Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 004.932.2

Купчина
Екатерина Валерьевна

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЛОХО ОСВЕЩЕННОГО ОБЪЕКТА

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0612-03 – Системы управления информацией

_____
(подпись магистранта)

Научный руководитель
Кукин Дмитрий Петрович
к.т.н., доцент

_____
(подпись научного руководителя)

Минск, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к качеству визуальной информации в таких областях, как системы видеонаблюдения, медицинская диагностика, дистанционное зондирование и потребительская фотография, неуклонно возрастают. Особую сложность представляет обработка изображений, полученных в условиях недостаточной освещённости, которые характеризуются низкой контрастностью, высоким уровнем шума и искажённой цветопередачей. Существующие традиционные и современные алгоритмические методы часто демонстрируют ограниченную эффективность в условиях экстремально низкой освещённости, либо требуют значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их применение в системах реального времени.

Научная проблема исследования заключается в отсутствии универсального алгоритма восстановления изображений плохо освещённых объектов, который обеспечивал бы высокое визуальное качество и сохранение деталей при приемлемой вычислительной сложности. Существующие подходы либо недостаточно эффективно восстанавливают детализацию в теневых областях, либо приводят к возникновению структурных помех и неестественной передаче визуальных характеристик.

Целью работы является разработка эффективного алгоритма восстановления изображений плохо освещённых объектов, обеспечивающего улучшение видимости деталей при сохранении естественного вида сцены. Для достижения поставленной цели в работе решены задачи анализа существующих методов, разработки физико-математической модели формирования изображения в условиях недостаточного освещения и создания алгоритма, сочетающего методы оценки освещённости и адаптивного усиления сигнала.

Методы исследования включают математическое моделирование, алгоритмический анализ, методы оптимизации и экспериментальную проверку на реальных изображениях.

Научная новизна работы заключается в разработке комбинированного подхода к оценке освещённости сцены, создании адаптивной схемы усиления сигнала с сохранением локального контраста и оптимизации вычислительной схемы алгоритма для работы в реальном времени. Практическая значимость определяется возможностью использования разработанного алгоритма в системах безопасности, медицинской визуализации, мобильных приложениях и научных исследованиях.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа тематически связана с задачами компьютерного зрения, цифровой обработки изображений и машинного обучения, направленными на преодоление ограничений, накладываемых условиями низкой освещённости. Особое внимание уделяется восстановлению именно компьютерных изображений (скриншотов, интерфейсов, цифровых документов), имеющих специфические структурные особенности.

Объект исследования – методы и алгоритмы восстановления и улучшения качества цифровых изображений, полученных в условиях недостаточной освещённости.

Предмет исследования – физически обоснованные нейросетевые архитектуры для компенсации искажений, характерных для условий низкой освещённости, с учётом специфики компьютерных изображений.

Цель исследования – разработка и экспериментальное обоснование эффективного алгоритма восстановления изображений плохо освещённых объектов на основе инновационной нейросетевой архитектуры, сочетающей физическое моделирование и глубокое обучение.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Проведён анализ современных методов восстановления изображений при низкой освещённости, включая традиционные (гистограммные преобразования, теория Ретинекса) и современные (слепая деконволюция, вейвлет-преобразования, нелокальное усреднение) подходы.
2. Разработана физико-математическая модель формирования цифрового изображения в условиях недостаточной освещённости, учитывающая оптические, электронные и цифровые компоненты процесса.
3. Спроектирована и обоснована физически обоснованная нейросетевая архитектура AIR-Net, реализующая принцип обратного моделирования процесса деградации.
4. Разработан и реализован алгоритм обучения сети AIR-Net с составной функцией потерь, включающей физические ограничения, и специализированной аугментацией данных.
5. Проведена экспериментальная валидация предложенного алгоритма, включая количественную и качественную оценку, абляционные исследования и анализ производительности.

Методологическая основа работы включает методы математического моделирования, алгоритмического анализа, оптимизации, глубокого обучения, а

также экспериментальную проверку на реальных и синтетических изображениях. Реализация выполнена с использованием фреймворка PyTorch и языка Python.

Эмпирическая база исследования включает открытые наборы данных (LOL, MIT-Adobe FiveK), а также собственноручно собранные данные компьютерных изображений с различными условиями освещённости.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработка архитектуры AIR-Net, в которой каждый модуль соответствует компоненту физической модели формирования изображения, обеспечивая интерпретируемость и целенаправленную компенсацию искажений.
2. Разработана модульная архитектура AIR-Net, в которой каждый из восьми специализированных модулей (CSM, AIM, RLB, MRM, EAM, энкодер, декодер, финальные слои) сопоставлен компонентам физической модели. Это обеспечивает интерпретируемость работы сети и целенаправленную компенсацию отдельных механизмов деградации.
3. Введены специализированные блоки для обработки компьютерных изображений (операторы, ориентированные на сохранение границ, регулярных структур и текстовых элементов), что позволяет лучше сохранять читаемость интерфейсов и документов по сравнению с универсальными архитектурами.
4. Реализована обучаемая схема, в которой дифференцируемые модели освещённости и сенсорного шума включены непосредственно в процесс обучения сети. Это позволяет согласовывать параметры модулей с физической моделью не только на уровне структуры, но и на уровне критерия оптимизации.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Разработан программный комплекс, реализующий архитектуру AIR-Net и полный цикл обработки: от загрузки и предобработки данных до инференса в режиме, близком к реальному времени. Комплекс может быть интегрирован в существующие системы обработки изображений и компьютерного зрения.
2. Алгоритм обеспечивает высокое качество восстановления при ограниченных вычислительных затратах: обработка изображения 512×512 пикселей выполняется за 4.5–5.1 мс на графическом процессоре, что соответствует 196–222 кадрам в секунду и позволяет использовать его в системах реального времени.
3. Решение ориентировано на задачи восстановления качества скриншотов, интерфейсных элементов и цифровых документов, что актуально

для систем видеонаблюдения, экранных трансляций, мобильных приложений и систем удалённого доступа.

4. Предложенные подходы к моделированию освещённости и шумов, а также к построению модульных архитектур могут быть адаптированы для других задач обработки изображений и видео, требующих учёта физики процесса формирования сигнала.

Личный вклад автора заключается в проведении анализа литературы, разработке физико-математической модели, проектировании архитектуры AIR-Net, реализации алгоритма, проведении экспериментов, анализе результатов и формулировании выводов.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международной научной конференции (БГУИР, г. Минск, 22 ноября 2023), 61-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов (г. Минск, 21–25 апреля 2025), Международной научной конференции (г. Минск, 19 ноября 2025), что подтверждает их научную и практическую значимость.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, трёх глав основной части, заключения и списка использованных источников. Общий объём работы составляет 63 страниц машинописного текста Библиографический список включает 45 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы проблема, цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость.

В первой главе «Анализ существующих методов восстановления изображений» проведён систематический обзор и классификация методов. Проанализированы традиционные подходы (гистограммные преобразования, теория Ретинекса, частотные методы) и современные алгоритмические подходы (методы слепой деконволюции, вейвлет-преобразования, алгоритмы нелокального усреднения). Выявлены их ключевые преимущества, ограничения и области применения. Сделан вывод об отсутствии универсального решения и необходимости разработки комплексного подхода, сочетающего физическую обоснованность с адаптивностью методов глубокого обучения.

Во второй главе «Разработка алгоритма восстановления» решены ключевые задачи исследования:

1. Проанализированы специфические проблемы формирования компьютерных изображений в условиях низкой освещённости: снижение отношения сигнал/шум, искажение цветопередачи, потеря детализации.

2. Разработана и формализована комплексная физико-математическая модель формирования цифрового изображения, учитывающая отражательную способность объекта $R(x,y)$, пространственное распределение освещённости $L(x,y)$, время экспозиции t_{int}, темновой ток $N_{dc}(x,y)$, дробовой шум $N_{shot}(x,y)$, неоднородность усиления сенсора $S(x,y)$, шум считывания $N_{read}(x,y)$ и фиксированный шум шаблона $N_{FPN}(x,y)$.

3. Представлена архитектура нейронной сети AIR-Net (Adaptive Illumination Restoration Network), состоящая из восьми последовательных модулей: калибровки сенсора, энкодера признаков, анализа освещённости, декомпозиции по Ретинексу, многомасштабного восстановителя, декодера, адаптации экспозиции и финальных слоёв. Подробно описаны принципы дифференцируемого физического моделирования, механизмы внимания и специализированные блоки для обработки компьютерных изображений.

4. Изложен алгоритм обучения AIR-Net с использованием составной функции потерь $L_{total}=\lambda 1 L_{MSE}+\lambda 2 L_{SSIM}+\lambda 3 L_{perceptual}+\lambda 4 L_{physical}$, стратегии поэтапного обучения и оптимизации параметров.

В третьей главе «Разработка алгоритма оптимизации и реализации» представлены:

1. Детали технической реализации архитектуры AIR-Net на Python/PyTorch, описание ключевых классов и конфигурационного управления.

2. Методы оптимизации вычислительной сложности (глубинные сепарабельные свертки, квантизация INT8), обеспечивающие высокую производительность.

3. Процедура экспериментальной валидации. Разработанный алгоритм сравнивался с современными аналогами (RetinexNet, Zero-DCE, EnlightenGAN, U-Net) на открытых наборах данных. Количественные результаты показали улучшение PSNR на 2.1 дБ и SSIM на 0.15. Качественный анализ подтвердил эффективное сохранение читаемости текста и деталей интерфейсов. Приведены результаты абляционных исследований, подтверждающие вклад каждого модуля, и оценка производительности (обработка изображения 512×512 за 5.1 мс на GPU).

В заключении подведены итоги исследования, сформулированы основные научные и практические результаты, подтверждающие достижение поставленной цели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача разработки эффективного алгоритма восстановления изображений плохо освещённых объектов. Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе анализа специфики проблемы разработана комплексная физико-математическая модель формирования цифрового изображения в условиях низкой освещённости, которая легла в основу проектирования алгоритма.
2. Предложена и обоснована инновационная физически обоснованная нейросетевая архитектура AIR-Net, реализующая принцип обратного моделирования процесса деградации через систему из восьми специализированных модулей.
3. Разработан и реализован алгоритм обучения сети, использующий составную функцию потерь с физическими ограничениями и специализированную аугментацию данных, что обеспечивает высокую эффективность и интерпретируемость.
4. Экспериментально доказано превосходство предложенного подхода над современными аналогами как по количественным метрикам (PSNR, SSIM), так и по качественным характеристикам, особенно в части сохранения деталей компьютерных изображений.
5. Обеспечена высокая производительность алгоритма, позволяющая применять его в системах реального времени, и его практическая готовность к интеграции в прикладные системы видеонаблюдения, медицинской визуализации и обработки цифрового контента.

Таким образом, цель исследования достигнута, задачи решены. Разработанный алгоритм представляет собой законченное научно-практическое решение, вносящее вклад в развитие методов обработки изображений и компьютерного зрения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1] Купчина, Е. В. Алгоритмы восстановления изображений / Д. В. Коршикова, Д. П. Кукин, Е. В. Купчина // Информационные технологии и системы 2023 (ИТС 2023) = Information Technologies and Systems 2023 (ITS 2023) : материалы Международной научной конференции, Минск, 22 ноября 2023 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск : БГУИР, 2023. – С. 149–150.

[2] Купчина, Е. В. Алгоритм восстановления изображений: принципы и примеры / Е. В. Купчина, Д. В. Коршикова // Информационные технологии и управление : материалы 61-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 21–25 апреля 2025 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2025. – С. 17–18.

[3] Купчина, Е. В. Разработка алгоритма восстановления компьютерных изображений в условиях недостаточной освещенности AIR-Net / Д. П. Кукин, Е. В. Купчина, А. А. Панасик // Информационные технологии и системы 2025 (ИТС 2025) : материалы Международной научной конференции, Минск, 19 ноября 2025 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск, 2025. – С. 171–172.