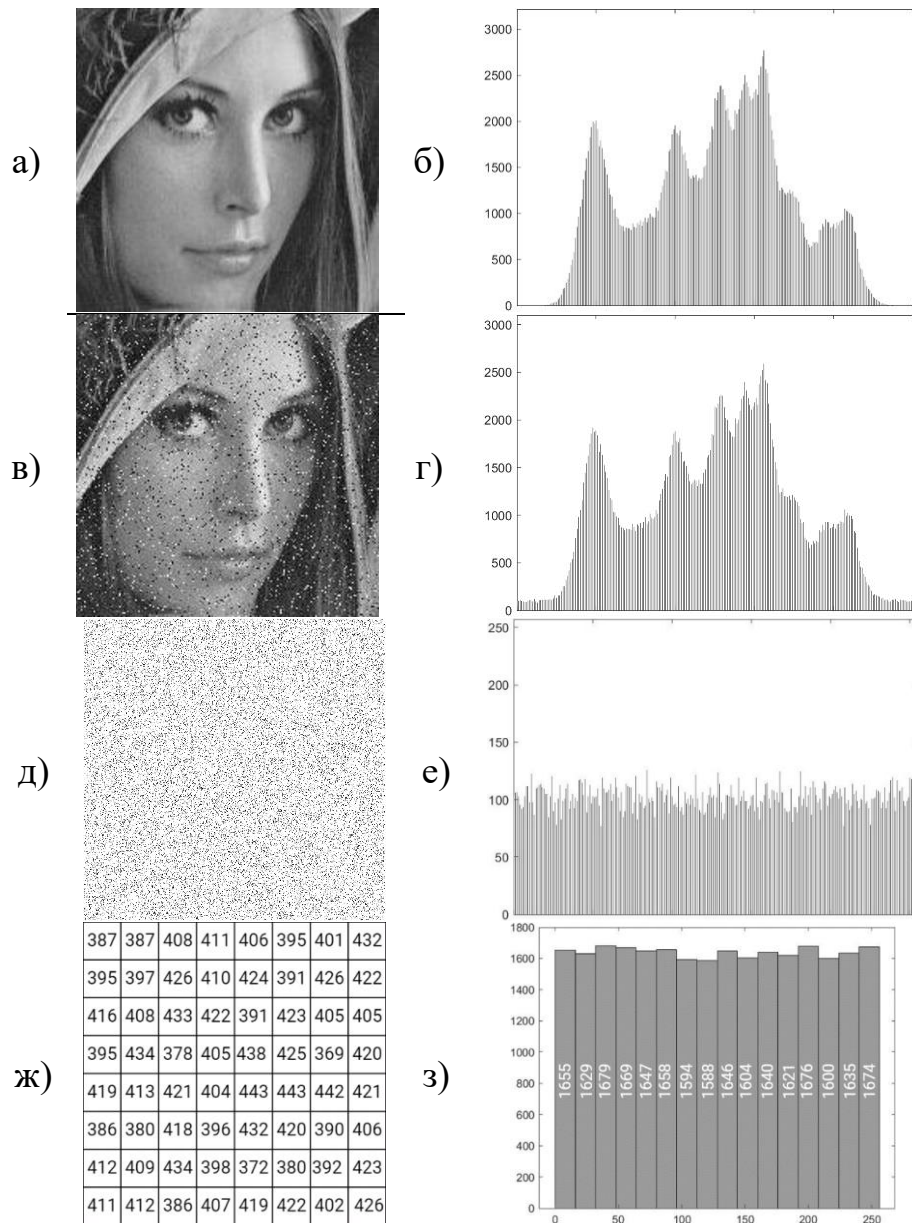


Рисунок 2.10 – Пример искажения случайным импульсным шумом изображения «Лена»: а) исходное неискаженное изображение; б) распределение яркостей пикселей на неискаженном изображении; в) изображение, искаженное импульсным шумом $p_c = 0,1$; г) распределение яркостей пикселей на искаженном изображении; д) расположение импульсных помех на изображении; е) распределение яркостей импульсных помех на изображении; ж) частота встречаемых импульсов в 64 равных участках изображения; з) частота встречаемых яркостей пикселей, разделенная на 16 равных участков.

Аналогичным образом можно определить, являются ли значения яркости пикселей импульсных помех равномерным. На рисунке 2.10з показана гистограмма значений импульсных помех, разделенная на 16 равных участков. В каждом столбце указано количество встречаемых импульсов на определенном отрезке значений яркости. Составим расчётную таблицу 2.4. Сумма искаженных пикселей на изображении равна 26215. Сумма искаженных пикселей на изображении равна 26215.

Таблица 2.4 – Расчетная таблица для вычисления критерия хи-квадрат

№	Число искаженных пикселей в участке	h	h'	$h - h'$	$(h - h')^2$	$\frac{(h - h')^2}{h'}$
1	1655	0,0631	0,0625	6,32E-04	3,99E-07	6,39E-06
2	1629	0,0621	0,0625	-3,60E-04	1,30E-07	2,07E-06
3	1679	0,0640	0,0625	1,55E-03	2,39E-06	3,83E-05
4	1669	0,0637	0,0625	1,17E-03	1,36E-06	2,17E-05
5	1647	0,0628	0,0625	3,27E-04	1,07E-07	1,71E-06
6	1658	0,0632	0,0625	7,46E-04	5,57E-07	8,91E-06
7	1594	0,0608	0,0625	-1,70E-03	2,87E-06	4,60E-05
8	1588	0,0606	0,0625	-1,92E-03	3,70E-06	5,92E-05
9	1646	0,0628	0,0625	2,88E-04	8,32E-08	1,33E-06
10	1604	0,0612	0,0625	-1,31E-03	1,73E-06	2,76E-05
11	1640	0,0626	0,0625	5,96E-05	3,55E-09	5,68E-08
12	1621	0,0618	0,0625	-6,65E-04	4,42E-07	7,08E-06
13	1676	0,0639	0,0625	1,43E-03	2,05E-06	3,28E-05
14	1600	0,0610	0,0625	-1,47E-03	2,15E-06	3,44E-05
15	1635	0,0624	0,0625	-1,31E-04	1,72E-08	2,75E-07
16	1674	0,0639	0,0625	1,36E-03	1,84E-06	2,94E-05
Σ	26215	1,0000	1,0000	6,94E-18	1,98E-05	3,17E-04

Отсюда $\chi_0^2 = \frac{(h - h')^2}{h'} \cdot 26125 = 8,32$. По таблице критических точек распределения χ^2 , по уровню значимости равной 0,9 и числу степеней свободы равной 15, находим $\chi_{кр}^2(0,1;15) = 8,5468$ [65]. Далее необходимо сравнить χ^2 с обратной кумулятивной функцией распределения $\chi_{кр}^2$. Значение χ_0^2 меньше, чем

$\chi_{кр}^2$. Следовательно, можно сделать вывод, что с уровнем значимости равным 0,9 распределение яркостей импульсных помех на изображении, искаженном случайным импульсным шумом, равномерное.

Задача детектирования и очистки случайного и случайно распределенного на изображении импульсного шума является более сложной задачей, чем восстановление изображения от полярного импульсного шума. Значение импульсов может быть близким к исходным значениям яркости, а случайность расположения импульсов может приводить к появлению искаженных пикселей, расположенных рядом.

2.2.1 Вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображения

Для решения второй поставленной задачи требуется разработать вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности в локальном окне. Для этого необходимо на зашумленном изображении $\Theta(F(i, j, k))$ определить карту искаженных пикселей $G(i, j, k)$, а именно определить является ли пиксель изображения или кадра видео искаженным.

В разработанном вычислительном методе сходство между пикселями определяется параметром геометрического расстояния и параметром сходства в значениях яркости в локальном окне, что позволяет справляться с задачей восстановления от данного типа импульсного шума. На первом этапе необходимо определить, искажен ли пиксель зашумленного изображения импульсной помехой. Параметр сходства в расстоянии между пикселями в локальном окне можно вычислить при помощи формулы

$$\lambda(F(i, j), F(a, b)) = \exp\left(-\frac{R^2(F(i, j), F(a, b))}{2\psi_\lambda^2}\right), F(a, b) \in A_{F(a, b)}, \quad (2.19)$$

где $\lambda(F(i, j), F(a, b))$ – коэффициент влияния геометрического расстояния; (i, j) и (a, b) обозначают координаты пикселей в локальной области A ; ψ_λ описывает среднеквадратичное отклонение коэффициента $\lambda(F(i, j), F(a, b))$.

Локальная область A рассчитывается и изменяется в соответствии с Евклидовым расстоянием, представленным формулой 2.10 и рисунком 2.7, также как и в разработанной модели для очистки полярного импульсного шума. Выбор размера локального окна A зависит от уровня шума p на изображении. Экспериментальным путем выявлено, что чем выше интенсивность импульсного шума на изображении, тем больший размер маски A необходим для получения лучшего результата очистки.

Для вычисления параметра сходства между пикселями по значению яркости пикселей используем логарифмическую функцию абсолютной разницы между обрабатываемым пикселем и другими пикселями в локальном окне A :

$$U(F(i, j), F(a, b)) = \begin{cases} 1, & \text{если } F(i, j) = F(a, b), \\ 1 - \frac{1}{q} \log_2 |(F(i, j) - F(a, b))|, & \text{если } F(i, j) \neq F(a, b), \end{cases} \quad (2.20)$$

где $F(a, b) \in A_{F(i, j)}$, q – разрядность пикселей изображения. Формула 2.20 указывает на разницу между пикселями $F(i, j)$ и $F(a, b)$ следующим образом: если пиксели равны между собой, то величина U равна 1; чем больше разница яркостей тем меньше величина U . Деление на разрядность q введено для сохранения величины U неотрицательной. Использование логарифмической функции, по сути, указывает на старший значащий бит разницы между пикселями. Использование такого подхода вместо линейной функции объясняется цифровой природой обрабатываемых данных и согласуется со зрительным восприятием человека [144].

Далее необходимо отсортировать по возрастанию массив U и суммировать первые $m/2$ элементов отсортированного массива, где m – количество элементов в локальном окне:

$$\eta_m(F(i, j), F(a, b)) = \sum_{k=1}^{m/2} U_k(F(i, j), F(a, b)). \quad (2.21)$$

В параметре $m/2$ отбиралась половина значений массива обрабатываемых данных. На основе параметров сходства между двумя пикселями, основанными на геометрической удаленности (2.19) и разности яркостей пикселей в окне детектора (2.21) вычисляется оценка сходства между пикселями W в разработанной модели

$$W(F(i, j), F(a, b)) = \lambda(F(i, j), F(a, b)) \cdot \eta(F(i, j), F(a, b)). \quad (2.22)$$

Для значений полученного массива W необходимо задать порог, определяющий, искажен ли пиксель помехой

$$G(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } W_{F(i, j)} \leq T; \\ 1, & \text{если } W_{F(i, j)} > T. \end{cases} \quad (2.23)$$

Массив значений G может быть рассмотрен как карта зашумленных пикселей. Чтобы выбрать порог T в массиве $G(i, j)$ мы используем ROC-кривую (receiver operating characteristic curve), которая позволяет оценить качество бинарной классификации.

Пусть G' карта координат истинно зашумленных и истинно незашумленных пикселей

$$G'(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } F(i, j) \text{ не искажен;} \\ 1, & \text{если } F(i, j) \text{ искажен.} \end{cases} \quad (2.24)$$

Сопоставим две карты G и G' . В этих картах представлена бинарная классификация, поэтому возможны четыре возможных результата

1. $G(i, j) = 1$ и $G'(i, j) = 1$, в результате получим истинно-положительное определение импульса (TP).
2. $G(i, j) = 0$ и $G'(i, j) = 1$, в результате получим ложноположительное определение импульса (FP).
3. $G(i, j) = 0$ и $G'(i, j) = 0$, в результате получим истинно-отрицательное определение импульса (TN).
4. $G(i, j) = 1$ и $G'(i, j) = 0$, в результате получим ложноотрицательное определение импульса (FN).

Определим понятия частоты ложноположительных (FPR) и ложноотрицательных (FNR) срабатываний детектора зашумленных пикселей:

$$FNR = \frac{FN}{FN+TP}, \quad (2.25)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP+TN}. \quad (2.26)$$

Точность (ACC) детектора определяется по формуле

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}. \quad (2.27)$$

Сбалансированная точность (BA) детектора определяется по формуле

$$BA = 1 - \frac{FNR+FPR}{2}. \quad (2.28)$$

Мы предполагаем, что при наилучшей BA мы можем определить порог T для наилучшего результата очистки изображений от случайного импульсного шума.

В таблице 2.5 приведен пример изображения зашумленного случайным импульсным шумом, которое было подвержено фильтрации предлагаемой моделью. На таблице видно, что при выборе порога $T=2^4$, достигается наивысшее значение BA. В таблице можно увидеть, что при достижении наилучшей BA, достигаются наилучшие значения характеристик PSNR.

Таблица 2.5 – Характеристики очистки изображения зашумленного случайным импульсным шумом «Лена» $p=0,25$ при использовании разработанной модели с различными T

	Порог T							
	2^{-1}	2^0	2^1	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6
TN	195297	194792	194067	192775	189816	180180	155000	90138
TP	39407	41670	43444	46167	51447	58050	61420	64239
FN	26129	23866	22092	19369	14089	7486	4116	1297
FP	1311	1816	2541	3833	6792	16428	41608	106470
PSNR	20.9377	21.4663	21.8340	22.5607	24.6600	28.2144	25.9542	21.1806
ACC	0.8953	0.9020	0.9060	0.9115	0.9203	0.9088	0.8256	0.5889
FNR	0.3987	0.3642	0.3371	0.2955	0.2150	0.1142	0.0628	0.0198
FPR	0.0067	0.0092	0.0129	0.0195	0.0345	0.0836	0.2116	0.5415
BA	0.7973	0.8133	0.8250	0.8425	0.8752	0.9011	0.8628	0.7193

На рисунке 2.11 изображен график значений FNR, FPR и BA при различных значениях T . Графики FNR и FPR наиболее близки при $T=2^4$. При этом значении порога BA достигает своего пика. На графике на рисунке X значения пороговых значений T определено значениями степени числа 2, от 2^{-1} до 2^6 . На рисунке 2.12 представлена матрица ошибок для различных моделей очистки от случайного импульсного шума.

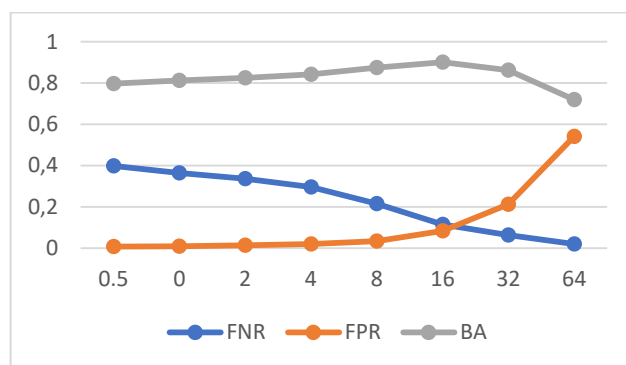


Рисунок 2.11— График FNR, FPR и BA в зависимости от порога T

импульс нет	импульс есть	TP 52610	FN 12926
	импульс есть	FP 4043	TN 192565

а)

импульс нет	импульс есть	TP 49952	FN 15584
	импульс есть	FP 2806	TN 193802

б)

импульс нет	импульс есть	TP 60060	FN 5470
	импульс есть	FP 24376	TN 172232

в)

импульс нет	импульс есть	TP 58050	FN 7486
	импульс есть	FP 16428	TN 180180

г)

Рисунок 2.12 – Матрица ошибок для изображения зашумленного случайным импульсным шумом «Лена» $p=0,25$ при использовании различных моделей: а) модель из работы [63]; б) модель из работы [54]; в) модель из работы [136]; г) модель на основе разработанного вычислительного метода оценки сходства между пикселями изображения

В таблице 2.6 представлены значения ВА для различных моделей очистки от случайного импульсного шума. Из рисунка 2.12 и таблицы 2.6 видно, что наилучший результат достигнут в модели на основе разработанного вычислительного метода оценки сходства между пикселями изображения.

Таблица 2.6 – Значения ВА для различных значений моделей очистки изображений и кадров видео от случайного импульсного шума

Модель очистки изображений от случайного импульсного шума	ROAD [63]	ROLD [54]	LCI [136]	Модель на основе разработанного вычислительного метода оценки сходства между пикселями изображения
TN	193802	192565	172232	180180
TP	49952	52610	60066	58050
FN	15584	12926	5470	7486
FP	2806	4043	24376	16428
ВА	0,874	0,891	0,896	0,901

Пример 2.2. Рассмотрим значение «23» в окне на рисунке 2.10. Необходимо проверить является ли это значение искажением. Для этого рассчитаем коэффициент влияния геометрического расстояния и разность значений яркостей между пикселями для оценки разницы между пикселями по формуле 2.22. Для данного примера возьмем $R=2$, разрядность изображения $q=8$, порог $T=20$, а $\psi_\lambda=25$. На рисунке 2.13 рамкой выделена локальная область A , в которой выполняются вычисления.

Рассчитаем значения геометрического влияния для $F_{3,3} = 23$:

$$\lambda(F_{3,3}, F_{1,3}) = \lambda(F_{3,3}, F_{3,1}) = \lambda(F_{3,3}, F_{5,3}) = \lambda(F_{3,3}, F_{3,5}) = \exp\left(\frac{4^2}{2 \cdot 25}\right) \approx 1,377$$

$$\lambda(F_{3,3}, x_{2,2}) = \lambda(F_{3,3}, F_{2,4}) = \lambda(F_{3,3}, F_{4,2}) = \lambda(F_{3,3}, F_{4,4}) = \exp\left(\frac{2^2}{2 \cdot 25}\right) \approx 1,083$$

$$\lambda(F_{3,3}, F_{2,3}) = \lambda(F_{3,3}, F_{3,2}) = \lambda(F_{3,3}, F_{3,4}) = \lambda(F_{3,3}, F_{4,3}) = \exp\left(\frac{1^2}{2 \cdot 25}\right) \approx 1,020$$

$$\sum_{k=1}^m \lambda_k(F(i, j), F(a, b)) \approx 9,922$$

192	155	156	149	148
157	227	156	44	153
158	157	23	157	118
158	192	158	201	157
157	157	156	156	156

8	5	4	5	8
5	2	1	2	5
4	1	x	1	4
5	2	1	2	5
8	5	4	5	8

а)

б)

Рисунок 2.13 – Пример фрагмента изображения.

а) значения пикселей в фрагменте изображения; б) квадраты расстояний между центральным пикселем x и соседями.

Далее рассчитаем разность яркостей пикселей в окне детектора A для $F_{3,3} = 23$:

$$U(F_{3,3}, F_{1,3}) = U(F_{3,3}, F_{5,3}) = U(F_{3,3}, F_{2,3}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 156| \approx 0,118$$

$$U(F_{3,3}, F_{3,1}) = U(F_{3,3}, F_{4,3}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 158| \approx 0,115$$

$$U(F_{3,3}, F_{2,2}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 227| \approx 0,041, \quad U(F_{3,3}, F_{2,4}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 192| \approx 0,075$$

$$U(F_{3,3}, F_{2,3}) = U(F_{3,3}, F_{4,3}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 157| \approx 0,117$$

$$U(F_{3,3}, F_{4,2}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 44| \approx 0,451, \quad U(F_{3,3}, F_{5,3}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 118| \approx 0,179$$

$$U(F_{3,3}, F_{4,4}) = 1 - \frac{1}{8} \log_2 |23 - 201| \approx 0,065$$

Далее необходимо отсортировать по возрастанию массив U и суммировать первые $m/2$ элементов отсортированного массива, где m количество элементов в

локальном окне. Для нашей локальной области A количество элементов массива $m=12$:

$$\eta(F_{3,3}) = \sum_{k=1}^{m/2} (0,041; 0,065; 0,075; 0,115; 0,115; 0,117) \approx 0,529$$

На основе полученных параметров сходства между двумя пикселями, можно вычислить оценку сходства между пикселями W :

$$W(F_{3,3}) = 9,922 \cdot 0,529 \approx 5.248$$

Данную оценку необходимо сравнить с пороговым значением по формуле 2.23, чтобы окончательно определить, является ли данный пиксель искаженным. В данном случае $T = 20$, и так как $W(F_{3,3}) < T$, центральный элемент локального окна является искаженным пикселем.

2.2.2 Математическая модель очистки изображений и видео от случайного импульсного шума

Постановка третьей научной задачи заключается в повышении качества изображений или видео, искаженных случайным импульсным шумом, рассчитанного метрикой PSNR:

$$\begin{cases} Q(Q_{\text{PSNR}}, \Xi_c, \Theta_c) \rightarrow Q_{\text{max}}, \\ Q_{\text{PSNR}} = \text{PSNR}(F(i, j, k), \Xi_c(\Theta_c(F(i, j, k)))), \\ 0,1 \leq p_c \leq 0,5, \end{cases} \quad (2.29)$$

где Q – качество восстановления изображения или кадра видео, индекс «с» означает искажение случайным импульсным шумом; p – вероятность искажения соответствующим индексом шумом.

Для решения задачи очистки изображений от случайного импульсного шума, на основе разработанного вычислительного метода, представленного в

формулах 2.19-2.23, разработана модель восстановления и представлена в виде системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Xi(\Theta_c(F(i, j))) = \frac{\sum_n m_n \varphi(d_n)}{\sum_n \varphi(d_n)}, \\ \varphi(d_n) = \begin{cases} \frac{\psi(d_n)}{d_n}, & \text{если } d_n \neq 0, \\ 0, & \text{если } d_n = 0, \end{cases} \\ \psi(d_n) = \frac{2d_n}{2\sigma^2 + d_n^2}, \\ d_n = \Theta_c(F(i, j) - \text{median}\{\Theta_c^{(n)}(F(i, j)) | W(\Theta_c(F(i, j))) < T, (i, j) \in A\}, \\ A = \{(i, j) | \sqrt{(i-a)^2 + (j-b)^2} \leq R\}. \end{array} \right. \quad (2.30)$$

После выполнения вычислений в соответствии с разработанным методом оценки сходства между пикселями применяется адаптивная медианная фильтрация. При адаптивной медианной фильтрации обработка выполняется только для пикселей, определенных детектором как искаженные [5]. На рисунке 2.14 приведен пример фрагмента изображения и соответствующей ему карты искаженных пикселей. Значения «1» в карте искаженных пикселей, полученной детектором, соответствуют пикселям, определенным как искаженные. Рассмотрим адаптивную медианную фильтрацию для исправления искаженного пикселя в центре фрагмента изображения на рисунке 2.14, принимающего значение «23».

Пример 2.3. Пусть в локальном окне формируется и упорядочивается по возрастанию массив из пикселей, которым соответствуют значения «0» из карты искаженных пикселей, полученной детектором шума (т.е. неискаженных):

$$\{156, 157, 157, 158\} \rightarrow \{156, \mathbf{157}, \mathbf{157}, 158\}.$$

В случае нечетного количества элементов медианой упорядоченного массива считается центральный элемент. В случае четного количества элементов медианой упорядоченного массива считается среднее арифметическое двух элементов. В рассмотренном примере медианой является значение «157», которое присваивается

искаженному пикселю в результате обработки. Для пикселей, которые находятся на границах изображения, выполняется правило, согласно которому размер изображения увеличивается повторением величин на его боковых границах во избежание выхода маски фильтра за границы изображения.

192	155	156	149	148
157	227	156	44	153
158	157	23	157	118
158	192	158	201	157
157	157	156	156	156

а)

1	0	0	0	0
0	1	0	1	0
0	0	1	0	1
0	1	0	1	0
0	0	0	0	0

б)

Рисунок 2.14 – Пример фрагмента изображения:

а) значения пикселей в фрагменте изображения; б) карта искаженных пикселей, полученная детектором шума

На рисунке 2.15 приведен пример восстановления изображения разработанной моделью. На рисунке 2.15а представлено исходное изображение. На рисунке 2.15б представлено изображение зашумленное случайным импульсным шумом, и в отличие от рисунка 2.7б, где изображение искажено полярным импульсным шумом, но вероятность искажения такая же, детали изображения видны более явно, так как искажения могут принимать значения близкие к исходным. Но при данной такой шум сложнее очистить из-за неясности положения импульсных помех на изображении. На рисунке 2.15в представлен результат восстановления искаженного изображения, очищенного от шума, но сохранившего детали оригинального изображения.

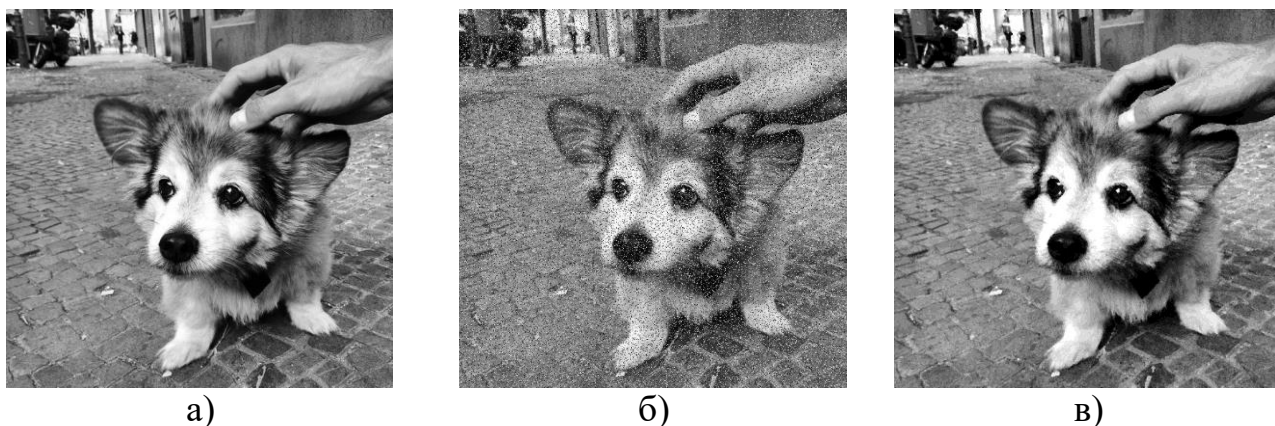


Рисунок 2.15 – Пример зашумления изображения полярным импульсным шумом.

а) исходное изображение; б) зашумленное изображение с вероятностью искажения, $p_c = 0,75$; в) результат восстановления изображения, при помощи разработанной модели

На рисунке 2.16 изображена схема реализации разработанного метода. На вход поступает зашумленное изображение. В этом изображении необходимо определить, является ли пиксель импульсом. Для этого необходимо рассчитать массив W по формуле (2.22) и определить искажения в соответствии с порогом T (2.23). На основе построенной карты помех G появляется возможность провести очистку адаптивным медианным фильтром. Для сохранения деталей мы используем маску фильтра 3×3 .

Если в процессе обработки адаптивным медианным фильтром возникает ситуация, когда в локальном окне 3×3 все пиксели отмечены как искаженные, то исправить центральный пиксель не представляется возможным за одну итерацию. В этом случае адаптивный медианный фильтр может применяться итеративно до тех пор, пока все искаженные пиксели не будут исправлены. После обработки всех пикселей искаженного изображения $F(i, j)$ получаем восстановленное изображение.

Для восстановления видеоданных разработанным методом очистки от случайного импульсного шума также используется маски фильтра A представленные на рисунке 2.8, где для детектирования и восстановления задействуются пиксели из предыдущего и следующего кадров видео.

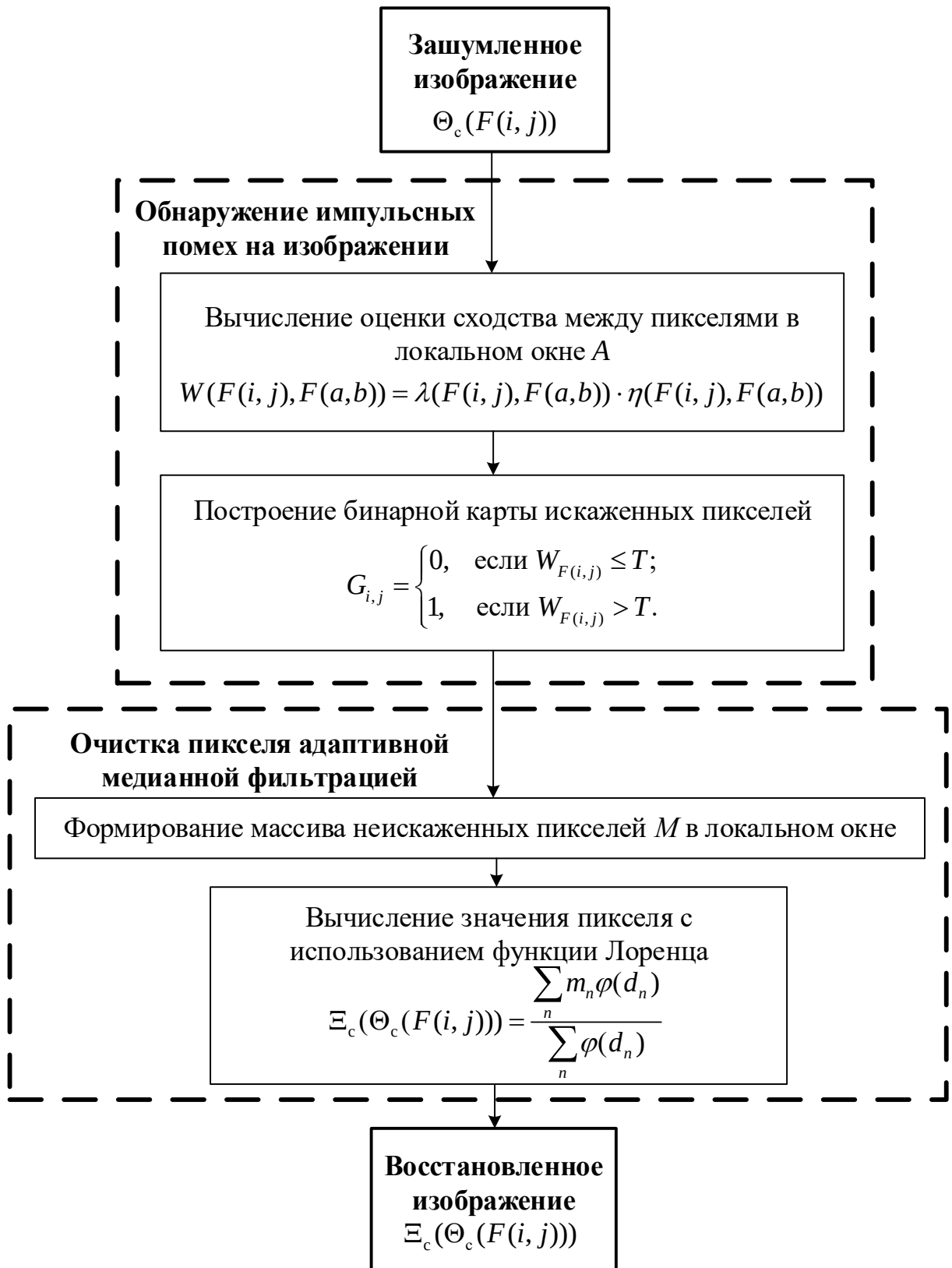


Рисунок 2.16 – Схема реализации разработанного метода восстановления изображений от случайного импульсного шума

Также учитывается правило для первого и последнего кадров видео, описанного в разработанной модели очистки видеоданных от полярного импульсного шума. С учетом введенной координаты k , обозначающей номер кадра видео, оценка сходства между пикселями для $F(i, j, k)$ рассчитывается иначе. Параметр геометрического расстояния, представленный в формуле (2.19) для обработки видеоданных, имеет вид:

$$\lambda(F(i, j, k), F(a, b, c)) = \exp\left(-\frac{R^2(F(i, j, k), F(a, b, c))}{2\psi_\lambda^2}\right), F(a, b, c) \in A_{F(i, j, k)}. \quad (2.31)$$

Параметр сходства яркости между пикселей имеет вид:

$$U(F(i, j, k), F(a, b, c)) = \begin{cases} 1, & \text{если } F(i, j, k) = F(a, b, c), \\ 1 - \frac{1}{q} \log_2 |F(i, j, k) - F(a, b, c)|, & \text{если } F(i, j, k) \neq F(a, b, c), \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\eta(F(i, j, k), F(a, b, c)) = \sum_{n=1}^{m/2} U_n(F(i, j, k), F(a, b, c)). \quad (2.33)$$

Оценка сходства между пикселями W в разработанной модели восстановления видеоданных представлена в виде формулы:

$$W(F(i, j, k), F(a, b, c)) = \lambda(F(i, j, k), F(a, b, c)) \cdot \eta(x_{i,j}, x_{a,b}). \quad (2.34)$$

В данном пункте рассмотрено восстановление изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом. Для данного типа шумового воздействия важно определить, какие пиксели искажены. С этой целью введена оценка сходства между пикселями, описываемая формулами 2.22 и 2.34. Численная оценка показателя качества разработанной модели будет показана в пункте 3.1. Данный метод можно применить для восстановления изображений и видео, переданных по двоичному симметричному каналу связи, где пиксели с определенной вероятностью, в результате ошибки, могут изменить свои значения. С помощью введенной оценки сходства между пикселями можно найти эти искаженные пиксели и восстановить, что будет продемонстрировано в следующем пункте.

2.3 Математическая модель очистки изображений и видео, переданных по двоичному симметричному каналу связи с ошибками

Канал с двоичным входом и двоичным выходом, где вероятности ошибки и корректной передачи равны, называют двоичным симметричным каналом (ДСК). Поскольку каждый выходной двоичный символ канала зависит только от соответствующего входного двоичного символа, говорится о том, что этот канал без памяти. По двоичному каналу можно передать сигналы, например 0 или 1. Передача в таком канале связи не идеальна, из-за этого принимающий сигнал с определенной вероятностью p_k может получить ошибку, которая заключается в замене знака 1 на 0 или 0 на 1. На рисунке 2.17 представлена схема двоичного симметричного канала, в котором: p_k – вероятность ошибки; $1 - p_k$ – вероятность корректной передачи. ДСК имеет входной и выходной сигналы $X \in \{0,1\}$ и $Y \in \{0,1\}$, откуда

$$p_k(X | Y) = \begin{cases} 1 - p_k, & \text{if } X = Y \\ p_k, & \text{if } X \neq Y \end{cases} \quad (2.35)$$

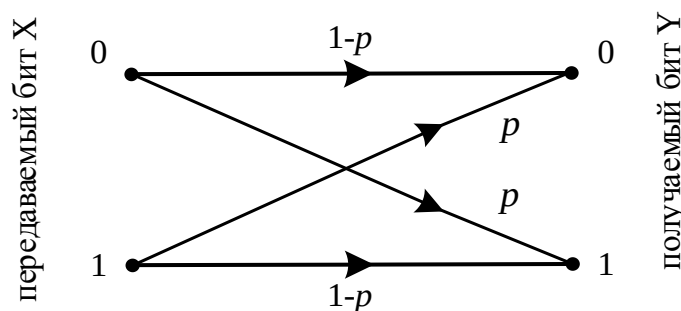


Рисунок 2.17 – Схема двоичного симметричного канала

Искаженные сигналы в ДСК возникают в результате возникновения помех. Под помехой понимается любое случайное воздействие на сигнал в канале связи, препятствующее правильному приему сигналов. В каналах связи действуют как

аддитивные помехи, то есть случайные процессы, накладываемые на передаваемые сигналы, так и мультипликативные помехи, выражающиеся в случайных изменениях характеристик канала.

Аддитивные помехи содержат три составляющие: сосредоточенную по частоте (гармоническую), сосредоточенную во времени (импульсную) и флуктуационную. Импульсная помеха представляет собой последовательность кратковременных импульсов, разделенных интервалами, превышающими время переходных процессов в канале. Причинами возникновения импульсных помех являются: влияние грозových разрядов на линии связи; влияние линий электропередачи на линии связи; плохие контакты в оборудовании передачи и питания; недостатки разработки и изготовления оборудования; причины эксплуатационного характера и др. Недостатки разработки и изготовления оборудования приводят к тому, что импульсные помехи возникают при толчках напряжения в питающей сети или переключениях с основных элементов на резервные. Цифровые данные часто передаются в виде последовательности двоичных чисел (битов информации). Во время передачи шум может исказить исходное сообщение. Модель состоит из передатчика способного отправить двоичный сигнал и приемника.

Передача данных в ДСК может быть описана схемой Бернулли [65]. Пусть Δ будет случайной величиной, которая подсчитывает количество отказов. Тогда, согласно схеме Бернулли, вероятность возникновения k ошибок при передаче n бит через BSC равна

$$p_k(\Delta = k) = \binom{n}{k} p_k^{n-k} q^k, \quad (2.36)$$

где q – это разрядность пикселя кадра видео; p_k – вероятность искажения одного бита в двумерном симметричном канале. Исходя из формулы 2.33, плотность импульсного шума на изображении в соответствии разрядностью изображения и вероятностью искажения бита равна

$$\rho_k = 1 - p_k^{n-k}. \quad (2.37)$$

В таблице 2.7 приведены значения плотности импульсного шума ρ_k на изображении в соответствии с вероятностью искажения бита p_k .

Таблица 2.7 – Плотность импульсного шума ρ_k на изображении

Вероятность искажения бита, p_k	Разрядность пикселей, n			
	8	12	16	24
0,01	0,0772	0,1136	0,1485	0,2143
0,05	0,3366	0,4596	0,5599	0,7080
0,10	0,5695	0,7176	0,8147	0,9202

Пример 2.4. Рассмотрим пример передачи 4 значений яркости пикселей «155», «156», «157», «166» с разрядностью $q=8$ по двоичному симметричному каналу с вероятностью ошибки 10 процентов. В двоичном коде данные пиксели представлены в виде 10011011 10011100 10011101 10100110. После передачи сигнала через ДСК при $p=0,10$ получаем сигнал 00011011 10011100 10011101 111000110 соответствующий значениям яркости пикселей «27», «156», «157», «198». Подчеркиванием выделены биты, в которых возникла ошибка. В данном случае, ошибка возникла в 2 пикселях из 4. Один раз ошибка пришлась на старший бит и значение яркости пикселя «155» в результате искажения изменила значение на «27», что сильно повлияло на качество передаваемой информации. Также в числе 166 ошибка на один пиксель возникла несколько раз.

Рассмотрим случай некодированной передачи видеопотока с камеры видеонаблюдения, при котором в канале связи возникают ошибки [105]. На рисунке 2.18 приведены кадры из видео, на которых с вероятностью $p_k=0,01;0,05;0,1$ каждый бит кадра подвергается искажению. В данном случае кадры видео 8-битные. На рисунке 2.19 представлено распределение пикселей на незакодированном кадре видео, переданного через ДСК. На рисунке 2.19ж представлен фрагмент изображения 2.19б, разделенного на 64 равных участка. Сходство искажений на изображениях, переданных через ДСК и изображений

искаженных случайным импульсным шумом будет явным, если распределение искаженных значений и расположение искаженных пикселей на изображении будет распределено равномерно, также как это было показано для случайного импульсного шума.

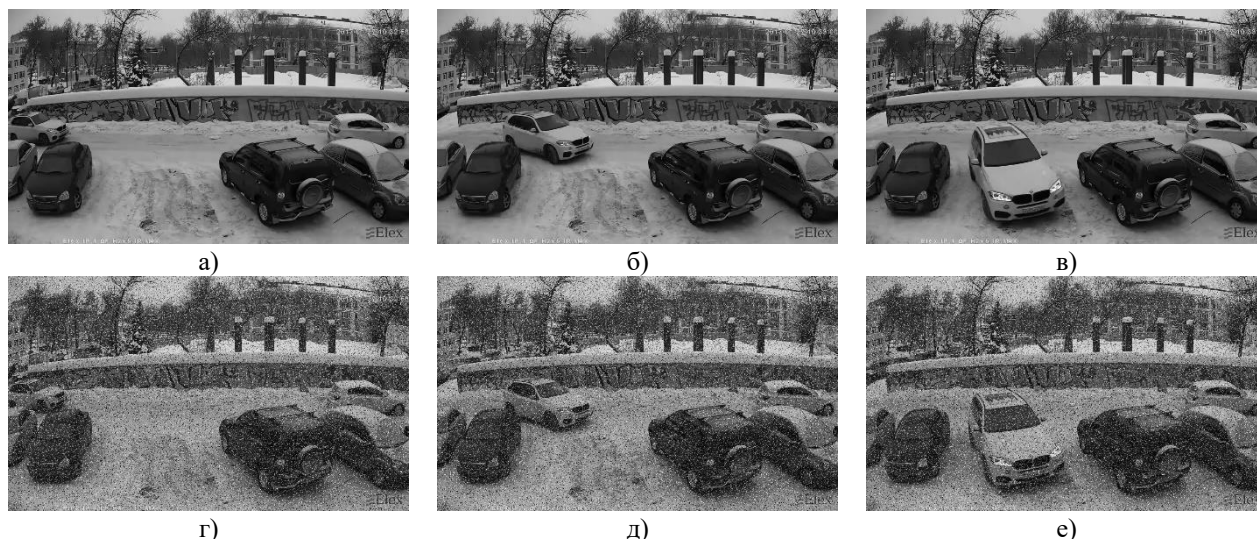


Рисунок 2.18 – Кадры из видео, использующегося в моделировании:

а) 1-й; б) 50-й; в) 100-й; г) искаженный 1-й кадр видео; д) искаженный 50-й кадр видео; е) искаженный 100-й кадр видео

Составим расчетную таблицу (таблица 2.8), для которой рассчитаем критерий χ^2 по формуле 2.2. Сумма значений $\frac{(h-h')^2}{h'}$ равна 0,000012. Сумма искаженных пикселей на изображении равна 503617. Отсюда $\chi_0^2 = 0,000012 \cdot 503617 = 6,20$. По таблице критических точек распределения χ^2 , по уровню значимости равной 0,9 и числу степеней свободы равной 15, находим $\chi_{кр}^2(0,1;15) = 8,5468$ [65]. Сравним χ^2 с обратной кумулятивной функцией распределения $\chi_{кр}^2$. Можно сделать вывод, что с уровнем значимости равной 0,9 распределение импульсных помех на изображении, переданном через ДСК с ошибками, равномерное.

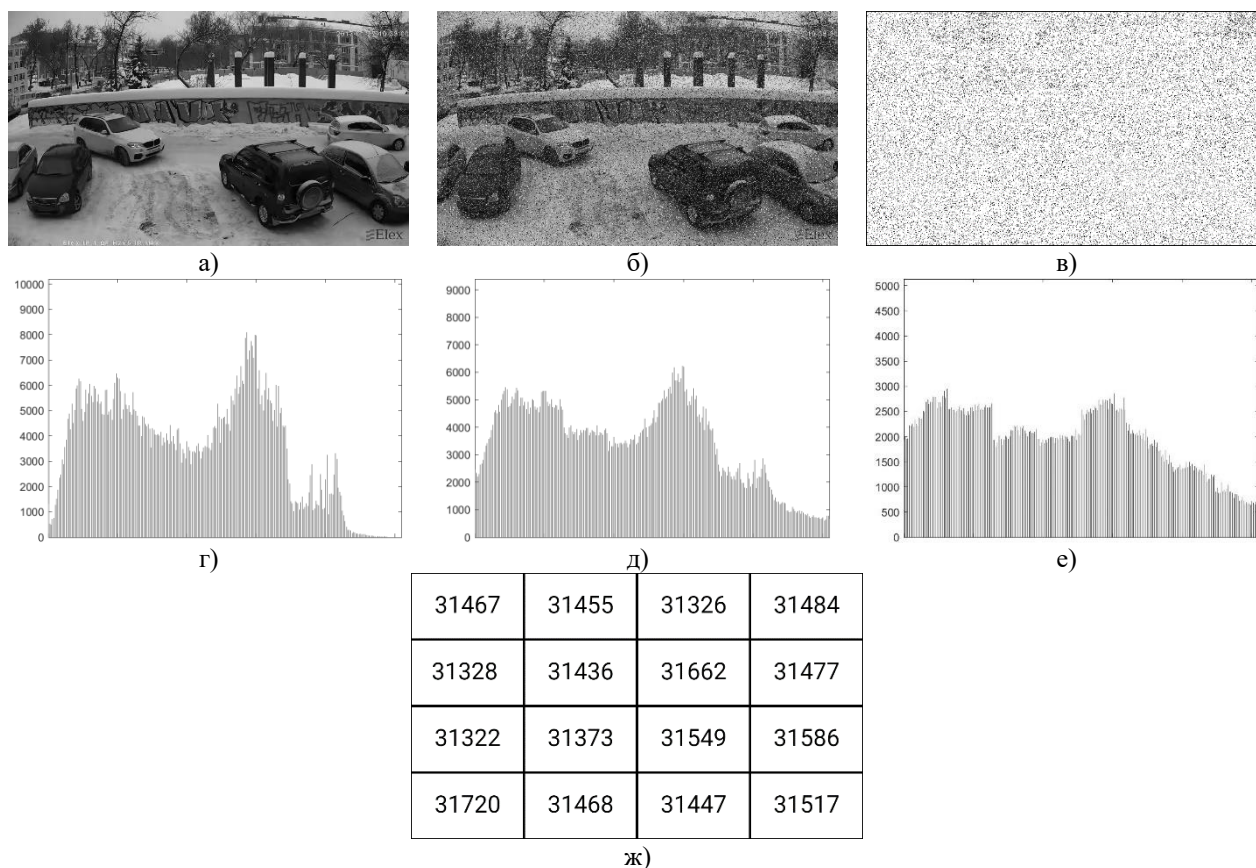


Рисунок 2.19 – Пример искажения кадра видео, переданного через ДСК:

а) исходный неискаженный кадр; б) кадр видео, переданный через ДСК с ошибками; в) расположение искаженных пикселей в кадре; г) распределение яркостей пикселей на неискаженном кадре; д) распределение яркостей пикселей на искаженном кадре; е) распределение яркостей искаженных пикселей в кадре; ж) частота встречаемых импульсов в 16 равных участках изображения

При помощи составленной расчетной таблицы 2.8 показано, что шум по расположению искаженных пикселей распределен равномерно и соответствует характеристикам случайного импульсного шума. Для устранения данного типа шумового воздействия подходят методы очистки, основанные на медианной фильтрации.

В разработанной модели на кадре зашумленного видео необходимо определить подвергся ли бит пикселя изображения искажению. Для этого используется оценка сходства между пикселями в локальном окне, представленная

в формуле 2.22. Оценка основана на двух параметрах, описываемых формулами 2.19 и 2.21.

Таблица 2.8 – Расчетная таблица для вычисления критерия хи-квадрат

№	Искаженных пикселей в участке	h	h'	$h - h'$	$(h - h')^2$	$\frac{(h - h')^2}{h'}$
1	1655	0,0631	0,0625	6,32E-04	3,99E-07	6,39E-06
2	1629	0,0621	0,0625	-3,60E-04	1,30E-07	2,07E-06
3	1679	0,0640	0,0625	1,55E-03	2,39E-06	3,83E-05
4	1669	0,0637	0,0625	1,17E-03	1,36E-06	2,17E-05
5	1647	0,0628	0,0625	3,27E-04	1,07E-07	1,71E-06
6	1658	0,0632	0,0625	7,46E-04	5,57E-07	8,91E-06
7	1594	0,0608	0,0625	-1,70E-03	2,87E-06	4,60E-05
8	1588	0,0606	0,0625	-1,92E-03	3,70E-06	5,92E-05
9	1646	0,0628	0,0625	2,88E-04	8,32E-08	1,33E-06
10	1604	0,0612	0,0625	-1,31E-03	1,73E-06	2,76E-05
11	1640	0,0626	0,0625	5,96E-05	3,55E-09	5,68E-08
12	1621	0,0618	0,0625	-6,65E-04	4,42E-07	7,08E-06
13	1676	0,0639	0,0625	1,43E-03	2,05E-06	3,28E-05
14	1600	0,0610	0,0625	-1,47E-03	2,15E-06	3,44E-05
15	1635	0,0624	0,0625	-1,31E-04	1,72E-08	2,75E-07
16	1674	0,0639	0,0625	1,36E-03	1,84E-06	2,94E-05
Σ	26215	1,0000	1,0000	6,94E-18	1,98E-05	3,17E-04

Модель восстановления изображений, переданных по двоичному симметричному каналу связи с ошибками, представлена в виде схемы на рисунке 2.20. На вход схемы поступает искаженное видео, далее оно поступает на блок «Обнаружение импульсного шума в видео», где происходит вычисление оценки сходства пикселей в области трех кадров видео по формуле 2.34. Далее строится карта искаженных пикселей при помощи сравнения значений оценки сходства пикселей и порогового значения T . Далее изображение, в котором определено местоположение искаженных значений, восстанавливается адаптивным медианным фильтром.

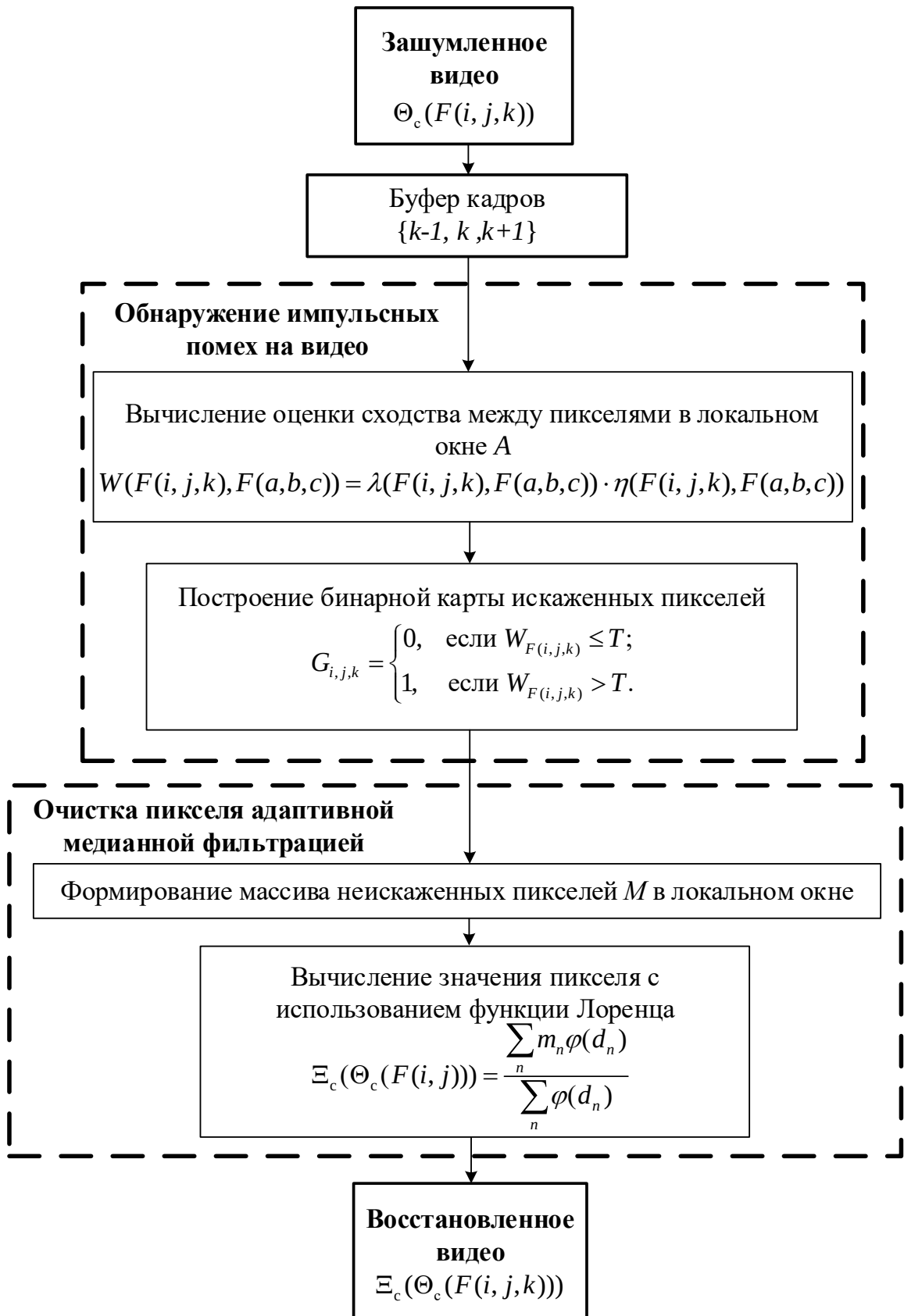


Рисунок 2.20 – Схема реализации разработанного метода восстановления изображений, переданных по двоичному симметричному каналу связи с ошибками

Формируется массив только неискаженных пикселей внутри маски фильтра, показанной на рисунке 2.8, для искаженных пикселей. Внутри маски фильтра вычисляется медиана, и полученное значение присваивается искаженному пикселю. В результате получаем восстановленное видео.

Для первого и последнего кадров видео буфер составляет всего два кадра: для первого это текущий и следующий кадры, для последнего это предыдущий и текущий кадры. Рассмотрим пример передачи видеоданных по двоичному симметричному каналу с ошибками.

Пример 2.5. Пусть через канал связи передается три последующих друг за другом кадра видео:

142	142	142	142	142	142	142	142	142
142	142	142	142	142	142	142	142	142
143	143	143	143	143	143	143	143	143

Пусть в результате передачи через двоичный симметричный канал с вероятностью ошибки $p_k = 0,05$ значения яркостей пикселей изменяются следующим образом:

142	142	78	142	142	174	142	142	142
142	15	142	140	158	142	142	142	138
143	143	143	142	143	143	143	143	143

В результате оценки сходства пикселей W по формуле 2.22 получаем следующие значения:

6,87	0	41,09	2,29	0	18,01	0	0	0
0	45,40	0	0	12,89	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Пусть $T=15$. При помощи сравнения этих значений с пороговым значением, получим карту искаженных значений:

0	0	1	0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рассчитаем медианы для пикселей, которые были определены как искаженные:

142	142	142	142	142	142	142	142	142
142	142	142	140	158	142	142	142	138
143	143	143	142	143	143	143	143	143

В результате получены восстановленные кадры видео.

2.4 Выводы по второй главе

1. Разработаны модели очистки изображений и видео от полярного импульсного шума. Для решения задачи восстановления пикселей предложено преобразование результата медианной фильтрации на основе распределения

Лоренца с использованием альтернативных масок, рассчитанных по метрике Евклида.

2. Разработан вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе параметра отличия яркости и параметра геометрической удаленности в локальном окне.

3. На основе вычислительного метода разработаны модели восстановления изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом. Результаты оценки сходства между пикселями при сравнении с пороговым значением формируют бинарную карту искажений, при помощи которой можно определить, является ли пиксель искаженным. В результате к пикселям, которые определены как импульсные помехи, можно применить адаптивную медианную фильтрацию для восстановления изображений и видео.

4. Рассмотрена передача изображений и видео по двоичному симметричному каналу с ошибками. Ошибки, возникающие при передаче данных, искажают значения яркости пикселей изображений. Продемонстрировано, что такой тип искажения схож с воздействием случайного импульсного шума на изображениях и видео. Следовательно разработанный метод может быть использован для решения данной задачи.

ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВИДЕО ОТ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА

3.1 Компьютерное моделирование очистки изображений и видео от полярного импульсного шума

Для решения четвертой поставленной задачи требуется разработать систему компьютерного моделирования для сравнения разработанных и существующих моделей очистки изображений и видео от полярного и случайного импульсного шума, которая должна: обрабатывать поступающие изображения или видео; вносить импульсные искажения в изображения или видео в соответствии с моделью шума; обрабатывать искаженные импульсным шумом изображения или видео на основе известных моделей очистки от импульсного шума; обрабатывать искаженные импульсным шумом изображения или видео на основе разработанных моделей очистки от импульсного шума; вычислять характеристику PSNR качества восстановления изображений или видео, искаженных импульсным шумом.

В данном пункте описана программная реализация в пакете прикладных программ Matlab [15] разработанных моделей для очистки изображений и видео от полярного импульсного шума, описанных в пункте 2.1. Для демонстрации эффективности представлены результаты сравнения существующих и разработанных моделей с использованием различных критериев оценки качества восстановления изображений: пикового отношения сигнал-шум (PSNR).

Для моделирования были использованы различные 8-битные изображения ($q=8$) в оттенках серого, искаженные полярным импульсным шумом, в соответствии с формулой 2.1. Для каждого изображения сгенерирован импульсный шум с интенсивностями $p_n = 0,01; 0,1; 0,25; 0,5$. Полярный импульсный шум в

программной среде MATLAB генерируется на изображении при помощи встроенной команды *imnoise('salt & pepper')*. При выполнении команды пиксели изображения с определенной вероятностью принимают значения 0 и 255. Критерий χ^2 показал (пункт 2.1), что расположение импульсов на изображении при уровне значимости 0,9 равномерное. Изображения, использованные для моделирования, представлены на рисунке 3.1.

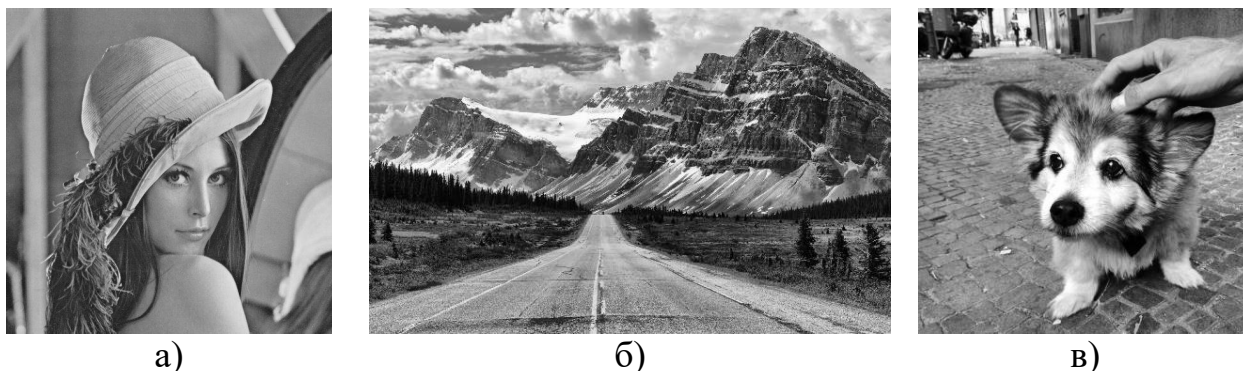


Рисунок 3.1 – Изображения, использованные при моделировании восстановления изображений от полярного импульсного шума:

а) «Лена»; б) «горы»; в) «собака»

В программной среде Matlab изображения загружаются при помощи встроенных команд, преобразуются в формат оттенков серого и искажаются полярным импульсным шумом (Приложение Д). В результате для каждого изображения сформировано 7 зашумленных изображений с интенсивностью шума от 1 до 99 процентов. На изображении 3.2 приведены зашумленные версии изображения 3.1б.

С увеличением интенсивности полярного импульсного шума изображение теряет всё больше деталей [10]. Но некоторые очертания объекта сохраняются даже при высоких интенсивностях шума из-за равномерного распределения шума по изображению. Так как разработанная модель основана на адаптивном подходе медианной фильтрации, каждый пиксель изображения в цикле проверяется на условие равенности значениям яркости 0 и 255. Если пиксель зашумленного изображения не равен 0 или 255, то в восстановленном изображении сохраняются

эти значения зашумленного изображения. Для пикселей чьи значения равны 0 или 255, составляется массив M внутри маски фильтра (формула 2.9), либо внутри стандартной маски 3×3 из значений, которые также не равны максимальным и минимальным значениям яркости, рассчитанным по метрике Евклида (формула 2.11).

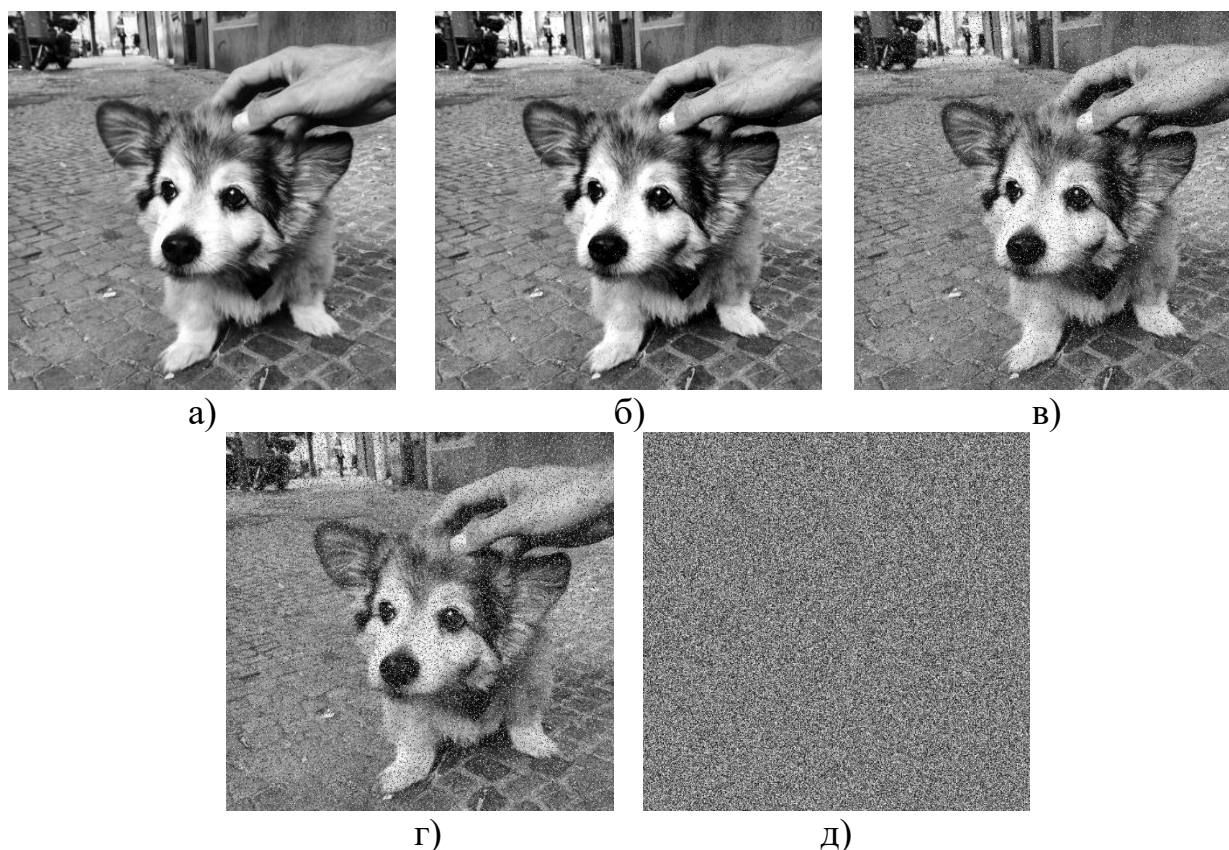


Рисунок 3.2 – Изображение, зашумленное полярным импульсным шумом различной интенсивности p_n : а) исходное изображение; зашумленные изображения: б) $p_n = 0,01$; в) $p_n = 0,1$; г) $p_n = 0,25$; д) $p_n = 0,5$

Далее в разработанной модели следует условие: если в массиве значений не ноль элементов, выполняются вычисления по формулам 2.4-2.7. Если массив неискаженных пикселей M пустой, то искаженное значение сохраняется до следующей итерации. Случай, когда массив M не содержит элементов, может возникнуть при высокой интенсивности импульсного шума, когда в локальной области вокруг искаженного пикселя ни один из пикселей не является исправным.

Вероятность появления таких случаев возрастает с увеличением интенсивности шума на изображениях. Моделирование показало, что для изображений, искаженных импульсным шумом с вероятностью возникновения искажений 99%, необходимо не более 4 итераций.

Для выявления свойств масок фильтров предлагается две модификации метода, используемых в модели восстановления полярного импульсного шума на изображениях, различающихся локальным окном обработки. В первой модификации окно имеет вид стандартной маски 3×3 (рисунок 3.3). Во второй модификации она имеет вид, описанный по формуле 2.11. Следует также отметить, что центральный пиксель является искаженным, и потому априори исключен из рассмотрения.

$i-1, j-1$	$i-1, j$	$i-1, j+1$
$i, j-1$	x	$i, j+1$
$i+1, j-1$	$i+1, j$	$i+1, j+1$

Рисунок 3.3 – Маска фильтра в первой модификации в разработанной модели очистки изображений от полярного импульсного шума

Для получения результатов обработки с использованием первой и второй модификаций в разработанной модели, в таблице 3.1 приведены логарифмы величин $2\sigma^2$ из формулы (2.5), использованные при моделировании. Данные значения получены в результате анализа качества обработки в каждом случае при варьировании значения величины $2\sigma^2$ в интервале от 10^1 до 10^6 . В таблицах 3.2-3.4 приведены результаты очистки тестовых изображений от импульсных шумов различной интенсивности. Значения характеристики PSNR для изображений после применения известных и разработанного методов показаны в таблицах 3.2-3.4. Для проведения моделирования каждое изображение подвергалось каждому уровню шумового воздействия 10 раз. Обработка каждого из этих изображений выполнялась также 10 раз.

Таблица 3.1 – Значения $\lg(2\sigma^2)$, использованные при моделировании фильтрации полярного импульсного шума для различных изображений

p_{Π}	«Лена»		«горы»		«собака»	
	Разработанная модель					
	1-ая	2-ая	1-ая	2-ая	1-ая	2-ая
0,01	2,6	3,8	3,5	3,5	3,2	3,5
0,10	3,2	3,9	3,6	4,0	3,4	4,3
0,25	3,7	4,5	3,1	4,3	3,9	5,4
0,50	4,7	5,8	4,3	5,4	4,6	5,4

Таблица 3.2 – Значения PSNR различных моделей очистки изображений от полярного импульсного шума для изображения «Лена», (дБ)

p_{Π}	Известные модели					Разработанная модель	
	Turkey	Hwang	Vijaykumar	Wang	Lu	первая	вторая
0,01	34,47	52,07	53,19	53,06	52,15	53,18	54,03
0,10	32,52	40,18	42,40	42,24	42,00	42,40	43,35
0,25	26,02	33,63	35,84	37,47	37,64	37,81	38,32
0,50	15,25	28,09	30,83	32,75	33,27	33,32	33,11

Таблица 3.3 – Значения PSNR различных моделей очистки изображений от полярного импульсного шума для изображения «горы», (дБ)

p_{Π}	Известные модели					Разработанная модель	
	Turkey	Hwang	Vijaykumar	Wang	Lu	первая	вторая
0,01	28,40	46,35	47,07	46,95	46,84	47,07	48,25
0,10	27,52	35,68	36,84	36,64	36,64	36,84	37,78
0,25	23,81	30,26	30,49	32,12	32,38	32,32	33,01
0,50	14,57	25,22	26,21	28,12	28,50	28,54	28,40

Таблица 3.4 – Значения PSNR различных моделей очистки изображений от полярного импульсного шума для изображения «собака», (дБ)

p_{Π}	Известные модели					Разработанная модель	
	Turkey	Hwang	Vijaykumar	Wang	Lu	первая	вторая
0,01	29,46	46,25	47,33	47,24	46,89	47,33	48,55
0,10	28,32	35,82	37,84	37,70	37,47	37,85	38,80
0,25	24,44	30,44	30,95	32,97	33,19	33,34	33,90
0,50	14,92	25,27	26,65	28,73	29,18	29,25	29,11

Из таблиц 3.2-3.4 видно, что наилучшие результаты получены при использовании разработанной модели. Можно отметить, что первая модификация разработанной модели показала наилучший результат при обработке изображений с импульсным шумом интенсивности $p_{\text{ш}} = 0,5$ (в зависимости от использованной для оценки характеристики). Вторая модификация разработанной модели показала лучшие результаты при обработке изображений с низкой интенсивностью шума $p_{\text{ш}} < 0,5$.

На рисунках 3.4-3.5 приведены примеры обработки тестовых изображений. На рисунке 3.4 показаны результаты обработки изображения «Лена», искаженного импульсным шумом с $p_{\text{ш}} = 0,25$. Из рисунка 3.4в видно низкое качество обработки при использовании модели Turkey. Рисунки 3.4г-3.4з уже имеют достаточно высокое визуальное качество, что подтверждается соответствующими значениями из таблиц 3.2 и 3.5.

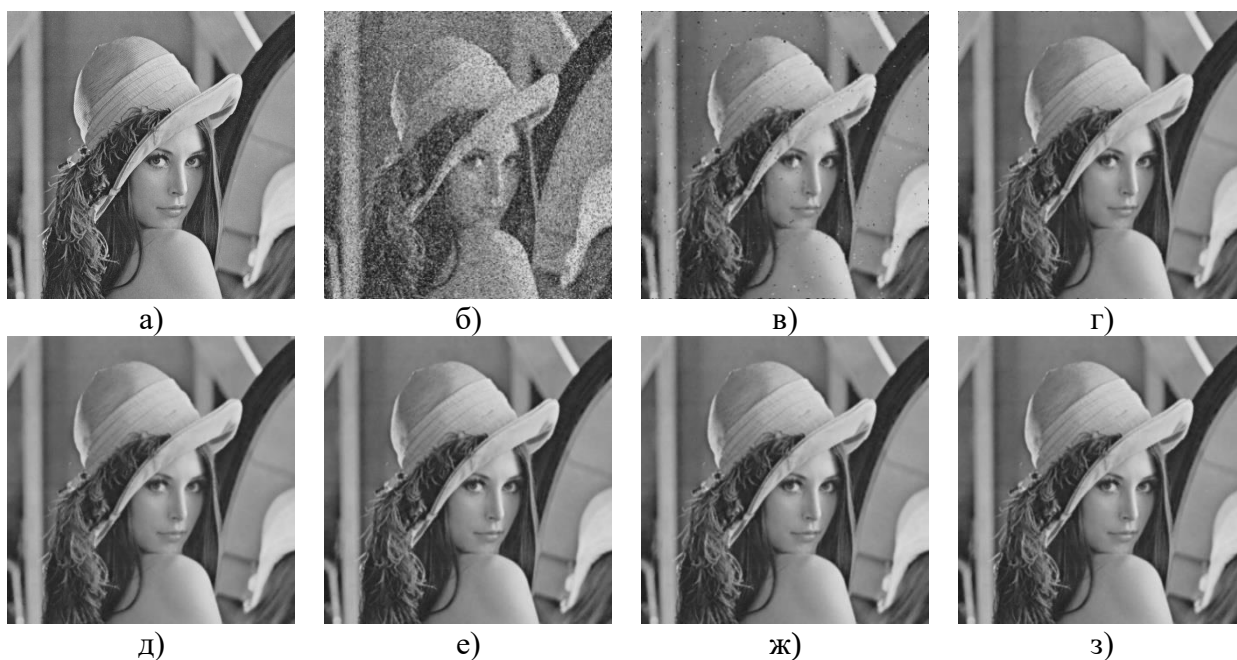


Рисунок 3.4 – Обработка изображений, искаженных полярным импульсным шумом: а) исходное полутоновое изображение «Лена»; б) изображение, искаженное импульсным шумом с интенсивностью $p_{\text{ш}} = 0,25$; результаты восстановления, на основе модели: в) Turkey; г) Hwang; д) Vijaykumar; е) Wang; ж) Lu; з) первая модификация разработанной модели

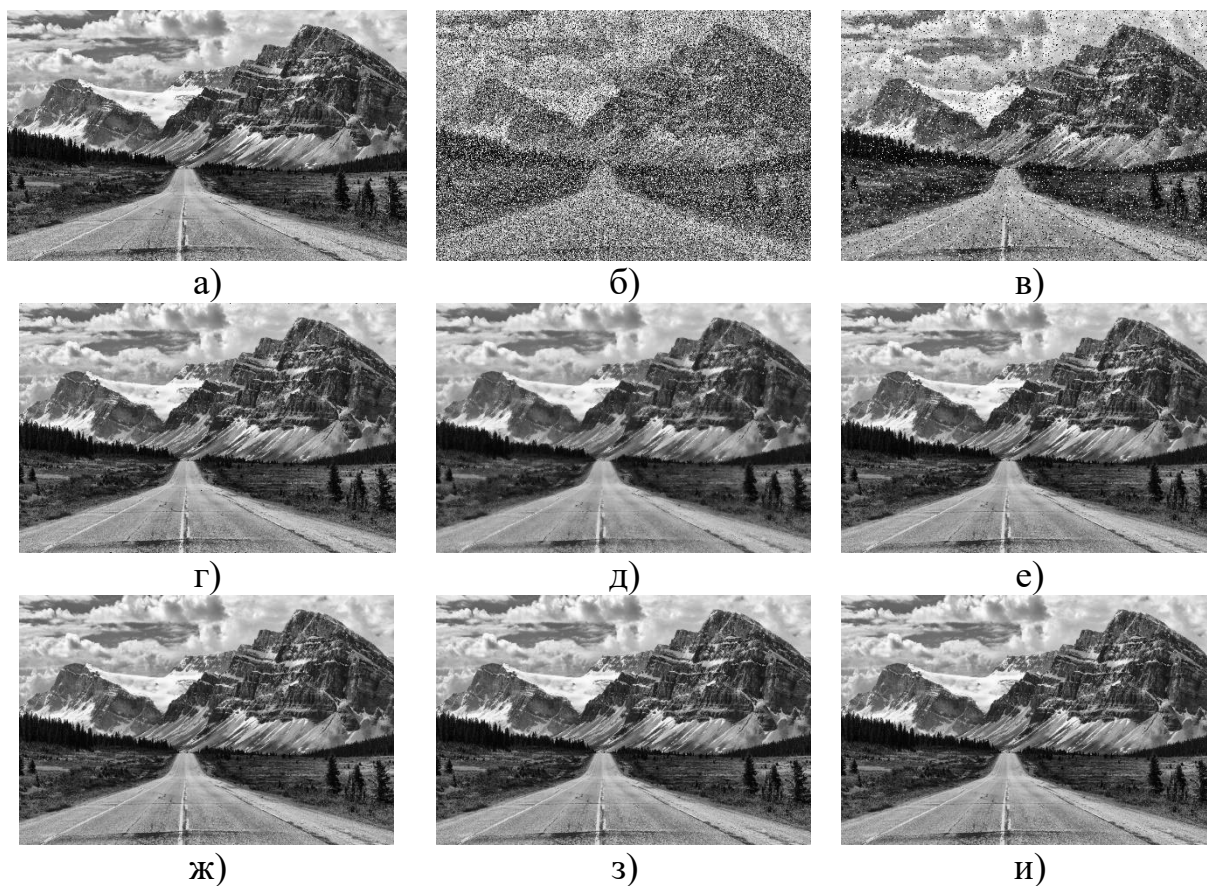


Рисунок 3.5 – Обработка изображений, искаженных полярным импульсным шумом: а) исходное полутоновое изображение «горы»; б) изображение, искаженное импульсным шумом с интенсивностью $p_n = 0,5$; результаты восстановления, на основе модели: в) Turkey; г) Hwang; д) Vijaykumar; е) Wang; ж) Lu; з) первая модификация разработанной модели; и) второй модификации разработанной модели

На рисунке 3.5 показаны результаты обработки изображения «горы», искаженного импульсным шумом с $p_n = 0,5$. Низкое качество применения Turkey и метода из Hwang здесь видно более отчетливо. На рисунке 3.6 продемонстрированы гистограммы сравнения известных и разработанной моделей в графическом виде.

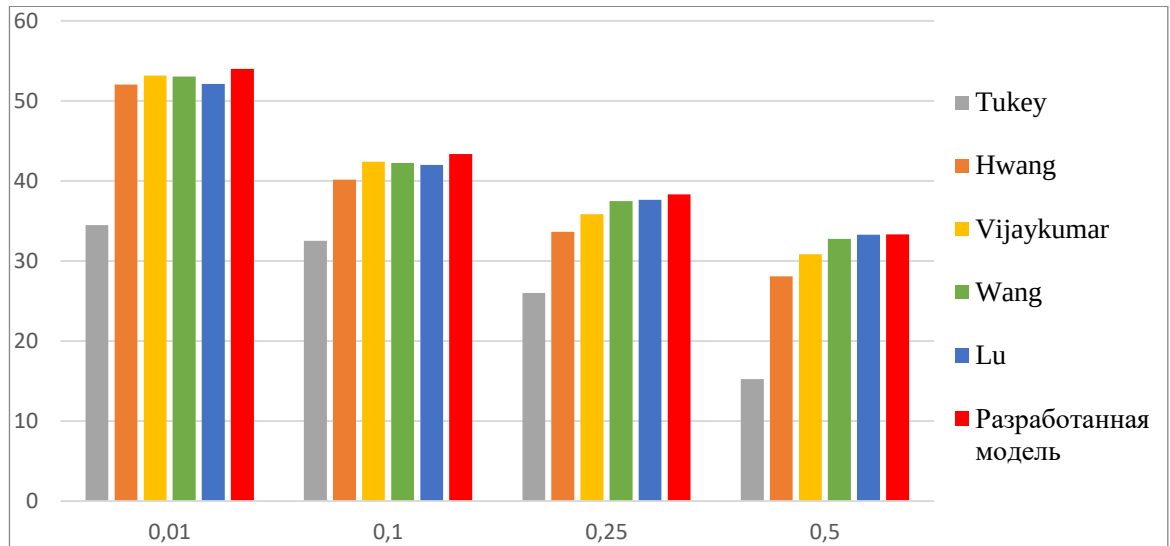


Рисунок 3.6 – Качество очистки изображений (PSNR), искаженных полярным импульсным шумом, при использовании различных моделей

В таблице 3.5 и на рисунке 3.7 представлены временные затраты моделей очистки изображений от полярного импульсного шума, из которых видно, что разработанная модель демонстрирует время на обработку, не превышающую время обработки изображений известными моделями. В таблице 3.5 и на рисунке 3.7 обработано изображение «собака» (рисунок 3.1), искаженное полярным импульсным шумом с интенсивностью $p_n = 0,50$. В качестве результата выбрано среднее значение на основе пяти обработок.

Таблица 3.5 – Временные затраты моделей очистки изображений от полярного импульсного шума, с

Известные модели					Разработанная модель
Turkey	Hwang	Vijaykumar	Wang	Lu	
0,05	0,5	9,9	4,5	2,2	1,6

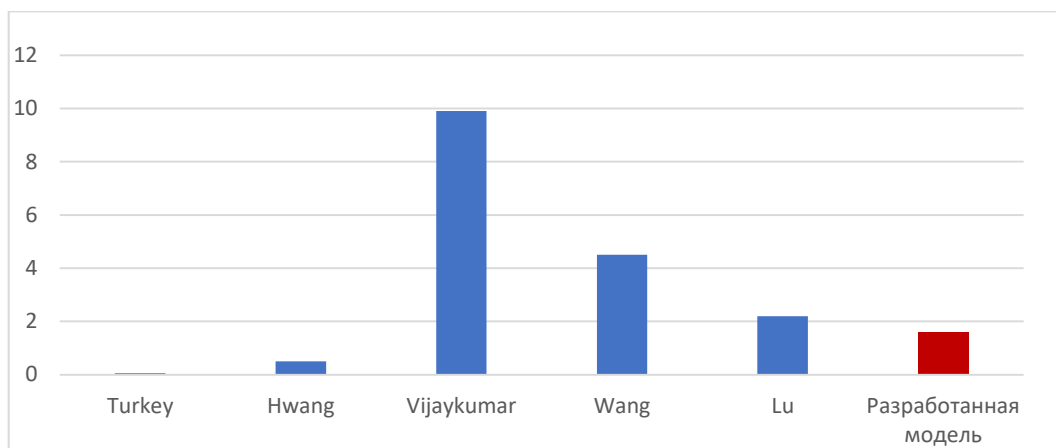


Рисунок 3.7 – Временные затраты моделей очистки изображений от полярного импульсного шума, с

Подводя итог по результатам моделирования, представленным в таблицах 3.2-3.4 и на рисунках 3.4 и 3.5, можно сделать вывод о том, что разработанные модели позволяют получать лучшее качество изображений, восстановленных адаптивной медианной фильтрацией после воздействия импульсного шума, по сравнению с применением известных методов.

Для решения задачи восстановления видео от полярного импульсного шума рассмотрен фрагмент видеозаписи, который состоит из 113 кадров, имеет частоту 24 кадра в секунду, разрешение 320x180 и представлен в формате «.avi». На рисунке 3.7 продемонстрированы 3 кадра использованного видеоклипа (первый, 50-й и последний).



Рисунок 3.8 – Кадры из видео, использованного при моделировании очистки изображений от полярного импульсного шума: а) 1-й кадр; б) 50-й кадр; в) 113-й кадр

Видеоданные покадрово искажены полярным импульсным шумом с помощью встроенной команды *imnoise* в Matlab с интенсивностями $p_{\pi} = 0,01; 0,1; 0,25; 0,5$. Видеофайл загружен с помощью команды «*VideoReader*» и записан в рабочую область в виде переменной, содержащей такие свойства файла как: название, путь к файлу, длительность, разрядность кадров, частота кадров, количество кадров, высота и ширина кадра и др. Далее с помощью команды *read*(«*видеофайл*», «*номер кадра*») выполняется циклическое обращение к каждому кадру. Для каждого кадра выполняется процедура восстановления изображений от полярного импульсного шума. Но, в отличие от очистки изображений, в задаче очистки видео изменена маска фильтра, представленная в видео множеств A , приведенных в формулах 2.13 и 2.14 (рисунок 2.8). В этой локальной области формируется массив неискаженных значений M .

Данным способом реализованы 4 модификации модели предложенные в пункте 2.1: $AM+$, $AML+$, $AM\Box$ и $AML\Box$. Модификации различаются маской фильтра A , а также наличием оценки на основе распределения Лоренца, вычисляемой по формуле 2.16. Каждый обработанный кадр последовательно записывается в видеофайл при помощи цикла с использованием команд *VideoWriter* и *writeVideo* (Приложение Е):

```
vidObj = VideoWriter («название файла», «формат файла»);
vidObj.FrameRate = 24;
open(vidObj);
for i=1:100
    x = num2str(i);
    im = ht («название изображения», x);
    im1 = ht (im, «формат изображения»);
    imdata = imread(im1);
    writeVideo(vidObj,imdata);
end
```

Для оценки качества обработки методов очистки от импульсного шума использована метрика PSNR, демонстрирующими разницу между исходным незашумлённым видео и видео, полученным после применения очистки. Результаты эксперимента представлены в таблицах 3.9 и 3.10. На рисунках 3.9-3.11 для наглядности качества обработки представлен 50-й кадр исходного, искаженных и восстановленных видео [22, 28].

Таблица 3.6 – Значения PSNR для различных моделей очистки видеоданных от полярного импульсного шума, дБ

p_n	Известные модели					Модификации разработанной модели			
	Turkey	Hwang	Vijaykumar	Wang	Lu	$AM +$	$AML +$	$AM \square$	$AML \square$
0,01	24,322	32,787	38,227	37,490	37,482	38,736	37,809	37,813	37,809
0,10	23,532	18,588	24,988	31,765	31,716	36,593	36,654	32,787	32,743
0,25	21,039	12,426	17,227	27,674	27,599	33,216	33,250	29,245	29,192
0,50	14,109	8,454	11,220	23,653	23,594	27,983	27,984	25,747	25,913

Для проведения моделирования каждое видео подвергалось каждому уровню шумового воздействия пять раз, после чего выполнялась обработка каждого из 5 зашумленных видео. Из таблицы 3.6 видно, что во всех рассмотренных случаях лучший результат показывает одна из модификаций предложенной модели. В большинстве случаев это $AML +$. При этом, для импульсного шума с низкой вероятностью $p_n = 0,01$ более предпочтительной оказалась модификация $AM +$, не использующая постобработку медиан на основе функции Лоренца. Использование модификаций $AM \square$ и $AML \square$, которые используют метрику для расчета масок L_1 , не продемонстрировала наилучших результатов. Наиболее близкий по качеству результат из известных моделей продемонстрировали методы Wang и Lu. Однако эти модели не используют данные из соседних кадров при восстановлении искаженного пикселя, что приводит к худшему результату в сравнении с предлагаемыми модификациями. Обобщая полученные данные, можно сделать вывод, что разработанная модель очистки видеоданных от импульсного шума

демонстрирует лучшие результаты по сравнению с известными. Для большинства практических случаев лучше всего подойдет модификация *AML* +. Однако при выборе модификации разработанной модели необходимо учитывать специфику решаемой практической задачи.

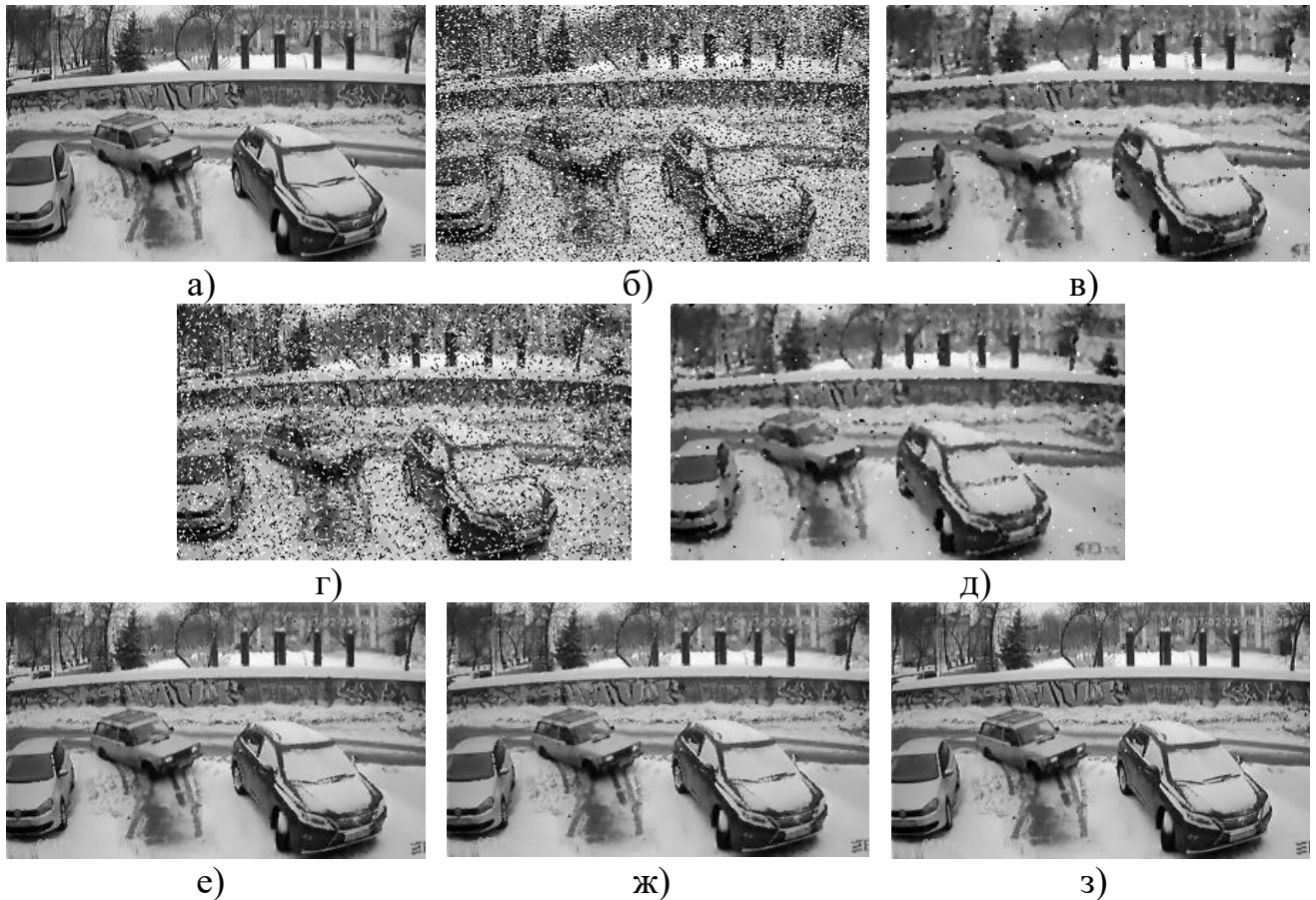


Рисунок 3.9 – Обработка видеоданных, искаженных полярным импульсным шумом: а) 50-й кадр исходного видео; б) 50-й кадр видео, искаженного импульсным шумом с интенсивностью $p_{\text{п}}=0,25$; результаты восстановления методами: в) Turkey; г) Hwang; д) Vijaykumar; е) Wang; ж) Lu; з) *AML* +

На рисунке 3.10 продемонстрированы гистограммы сравнения известных и разработанной моделей очистки видео от полярного импульсного шума в графическом виде.

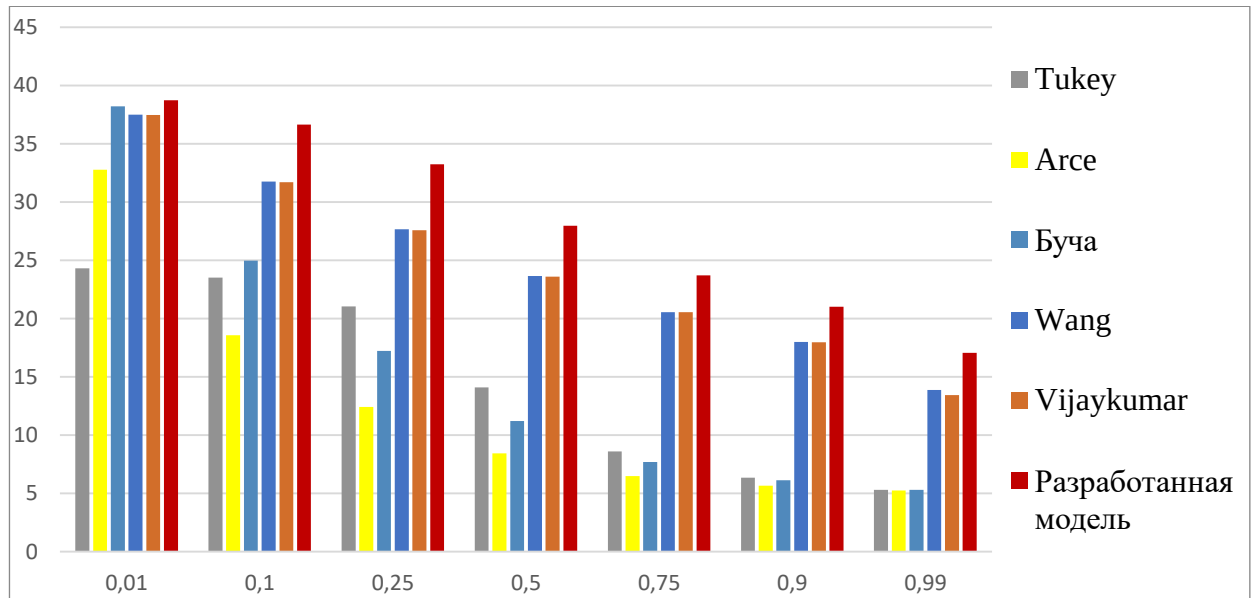


Рисунок 3.10 – Качество очистки видео (PSNR), искаженных полярным импульсным шумом, при использовании различных моделей

В таблице 3.7 и на рисунке 3.11 представлены временные затраты моделей очистки изображений от полярного импульсного шума, из которых видно, что разработанная модель демонстрирует время на обработку, не превышающую время обработки видео известными моделями. В таблице 3.7 и на рисунке 3.11 обработано видео, представленное на рисунке 3.8, искаженное полярным импульсным шумом с интенсивностью $p_{\text{п}} = 0,50$. В качестве результата выбрано среднее значение на основе пяти обработок.

Таблица 3.7 – Временные затраты моделей очистки видео от полярного импульсного шума, с

Известные модели				Разработанная модель
Tukey	Hwang	Bucha [38]	Wang	
14,1	43,3	20,1	32,6	39,1

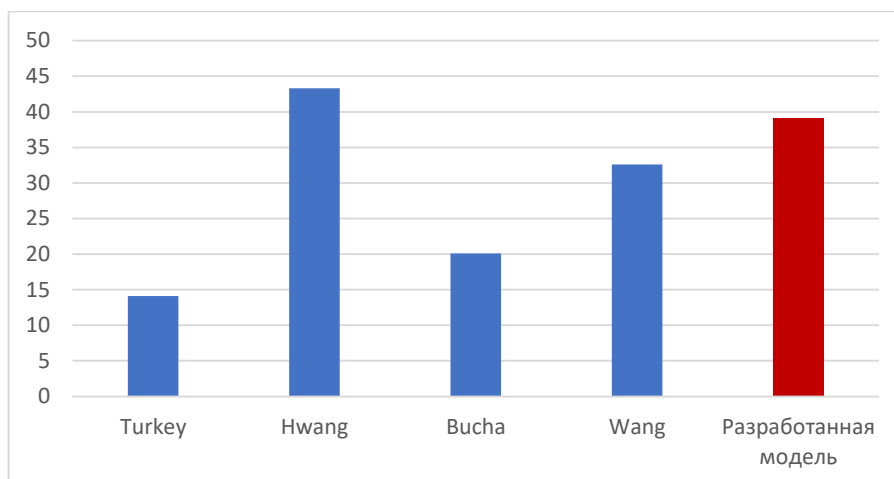


Рисунок 3.11 – Временные затраты моделей очистки видео от полярного импульсного шума, с

В данном пункте показано, что разработанные модели для очистки изображений и видео от полярного импульсного шума за счет введения оценки на основе распределения Лоренца и с использованием масок, построенных по метрике Евклида, позволяют получить результаты, демонстрирующие эффективность данных моделей, на основе математической характеристики PSNR в среднем на 1,4-63,4 %, для восстановления изображений, а для восстановления видео на 15,7-182 %, по сравнению с известными методами.

3.2 Компьютерное моделирование очистки изображений и видео от случайного импульсного шума

В данном пункте описана программная реализация разработанных моделей очистки изображений и видео от случайного импульсного шума, описанных в пункте 2.2. Далее продемонстрирована реализация модели данного типа шумового воздействия и представлены результаты сравнения существующих и разработанных моделей в виде таблиц и примеров обработки изображений и видео, искажённых под воздействием случайного импульсного шума. Для

генерации случайного импульсного шума на изображении использован следующий цикл в математическом пакете Matlab (Приложение Е) [16]:

```
while sum(sum(MAP))<k
    i=randi([1 row],1);
    j=randi([1 col],1);
    if MAP(i,j)==0
        MAP(i,j)=1;
        f(i,j)=randi([0 255],1);
    end
end
```

В данном участке кода переменная k равна произведению высоты и ширины изображения, умноженную на интенсивность шума на изображении p_c , i и j – координаты изображения, а f – зашумленное изображение. Функция *randi* создает массив равномерно распределенных псевдослучайных целых чисел. В результате получаем изображение, зашумленное псевдослучайными значениями, которые также псевдослучайно распределены по изображению, но при этом распределены равномерно. На полученном зашумленном изображении необходимо при помощи цикла по координатам произвести оценку разности между значениями в окрестности A по формуле 2.22 для каждого пикселя. В результате получаем матрицу значений, размеры которой равны размерам зашумленного изображения. Также внутри цикла прописано условие (формула 2.23) (Приложение Ж):

```
if W (i,j) > T
    MAP1 (i,j) = 1;
    Kkk = kkk + 1;
else
```

В результате формируется бинарная карта MAP1, которая для каждого пикселя зашумленного изображения определяет, является ли данный пиксель импульсным. Далее, для каждого пикселя изображения, искаженного случайным импульсным шумом, чье значение в карте MAP1 с соответствующими координатами равно 1, выполняется медианная фильтрация внутри маски фильтра A , состоящей только из неискаженных значений. Восстановленное изображение получается в результате полного выполнения цикла.

В разработанной модели предлагается динамический размер локальной области A . В таблице 3.8 для трех изображений (рисунок 3.12) приведен анализ значений характеристик PSNR и SSIM для различных размеров окна A разработанной модели. На изображениях 3.12а и 3.12б рамкой выделены фрагменты, которые в дальнейшем рассматриваются в увеличении. По полученным результатам рекомендуется для интенсивности шума $0 < p_c \leq 0,25$ использовать локальное окно размера $R=2$, рассчитанное по метрике Евклида (формула 2.13). Для интенсивности шума $0,25 < p_c$ следует использовать локальное окно размера $R=3$. Также, экспериментально установлено, что для шума с интенсивностью $p_c = 0,1$ наилучший результат достигается при выборе порога $T=22$, для шума $p_c = 0,25$ наилучший результат достигается при выборе порога $T=19$, в случае $p_c = 0,5$ наилучший результат достигается при выборе порога $T=100$. Значительное увеличение параметра T в последнем случае объясняется увеличенным размером локального окна детектора, что приводит к существенному росту получаемых значений по формуле 2.23.

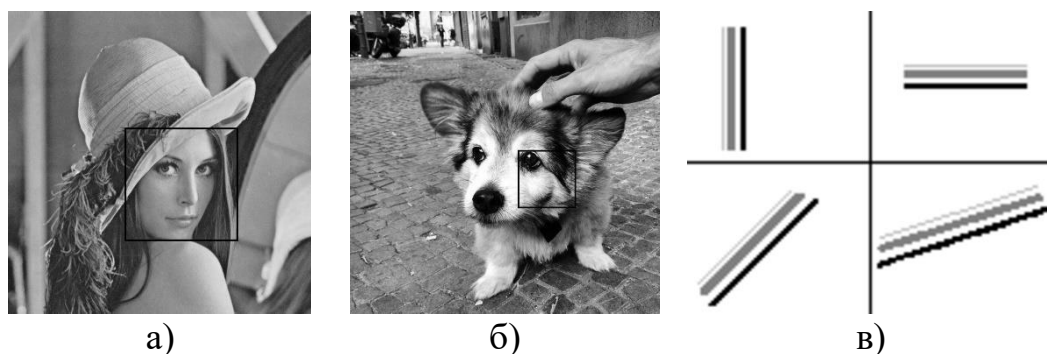


Рисунок 3.12 – Изображения, использованные при моделировании разработанного метода для очистки изображений от случайного импульсного шума: а) «Лена»; б) «собака»; в) «тонкие линии»

Таблица 3.8 – Значения PSNR для различных размеров окна A в разработанной модели очистки изображений от случайного импульсного шума

Изображение	«Лена»			«собака»			«тонкие линии»		
p_c	0,10	0,25	0,50	0,10	0,25	0,50	0,10	0,25	0,50
$A=1$	33,21	28,56	21,01	29,47	26,01	19,46	20,77	16,75	12,48
$A=2$	34,12	30,66	24,84	29,71	26,82	22,25	18,70	17,40	17,81
$A=3$	33,07	30,06	26,45	29,32	26,31	23,40	16,98	15,77	13,77
$A=4$	32,07	29,34	26,13	28,18	25,85	23,29	14,87	14,11	13,13

Экспериментально определенную интенсивность шума ρ_{cz} , до $p_c = 0,5$ включительно, предлагается оценивать следующим образом:

$$\rho_{cz} \approx 1,3 \cdot \frac{t}{r}, \quad (3.1)$$

где t – количество пикселей, определенных как искаженные, r – количество пикселей в изображении. Коэффициент 1,3 также определен экспериментально. При получении величины $\rho_{cz} > 0,5$ можно считать, что возник импульсный шум высокой интенсивности. В коэффициент, равный 1,3, заложено ожидание ложноположительных срабатываний детектора. Данная величина определена на основе моделирования шумов различной интенсивности до 50% включительно, возникающих на разных изображениях.

Для моделирования использованы 8-битные изображения ($q=8$) в оттенках серого «Лена», «тонкие линии» и «собака» (Рисунок 3.12), искаженные

случайнозначным импульсным шумом. Для каждого изображения сгенерирован импульсный шум с вероятностью возникновения шума $p_c = 0,1; 0,25; 0,5$. Для корректного сравнения моделей удаления импульсного шума использована только одна итерация восстановления адаптивным медианным фильтром. Размер локального окна R для интенсивности шума $0 < p_c \leq 0,25$ выбран равный 2, для интенсивности шума $0,25 < p_c$ – равный 3. Для каждого p_c выбраны одинаковые варьируемые параметры у каждой модели (пороги, среднеквадратичные отклонения гауссовых распределений). Для изображений на рисунке 3.12, для $p_c = 0; 0,1; 0,25; 0,5$ рассчитаны значения $\rho_{сз}$, представленные в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Значения $\rho_{сз}$ для различных изображений зашумленных случайным импульсным шумом с различными значениями интенсивности p_c

Изображение	Интенсивность p_c			
	0	0,1	0,25	0,50
«Лена»	0,007	0,106	0,250	0,482
«собака»	0,018	0,113	0,255	0,492
«тонкие линии»	0,050	0,145	0,288	0,530

Если детектор определил уровень шума менее 5%, то можно считать такое значение соответствующим незашумленному изображению, для которого фильтрацию выполнять не нужно. Выбор порога менее 5% связан с ожиданием ложноположительных срабатываний детектора, неизбежных при решении рассматриваемой задачи. При этом выполнена фильтрация неискаженных изображений разработанная модель. На рисунке 3.13 представлены результаты обработки, а в таблице 3.10 приведены значения PSNR. Анализ данных из рисунка 3.13 и таблицы 3.10 показывает, что применение разработанной модели к незашумлённому изображению не вносит видимых для человеческого глаза искажений.

Таблица 3.10 – Значения PSNR и SSIM для неискаженных изображений, обработанных предлагаемой моделью очистки изображений от случайного импульсного шума

Изображение	PSNR
«Лена»	39,748
«собака»	32,495
«тонкие линии»	33,890

Сравнение разработанной модели выполнено с несколькими предшественниками. В работе 2021 года Garnett был предложен метод исправления изображений, искаженных случайным импульсным шумом на основе индекса локального консенсуса. Авторами указанной статьи демонстрируется превосходство предложенной разработки над всеми известными аналогами. Далее проведено сравнение предлагаемого подхода с указанной разработкой, а также с некоторыми другими предшественниками, включающими стандартный медианный фильтр, описанный в Turkey, и некоторыми модификациями адаптивного медианного фильтра из работ Dong и Xiao. На рисунках 3.14-3.16 приведены фрагменты изображений из рисунка 3.13 соответственно. На рисунке 3.14б представлено изображение 3.10б, искаженное воздействием импульсного шума $p_c = 0,1$. В 3.14в-3.14е приведены результаты обработки рассматриваемыми известными моделями, в 3.14ж предлагаемой моделью. Из рисунка 3.14ж видно, что в процессе обработки изображение потеряло детали исходного изображения 3.14а, но при этом было сохранено больше деталей, чем в других моделях 3.14в-3.14е, где заметно более существенное искажение линий в результате восстановления от шума рассматриваемыми известными методами. Для воздействия возможной погрешности на результаты моделирования каждое изображение было зашумлено десять раз. После чего каждое из этих изображений было обработано и взято среднее значение.

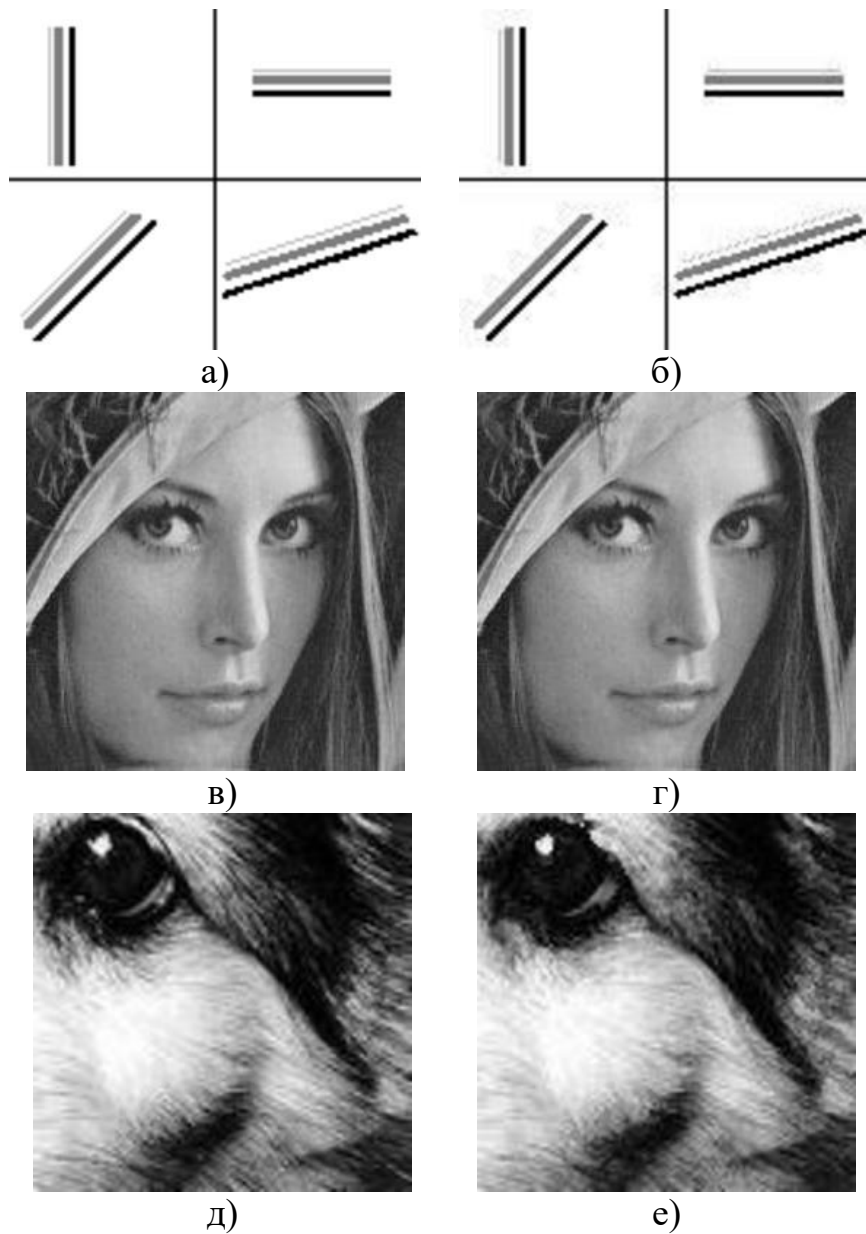


Рисунок 3.13 – Обработка неискаженных изображений разработанным методом восстановления изображений от случайного импульсного шума: а) фрагмент неискаженного изображения «тонкие линии»; б) фрагмент неискаженного изображения «тонкие линии», обработанного разработанным методом; в) фрагмент неискаженного изображения «Лена»; г) фрагмент неискаженного изображения «Лена», обработанного разработанным методом; д) фрагмент неискаженного изображения «собака»; е) фрагмент неискаженного изображения «собака», обработанного разработанным методом

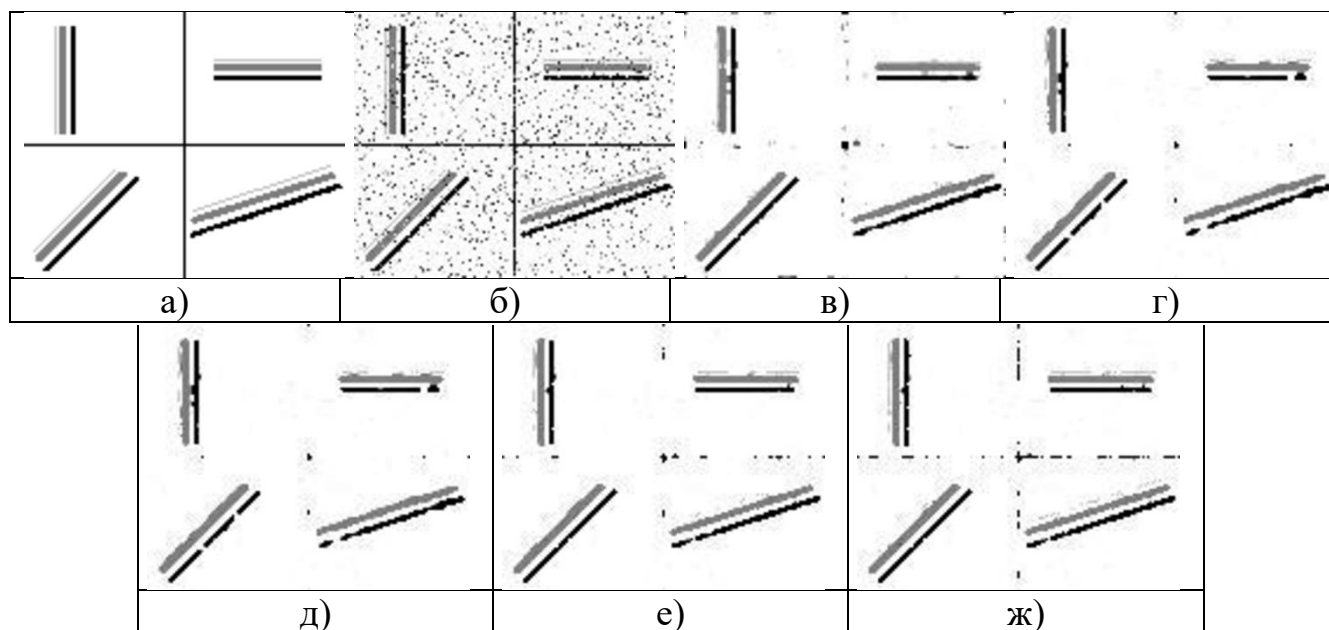


Рисунок 3.14 – Пример восстановления фрагмента изображения «тонкие линии», искаженного случайным импульсным шумом: а) исходный фрагмент; б) фрагмент, искаженный шумом с интенсивностью $p_c = 0,1$; результаты восстановления: в) Turkey; г) Garnett; д) Dong; е) Xiao; ж) разработанная модель

На рисунке 3.14б представлен фрагмент изображения 3.11в, зашумленный импульсным шумом $p_c = 0,25$. На рисунке 3.16ж видно преимущество данной модели: в отличие от рассматриваемых известных моделей 3.14в-3.14е, на изображении практически не осталось искаженных пикселей.

На рисунке 3.16б представлен фрагмент изображения 3.12а, искаженный воздействием импульсного шума с $p_c = 0,5$. Приведенные фрагменты для высокой интенсивности шума еще более явно показывают преимущества предлагаемой модели. На рисунках 3.16в-3.16е из-за скопления помех и высокой интенсивности шума пиксели не были идентифицированы как искаженные помехой. На рисунке 3.16ж искаженных областей практически не осталось.

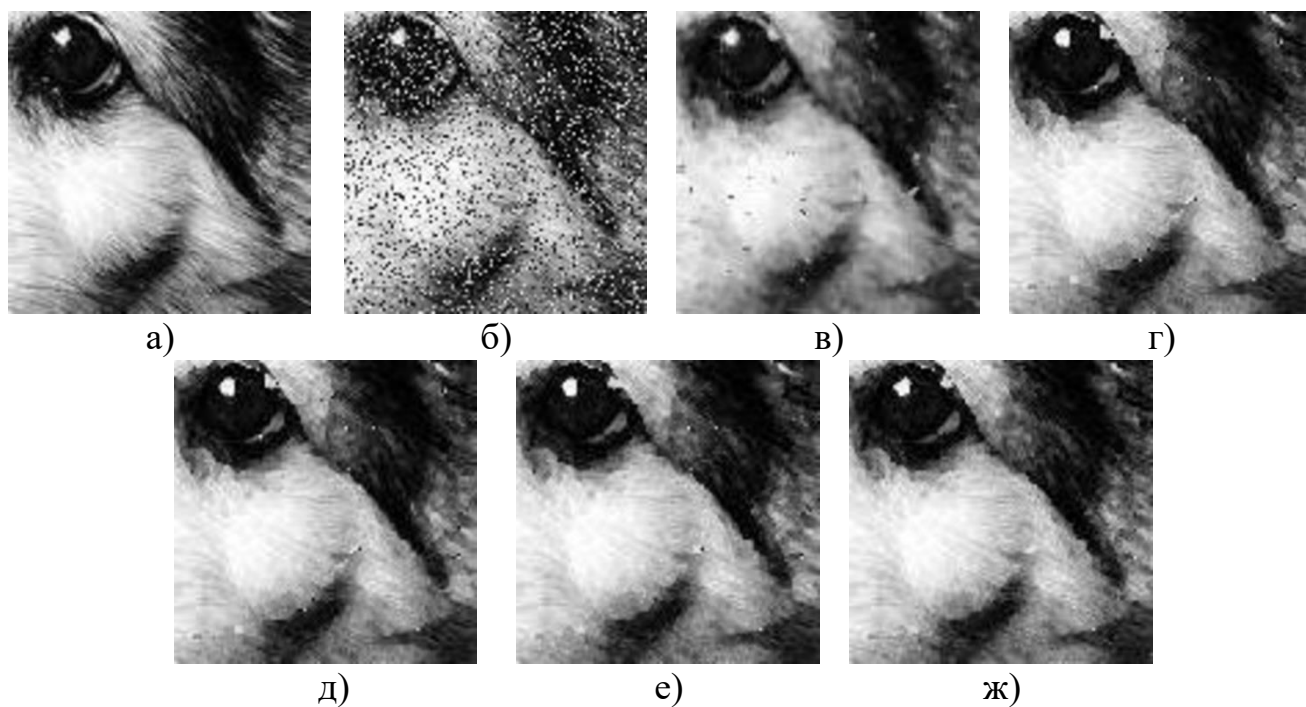


Рисунок 3.15 – Фрагменты изображения «собака», искаженного случайным импульсным шумом: а) исходный фрагмент; б) фрагмент, искаженный шумом с интенсивностью $p_c = 0,25$; результаты восстановления: в) Turkey; г) Garnett; д) Dong; е) Xiao; ж) разработанная модель

В таблице 3.11 приведены значения PSNR для различных рассматриваемых известной и предлагаемых моделей. Для интенсивности шума $p_c = 0,1$ в трех тестовых изображениях у разработанной модели получены наилучшие результаты на основе характеристики PSNR.

Для изображений «Лена» и «тонкие линии» разработанная модель показала лучший результат в большинстве рассмотренных случаев. Численная оценка качества предлагаемой модели представлена в таблице 3.11 подтверждает более качественную работу по сравнению с аналогами. Результаты показали, что разработанная модель наилучшим образом справилась с данным типом шумового воздействия. Для случаев $p_c = 0,1$ и $p_c = 0,25$ разработанная модель показала наилучшие результаты PSNR и SSIM на двух из трех тестовых изображений.

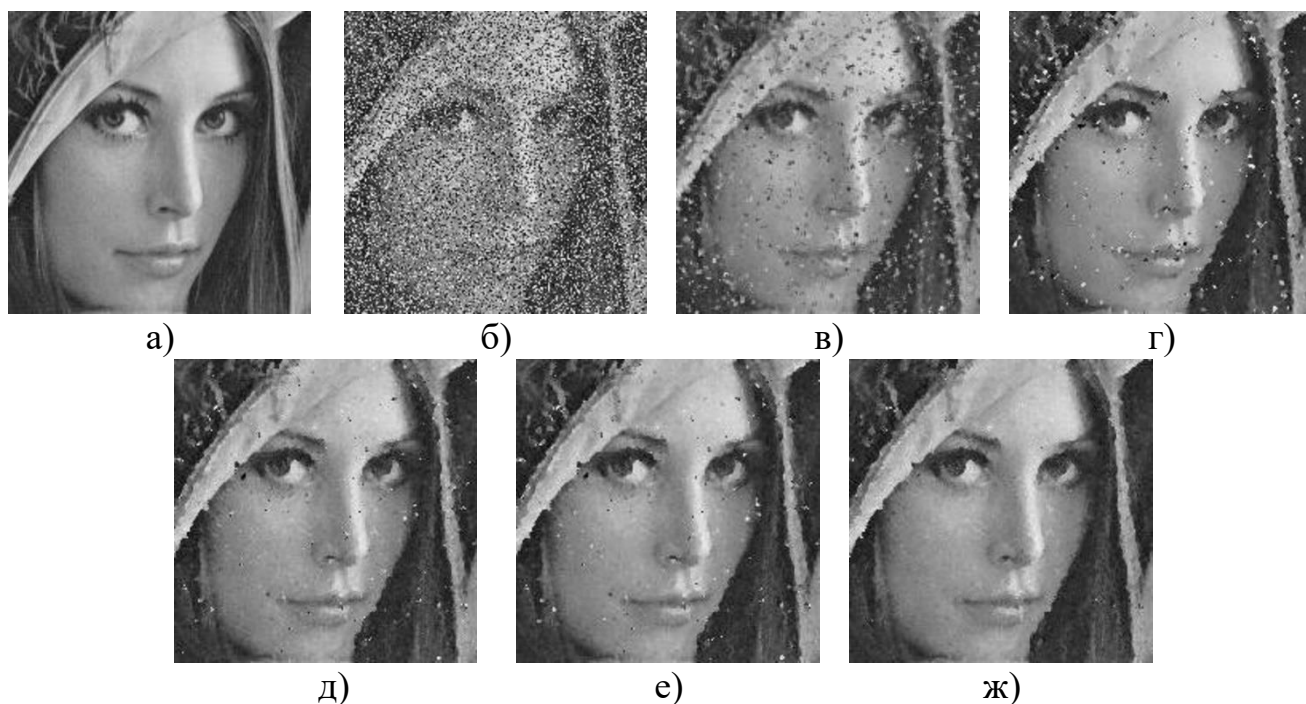


Рисунок 3.16 – Фрагменты изображения «Лена», искаженного случайным импульсным шумом: а) исходный фрагмент; б) фрагмент, искаженный шумом с интенсивностью $p_c = 0,5$; результаты восстановления: в) Turkey; г) Garnett; д) Dong; е) Xiao; ж) разработанная модель

Таблица 3.11 – Значения PSNR различных моделей очистки случайного импульсного шума на изображениях

Изображение	Интенсивность шума p_c	Известные модели				Разработанная модель
		Turkey	Garnett	Dong	Xiao	
«Лена»	0,10	31,684	32,936	33,304	31,767	34,116
	0,25	28,604	30,228	30,551	29,082	30,657
	0,50	21,182	24,789	24,854	22,166	26,450
«собака»	0,10	27,427	28,322	28,537	27,615	29,712
	0,25	25,337	26,404	26,584	25,179	26,816
	0,50	19,424	22,150	22,140	19,582	23,399
«тонкие линии»	0,10	16,733	16,488	17,610	16,497	18,702
	0,25	15,519	15,173	16,434	16,935	17,400
	0,50	11,511	13,164	13,621	15,148	13,773

Разработанный детектор может найти применение для определения капель дождя и снега и дальнейшей очистки от них на изображениях и кадрах видео при соответствующей адаптации математической модели.

На рисунке 3.17 продемонстрированы гистограммы сравнения известных и разработанной моделей очистки изображений от случайного импульсного шума в графическом виде.

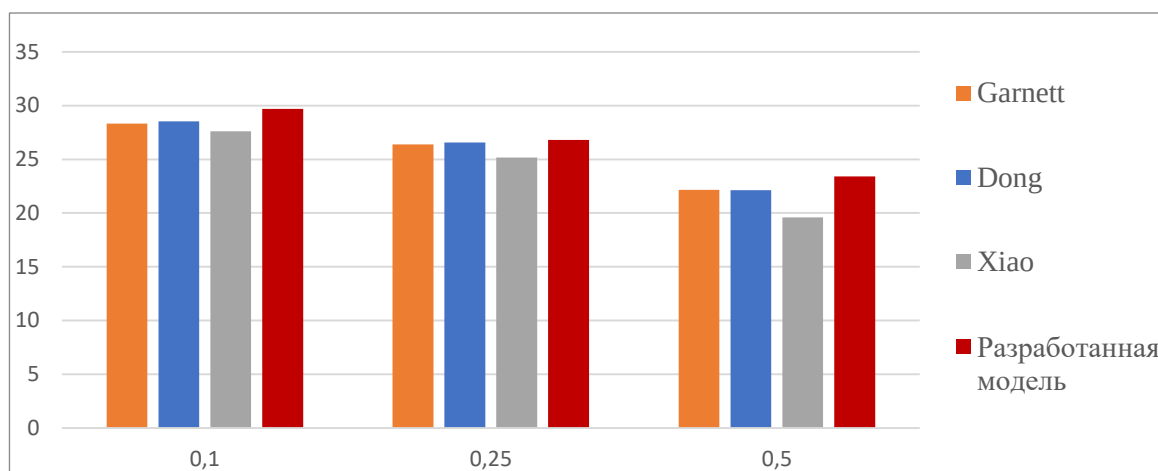


Рисунок 3.17 – Качество очистки изображений (PSNR), искаженных случайным импульсным шумом, при использовании различных моделей

В таблице 3.12 и на рисунке 3.18 представлены временные затраты моделей очистки изображений от случайного импульсного шума, из которых видно, что разработанная модель демонстрирует время на обработку, не превышающую время обработки изображений известными моделями. В таблице 3.12 и на рисунке 3.18 обработано изображение «Лена» (рисунок 3.1а), искаженное случайным импульсным шумом с интенсивностью $p_c = 0,25$. В качестве результата выбрано среднее значение на основе пяти обработок.

Для очистки видеоданных от случайного импульсного шума выполняется покадровая очистка изображений в цикле. На каждой итерации в цикле задействуются предыдущий, текущий и следующий кадры, которые вводятся с помощью команд (Приложение И):

$PF = (read(video1, kadr-1));$

$CF = (read(video1, kadr));$

$NF = (read(video1, kadr+1));$

Таблица 3.12 – Временные затраты моделей очистки изображений от случайного импульсного шума, с

Известные модели				Разработанная модель
Tukey	Garnett	Dong	Xiao	
0,178	8,1	8,8	29,2	10,8

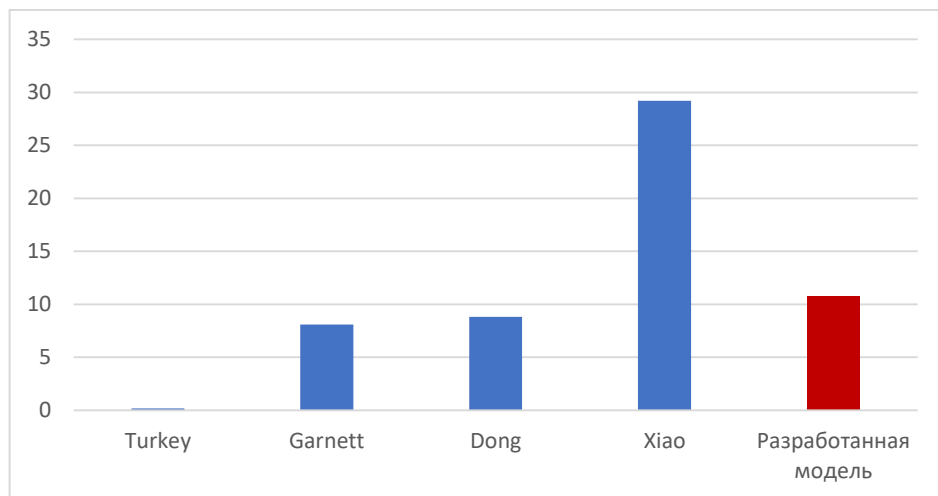


Рисунок 3.18 – Временные затраты моделей очистки изображений от случайного импульсного шума, с

Здесь *kadr* – порядковый номер кадра, *video1* – загруженное для обработки видео. Команда *read* выполняет считывание одного или нескольких кадров видео. Далее каждый кадр видео последовательно записывается в видеофайл при помощи команд *VideoWriter* и *writeVideo* внутри цикла и в результате получается видео, очищенное от воздействия случайного импульсного шума. При моделировании методов восстановления видеоданных, искаженных случайным импульсным шумом, использован фрагмент видеозаписи, представленный на рисунке 3.9. Для оценки качества обработки моделей очистки от импульсного шума использованы метрики PSNR и SSIM. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.13, значения PSNR представлены в виде средних значений результатов обработки зашумленных 10 раз изображений. На

рисунках 3.19-3.21 для наглядности качества обработки представлен 50-й кадр исходного, искаженного и восстановленного видео.

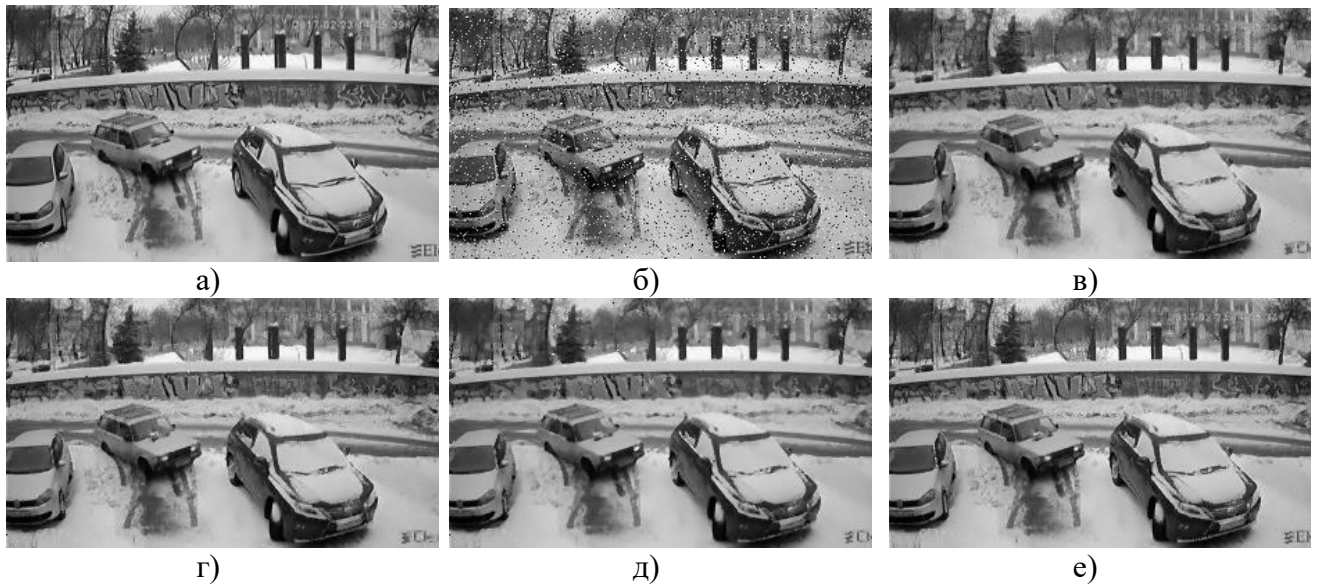


Рисунок 3.19 – Обработка видеоданных, искаженных случайным импульсным шумом: а) 50-й кадр исходного видео; б) 50-й кадр видео, искаженного импульсным шумом с интенсивностью $p_c=0,10$; результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

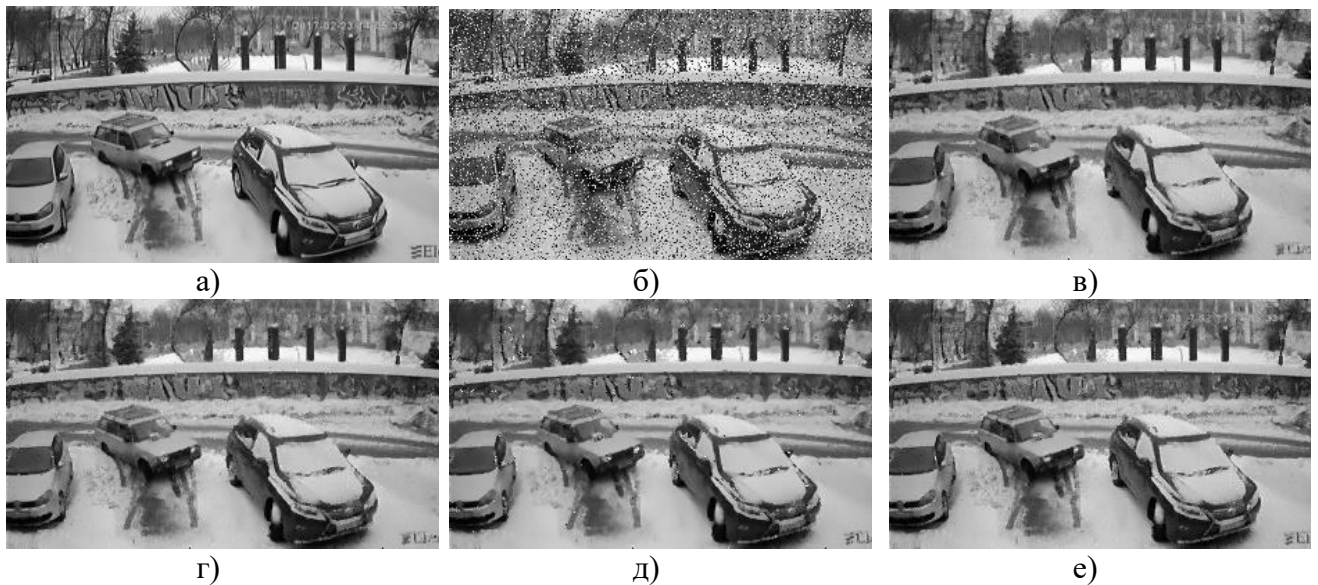


Рисунок 3.20 – Обработка видеоданных, искаженных случайным импульсным шумом: а) 50-й кадр исходного видео; б) 50-й кадр видео, искаженного импульсным шумом с интенсивностью $p_c=0,25$; результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

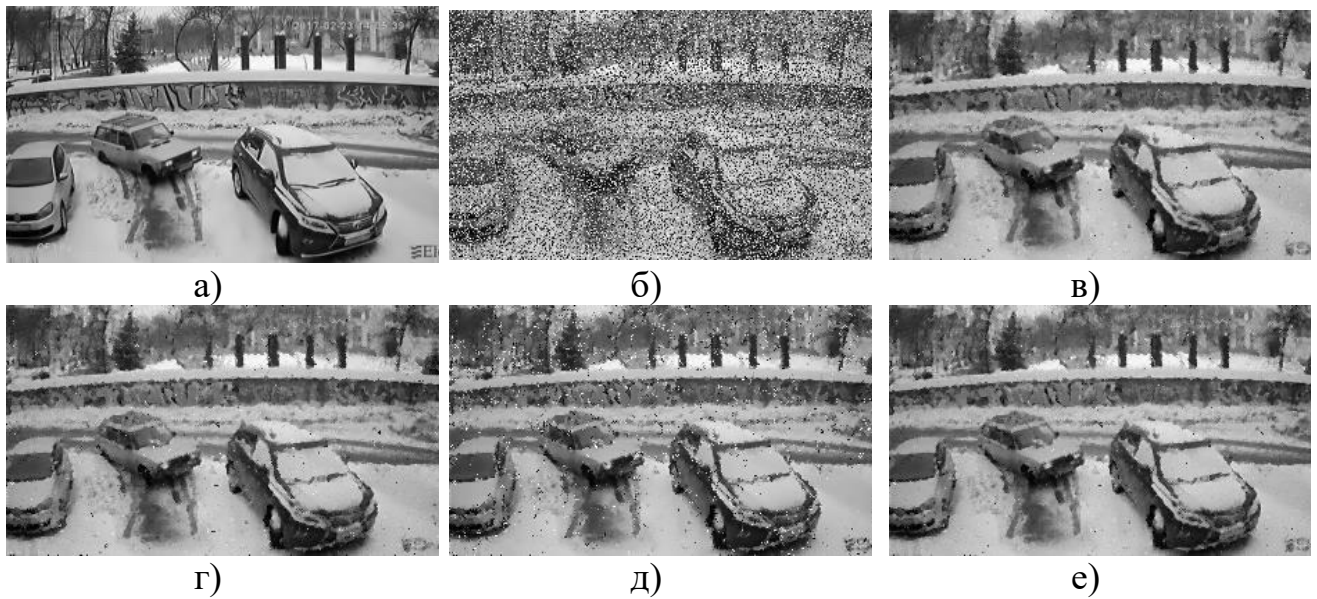


Рисунок 3.21 – Обработка видеоданных, искаженных случайным импульсным шумом:
а) 50-й кадр исходного видео; б) 50-й кадр видео, искаженного импульсным шумом с интенсивностью $p_2=0,50$; результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

При плотности шума $p_c=0,25$ разработанная модель визуально отличается от результатов обработки известными методами. На рисунке 3.21е видно, что на кадре видео осталось меньше искаженных пикселей, чем на рисунках 3.21в-3.21д. Количество оставшихся искаженных пикселей при плотности шума $p_c=0,50$ еще больше, что видно из рисунка 3.21.

Таблица 3.13 – Значения PSNR для различных моделей очистки видеоданных от случайного импульсного шума

Интенсивность шума p_c	Известные модели			Разработанная модель
	Garnett	Dong	Xiao	
0,10	24,691	24,920	24,658	26,856
0,25	23,782	23,846	23,429	25,041
0,50	21,547	21,378	19,106	22,016

На рисунке 3.2 продемонстрированы гистограммы сравнения известных и разработанной моделей очистки видео от случайного импульсного шума в графическом виде.

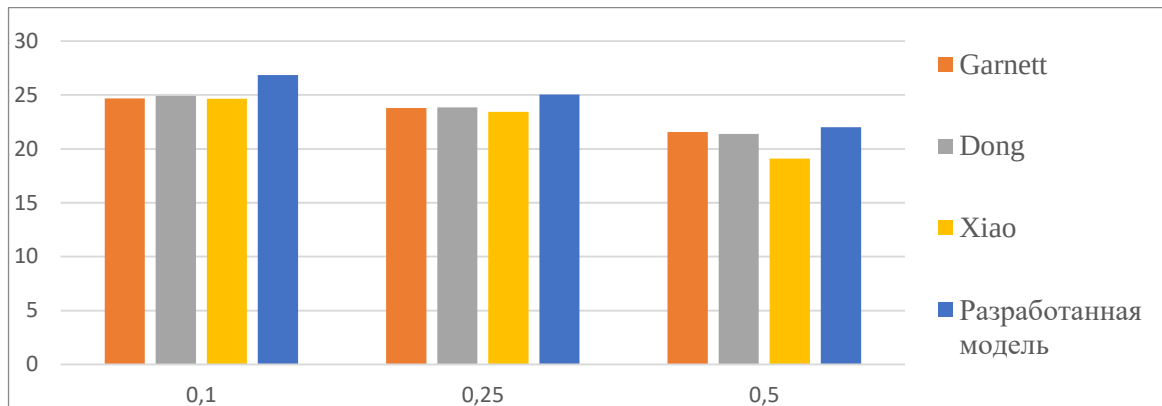


Рисунок 3.22 – Качество очистки видео (PSNR), искаженных случайного импульсным шумом, при использовании различных моделей

Полученные результаты, представленные в таблице 3.13, демонстрируют эффективность разработанной модели. Для каждой рассмотренной интенсивности шума разработанная модель получила более низкие значения среднеквадратичной ошибки, а индекс структурного сходства ближе к значениям 1. В таблицах наилучшие результаты для каждой интенсивности шума выделены жирным.

В случае, когда изображение или кадр видео подвергается воздействию комбинации различных типов шумового воздействия, сравним результаты восстановления случайного, гауссова и смешанного воздействия гауссового и случайного импульсного шума. В таблице 3.14 представлены результаты обработки известными и разработанной моделями, основанные на метрике PSNR. Вероятность возникновения случайного импульсного шума равна $p_c = 0,25$, вероятность возникновения гауссова шума равна $p_{\text{гаусс}} = 0,1$. На рисунке 3.23 продемонстрированы результаты восстановления изображений от различных типов шума разработанной моделью.

Таблица 3.14 – Значения PSNR для различных моделей очистки изображений от различных типов зашумления

Тип шума	Известные модели				Разработанная модель	
	Tukey	Garnett	Dong	Xiao	Адаптивный	Не адаптивный
$p_c = 0,25$	31,684	32,936	33,304	31,767	34,116	26,779
$p_{\text{гаусс}} = 0,1$	19,1525	17,973	18,104	18,221	17,999	19,453
$p_c = 0,25 +$ $p_{\text{гаусс}} = 0,1$	18,3638	17,787	17,831	16,821	17,785	18,989



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.23 – Результат изображений, искаженных смешанным шумом разработанной моделью, при использовании различных моделей: а) случайный импульсный шум $p_c = 0,25$; б) гауссов шум $p_{\text{гаусс}} = 0,1$; в) смешанный шум $p_c = 0,25 + p_{\text{гаусс}} = 0,1$; г-е) результаты обработки изображений а-в) разработанной моделью соответственно

При воздействии гауссова и смешанного шума наилучшие результаты из известных моделей демонстрируют не адаптивные модели, восстанавливающие

каждый пиксель изображения. В связи с этим была предложена модификация разработанной модели, не использующая адаптивный подход. Тем самым были получены наилучшие результаты при обработке от гауссова и смешенного шума.

В данном пункте показано, что разработанные модели для очистки изображений и видео от случайного импульсного шума за счет введения оценки разности между пикселями, основанной на расстоянии между пикселями внутри локального окна, а также на разнице яркости пикселей, позволяют получить результаты, демонстрирующие эффективность данных моделей в сравнении с существующими. Разработанная модель продемонстрировала повышение качества восстановления для различных интенсивностей шума в среднем на 3,3-13,6 % по метрике PSNR.

3.3 Вычислительный эксперимент очистки изображений и видео, переданных по двоичному симметричному каналу связи с ошибками

Как было показано в пункте 2.3, распределение искаженных пикселей по изображению является равномерным, как и в случае с изображением, искаженным случайным импульсным шумом. Следовательно, можно применить методы очистки случайного импульсного шума. В данном пункте описана программная реализация разработанных моделей очистки изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками. Показано, каким образом были сгенерированы изображения и видео, переданные через двоичный симметричный канал связи с ошибками. Представлены результаты обработки разработанным методом, а также проведено сравнение с существующими методами.

Для моделирования использовано 8-битное полутоновое изображение с разрешением 944 на 768 пикселей, представленное на рисунке 3.21а. Каждый бит изображения с искажен с вероятностями $p_k = 0,01; 0,05; 0,1$. Для определения

качества обработки изображений использованы характеристики PSNR и SSIM. Моделирование изображений, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками, реализовано с помощью программного кода (Приложение К):

```

m0=mod(f,2); i1=(f-m0)/2;
m1=mod(i1,2); i2=(i1-m1)/2;
m2=mod(i2,2); i3=(i2-m2)/2;
m3=mod(i3,2); i4=(i3-m3)/2;
m4=mod(i4,2); i5=(i4-m4)/2;
m5=mod(i5,2); i6=(i5-m5)/2;
m6=mod(i6,2); i7=(i6-m6)/2;
m7=mod(i7,2); i8=(i7-m7)/2;
n1 = bsc(double(m0), k);
n2 = bsc(double(m1), k);
n3 = bsc(double(m2), k);
n4 = bsc(double(m3), k);
n5 = bsc(double(m4), k);
n6 = bsc(double(m5), k);
n7 = bsc(double(m6), k);
n8 = bsc(double(m7), k);
dec1 = n8*128+n7*64+n6*32+n5*16+n4*8+n3*4+n2*2+n1*1;

```

Здесь k – вероятность ошибки; функция *bsc(данные, вероятность)* передает данные двоичного входного сигнала через двоичный симметричный канал, имеющий заданную вероятность ошибки. Канал вносит битовую ошибку и обрабатывает каждый элемент входных данных независимо от других. Функция *mod* возвращает остаток от деления. Переменная *dec1* преобразует последовательность 8 бит в десятичное значение яркости пикселей изображения. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.15. На рисунках 3.24а, 3.24а и 3.26а представлен фрагмент исходного изображения. На рисунках 3.24б-3.24д, 3.25б-3.25д, и 3.26б-

3.26д представлены результаты обработки известными методами. На рисунках 3.24е-3.26е представлены результаты работы разработанной модели по восстановлению изображений, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками. Из рисунков 3.24е-3.26е видно, что разработанная модель обнаруживает и восстанавливает больше искаженных пикселей, чем известные, результат которых представлен на рисунках 3.24б-3.24д, 3.25б-3.25д и 3.26б-3.26д.

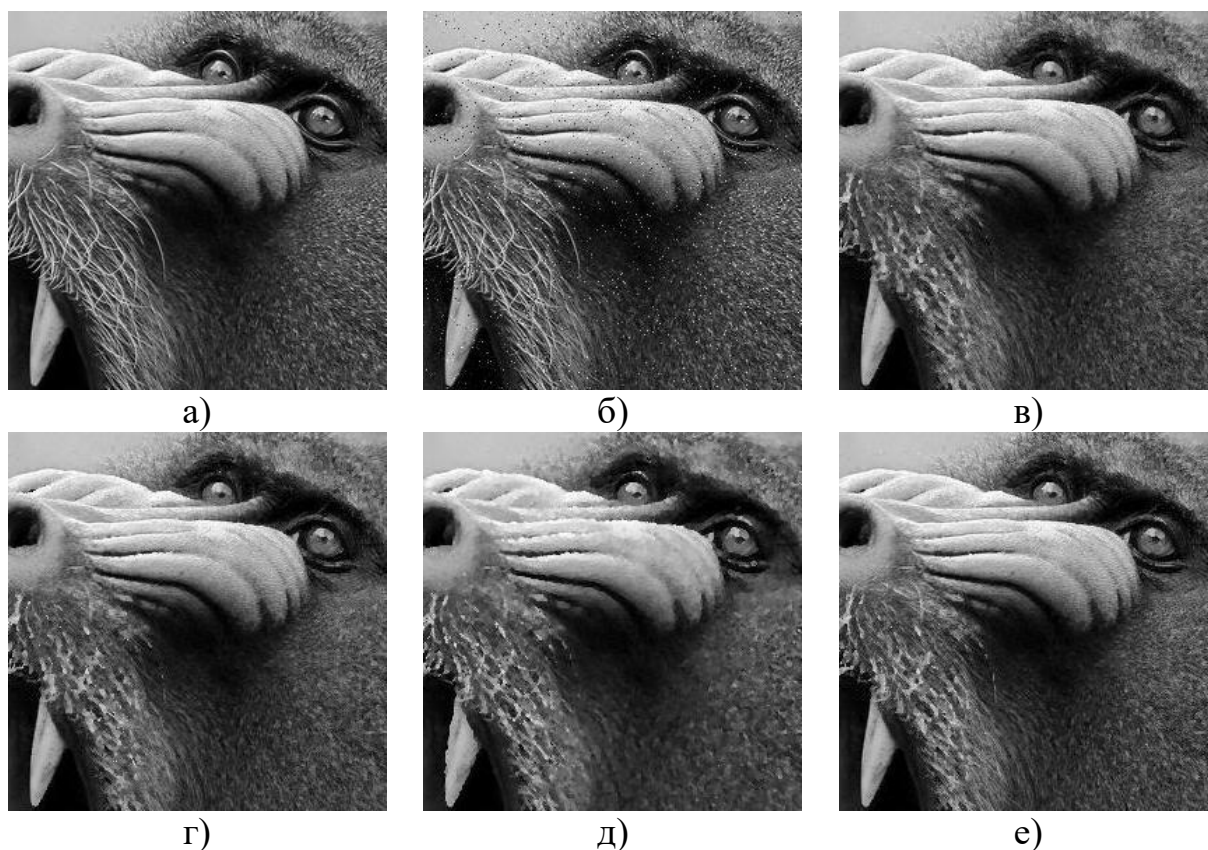


Рисунок 3.24 – Пример восстановления изображения, переданного через двоичный симметричный канал связи с ошибками: а) Фрагмент исходного изображения; б) фрагмент изображения, переданного через ДСК ($p_k=0,01$); результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

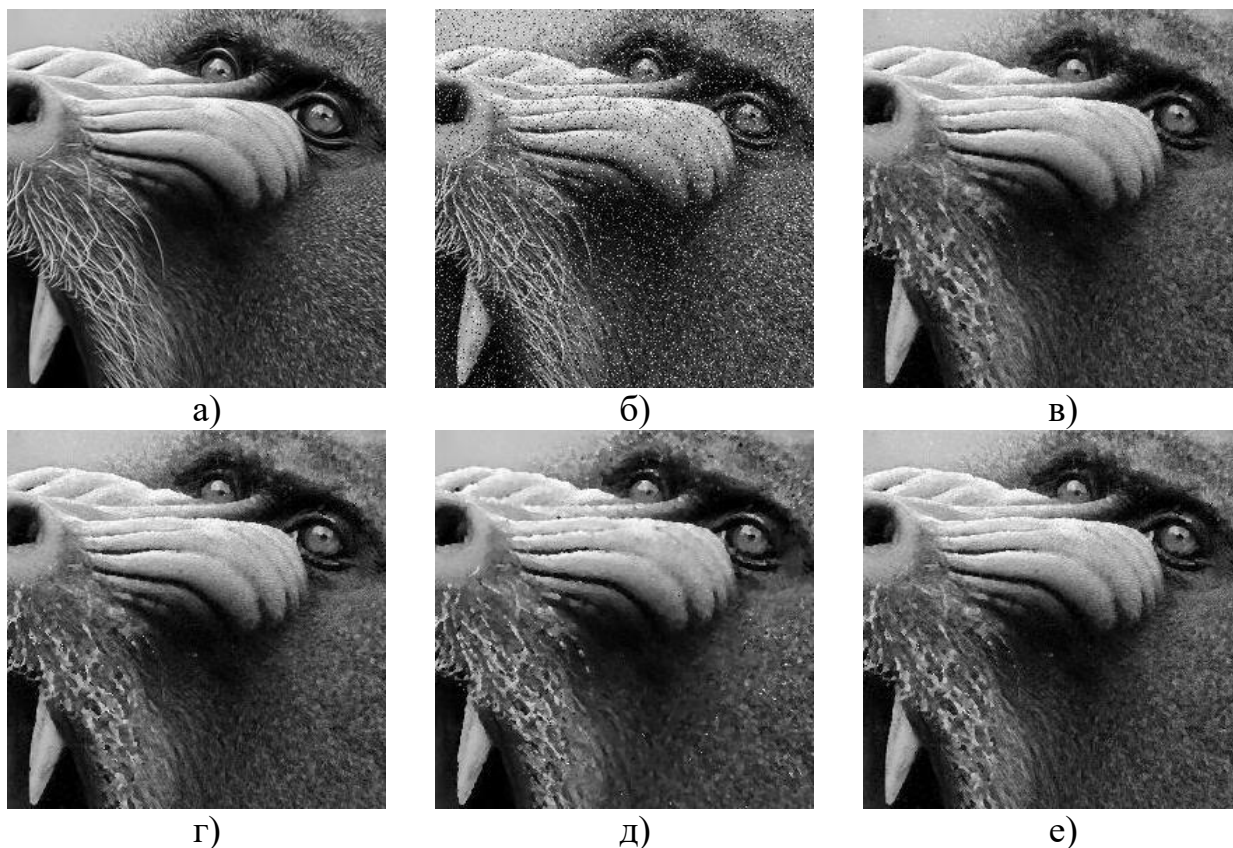


Рисунок 3.25 – Пример восстановления изображения, переданного через двоичный симметричный канал связи с ошибками: а) фрагмент исходного изображения; б) фрагмент изображения, переданного через ДСК ($p_k=0,01$); результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

Моделирование показывает эффективность работы предложенной модели. В таблице 3.15 наилучшие результаты для каждой вероятности возникновения ошибки в двоичном симметричном канале связи, выделен жирным. Для вероятности искажения бита $p_k=0,01$ прослеживается превосходство предложенной модели. Для вероятности искажения бита $p_k=0,05$ предложенная модель уступает в характеристике SSIM. Для вероятности искажения бита $p_k=0,1$ предложенная модель принимает значения близкие к наилучшим.

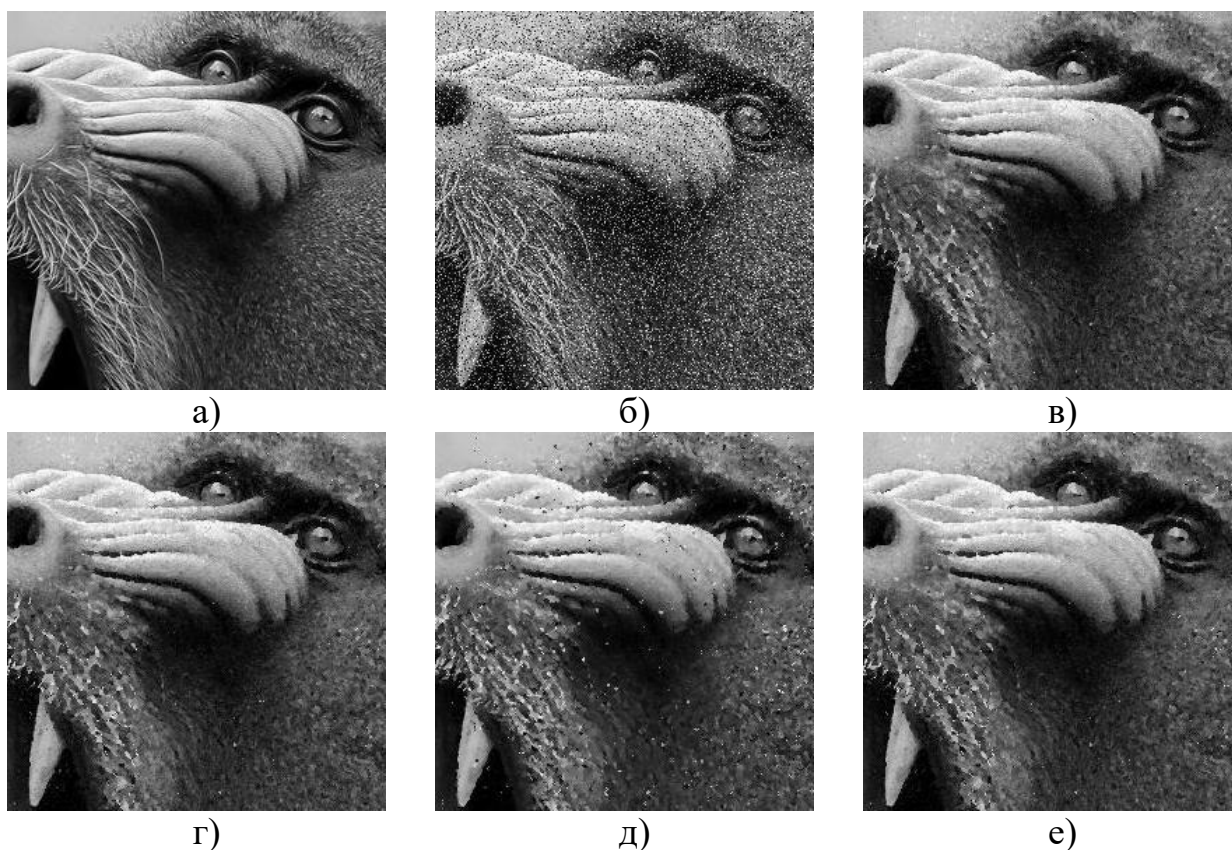


Рисунок 3.26 – Пример восстановления изображения, переданного через двоичный симметричный канал связи с ошибками: а) фрагмент исходного изображения; б) фрагмент изображения, переданного через ДСК ($p_k=0,1$); результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

Таблица 3.15 – Значения PSNR для различных моделей очистки изображений, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками

Вероятность искажения бита, p_k	Известные модели			Предложенная модель
	Garnett	Dong	Xiao	
0,01	27,254	26,866	25,661	28,063
0,05	25,723	25,601	25,200	25,770
0,10	24,146	24,152	23,244	24,138

На рисунке 3.27 продемонстрированы гистограммы сравнения известных и разработанной моделей очистки изображений, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками, в графическом виде.

Для решения задачи восстановления видеоданных, переданных через двоичный симметричный канал, ошибки в канале связи реализованы с помощью программного кода, аналогичного тому, который использован при моделировании переданных по каналу связи изображений. В данном случае выполнялся цикл для каждого кадра в цикле, в результате которого каждое изображение было зашумлено. Далее при помощи команд *VideoWriter* и *writeVideo* изображения снова преобразуются в видеофайл.

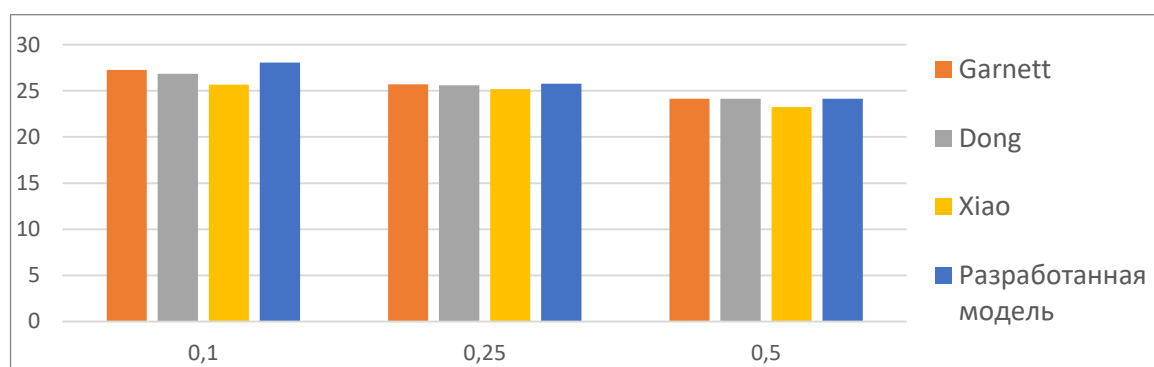


Рисунок 3.27 – Качество очистки изображений (PSNR), переданных через двоичный симметричный канал с ошибками

Для моделирования использовано 8-битное видео в оттенках серого [36]. Видео состоит из 100 кадров. Кадровая частота равна 24 кадра в секунду. Разрешение 1228 на 720 пикселей. На видео каждый бит искажен с различными значениями вероятности $p_k = 0,01; 0,05; 0,1$. Для определения качества обработки видео использована математическая характеристика PSNR. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.16. На рисунках 3.28-3.30 представлен 50-й кадр исходного, искаженных и восстановленных видео. Результаты восстановления, представленные на рисунках 3.28-3.30 визуально практически не различимы. Но значения PSNR в таблице 3.16, что разработанная модель наилучшим образом справляется с поставленной задачей восстановления видеоданных, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками.

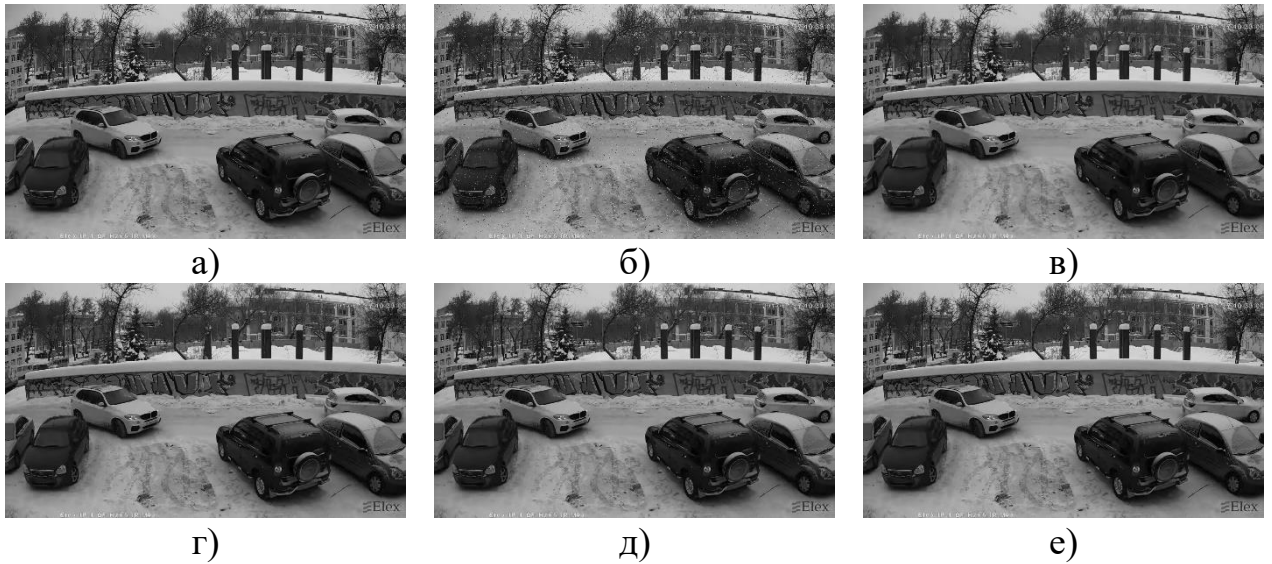


Рисунок 3.28 – Пример восстановления кадра видео, переданного через двоичный симметричный канал связи с ошибками: а) 50 кадр исходного видео; б) 50 кадр видео, переданного через ДСК ($p_k=0,01$); результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

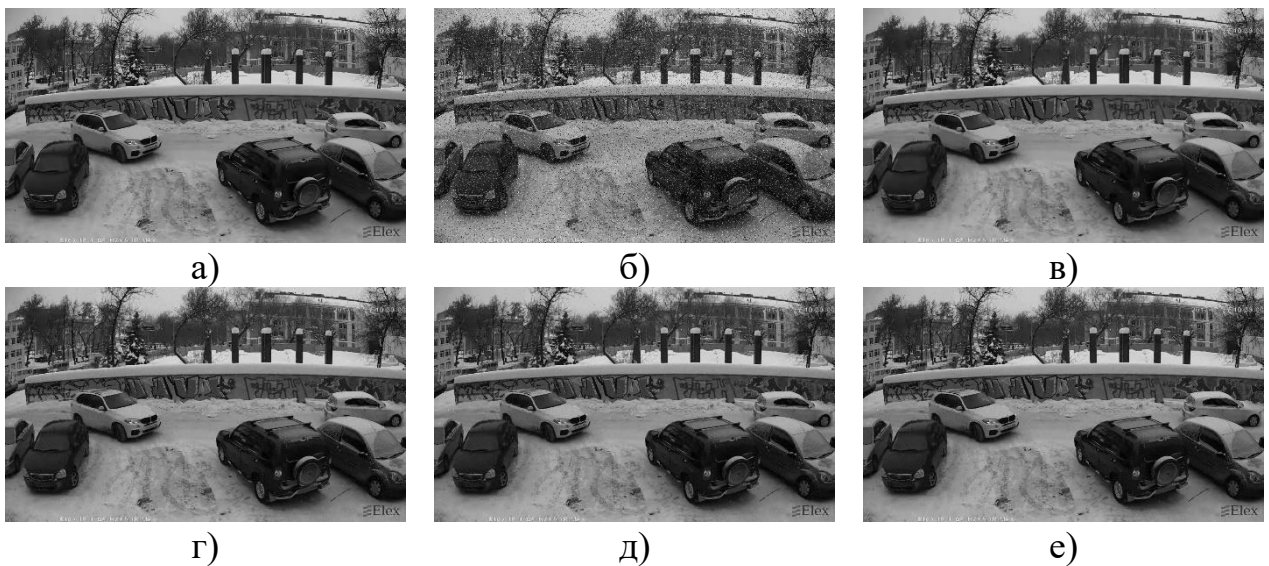


Рисунок 3.29 – Пример восстановления кадра видео, переданного через двоичный симметричный канал связи с ошибками: а) 50 кадр исходного видео; б) 50 кадр видео, переданного через ДСК ($p_k=0,05$); результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

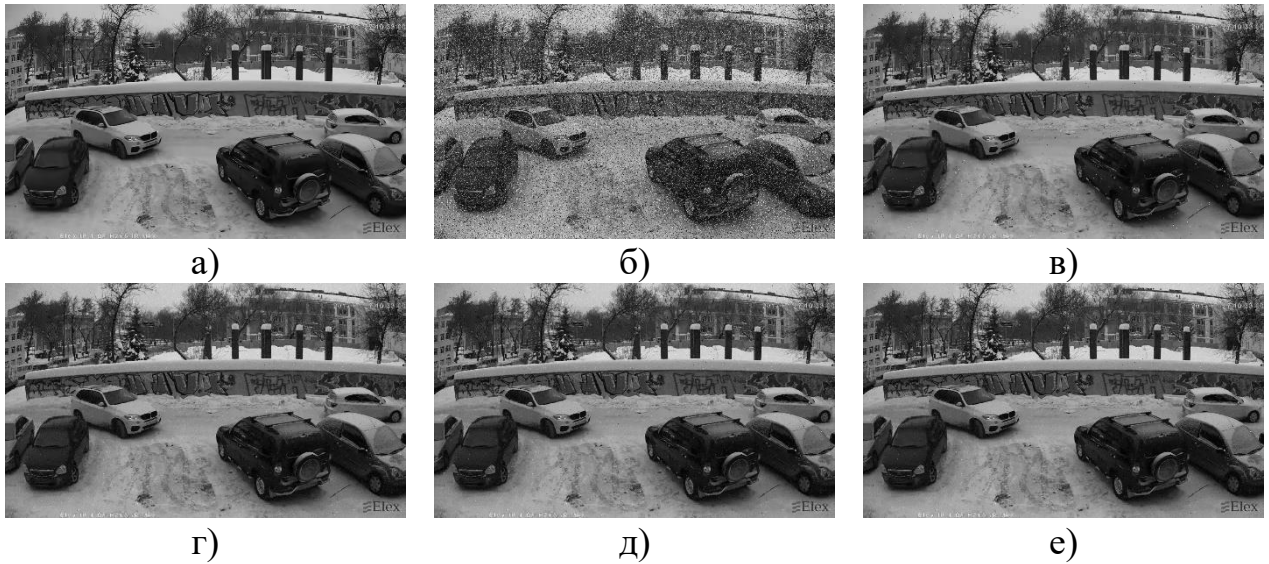


Рисунок 3.30 – Пример восстановления кадра видео, переданного через двоичный симметричный канал связи с ошибками: а) 50 кадр исходного видео б) 50 кадр видео, переданного через ДСК ($p_k=0.10$); результат восстановления, на основе модели в) Garnett; г) Dong; д) Xiao; е) разработанной модели

Таблица 3.16 – Значения PSNR для различных моделей очистки видеоданных, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками

Вероятность искажения бита, p_k	Известные модели			Разработанная модель
	Garnett	Dong	Xiao	
0,01	28,408	28,777	28,006	31,188
0,05	26,997	27,181	27,233	28,449
0,10	25,591	25,506	24,797	26,330

На рисунке 3.31 продемонстрированы гистограммы сравнения известных и разработанной моделей очистки видео, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками, в графическом виде.

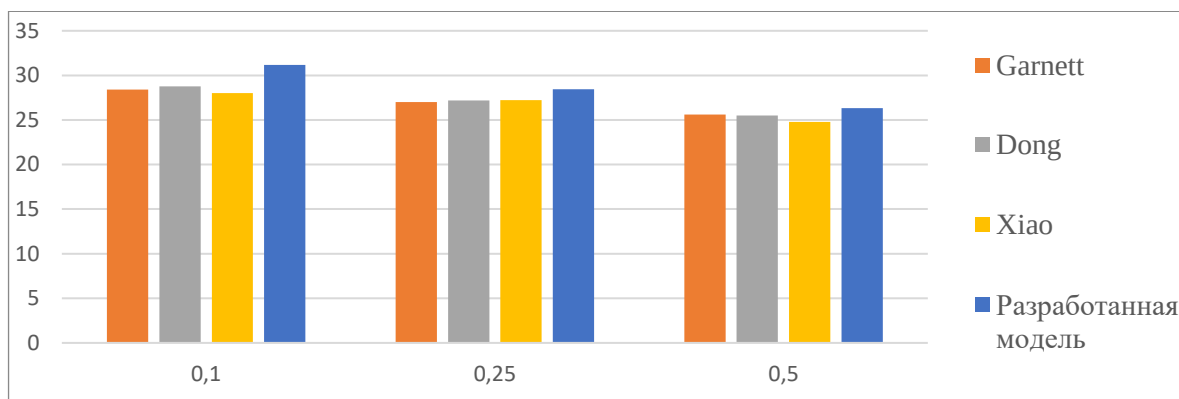


Рисунок 3.31 – Качество очистки видео (PSNR), переданных через двоичный симметричный канал с ошибками

Результаты моделирования показали, что предложенная модель демонстрирует наилучшие результаты обработки кадров, которые были переданы через двоичный симметричный канал связи, что видно из таблицы 3.16. Согласно таблице 3.16, для всех рассмотренных значений вероятности битовых искажений получены более высокие значения PSNR.

В данном пункте рассмотрена передача изображений через двоичный симметричный канал связи, где с определенной вероятностью каждый бит изображения был искажен. Распределение искажений на изображении в пункте 2.3 показало, что случайный по значению и расположению по изображению шум, распределенный равномерно, соответствует характеристикам случайного импульсного шума. Разработанная модель для детектирования и очистки искаженных пикселей на изображениях основана на оценке разницы между пикселями по яркости и геометрической удаленности пикселей в локальном окне. Расстояния в локальном окне определены Евклидовой метрикой. Разработанная модель продемонстрировала повышение качества восстановления изображений в двоичном симметричном канале связи на 2,3-5,2% по метрике PSNR [8]. При восстановлении видео вычислительный метод продемонстрировал повышение качества на 5,2-7,6% по метрике PSNR. Разработанная модель может применяться в системах видеонаблюдения, где в каналах связи часто возникают помехи, для улучшения нейросетевого определения охраноспособности товарных знаков, а

также в местах, где погодные условия [7] искажают сигналы передаваемые по каналам связи.

3.4 Практические рекомендации по восстановлению цифровых изображений, искаженных импульсным шумом

Для эффективного применения разработанных моделей восстановления цифровых изображений и видео, искаженных импульсным шумом сформулированы практические рекомендации.

При получении искаженного изображения или видео на предварительном этапе, необходимо проанализировать их гистограмму. Если преобладают минимальные и максимальные значения яркости изображения, частот как при распределении представленных на рисунке 2.1г, то можно сделать вывод об искажении изображения или кадра видео полярным импульсным шумом. В случае равномерного распределения значений яркости изображения (рисунок 2.10е), можно сделать предположение о зашумлении изображения случайным импульсным шумом.

В случае искажения изображения или видео полярным импульсным шумом, плотность шума можно оценить по формуле

$$p_{\Pi} = \frac{h_0 + h_{255}}{D_1 \cdot D_2}, \quad (3.2)$$

где h_0 и h_{255} – значения яркостей пикселей со значениями 0 и 255, представленных на гистограмме; D_1 и D_2 – ширина и высота изображения соответственно.

На рисунке 3.32 представлена блок-схема практических рекомендаций по восстановлению цифровых изображений, искаженных импульсным шумом.

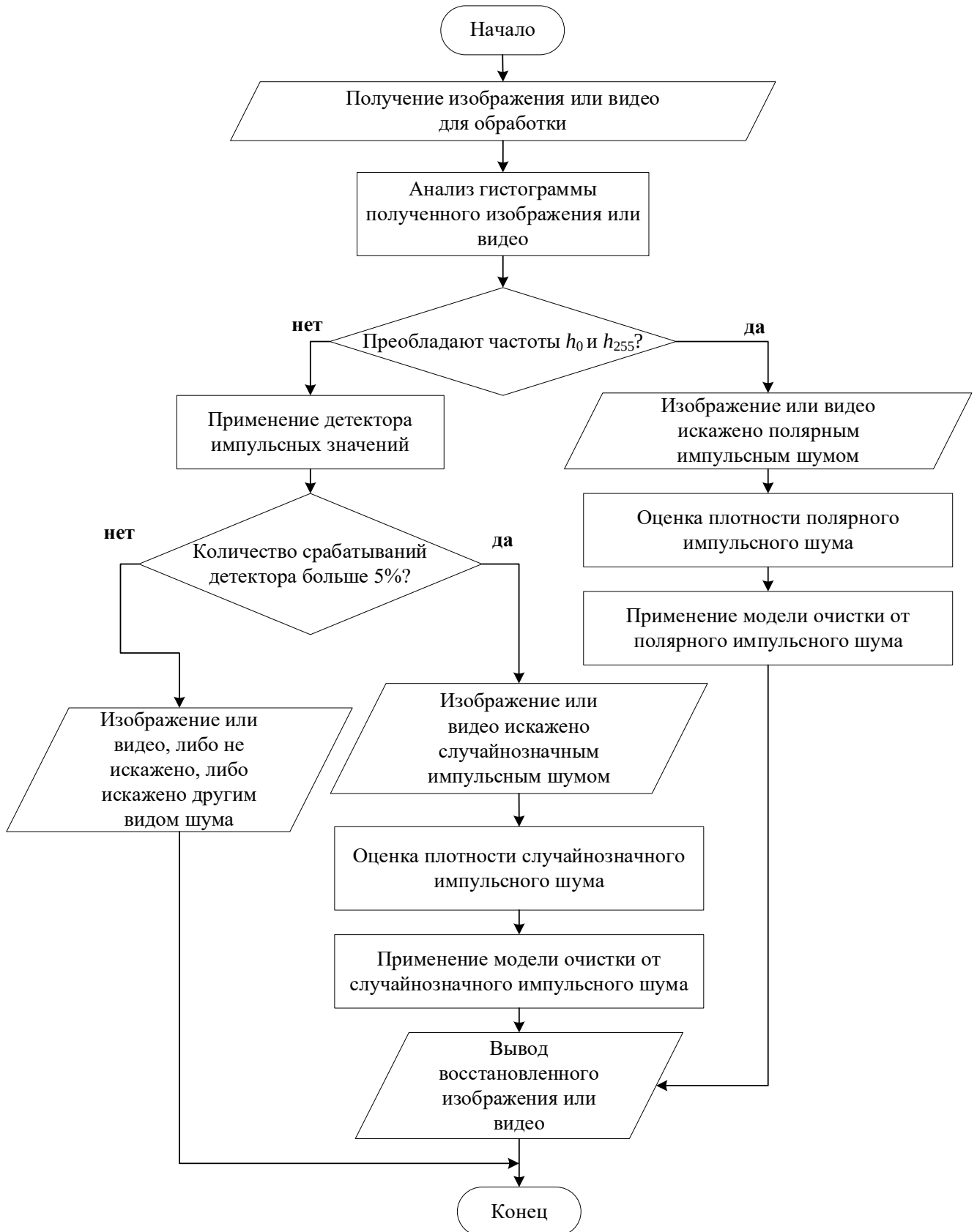


Рисунок 3.32 – Блок-схема практических рекомендаций по восстановлению цифровых изображений, искаженных импульсным шумом

В случае искажения изображений или видео случайным импульсным шумом, интенсивность шума на изображении можно определить при помощи детектора искаженных пикселей (формула 3.1). Если детектор определил уровень шума менее 5%, то можно считать такое значение соответствующим незашумленному изображению, для которого фильтрацию выполнять не нужно, либо выполнять методы удаления других видов шума. Выбор порога менее 5% связан с ожиданием ложноположительных срабатываний детектора, которые неизбежны при решении рассматриваемой задачи.

В зависимости от зашумления изображения или кадра видео определенным типом импульсного шума, применяется модель очистки изображений и видео от полярного импульсного шума (формула 2.8) или модель очистки изображений и видео от случайного импульсного шума (формула 2.30) соответственно.

Разработанные модели восстановления изображений и видео от полярного или случайного импульсного шума продемонстрировали повышение качества восстановления, рассчитанное по метрике PSNR, благодаря особенностям различных разновидностей шумового воздействия, а предлагаемые практические рекомендации позволяют применять разработанные модели восстановления изображений и видео для случаев искажения соответствующим видом шума.

3.5 Выводы по третьей главе

1. Проведено компьютерное моделирование разработанных моделей очистки изображений и видео от полярного импульсного шума в программной среде Matlab (Приложения Д-Е). Продemonстрировано, что разработанная модель улучшает качество восстановления изображений в среднем на 1,7-9,7% по метрике PSNR. Для восстановления видео результаты обработки повысили качество результата восстановления на 13,8-128,5% по метрике PSNR, по сравнению с известными моделями.

2. Проведено компьютерное моделирование разработанных моделей очистки изображений и видео от случайного импульсного шума, основанных на вычислительном методе оценки сходства между пикселями в программной среде Matlab (Приложения Ж-И). Разработанная модель продемонстрировала повышение качества восстановления для различных значений интенсивности шума в среднем на 3,3-13,6% по метрике PSNR, по сравнению с известными моделями.

3. Проведено компьютерное моделирование разработанных моделей очистки от случайного импульсного шума, основанных на вычислительном методе оценки сходства между пикселями над изображениями и видео, переданных через двоичный симметричный канал связи с ошибками (Приложение К). Разработанная модель продемонстрировала повышение качества восстановления изображений в двоичном симметричном канале связи в среднем на 2,3-5,2% по метрике PSNR. Для задачи восстановления видео вычислительный метод продемонстрировал повышение качества по метрике PSNR на 5,2-7,6%.

4. Предложены практические рекомендации по восстановлению цифровых изображений, искаженных импульсным шумом, которые позволяют применять разработанные модели восстановления изображений и видео для случаев искажения соответствующим видом шума. Определить разновидность шумового воздействия предлагается при помощи анализа гистограммы изображения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования реализованы различные методы и алгоритмы нелинейной фильтрации для шумоподавления изображений и видео. Достигнуто повышение качества восстановления изображений и видео, искаженных полярным или случайным импульсным шумом, а также изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками. Проведенное диссертационное исследование, в том числе экспериментальное моделирование, позволило получить следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработаны модели восстановления изображений и видео, искаженных полярным импульсным шумом. Использование адаптивного подхода по исправлению только искаженных значений пикселя, функции Лоренца при обработке медианы значений пикселей, и применение масок фильтра, рассчитанных по метрике Евклида, улучшило качество результата восстановления на 1,7-9,7%, рассчитанного по метрике пикового отношения сигнала к шуму (PSNR), по сравнению с известными методами. Для восстановления видео, искаженных полярным импульсным шумом, использование масок фильтра, включающих в себя пиксели из текущего, предыдущего и последующего кадров, а также методов, использующихся в разработанной модели очистки изображений от полярного импульсного шума, позволили повысить качество результата восстановления, рассчитанного по метрике PSNR на 13,8-128,5%, по сравнению с известными методами.

2. Разработан вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе параметра отличия яркости и параметра геометрической удаленности в локальном окне. На основе вычислительного метода разработаны модели восстановления изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом. Разработанная модель продемонстрировала повышение качества восстановления, вычисленного по метрике PSNR для

различных интенсивностей шума, на 3,3-13,6%, по сравнению с известными моделями.

3. Применена модель очистки изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом, для задачи восстановления изображений и видео, переданных по двоичному симметричному каналу связи с ошибками. Разработанная модель продемонстрировала повышение качества восстановления изображений, вычисленного по метрике PSNR в двоичном симметричном канале связи на 2,3-5,2%, по сравнению с известными моделями. Для задачи восстановления видео вычислительный метод продемонстрировал повышение качества восстановления, вычисленного по метрике PSNR на 5,2-7,6%, по сравнению с известными моделями.

Применение разработанных моделей очистки от полярного и случайного импульсного шума позволяет повысить качество восстановления изображений и видео, а также устранить ошибки, вызванные при передаче через двоичный симметричный канал связи. Разработанные методы могут быть использованы для устранения ошибок и последствий помех на изображениях и видео при регистрации, возникновении электрических разрядов или других проблем, вызванных во время коммутационных процессов в электрических схемах. Разработанные модели и методы могут быть применены в беспилотных транспортных средствах, видеонаблюдении, спутниковых системах, в интеллектуальной обработке изображений, в медицинском оборудовании, при помощи которого регистрируют изображения или видео.

Обозначения и сокращения

ДСК – двоичный симметричный канал

КВ – коэффициент возмущения

СМФ – стандартный медианный фильтр

СНС – сверточная нейронная сеть

ША – шумоподавляющий автоэнкодер

AFSF – adaptive fuzzy switching filter (адаптивный фильтр с нечетким переключением)

DSL – digital subscriber line (цифровая абонентская линия)

FIRE – fuzzy inference ruled by else-action (нечеткий вывод, управляемый другим действием)

LCI – local consensus index (индекс локального консенсуса)

PSNR – peak signal-to-noise ratio (пиковое отношение сигнала к шуму)

REIN – repetitive electrical impulse noise (повторяющийся электрический импульсный шум)

ReLU – rectified linear unit (выпрямленный линейный блок)

ROAD – rank-ordered absolute differences (ранговые абсолютные разности)

ROLD – rank-ordered logarithmic difference (ранговая логарифмическая разница)

SHINE – single high impulse noise event (единичное событие с высоким импульсным шумом)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Индекс развития визуальных сетевых технологий Cisco Visual Networking Index: прогноз и методика Networking, Cloud, and Cybersecurity Solutions [Электронный ресурс]: Cisco URL: https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/1211_BUSINESS_SERVICES_CKN_PDF.pdf (дата обращения: 24.07.2023).
2. Козак, А. В. Быстрое восстановление смазанного изображения, полученного горизонтально вращающейся камерой / А. В. Козак, Б. Я. Штейнберг, О. Б. Штейнберг // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 1046-1053.
3. Красильников Н. Н. Цифровая обработка 2D и 3D изображений. – Петербург: БХВ, – 2011. – 608 с.
4. Ляхов, П. А. Итеративный метод адаптивной медианной фильтрации изображений на основе функции Лоренца / П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев, В. В. Засимович // Естественные науки - основа настоящего и фундамент для будущего: Материалы VI-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука - региону», Ставрополь, 02–27 апреля 2018 года. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2018. – С. 28-32.
5. Ляхов, П. А. Новый метод обнаружения и устранения случайного импульсного шума на изображениях / П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 262-271. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-1145.
6. Максимов, А. И. Метод оптимального линейного сверхразрешающего восстановления изображений / А. И. Максимов, В. В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 5. – С. 692-701.

7. Обзор методов улучшения визуального качества изображений и видео в неблагоприятных погодных условиях / П. А. Ляхов, В. В. Лютова, А. С. Ионисян, А. Р. Оразаев // Современная наука и инновации. – 2022. – № 4(40). – С. 8-24.

8. Оразаев, А. Р. Очистка изображений от импульсных помех в двоичном симметричном канале связи // Современная наука и инновации. – 2023. – №. 3. – С. 33-41.

9. Патент № 2765811 С1 Российская Федерация, МПК H04L 9/00, G06F 11/08, H04N 7/08. способ скрытой защищенной передачи телеметрических данных в робототехнических комплексах: № 2020144343: заявл. 30.12.2020: опубл. 03.02.2022 / Ю. Е. Рябинин, О. А. Финько, А. С. Куракин [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко" Министерства обороны Российской Федерации.

10. Патент № 2771791 С1 Российская Федерация, МПК G06T 5/10, G06T 7/35. Способ адаптивной медианной фильтрации импульсного шума на изображениях: № 2021111656: заявл. 23.04.2021: опубл. 12.05.2022 / П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев, У. А. Ляхова, М. В. Валусева; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Северо-Кавказский федеральный университет".

11. Патент № 2785832 С1 Российская Федерация, МПК H04L 9/00, G06F 11/08. Способ обеспечения робастности цифрового водяного знака, встраиваемого в статическое изображение, передаваемое по каналу связи с помехами: № 2022124990: заявл. 22.09.2022: опубл. 14.12.2022 / А. А. Антонов, О. А. Финько, И. В. Шпырня [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко" Министерства обороны Российской Федерации

12. Рабин, А. В. Помехозащищенность в каналах с аддитивным шумом при использовании ортогонального кодирования и частотной модуляции / А. В. Рабин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – Т. 18, № 5. – С. 5-12.

13. Рабин, А. В. Помехозащищенность в каналах со случайной фазой и замираниями при использовании ортогонального кодирования и частотной модуляции / А. В. Рабин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – Т. 18, № 6. – С. 17-23.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613716 Российская Федерация. Среда моделирования пространственной фильтрации изображений: № 2017610863: заявл. 02.02.2017: опубл. 27.03.2017 / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, К. С. Шульженко [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617181 Российская Федерация. Программный комплекс для подавления импульсного шума на визуальных данных: № 2022614389: заявл. 24.03.2022: опубл. 19.05.2022 / П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616633. Среда обработки моделирования нейросетевой обработки видеопотока: № 2023615248: заявл. 22.03.2023: опубл. 30.03.2023 / П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

17. Север, К. О. Сравнительный анализ двух способов фильтрации для устранения шума в изображении разной степени зашумленности / К. О. Север, И. И. Турулин, Д. А. Гужва // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 3(220). – С. 82-91.

18. Семантико-морфологическое описание и синтез изображений с использованием глубоких нейронных сетей / Ю. В. Визильтер, О. В. Выголов, С. Ю. Желтов, В. В. Князь // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 4(178). – С. 13-24.
19. Сойфер, В. А. Компьютерная обработка изображений. Часть 2. Методы и алгоритмы // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – Т. 3. – №. 2. – С. 110-121.
20. Ускорение тензорных вычислений с использованием системы остаточных классов / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. С. Ионисян, А. Р. Оразаев // Инфокоммуникационные технологии. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 361-366.
21. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых [и др.]. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2002. – 352 с.
22. Червяков, Н. И. 3D-обобщение метода очистки от импульсного шума для обработки видеоданных / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 92-100.
23. Червяков, Н. И. Два метода адаптивной медианной фильтрации импульсного шума на изображениях / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 667-678.
24. Червяков, Н. И. Метод адаптивной медианной фильтрации импульсного шума на изображениях с использованием нечеткой логики / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев // Мягкие измерения и вычисления. – 2018. – № 10(11). – С. 23-31
25. Червяков, Н. И. Методы морфологической обработки полутоновых и цветных изображений / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев // Современные технологии в нефтегазовом деле - 2017: сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х томах, Октябрьский, 31 марта 2017 года. Том 2. – Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017. – С. 296-299.

26. Червяков, Н. И. Применение медианных фильтров с взвешенным центральным элементом для очистки изображений от импульсного шума / Н. И. Червяков, П. А. Ляхов, А. Р. Оразаев // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 4. – С. 325-337.
27. A new method for adaptive median filtering of images / P. A. Lyakhov, A. R. Orazhev, N. I. Chervyakov, D. I. Kaplun // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, Saint Petersburg - Moscow, 28–30 января 2019 года. – Saint Petersburg - Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 1197-1201.
28. A new method of cleaning video from impulse noise / N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, A. R. Orazhev, M. V. Valueva // 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT 2019, Dolgoprudny, 20–21 ноября 2019 года. – Dolgoprudny, 2019. – P. 9030589.
29. Abadi M. Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems / M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, E. Brevdo // arXiv preprint arXiv:1603.04467. – 2016. – P. 1-19.
30. Abreu, E. A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images / E. Abreu, M. Lightstone, S. K. Mitra // IEEE transactions on image processing. – 1996. – Vol. 5. – №. 6. – P. 1012-1025.
31. Arakawa K. Median filter based on fuzzy rules and its application to image restoration / K. Arakawa // Fuzzy sets and systems. – 1996. – Т. 77. – №. 1. – С. 3-13.
32. Arakawa, K. Fuzzy rule-based image processing with optimization // Fuzzy techniques in image processing / K. Arakawa // Fuzzy techniques in image processing. – 2000. – P. 222-247.
33. Baboshina, V.A. Combined use of a bilateral and median filter to suppress gaussian noise in images/ V.A. Baboshina, A. R. Orazhev, E. D. Shalugin, A. M. Sinitca // 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2022. – P. 1-5.

34. Bedicks, G. Digital signal disturbed by impulsive noise / G. Bedicks, C.E. Dantas, F. Sukys // IEEE transactions on broadcasting. – 2005. – Vol. 51. – №. 3. – P. 322-328.
35. Bengio, Y. Greedy layer-wise training of deep networks / Y. Bengio, P. Lamblin, D. Popovichi // Advances in neural information processing systems. – 2006. – Vol. 19. – P. 1-8.
36. Bitbucket_anzor_orazaev [Электронный ресурс]: Bitbucket.org URL: https://bitbucket.org/anzor_orazaev/testvideo/src/master (дата обращения: 24.07.2023).
37. Bovik, A.C. Hand Book of Image and Video Processing – Academic press, Cambridge, MA, USA, – 2010, – P. 1217.
38. Bucha V. V. Method for improving disparity map and device for implementing method [In Russian]. Pat RF of Invent N RU2382406C1 of February 20, 2010 / V. V. Bucha, A. K. Ignatov // Russian Bull of Inventions N. –2010. –P. 1-28.
39. Burger, H. C. Image denoising: Can plain neural networks compete with BM3D? / H. C. Burger, C. J. Schuler, S. Harmeling // 2012 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, – 2012. – P. 2392-2399.
40. Burger, W. Principles of digital image processing / W. Burger, M.J. Burge – London : Springer, – 2009. – Vol. 111. P. 374.
41. Chan, R. H. An iterative procedure for removing random-valued impulse noise / R.H. Chan, C. Hu, M. Nikolova //IEEE signal processing letters. – 2004. – Vol. 11. – №. 12. – P. 921-924.
42. Chan, R. H. Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization / R. H. Chan, C. W. Ho, M. Nikolova // IEEE Transactions on image processing. – 2005. – Vol. 14. – №. 10. – P. 1479-1485.
43. Chen, B. H. Gaussian-adaptive bilateral filter / B. H. Chen, Y.S. Tseng, J. L. Yin // IEEE Signal processing letters. – 2020. – Vol. 27. – P. 1670-1674.
44. Chen, J. Adaptive probability filter for removing salt and pepper noises / J. Chen, Y. Zhan, H. Cao // IET Image Processing. – 2018. – Vol. 12. – №. 6. – P. 863-871.

45. Chen, T. Tri-state median filter for image denoising / T. Chen, K. K. Ma, L. H. Chen // IEEE Transactions on Image processing. – 1999. – Vol. 8. – №. 12. – P. 1834-1838.
46. Chen, Y. Revisiting loss-specific training of filter-based MRFs for image restoration / Y. Chen, T. Pock, R. Ranftl // Pattern Recognition: 35th German Conference, GCPR 2013, Saarbrücken, Germany, September 3-6, 2013. Proceedings 35. – Springer Berlin Heidelberg, – 2013. – P. 271-281.
47. Chen, Y. Trainable nonlinear reaction diffusion: A flexible framework for fast and effective image restoration / Y. Chen, T. Pock // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2016. – Vol. 39. – №. 6. – P. 1256-1272.
48. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper [Электронный ресурс]: Cisco. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (дата обращения: 24.07.2023).
49. Cui, H. Denoising and resource allocation in uncoded video transmission / H. Cui, R. Xiong, C. Luo // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. – 2014. – Vol. 9. – №. 1. – P. 102-112.
50. Cui, H. Privacy-preserving image denoising from external cloud databases / H. Cui, Y. Zheng, C. Wang // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2017. – Vol. 12. – №. 6. – P. 1285-1298.
51. Dabov, K. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering / K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik // IEEE Transactions on image processing. – 2007. – Vol. 16. – №. 8. – P. 2080-2095.
52. Deschrijver, G. On the relationship between some extensions of fuzzy set theory / G. Deschrijver, E. E. Kerre // Fuzzy sets and systems. – 2003. – Vol. 133. – №. 2. – P. 227-235.
53. Domke, J. Generic methods for optimization-based modeling / J. Domke // Artificial Intelligence and Statistics. – PMLR, – 2012. – P. 318-326.

54. Dong, Y., Chan R. H., Xu S. A detection statistic for random-valued impulse noise / Y. Dong, R. H. Chan, S. Xu // IEEE transactions on image processing. – 2007. – Vol. 16. – №. 4. – P. 1112-1120.
55. Dong, Y. A new directional weighted median filter for removal of random-valued impulse noise/ Y. Dong, S. Xu //IEEE signal processing letters. – 2007. – Vol. 14. – №. 3. – P. 193-196.
56. Donoho, D. L. Wavelet shrinkage: asymptopia? / D. L. Donoho, I. M. Johnstone, G. Kerkycharian //Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). – 1995. – Vol. 57. – №. 2. – P. 301-337.
57. Efficiency Analysis of the Image Impulse Noise Cleaning Using Median Filters with Weighted Central Element / N. Chervyakov, P. Lyakhov, A. Orazhev, M. Valueva // Problems of Complex Systems Optimization : IEEE SIBIRCON 2017, Novosibirsk, – 2017. – P. 141-146.
58. El-Bendary, M. A. M. Interleaved reed-solomon codes with code rate switching over wireless communications channels / H. Kasban, M. A. R. El-Tokhy // International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS). – 2014. – Vol. 16. – №. 1.
59. Fabijańska, A. Noise adaptive switching median-based filter for impulse noise removal from extremely corrupted images / A. Fabijańska, D. Sankowski // IET image processing. – 2011. – Vol. 5. – №. 5. – P. 472-480.
60. Fan, X. Layered soft video broadcast for heterogeneous receivers / X. Fan, R. Xiong, D. Zhao // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology – 2015. – Vol. 25. – №. 11. – P. 1801-1814.
61. Farbiz, F. A fuzzy logic control based approach for image filtering / F. Farbiz, M. B. A. Menhaj // Fuzzy techniques in image processing. – 2000. – P. 194-221.
62. Gao, Z. An adaptive median filtering of salt and pepper noise based on local pixel distribution //2018 International Conference on Transportation & Logistics, Information & Communication, Smart City (TLICSC 2018). – Atlantis Press, – 2018. – P. 473-483.

63. Garnett, R. A universal noise removal algorithm with an impulse detector / R. Garnett, T. Huegerich, C. Chui // IEEE Transactions on image processing. – 2005. – Vol. 14. – №. 11. – P. 1747-1754.
64. Gastpar, M. Uncoded transmission is exactly optimal for a simple Gaussian “sensor” network // IEEE Transactions on Information Theory. – 2008. – T. 54. – №. 11. – C. 5247-5251.
65. Gmurman, V. E. Probability theory and mathematical statistics: textbook for universities // Moscow: Vysshaya shkola. – 2003. – P. 479.
66. Gonzales, R. C. Digital image processing 4th edition / R. C. Gonzales, R. E. Woods - Harlow, England. – 2018.
67. Gu, S. Weighted nuclear norm minimization with application to image denoising / S. Gu, L. Zhang, W. Zuo // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2014. – P. 2862-2869.
68. Hamming Neural Network in Discrete Form / A. Shaposhnikov, E. Eremenko, D. Malakhov, A. Orazhev // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 424. – P. 11-17.
69. Hardie, R. C. Rank conditioned rank selection filters for signal restoration / R. C. Hardie, K. E. Barner // IEEE Transactions on Image Processing. – 1994. – Vol. 3. – №. 2. – P. 192-206.
70. He, C. Exploiting Channel Assignment and Power Allocation for Linear Uncoded Multiuser Video Streaming / C. He, Y. Hu, Y. Chen // ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). – IEEE, – 2019. – P. 1-6.
71. He, C. MUcast: Linear uncoded multiuser video streaming with channel assignment and power allocation optimization / C. He, Y. Hu, Y. Chen // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2019. – Vol. 30. – №. 4. – P. 1136-1146.
72. Hwang, H. Adaptive median filters: new algorithms and results / H. Hwang, R. A. Haddad // IEEE Transactions on image processing. – 1995. – T. 4. – №. 4. – C. 499-502.

73. Ioffe, S. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift / S. Ioffe, C. Szegedy // International conference on machine learning. – pmlr, – 2015. – P. 448-456.
74. ITU-T G.998.4: Improved impulse noise protection for digital subscriber line (DSL) transceivers (Международный стандарт от ноября 2018). [Электронный ресурс]: Международный союз электросвязи URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.998.4> (дата обращения: 24.07.2023).
75. Jahne, B. Digital image processing. Berlin, Heidelberg, New York: Springer; – 2005. – P. 621.
76. Jain, V. Natural image denoising with convolutional networks / V. Jain, S. Seung // Advances in neural information processing systems. – 2008. – Vol. 21. – P. 1-8.
77. Jakubczak S., Katabi D. SoftCast: One-size-fits-all wireless video / S. Jakubczak, D. Katabi // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2010 conference. – 2010. – P. 449-450.
78. Jakubczak, S. A cross-layer design for scalable mobile video / S. Jakubczak, D. Katabi // Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking. – 2011. – P. 289-300.
79. Jakubczak, S. SoftCast: One video to serve all wireless receivers / S. Jakubczak, H. Rahul, D. Katabi // Massachusetts Inst Technol, Cambridge, MA, USA: Tech Rep – 2009. – P. 1-15.
80. Jancsary, J. Loss-specific training of non-parametric image restoration models: A new state of the art / S. Nowozin, C. Rother // Computer Vision–ECCV 2012: 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy, October 7-13, 2012, Proceedings, Part VII 12. – Springer Berlin Heidelberg, – 2012. – P. 112-125.
81. Kai, Z. Beyond a gaussian denoiser: Residual learning of deep CNN for image denoising / Z. Kai, W. Zuo, Y. Chen // IEEE transactions on image processing. – 2017. – Vol. 26. – №. 7. – P. 3142-3155.
82. Kalaykov, I. Real-time image noise cancellation based on fuzzy similarity / I. Kalaykov, G. Tolt // Fuzzy filters for image processing. – 2003. – P. 54-71.

83. Kim, H. Spiking neural network using synaptic transistors and neuron circuits for pattern recognition with noisy images / H. Kim, S. Hwang, J. Park // IEEE Electron Device Letters. – 2018. – Vol. 39. – №. 4. – P. 630-633.
84. Ko, S.J., Center weighted median filters and their applications to image enhancement / S.J. Ko, Y.H. Lee // IEEE transactions on circuits and systems. – 1991. – Vol. 38. – №. 9. – P. 984-993.
85. Konur, O. Adam: A method for stochastic optimization / O. Konur, D. Kingma, J. Ba // Proc. Int. Conf. Learn. Represent.(ICLR). – 2015. – P. 1-15.
86. Krejci, J. Analyses and modeling impulse noise generated by household appliances /J. Krejci, T. Zeman // Advances in electrical and electronic engineering. – 2014. – Vol. 12. – №. 1. – P. 20-29.
87. Krizhevsky, A. Imagenet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton //Communications of the ACM. – 2017. – Vol. 60. – №. 6. – P. 84-90.
88. Kwan, H. K. Fuzzy filters for noise reduction in images // Fuzzy filters for image processing. – 2003. – P. 25-53.
89. Kwon, G. Y. Diagnosis of shielded cable faults via regression-based reflectometry / G. Kwon, C. K. Lee, Y. J. Shin // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 66. – №. 3. – P. 2122-2131.
90. Lan, X. Random-valued impulse noise removal by the adaptive switching median detectors and detail-preserving regularization / X. Lan, Z. Zuo // Optik. – 2014. – Vol. 125. – №. 3. – P. 1101-1105.
91. Lee, C. S. Adaptive fuzzy filter and its application to image enhancement / C. S. Lee, Y. H. Kuo // Fuzzy techniques in image processing. – 2000. – P. 172-193.
92. Lee, C. S. Weighted fuzzy mean filters for image processing / C.S. Lee, Y. H. Kuo, P.T. Yu // Fuzzy Sets and systems. – 1997. – Vol. 89. – №. 2. – P. 157-180.
93. Liu, C. Automatic estimation and removal of noise from a single image / C. Liu, R. Szeliski, S. Kang // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2007. – Vol. 30. – №. 2. – P. 299-314.

94. Liu, D. C. On the limited memory BFGS method for large scale optimization / D. C. Liu, J. Nocedal // Mathematical programming. – 1989. – Vol. 45. – №. 1-3. – P. 503-528.
95. Liu, J. A weighted dictionary learning model for denoising images corrupted by mixed noise / J. Liu, X.C. Tai, H. Huang // IEEE transactions on image processing. – 2012. – Vol. 22. – №. 3. – P. 1108-1120.
96. Lu, C. T. Removal of salt-and-pepper noise in corrupted image using three-values-weighted approach with variable-size window / C.T. Lu, Y. Y. Chen, L. L. Wang // Pattern Recognition Letters. – 2016. – Vol. 80. – P. 188-199.
97. Lyakhov, P. A. Bilateral and Median Filter Combination for High-Quality Cleaning of Random Impulse Noise in Images / P. A. Lyakhov, A. S. Voznesensky, E. D. Shalugin, A. R. Orazhev // 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2022. – C. 1-5.
98. Mafi, M. High impulse noise intensity removal in MRI images / M. Mafi, H. Martin, M. Adjouadi // 2017 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB). – IEEE, – 2017. – P. 1-6.
99. Mairal, J. Non-local sparse models for image restoration / J. Mairal, F. Bach, J. Ponce // 2009 IEEE 12th international conference on computer vision. – IEEE, – 2009. – P. 2272-2279.
100. Mathur, A. Performance evaluation of PLC under the combined effect of background and impulsive noises / A. Mathur, M. R. Bhatnagar, B. K. Panigrahi // IEEE Communications Letters. – 2015. – Vol. 19. – №. 7. – P. 1117-1120.
101. Nair, V. Rectified linear units improve restricted boltzmann machines / V. Nair, G. E. Hinton // Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10). – 2010. – P. 807-814.
102. Nikolova, M. A variational approach to remove outliers and impulse noise / M. Nikolova // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2004. – Vol. 20. – №. 1-2. – P. 99-120.

103. Nikolova, M. Minimizers of cost-functions involving nonsmooth data-fidelity terms. Application to the processing of outliers // *SIAM Journal on Numerical Analysis*. – 2002. – Vol. 40. – №. 3. – P. 965-994.
104. Orazhev, A. R. Neural Network System for Recognizing Images Affected by Random-Valued Impulse Noise / A. R. Orazhev, P. A. Lyakhov, V. A. Baboshina, D. I. Kalita // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – №. 3. – P. 1585.
105. Orazhev, A. R. Uncoded Video Data Stream Denoising in a Binary Symmetric Channel // *International Conference on Actual Problems of Applied Mathematics and Computer Science*. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2022. – P. 391-400.
106. Pok, G. Selective removal of impulse noise based on homogeneity level information / G. Pok, J. C. Liu, A. S. Nair // *IEEE Transactions on Image processing*. – 2003. – Vol. 12. – №. 1. – P. 85-92.
107. Portilla, J. Image denoising using scale mixtures of Gaussians in the wavelet domain / J. Portilla, V. Strela, M. J. Wainwright // *IEEE Transactions on Image processing*. – 2003. – Vol. 12. – №. 11. – P. 1338-1351.
108. Pratt, W. K. *Digital image processing: PIKS Scientific inside*. – Hoboken, New Jersey : Wiley-interscience, – 2007. – Vol. 4. – P. 769.
109. Pullano, V. Modeling effects of impulse noise on application-layer FEC in DSL channels / V. Pullano, R. Skupin, G. E. Corazza // *2013 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. – IEEE, – 2013. – P. 1-5.
110. Remez, T. Class-aware fully convolutional Gaussian and Poisson denoising / T. Remez, O. Litany, R. Giryes // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2018. – Vol. 27. – №. 11. – P. 5707-5722.
111. Rosi, T. What are we looking at when we say magenta? Quantitative measurements of RGB and CMYK colours with a homemade spectrophotometer / T. Rosi, M. Malgieri, P. Onorato // *European Journal of Physics*. – 2016. – Vol. 37. – №. 6. – P. 065301.

112. Russo, F. A fuzzy filter for images corrupted by impulse noise / F. Russo, G. Ramponi // IEEE Signal Processing Letters. – 1996. – Vol. 3. – №. 6. – P. 168-170.
113. Russo, F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51. – №. 4. – P. 824-828.
114. Russo, F. FIRE operators for image processing // Fuzzy sets and Systems. – 1999. – Vol. 103. – №. 2. – P. 265-275.
115. Russo, F. Removal of impulse noise using a FIRE filter / F. Russo, G. Ramponi // Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing. – IEEE, 1996. – Vol. 2. – P. 975-978.
116. Sara, U. Image quality assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—a comparative study / U. Sara, M. Akter, M. S. Uddin // Journal of Computer and Communications. – 2019. – Vol. 7. – №. 3. – P. 8-18.
117. Schmidt, U. Shrinkage fields for effective image restoration / U. Schmidt, S. Roth // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2014. – P. 2774-2781.
118. Schulte, S. A fuzzy impulse noise detection and reduction method / S. Schulte, M. Nachtgael, V. De Witte // IEEE Transactions on Image Processing. – 2006. – Vol. 15. – №. 5. – P. 1153-1162.
119. Shah, A. Comparative analysis of median filter and its variants for removal of impulse noise from gray scale images / A. Shan, J. I. Bangash, A. W. Khan // Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34. – №. 3. – P. 505-519.
120. Shaposhnikov, A. V Discrete Neural Network of Bidirectional Associative Memory / A. V. Shaposhnikov, A. S. Ionisyan, A. R. Orazhev // International Conference on Actual Problems of Applied Mathematics and Computer Science. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2022. – P. 335-342.
121. Shomorony, I. Worst-case additive noise in wireless networks / I. Shomorony, A. S. Avestimehr // IEEE Transactions on Information Theory. – 2013. – Vol. 59. – №. 6. – P. 3833-3847.

122. Shongwey, T. On impulse noise and its models / T. Shongwey, A. J. Vinck, H. C. Ferreira // 18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. – IEEE, – 2014. – P. 12-17.
123. Simonyan, K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition / K. Simonyan, A. Zisserman // arXiv preprint arXiv:1409.1556. – 2014. – P. 1-14.
124. Singh, N. Triple Threshold Statistical Detection filter for removing high density random-valued impulse noise in images / N. Singh, U. Oorkavalan // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2018. – Vol. 2018. – №. 1. – P. 1-16.
125. Sun, T. Detail-preserving median based filters in image processing / T. Sun, Y. Neuvo // Pattern recognition letters. – 1994. – Vol. 15. – №. 4. – P. 341-347.
126. Taguchi, A. Fuzzy filters for image smoothing / A. Taguchi, H. Takashima, Y. Murata // Nonlinear Image Processing V. – SPIE, – 1994. – Vol. 2180. – P. 332-339.
127. Taheri, E. A symmetrized and simplified Bernoulli trial collision scheme in direct simulation Monte Carlo / E. Taheri, E. Roohi, S. Stefanov // Physics of Fluids. – 2022. – Vol. 34. – №. 1. – P. 012010.
128. Tang, L. A new fuzzy logic image de-noising algorithm based on gradient detection / L. Tang, H. Wang, B. Qi // Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2007). – IEEE, 2007. – Vol. 2. – P. 103-107.
129. TelecomDaily: Россия вышла на второе место по темпам подключения видеокамер [Электронный ресурс]: TelecomDaily URL: <https://telecomdaily.ru/news/2021/06/30/telecomdaily-rossiya-vyshla-na-vtoroe-mesto-po-tempam-podklyucheniya-videokamer> (дата обращения: 24.07.2023).
130. Tomasi, C. Bilateral filtering for gray and color images / C. Tomasi, R. Manduchi // Sixth international conference on computer vision (IEEE Cat. No. 98CH36271). – IEEE, 1998. – P. 839-846.
131. Vijaykumar, V. R. High Density Impulse Noise Removal Using Robust Estimation Based Filter / V. R. Vijaykumar, P. T. Vanathi, P. Kanagasabapathy, D. Ebenezer // IAENG International Journal of Computer Science. – 2008. – Vol. 35. – №. 3. – P. 1-8.

132. Vincent, P. Stacked denoising autoencoders: Learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion / P. Vincent, H. Larochelle, I. Lajoie, Y. Bengio, P. A. Manzagol, L. Bottou // *Journal of machine learning research*. – 2010. – Vol. 11. – №. 12. – P. 3371-3408.
133. Wang, J. H. HAF: An adaptive fuzzy filter for restoring highly corrupted images by histogram estimation / J. H. Wang, H. C. Chiu // *Proceedings-national science council republic of China part a physical science and engineering*. – 1999. – Vol. 23. – P. 630-643.
134. Wang, Z. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // *IEEE transactions on image processing*. – 2004. – T. 13. – №. 4. – C. 600-612.
135. Wang, Z. Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images / Z. Wang, D. Zhang // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*. – 1999. – Vol. 46. – №. 1. – P. 78-80.
136. Wenbin, L. Efficient removal of impulse noise from digital images // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. – 2006. – Vol. 52. – №. 2. – P. 523-527.
137. Xiao, X. A local consensus index scheme for random-valued impulse noise detection systems / X. Xiao, N. N. Xiong, J. Lai, C. D. Wang, Z. Sun, J. Yan // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. – 2019. – Vol. 51. – №. 6. – P. 3412-3428.
138. Xie, J. Image denoising and inpainting with deep neural networks / J. Xie, L. Xu, E. Chen // *Advances in neural information processing systems*. – 2012. – T. 25. – P. 1-9.
139. Xiong, B. A universal denoising framework with a new impulse detector and nonlocal means / B. Xiong, Z. Yin // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2011. – Vol. 21. – №. 4. – P. 1663-1675.
140. Xiong, R. Analysis of decorrelation transform gain for uncoded wireless image and video communication / R. Xiong, F. Wu, J. Xu, X. Fan, C. Luo, W. Gao // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2016. – Vol. 25. – №. 4. – P. 1820-1833.

141. Xu, C. High frequency properties of shielded power cable-part 1: overview of mechanisms / C. Xu, L. Zhou, J. Y. Zhou, S. Boggs // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2005. – Vol. 21. – №. 6. – P. 24-28.
142. Xu, H. Adaptive fuzzy switching filter for images corrupted by impulse noise / H. Xu, G. Zhu, H. Peng, D. Wang // Pattern Recognition Letters. – 2004. – Vol. 25. – №. 15. – P. 1657-1663.
143. Yu, T. H. A fuzzy logic-based predictor for predictive coding of images //IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1998. – Vol. 6. – №. 1. – P. 153-162.
144. Yuan, C. Human action recognition under log-euclidean riemannian metric / C. Yuan, W. Hu, X. Li, S. Maybank, G. Luo // Computer Vision–ACCV 2009: 9th Asian Conference on Computer Vision, Xi'an, September 23-27, 2009, Revised Selected Papers, Part I 9. – Springer Berlin Heidelberg, – 2010. – P. 343-353.
145. Zhang, K. Learning deep CNN denoiser prior for image restoration / K. Zhang, W. Zuo, S. Gu, L. Zhang // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2017. – P. 3929-3938.
146. Zhao, F. Analysis of oscillation in bridge structure based on GaN devices and ferrite bead suppression method / F. Zhao, Y. Li, Q. Tang, L. Wang // 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – IEEE, – 2017. – P. 391-398.
147. Zhao, W. Detail-preserving image denoising via adaptive clustering and progressive PCA thresholding / Y. Lv, Q. Liu, B. Qin // IEEE Access. – 2017. – Vol. 6. – P. 6303-6315.
148. Zimmermann, M. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications / M. Zimmermann, K. Dostert //IEEE transactions on Electromagnetic compatibility. – 2002. – Vol. 44. – №. 1. – P. 249-258.
149. Zlokolica, V. Motion-and detail-adaptive denoising of video / V. Zlokolica, W. Philips // Image Processing: Algorithms and Systems III. – SPIE, 2004. – Vol. 5298. – P. 403-412.
150. Zoran, D. From learning models of natural image patches to whole image restoration / D. Zoran, Y. Weiss // 2011 international conference on computer vision. – IEEE. – 2011. – P. 479-486.

Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Онлайн патент»
_____ Акиншина А.В.
«В» мая 2023 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Оразаева Анзора Руслановича

Следующие результаты диссертационной работы Оразаева А.Р. использованы компанией ООО «Онлайн патент»:

1. Математическая модель восстановления изображений и видео, искаженных полярным импульсным шумом на основе адаптивной медианной фильтрации с использованием функции Лоренца.
2. Вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности в локальном окне.
3. Математическая модель восстановления изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом с использованием вычислительного метода оценки сходства между пикселями в локальном окне для определения импульсных значений.

Указанные результаты успешно использованы в проектах нашей компании по обработке изображений и техническому зрению для улучшения нейросетевого определения охраноспособности товарных знаков.

Рисунок А.1 – Акт внедрения результатов диссертационной работы в ООО
«Онлайн патент»

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Стилсофт»

Ю.П. Стоянов

«15» мая 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
«Методы и алгоритмы высококачественного восстановления цифровых
изображений, искаженных импульсным шумом»

Оразаева Анзора Руслановича

Следующие результаты диссертационной работы Оразаева А.Р.
использованы компанией ООО «Стилсофт»:

1. Математическая модель восстановления изображений и видео, искаженных полярным импульсным шумом на основе адаптивной медианной фильтрации с использованием функции Лоренца.
2. Вычислительный метод оценки сходства между пикселями изображений и видео на основе учета яркости и геометрической удаленности в локальном окне.
3. Математическая модель восстановления изображений и видео, искаженных случайным импульсным шумом с использованием вычислительного метода оценки сходства между пикселями в локальном окне для определения импульсных значений.

Указанные результаты успешно использованы в процессе разработки системы обработки видеоинформации тепловизионной камеры полезной нагрузки беспилотного летательного аппарата.

Рисунок А.2 – Акт внедрения результатов диссертационной работы в ООО
«Стилсофт»

Приложение Б. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение



Рисунок Б.1 –Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2017613716 от 27.03.2017



Рисунок Б.2 –Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 202261781 от 19.04.2022



Рисунок Б.3 –Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023616633 от 30.03.2023

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2771791

Способ адаптивной медианной фильтрации
импульсного шума на изображениях

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Северо-Кавказский федеральный университет" (RU)*

Авторы: *Ляхов Павел Алексеевич (RU), Оразаев Анзор
Русланович (RU), Ляхова Ульяна Алексеевна (RU),
Валуева Мария Васильевна (RU)*

Заявка № 2021111656

Приоритет изобретения 23 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 12 мая 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 23 апреля 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b8b077e14e4010a94e6dbd24145d5c7
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 2.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



Рисунок Б.4 – Патент на изобретение № 2771791 от 12.05.2021

**Приложение В. Расчетная таблица критерия хи-квадрат для определения
равномерности расположения искаженных пикселей при воздействии
полярного импульсного шума на изображение**

Таблица В.1 – Расчетная таблица для вычисления критерия хи-квадрат

№	Искаженных пикселей в участке	h	h'	$h - h'$	$(h - h')^2$	$\frac{(h - h')^2}{h'}$
1	522	0,0151	0,0156	-5,73E-04	3,28E-07	2,10E-05
2	541	0,0156	0,0156	-2,48E-05	6,14E-10	3,93E-08
3	505	0,0146	0,0156	-1,06E-03	1,13E-06	7,23E-05
4	569	0,0164	0,0156	7,83E-04	6,13E-07	3,92E-05
5	537	0,0155	0,0156	-1,40E-04	1,96E-08	1,26E-06
6	555	0,0160	0,0156	3,79E-04	1,44E-07	9,19E-06
7	559	0,0161	0,0156	4,94E-04	2,44E-07	1,56E-05
8	519	0,0150	0,0156	-6,59E-04	4,35E-07	2,78E-05
9	543	0,0157	0,0156	3,29E-05	1,08E-09	6,92E-08
10	545	0,0157	0,0156	9,06E-05	8,20E-09	5,25E-07
11	540	0,0156	0,0156	-5,36E-05	2,87E-09	1,84E-07
12	521	0,0150	0,0156	-6,01E-04	3,62E-07	2,32E-05
13	566	0,0163	0,0156	6,96E-04	4,85E-07	3,10E-05
14	529	0,0153	0,0156	-3,71E-04	1,38E-07	8,80E-06
15	571	0,0165	0,0156	8,40E-04	7,06E-07	4,52E-05
16	568	0,0164	0,0156	7,54E-04	5,68E-07	3,64E-05
17	545	0,0157	0,0156	9,06E-05	8,20E-09	5,25E-07
18	556	0,0160	0,0156	4,08E-04	1,66E-07	1,06E-05
19	548	0,0158	0,0156	1,77E-04	3,14E-08	2,01E-06
20	516	0,0149	0,0156	-7,46E-04	5,56E-07	3,56E-05
21	550	0,0159	0,0156	2,35E-04	5,51E-08	3,53E-06
22	560	0,0161	0,0156	5,23E-04	2,74E-07	1,75E-05
23	569	0,0164	0,0156	7,83E-04	6,13E-07	3,92E-05
24	510	0,0147	0,0156	-9,19E-04	8,44E-07	5,40E-05
25	539	0,0155	0,0156	-8,25E-05	6,80E-09	4,35E-07
26	556	0,0160	0,0156	4,08E-04	1,66E-07	1,06E-05
27	558	0,0161	0,0156	4,65E-04	2,17E-07	1,39E-05
28	513	0,0148	0,0156	-8,32E-04	6,93E-07	4,43E-05
29	577	0,0166	0,0156	1,01E-03	1,03E-06	6,57E-05
30	558	0,0161	0,0156	4,65E-04	2,17E-07	1,39E-05
31	545	0,0157	0,0156	9,06E-05	8,20E-09	5,25E-07
32	529	0,0153	0,0156	-3,71E-04	1,38E-07	8,80E-06

Продолжение таблицы В.1

33	554	0,0160	0,0156	3,50E-04	1,23E-07	7,84E-06
34	513	0,0148	0,0156	-8,32E-04	6,93E-07	4,43E-05
35	516	0,0149	0,0156	-7,46E-04	5,56E-07	3,56E-05
36	550	0,0159	0,0156	2,35E-04	5,51E-08	3,53E-06
37	533	0,0154	0,0156	-2,55E-04	6,53E-08	4,18E-06
38	542	0,0156	0,0156	4,06E-06	1,64E-11	1,05E-09
39	560	0,0161	0,0156	5,23E-04	2,74E-07	1,75E-05
40	530	0,0153	0,0156	-3,42E-04	1,17E-07	7,48E-06
41	550	0,0159	0,0156	2,35E-04	5,51E-08	3,53E-06
42	521	0,0150	0,0156	-6,01E-04	3,62E-07	2,32E-05
43	552	0,0159	0,0156	2,92E-04	8,55E-08	5,47E-06
44	524	0,0151	0,0156	-5,15E-04	2,65E-07	1,70E-05
45	557	0,0161	0,0156	4,37E-04	1,91E-07	1,22E-05
46	561	0,0162	0,0156	5,52E-04	3,05E-07	1,95E-05
47	496	0,0143	0,0156	-1,32E-03	1,75E-06	1,12E-04
48	532	0,0153	0,0156	-2,84E-04	8,08E-08	5,17E-06
49	538	0,0155	0,0156	-1,11E-04	1,24E-08	7,93E-07
50	516	0,0149	0,0156	-7,46E-04	5,56E-07	3,56E-05
51	533	0,0154	0,0156	-2,55E-04	6,53E-08	4,18E-06
52	521	0,0150	0,0156	-6,01E-04	3,62E-07	2,32E-05
53	526	0,0152	0,0156	-4,57E-04	2,09E-07	1,34E-05
54	549	0,0158	0,0156	2,06E-04	4,24E-08	2,71E-06
55	515	0,0149	0,0156	-7,75E-04	6,00E-07	3,84E-05
56	547	0,0158	0,0156	1,48E-04	2,20E-08	1,41E-06
57	515	0,0149	0,0156	-7,75E-04	6,00E-07	3,84E-05
58	574	0,0166	0,0156	9,27E-04	8,59E-07	5,50E-05
59	543	0,0157	0,0156	3,29E-05	1,08E-09	6,92E-08
60	535	0,0154	0,0156	-1,98E-04	3,91E-08	2,50E-06
61	540	0,0156	0,0156	-5,36E-05	2,87E-09	1,84E-07
62	570	0,0164	0,0156	8,11E-04	6,58E-07	4,21E-05
63	570	0,0164	0,0156	8,11E-04	6,58E-07	4,21E-05
64	577	0,0166	0,0156	1,01E-03	1,03E-06	6,57E-05
Σ	34679	1	1	-1,91E-17	2,09E-05	1,34E-03

**Приложение Г. Расчетная таблица критерия хи-квадрат для определения
равномерности расположения искаженных пикселей при воздействии
случайнозначного импульсного шума на изображение**

Таблица Г.1 – Расчетная таблица для вычисления критерия хи-квадрат

№	Искаженных пикселей в участке	h	h'	$h - h'$	$(h - h')^2$	$\frac{(h - h')^2}{h'}$
1	387	0,0148	0,0156	-8,62E-04	7,44E-07	4,76E-05
2	387	0,0148	0,0156	-8,62E-04	7,44E-07	4,76E-05
3	408	0,0156	0,0156	-6,14E-05	3,77E-09	2,41E-07
4	411	0,0157	0,0156	5,30E-05	2,81E-09	1,80E-07
5	406	0,0155	0,0156	-1,38E-04	1,90E-08	1,21E-06
6	395	0,0151	0,0156	-5,57E-04	3,11E-07	1,99E-05
7	401	0,0153	0,0156	-3,28E-04	1,08E-07	6,90E-06
8	432	0,0165	0,0156	8,54E-04	7,30E-07	4,67E-05
9	422	0,0161	0,0156	4,73E-04	2,23E-07	1,43E-05
10	426	0,0163	0,0156	6,25E-04	3,91E-07	2,50E-05
11	391	0,0149	0,0156	-7,10E-04	5,04E-07	3,23E-05
12	424	0,0162	0,0156	5,49E-04	3,01E-07	1,93E-05
13	410	0,0156	0,0156	1,49E-05	2,22E-10	1,42E-08
14	426	0,0163	0,0156	6,25E-04	3,91E-07	2,50E-05
15	397	0,0151	0,0156	-4,81E-04	2,31E-07	1,48E-05
16	395	0,0151	0,0156	-5,57E-04	3,11E-07	1,99E-05
17	405	0,0154	0,0156	-1,76E-04	3,09E-08	1,98E-06
18	423	0,0161	0,0156	5,11E-04	2,61E-07	1,67E-05
19	391	0,0149	0,0156	-7,10E-04	5,04E-07	3,23E-05
20	422	0,0161	0,0156	4,73E-04	2,23E-07	1,43E-05
21	433	0,0165	0,0156	8,92E-04	7,96E-07	5,10E-05
22	408	0,0156	0,0156	-6,14E-05	3,77E-09	2,41E-07
23	416	0,0159	0,0156	2,44E-04	5,94E-08	3,80E-06
24	420	0,0160	0,0156	3,96E-04	1,57E-07	1,01E-05
25	419	0,0160	0,0156	3,58E-04	1,28E-07	8,21E-06
26	426	0,0163	0,0156	6,25E-04	3,91E-07	2,50E-05
27	420	0,0160	0,0156	3,96E-04	1,57E-07	1,01E-05
28	369	0,0141	0,0156	-1,55E-03	2,40E-06	1,54E-04
29	425	0,0162	0,0156	5,87E-04	3,45E-07	2,21E-05
30	438	0,0167	0,0156	1,08E-03	1,17E-06	7,51E-05

Продолжение таблицы Г.1

31	405	0,0154	0,0156	-1,76E-04	3,09E-08	1,98E-06
32	378	0,0144	0,0156	-1,21E-03	1,45E-06	9,30E-05
33	434	0,0166	0,0156	9,30E-04	8,66E-07	5,54E-05
34	395	0,0151	0,0156	-5,57E-04	3,11E-07	1,99E-05
35	419	0,0160	0,0156	3,58E-04	1,28E-07	8,21E-06
36	413	0,0158	0,0156	1,29E-04	1,67E-08	1,07E-06
37	421	0,0161	0,0156	4,35E-04	1,89E-07	1,21E-05
38	404	0,0154	0,0156	-2,14E-04	4,58E-08	2,93E-06
39	443	0,0169	0,0156	1,27E-03	1,62E-06	1,04E-04
40	442	0,0169	0,0156	1,24E-03	1,53E-06	9,77E-05
41	421	0,0161	0,0156	4,35E-04	1,89E-07	1,21E-05
42	386	0,0147	0,0156	-9,01E-04	8,11E-07	5,19E-05
43	380	0,0145	0,0156	-1,13E-03	1,28E-06	8,16E-05
44	418	0,0159	0,0156	3,20E-04	1,02E-07	6,56E-06
45	396	0,0151	0,0156	-5,19E-04	2,70E-07	1,72E-05
46	432	0,0165	0,0156	8,54E-04	7,30E-07	4,67E-05
47	420	0,0160	0,0156	3,96E-04	1,57E-07	1,01E-05
48	390	0,0149	0,0156	-7,48E-04	5,60E-07	3,58E-05
49	406	0,0155	0,0156	-1,38E-04	1,90E-08	1,21E-06
50	412	0,0157	0,0156	9,12E-05	8,32E-09	5,32E-07
51	409	0,0156	0,0156	-2,32E-05	5,40E-10	3,46E-08
52	434	0,0166	0,0156	9,30E-04	8,66E-07	5,54E-05
53	398	0,0152	0,0156	-4,43E-04	1,96E-07	1,26E-05
54	372	0,0142	0,0156	-1,43E-03	2,06E-06	1,32E-04
55	380	0,0145	0,0156	-1,13E-03	1,28E-06	8,16E-05
56	392	0,0150	0,0156	-6,72E-04	4,51E-07	2,89E-05
57	423	0,0161	0,0156	5,11E-04	2,61E-07	1,67E-05
58	411	0,0157	0,0156	5,30E-05	2,81E-09	1,80E-07
59	412	0,0157	0,0156	9,12E-05	8,32E-09	5,32E-07
60	386	0,0147	0,0156	-9,01E-04	8,11E-07	5,19E-05
61	407	0,0155	0,0156	-9,95E-05	9,91E-09	6,34E-07
62	419	0,0160	0,0156	3,58E-04	1,28E-07	8,21E-06
63	422	0,0161	0,0156	4,73E-04	2,23E-07	1,43E-05
64	402	0,0153	0,0156	-2,90E-04	8,43E-08	5,39E-06
Σ	26215	1,0000	1	5,20E-18	2,83E-05	1,81E-03

**Приложение Д. Листинг программного модуля восстановления изображения,
искаженного полярным импульсным шумом**

```

function Arr_frm = frm_zeros( Arr_orig ,sfrm)
size_arr_orig=size(Arr_orig);
Arr_frm=int32(zeros(size_arr_orig(1)+sfrm*2,size_arr_orig(2)+sfrm*2));
for i=sfrm+1:1:size_arr_orig(1)+sfrm
    for j=sfrm+1:1:size_arr_orig(2)+sfrm
        Arr_frm(i,j)= Arr_orig(i-sfrm,j-sfrm);
    end
end
end

function Array= filter_arr ( Arr_orig, Arr_filt,r)
    size_filter=size(Arr_filt);
    n=fix(size_filter(1)/2);
    Array_tmp = frm_zeros( Arr_orig ,n) ;
    size_arr_tmp=size(Array_tmp);
    Array1=zeros( size_arr_tmp(1)-2*n,size_arr_tmp(2)-2*n);
    Array=int32(Array1);
    for i=1:1:size_arr_tmp(1)-2*n
        for j=1:1:size_arr_tmp(2)-2*n
            for k=1:1:size_filter(1)
                for l=1:1:size_filter(1)
                    Array(i,j)=Array(i,j)+Array_tmp(i+k-1,j+l-1)*Arr_filt(k,l);
                end
            end
        end
        Array(i,j)=Array(i,j)/r;
    end
end
Array=uint8(Array);
end

frame = 9; mask=1; step=10; z1=0;
PSNR=zeros(); SSIM=zeros(); SP1 = frm_zeros( SP1 ,frame);

for n1=3:0.1:3
    AA=0;
    z1=z1+1;
    SP=SP1;
    for m=1:1:step
        for i=1:1:row
            for j=1:1:col
                if (SP(i+frame,j+frame)~=255) && (SP(i+frame,j+frame)~=0)
                    AA(i,j)=SP(i+frame,j+frame);
                else
                    k=0;
                    vek1=0;

```

```

        vek1s=0;
        if (SP(i+frame,j+frame+1)~=255) && (SP(i+frame,j+frame+1)~=0)
            k=k+1;
            vek1(k)=SP(i+frame,j+frame+1);
        end
        if (SP(i+frame+1,j+frame)~=255) && (SP(i+frame+1,j+frame)~=0)
            k=k+1;
            vek1(k)=SP(i+frame+1,j+frame);
        end
        if (SP(i+frame,j+frame-1)~=255) && (SP(i+frame,j+frame-1)~=0)
            k=k+1;
            vek1(k)=SP(i+frame,j+frame-1);
        end
        if (SP(i+frame-1,j+frame)~=255) && (SP(i+frame-1,j+frame)~=0)
            k=k+1;
            vek1(k)=SP(i+frame-1,j+frame);
        end
        if (k~=0)
            med=0;
            vek1s=sort(vek1);
            vek1=zeros();
            z=k/2;
            x=floor(z);
            if ((z-x)==0)
                med=(vek1s(x)+vek1s(x+1))/2;
            else med=vek1s(x+1);
            end
            num=0;
            den=0;
            for ii=1:1:k
                num=num+((vek1s(ii)*2)/((10^n1)+((vek1s(ii)-med)^2)));
                den=den+(2/((10^n1)+((vek1s(ii)-med)^2)));
            end
            AA(i,j)=num/den;

        end
    end
end

end
SP = AA;
SP = frm_zeros( SP ,frame);

end
AAA=uint8(AA);
PSNR(z1)=psnr(AAA,f2);
SSIM(z1)=ssim(AAA,f2);
end

```

**Приложение Е. Листинг программного модуля восстановления видео,
искаженного полярным импульсным шумом**

```

clear
video1 = VideoReader('Video3d99.avi');
frame001=read(video1,1);
aaa=frame001;
[row, col] = size(aaa);
ramka=3;
step=2;

for m=1:1:step
    video1 = VideoReader('Video3d99.avi');
    for kadr=1:1:113
        PF=(read(video1,kadr));
        CF=(read(video1,kadr+1));
        NF=(read(video1,kadr+2));
        PF=frm_zeros(PF,ramka);
        CF=frm_zeros(CF,ramka);
        NF=frm_zeros(NF,ramka);

        for i=1:1:row
            for j=1:1:col
                if (CF(i+ramka,j+ramka)~=255) && (CF(i+ramka,j+ramka)~=0)
                    AA(i,j)=CF(i+ramka,j+ramka);
                else

                    k=0;

%                PF

                if (PF(i+ramka,j+ramka+1)~=255) && (PF(i+ramka,j+ramka+1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka,j+ramka+1);
                end
                if (PF(i+ramka+1,j+ramka)~=255) && (PF(i+ramka+1,j+ramka)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka+1,j+ramka);
                end
                if (PF(i+ramka,j+ramka-1)~=255) && (PF(i+ramka,j+ramka-1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka,j+ramka-1);
                end
                if (PF(i+ramka-1,j+ramka)~=255) && (PF(i+ramka-1,j+ramka)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka-1,j+ramka);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

if (PF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=255) && (PF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=PF(i+ramka-1,j+ramka+1);
end
if (PF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=255) && (PF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=PF(i+ramka+1,j+ramka+1);
end
if (PF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=255) && (PF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=PF(i+ramka+1,j+ramka-1);
end
if (PF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=255) && (PF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=PF(i+ramka-1,j+ramka-1);
end
if (PF(i+ramka,j+ramka)~=255) && (PF(i+ramka,j+ramka)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=PF(i+ramka,j+ramka);
end

%      CF
if (CF(i+ramka,j+ramka+1)~=255) && (CF(i+ramka,j+ramka+1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka,j+ramka+1);
end
if (CF(i+ramka+1,j+ramka)~=255) && (CF(i+ramka+1,j+ramka)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka+1,j+ramka);
end
if (CF(i+ramka,j+ramka-1)~=255) && (CF(i+ramka,j+ramka-1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka,j+ramka-1);
end
if (CF(i+ramka-1,j+ramka)~=255) && (CF(i+ramka-1,j+ramka)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka-1,j+ramka);
end
if (CF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=255) && (CF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka-1,j+ramka+1);
end
if (CF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=255) && (CF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka+1,j+ramka+1);
end
if (CF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=255) && (CF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka+1,j+ramka-1);
end
if (CF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=255) && (CF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=0)
    k=k+1;

```

```

        vek1(k)=CF(i+ramka-1,j+ramka-1);
    end

%      NF

    if (NF(i+ramka,j+ramka+1)~=255) && (NF(i+ramka,j+ramka+1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka,j+ramka+1);
    end
    if (NF(i+ramka+1,j+ramka)~=255) && (NF(i+ramka+1,j+ramka)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka+1,j+ramka);
    end
    if (NF(i+ramka,j+ramka-1)~=255) && (NF(i+ramka,j+ramka-1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka,j+ramka-1);
    end
    if (NF(i+ramka-1,j+ramka)~=255) && (NF(i+ramka-1,j+ramka)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka-1,j+ramka);
    end
    if (NF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=255) && (NF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka-1,j+ramka+1);
    end
    if (NF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=255) && (NF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka+1,j+ramka+1);
    end
    if (NF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=255) && (NF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka+1,j+ramka-1);
    end
    if (NF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=255) && (NF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka-1,j+ramka-1);
    end
    if (NF(i+ramka,j+ramka)~=255) && (NF(i+ramka,j+ramka)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka,j+ramka);
    end

    if (k~=0)
        vek1s=sort(vek1);
        vek1=zeros();
        z=k/2;
        x=floor(z);
        if ((z-x)==0)

            AA(i,j)=(vek1s(x)+vek1s(x+1))/2;
        else AA(i,j)=vek1s(x+1);
        end
    end

```

```

        else
            AA(i,j)=CF(i+ramka,j+ramka+1);
        end
    end
end
end
AA1=uint8(AA);
%    image writt
filename = strcat('99file', num2str(kadr),'.png');
imwrite(AA1, filename);

end
%    VideoWritter
vidObj = VideoWriter('Video3d99.avi','Grayscale AVI');
vidObj.FrameRate = 24;
open(vidObj);

    for i=1:113
        x = num2str(i);
        im = horzcat('99file',x);
        im1 = horzcat(im, '.png');
        imdata = imread(im1);
        writeVideo(vidObj,imdata);
    end
close(vidObj);

end

```

Приложение Ж. Листинг программного модуля генерации случайного импульсного шума на изображении и последующее восстановление

```
% генератор рандомного импульсного шума
clear
% kk -интенсивность шума; filename-имя сохраняемого файла
p=0.57;
filename = strcat('parking','57');
orig = imread('tempfile150.png'); orig=im2gray(orig); f=orig;
[ row, col ] = size(f);
k=row*col*p;
MAP=zeros(size(f));

while sum(sum(MAP))<k
    i=randi([1 row],1);
    j=randi([1 col],1);
    if MAP(i,j)==0
        MAP(i,j)=1;
        f(i,j)=randi([0 255],1);
    end
end
sum(sum(MAP));
kk=k/(row*col)
imwrite(f, strcat(filename,'.jpg'));
save(strcat(filename,'.mat'));
    load lena10.mat
    ramka=4;
    f=imread('bsc5_3.png');
    [row, col] = size(f(:, :, 1));
    T=19; a=zeros(); b=5; step=2; c = [ 2 1 2 1 1 2 1 2 4 4 4 4 ]; c =sqrt(c);
    f=frm_zeros(f, ramka);

% % Построение карты
kkk=0;
for i=1:1:row
    for j=1:1:col

        aa=double(f(i+ramka,j+ramka));
        a(1)=(f(i+ramka+1,j+ramka-1));
        a(2)=(f(i+ramka+1,j+ramka));
        a(3)=(f(i+ramka+1,j+ramka+1));
        a(4)=(f(i+ramka,j+ramka-1));
        a(5)=(f(i+ramka,j+ramka+1));
        a(6)=(f(i+ramka-1,j+ramka-1));
        a(7)=(f(i+ramka-1,j+ramka));
        a(8)=(f(i+ramka-1,j+ramka+1));
        a(9)=(f(i+ramka-2,j+ramka));
        a(10)=(f(i+ramka+2,j+ramka));
```

```

a(11)=(f(i+ramka,j+ramka-2));
a(12)=(f(i+ramka,j+ramka+2));
for n=1:1:12
    v(n)=log2(double(abs(aa-a(n))))-8;
    vv(n)=1+(max([v(n);-b])/b);
    WS(n)=exp(-((abs(c(n)))^2)/(2*25));
end
vvv=sort(vv);
ROLD=sum([vvv(1),vvv(2),vvv(3),vvv(4),vvv(5),vvv(6)]);
Ws=sum(WS);
W(i,j)=ROLD.*Ws;

if W(i,j)>T
    MAP1(i,j)=1;
    kkk=kkk+1;
else
    MAP1(i,j)=100;
end

end
end
MAP2=MAP1;
MAP2=frm_zeros(MAP2, ramka);
for m=1:1:step
    for i=1:1:row
        for j=1:1:col
            if MAP2(i+ramka,j+ramka,m)==100
                f(i+ramka,j+ramka,m+1)=f(i+ramka,j+ramka,m);
            else

                k=0;

                if MAP2(i+ramka-1,j+ramka-1,m)==100
                    k=k+1;
                    vek1(k)=f(i+ramka-1,j+ramka-1,m);
                end
                if MAP2(i+ramka-1,j+ramka,m)==100
                    k=k+1;
                    vek1(k)=f(i+ramka-1,j+ramka,m);
                end
                if MAP2(i+ramka-1,j+ramka+1,m)==100
                    k=k+1;
                    vek1(k)=f(i+ramka-1,j+ramka+1,m);
                end

                if MAP2(i+ramka,j+ramka-1,m)==100
                    k=k+1;
                    vek1(k)=f(i+ramka,j+ramka-1,m);
                end
                if MAP2(i+ramka,j+ramka+1,m)==100
                    k=k+1;
                    vek1(k)=f(i+ramka,j+ramka+1,m);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

if MAP2(i+ramka+1,j+ramka-1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=f(i+ramka+1,j+ramka-1,m);
end
if MAP2(i+ramka+1,j+ramka,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=f(i+ramka+1,j+ramka,m);
end
if MAP2(i+ramka+1,j+ramka+1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=f(i+1+ramka,j+ramka+1,m);
end

if (k~=0)

    vek1s=sort(vek1);
    vek1=zeros();
    z=k/2;
    x=floor(z);
    if ((z-x)==0)
        f(i+ramka,j+ramka,m+1)=(vek1s(x)+vek1s(x+1))/2;
    else f(i+ramka,j+ramka,m+1)=vek1s(x+1);
    end
else
    f(i+ramka,j+ramka,m+1)=f(i+ramka,j+ramka,m);
end
end
if k~=0
    MAP2(i+ramka,j+ramka,m+1)=100;
else
    MAP2(i+ramka,j+ramka,m+1)=1;
end
end
end
end
for i=1:1:row
    for j=1:1:col
        AA(i,j)=f(i+ramka,j+ramka,m);
    end
end
end

AA=uint8(AA);
figure; imshow(AA);
PSNR=psnr(AA,orig); SSIM=ssim(AA,orig);
% процент детектированных импульсов на изображении
kkk/(row*col)

```

Приложение II. Листинг программного модуля генерации случайного импульсного шума на видео и последующее восстановление

```

% генератор рандомного импульсного шума
clear
video1 = VideoReader('testgray.avi');
% p - интенсивность шума;
f = (read(video1,1));
[ row, col ] = size(f);
p=0.5;
pp=row*col*p;
MAP=zeros(size(f));

for k=1:1:113
    MAP=zeros(size(f));
    frame=(read(video1,k));
    while sum(sum(MAP))<pp
        i=randi([1 row],1);
        j=randi([1 col],1);
        if MAP(i,j)==0
            MAP(i,j)=1;
            frame(i,j)=randi([0 255],1);
        end
    end
    filename = strcat('test', num2str(k),'.png');
    imwrite(frame, filename);
end

vidObj = VideoWriter('50parking.avi','Grayscale AVI');

vidObj.FrameRate = 30;
open(vidObj);

for i=1:113
    x = num2str(i);
    im = horzcat('test',x);
    im1 = horzcat(im,'.png');
    imdata = imread(im1);
    writeVideo(vidObj,imdata);
end
close(vidObj);

% Метод восстановления
k=1;
ramka=4;
T=22;
a=zeros();
b=5;

```

```

step=2;
c = [ 2 1 2 1 1 2 1 2 4 4 4 1 1];
c =sqrt(c);
video1 = VideoReader('50parking.avi');
finishname = strcat('50parking_p.avi');
frame001=read(video1,1);
aaa=frame001;
[row, col] = size(aaa);

for kadr=1:1:98
    PF=(read(video1,kadr));
    CF=(read(video1,kadr+1));
    NF=(read(video1,kadr+2));
    PF=frm_zeros(PF, ramka);
    CF=frm_zeros(CF, ramka);
    NF=frm_zeros(NF, ramka);

% Построение карты
kkk=0;
for i=1:1:row
    for j=1:1:col
        aa=double(CF(i+ramka,j+ramka));
        a(1)=(CF(i+ramka+1,j+ramka-1));
        a(2)=(CF(i+ramka+1,j+ramka));
        a(3)=(CF(i+ramka+1,j+ramka+1));
        a(4)=(CF(i+ramka,j+ramka-1));
        a(5)=(CF(i+ramka,j+ramka+1));
        a(6)=(CF(i+ramka-1,j+ramka-1));
        a(7)=(CF(i+ramka-1,j+ramka));
        a(8)=(CF(i+ramka-1,j+ramka+1));
        a(9)=(CF(i+ramka-2,j+ramka));
        a(10)=(CF(i+ramka+2,j+ramka));
        a(11)=(CF(i+ramka,j+ramka-2));
        a(12)=(CF(i+ramka,j+ramka+2));
        a(13)=(PF(i+ramka,j+ramka));
        a(14)=(NF(i+ramka,j+ramka));
        for n=1:1:14
            v(n)=log2(double(abs(aa-a(n))))-8;
            vv(n)=1+(max([v(n);-b])/b);
            WS(n)=exp(-((abs(c(n)))^2)/(2*25));
        end
        vvv=sort(vv);
        ROLD=sum([vvv(1),vvv(2),vvv(3),vvv(4),vvv(5),vvv(6),vvv(7)]);
        Ws=sum(WS);
        W(i,j)=ROLD.*Ws;

        if W(i,j)>T
            MAP0(i,j)=1;
            kkk=kkk+1;
        else
            MAP0(i,j)=100;
        end
    end
end

```

```

    end
end

MAP2=MAP0;
MAP2=frm_zeros(MAP2, ramka);

for m=1:1:step
    for i=1:1:row
        for j=1:1:col
            if MAP2(i+ramka,j+ramka,m)==100
                CF(i+ramka,j+ramka,m+1)=CF(i+ramka,j+ramka,m);
            else
                k=0;
%                PF

                if (PF(i+ramka,j+ramka+1)~=255) && (PF(i+ramka,j+ramka+1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka,j+ramka+1);
                end
                if (PF(i+ramka+1,j+ramka)~=255) && (PF(i+ramka+1,j+ramka)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka+1,j+ramka);
                end
                if (PF(i+ramka,j+ramka-1)~=255) && (PF(i+ramka,j+ramka-1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka,j+ramka-1);
                end
                if (PF(i+ramka-1,j+ramka)~=255) && (PF(i+ramka-1,j+ramka)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka-1,j+ramka);
                end
                if (PF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=255) && (PF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka-1,j+ramka+1);
                end
                if (PF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=255) && (PF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka+1,j+ramka+1);
                end
                if (PF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=255) && (PF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka+1,j+ramka-1);
                end
                if (PF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=255) && (PF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka-1,j+ramka-1);
                end
                if (PF(i+ramka,j+ramka)~=255) && (PF(i+ramka,j+ramka)~=0)
                    k=k+1;
                    vek1(k)=PF(i+ramka,j+ramka);
                end
            end
        end
    end
end

```

```

%          CF

if MAP2(i+ramka-1,j+ramka-1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka-1,j+ramka-1,m);
end
if MAP2(i+ramka-1,j+ramka,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka-1,j+ramka,m);
end
if MAP2(i+ramka-1,j+ramka+1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka-1,j+ramka+1,m);
end

if MAP2(i+ramka,j+ramka-1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka,j+ramka-1,m);
end
if MAP2(i+ramka,j+ramka+1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka,j+ramka+1,m);
end

if MAP2(i+ramka+1,j+ramka-1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka+1,j+ramka-1,m);
end
if MAP2(i+ramka+1,j+ramka,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+ramka+1,j+ramka,m);
end
if MAP2(i+ramka+1,j+ramka+1,m)==100
    k=k+1;
    vek1(k)=CF(i+1+ramka,j+ramka+1,m);
end
%          NF

if (NF(i+ramka,j+ramka+1)~=255) && (NF(i+ramka,j+ramka+1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=NF(i+ramka,j+ramka+1);
end
if (NF(i+ramka+1,j+ramka)~=255) && (NF(i+ramka+1,j+ramka)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=NF(i+ramka+1,j+ramka);
end
if (NF(i+ramka,j+ramka-1)~=255) && (NF(i+ramka,j+ramka-1)~=0)
    k=k+1;
    vek1(k)=NF(i+ramka,j+ramka-1);
end

```

```

    if (NF(i+ramka-1,j+ramka)~=255) && (NF(i+ramka-1,j+ramka)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka-1,j+ramka);
    end
    if (NF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=255) && (NF(i+ramka-1,j+ramka+1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka-1,j+ramka+1);
    end
    if (NF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=255) && (NF(i+ramka+1,j+ramka+1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka+1,j+ramka+1);
    end
    if (NF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=255) && (NF(i+ramka+1,j+ramka-1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka+1,j+ramka-1);
    end
    if (NF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=255) && (NF(i+ramka-1,j+ramka-1)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka-1,j+ramka-1);
    end
    if (NF(i+ramka,j+ramka)~=255) && (NF(i+ramka,j+ramka)~=0)
        k=k+1;
        vek1(k)=NF(i+ramka,j+ramka);
    end

    if (k~=0)

        vek1s=sort(vek1);
        vek1=zeros();
        z=k/2;
        x=floor(z);
        if ((z-x)==0)
            CF(i+ramka,j+ramka,m+1)=(vek1s(x)+vek1s(x+1))/2;
        else CF(i+ramka,j+ramka,m+1)=vek1s(x+1);
        end
    else
        CF(i+ramka,j+ramka,m+1)=CF(i+ramka,j+ramka,m);
    end
end
if k~=0
    MAP2(i+ramka,j+ramka,m+1)=100;
else
    MAP2(i+ramka,j+ramka,m+1)=1;
end
end
end
for i=1:1:row
    for j=1:1:col
        AA(i,j)=CF(i+ramka,j+ramka,m);
    end
end
end

```

```

% сохранить кадр
    filename = strcat('50p', num2str(kadr),'.png');
    imwrite(uint8(AA), filename);
end
% собрать кадры в видео
vidObj = VideoWriter(finishname,'Grayscale AVI');
vidObj.FrameRate = 24;
open(vidObj);
for i=1:98
    x = num2str(i);
    im = horzcat('50p',x);
    im1 = horzcat(im, '.png');
    imdata = imread(im1);
    writeVideo(vidObj,imdata);
end
close(vidObj);
kkk/(row*col)

```

Приложение К. Листинг программного модуля очистки изображений и видео, переданных через двоичный симметричный канал с ошибками

```

video1 = VideoReader('elex.avi');
finishname = strcat('elexBSC5.avi');
for kadr=1:1:100
    f=(read(video1,kadr));
    [row,col]=size(f);
    k=0.05; % Вероятность возникновения ошибки
    m0=mod(f,2); i1=(f-m0)/2;
    m1=mod(i1,2); i2=(i1-m1)/2;
    m2=mod(i2,2); i3=(i2-m2)/2;
    m3=mod(i3,2); i4=(i3-m3)/2;
    m4=mod(i4,2); i5=(i4-m4)/2;
    m5=mod(i5,2); i6=(i5-m5)/2;
    m6=mod(i6,2); i7=(i6-m6)/2;
    m7=mod(i7,2); i8=(i7-m7)/2;
    n1=bsc(double(m0),k); n2=bsc(double(m1),k);
    n3=bsc(double(m2),k); n4=bsc(double(m3),k);
    n5=bsc(double(m4),k); n6=bsc(double(m5),k);
    n7=bsc(double(m6),k); n8=bsc(double(m7),k);
    deci=n8*128+n7*64+n6*32+n5*16+n4*8+n3*4+n2*2+n1*1;

    for i=1:1:row
        for j=1:1:col
            if deci(i,j)~=f(i,j)
                MAP(i,j)=1;
            else MAP(i,j)=0;
            end
        end
    end
    MAP1(:,:,kadr)=MAP;
    filename = strcat('bsc5_', num2str(kadr),'.png');
    imwrite(uint8(deci), filename);
end
vidObj = VideoWriter(finishname,'Grayscale AVI'); vidObj.FrameRate = 24;
open(vidObj);

for i=1:100
    x = num2str(i);
    im = horzcat('bsc5_',x);
    im1 = horzcat(im,'.png');
    imdata = imread(im1);
    writeVideo(vidObj,imdata);
end
close(vidObj);

```