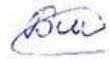


На правах рукописи



Бауков Андрей Алексеевич

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ВИДИМОСТИ,
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЕЛЕВИДЕНИЯ И
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

Специальность:

2.2.13. – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2025

Работа выполнена на кафедре радиоправления и связи ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина».

Научный руководитель: **Дмитриев Владимир Тимурович**,
доктор технических наук, доцент,
зав. кафедрой радиоправления и связи
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина»

Официальные оппоненты: **Приоров Андрей Леонидович**,
доктор технических наук,
профессор Ярославского государственного
университета им. П.Г. Демидова, г. Ярославль

Капустин Вячеслав Валериевич,
кандидат технических наук,
доцент Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники, г. Томск

Ведущая организация: **Закрытое акционерное общество «МНИТИ»**,
г. Москва

Защита состоится 23 мая 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и на сайте университета <https://rsreu.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Видеоизображения, используемые в телевизионных системах и системах технического зрения (СТЗ), часто могут быть получены в неблагоприятных погодных условиях. Атмосферные осадки в виде падающих частиц создают эффект динамических помех и могут привести к ограничению видимости объектов в кадре, а также к полному перекрытию падающими частицами обзора мелких деталей видеосцены. А такие явления, как туман, дым, смог, осадки на дальнем плане, а также пребывание части или всей сцены в тени или темноте приводят к статическим помехам, например, к уменьшению контрастности и цветовой насыщенности видеоизображений. При этом значительно ухудшается видимость предметов в кадре.

Поскольку для обработки видеоизображений часто используются различные алгоритмы СТЗ, то нежелательные эффекты, вызванные описанными динамическими и статическими помехами, могут привести к ошибкам и сбоям, что может вызвать аварийные ситуации при использовании СТЗ в беспилотных робототехнических комплексах или транспортных средствах. Кроме того, неблагоприятные погодные явления, присутствующие в кадре, ухудшают восприятие видеосцены наблюдателем или телезрителем, снижают дальность наблюдения, уменьшают информативность видеоизображений.

К снижению контрастности видеопоследовательностей приводят также и нелинейные искажения телевизионного сигнала при передаче по системам связи. Данные искажения являются причиной нарушения правильной передачи яркостной и цветовой информации, уменьшения его динамического диапазона.

Таким образом, целесообразным является включение в состав систем телевидения и технического зрения алгоритмов обработки видеоизображений, полученных в условиях недостаточной видимости, которые должны решать задачи снижения негативных влияний присутствия мешающих факторов в кадре.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время задачи улучшения качества и ослабления помех видеоизображений решаются, как правило, с помощью цифровых методов обработки. Большой вклад в разработку и исследование данных методов сделали такие отечественные учёные, как Б. А. Алпатов, Ю. В. Визильтер, И. С. Грузман, С. Ю. Желтов, В. А. Коротков, А. А. Потапов, В. А. Сойфер, В. В. Старовойтов, В. Т. Фисенко, Я. А. Фурман и другие. Работали в данной области и зарубежные учёные: N. Brewer, M. Ebner, K. Garg, R. Gonzalez, K. He, Z. Jia, D. Jobson, E. Land, N. Limare, S. Nayar, W. Pratt, R. Woods, K. Zuiderveld и другие.

Известен ряд работ, в которых описаны алгоритмы, решающие задачи обработки видеоизображений, подверженных искажениям в виде «следов» частиц атмосферных осадков в кадре. Также представлены алгоритмы, позволяющие увеличить контрастность изображений, в том числе в условиях тумана или дыма. Каждый из этих алгоритмов имеет свои особенности и недостатки. К недостаткам можно отнести недостаточную степень уменьшения видимости частиц осадков, возникновение различных искажений видеоизображений при обработке алгоритмами и другие. Поэтому актуальной является задача разработки новых алгоритмов обработки видеоизображений, которые в зависимости от вида и степени проявления мешающих факторов должны обеспечивать требуемое улучшение качества видеопоследовательности, и в которых должны быть значительно уменьшены недостатки известных подходов.

Цель работы и основные задачи. Целью является разработка алгоритмов обработки видеоизображений для применения в системах телевидения и СТЗ, которые позволят усиливать контраст видеопоследовательностей и уменьшать видимость частиц атмосферных осадков на видеоизображениях, полученных с помощью неподвижных камер, а также ослаблять проявления сопутствующих съёмке и обработке цветоярких искажений.

При этом предполагается решить следующие задачи:

- провести анализ особенностей, преимуществ и недостатков известных алгоритмов уменьшения видимости частиц атмосферных осадков и усиления контраста на видеоизображениях;
- обосновать применение показателей качества (ПК) видеоизображений, характеризующих контраст, полноту цвета, цветояркие и градиентные искажения, общее качество видеок кадров, правильность обнаружения частиц атмосферных осадков в целях оценки работы предложенных и известных алгоритмов обработки;
- провести статистический анализ характеристик изображений частиц дождя и снега, а также слабоконтрастных участков кадров;
- по результатам статистического анализа разработать процедуру обнаружения частиц осадков и процедуру автоматического определения оптимальной степени усиления контраста каждого участка кадра;
- разработать алгоритм уменьшения видимости частиц атмосферных осадков и алгоритм усиления контраста, в которых будет снижено проявление недостатков известных методов;
- выполнить экспериментальный сравнительный анализ разработанных и известных алгоритмов.

Объект исследования. Объектом исследования являются видеоизображения, снятые в сложных метеоусловиях и в условиях

недостаточной видимости, кадры которых искажены мешающими факторами в виде атмосферных осадков, тумана, дыма или тени.

Предмет исследования. Предметом исследования являются методы и алгоритмы уменьшения видимости частиц атмосферных осадков и усиления контраста видеоизображений.

Методы исследования. В представленной работе использованы такие математические и статистические методы, как метод семейства кривых Пирсона, метод минимизации целевой функции симплекс-алгоритмом Нелдера – Мида и метод моментов для аппроксимации гистограмм распределений, многокритериальный подход и метод анализа иерархий для оценки работы алгоритмов по нескольким ПК, методы цифровой обработки изображений, например, морфологические методы и методы гистограммной обработки.

Научная новизна. В процессе работы над диссертацией получены нижеперечисленные новые научные результаты:

1) выполнен статистический анализ геометрических и цветоярких параметров изображений частиц дождя и снега, в результате которого установлены законы распределений данных характеристик: бета-распределение II рода, обобщённое бета-распределение I рода, распределение Пирсона IV типа;

2) предложен алгоритм уменьшения видимости частиц атмосферных осадков, включающий разработанную процедуру обнаружения данных частиц, основанную на применении решающих правил выделения пикселей осадков из совокупности точек всех движущихся объектов кадра, которые обоснованы с помощью полученных законов распределения параметров изображений капель дождя и снежинок;

3) выполнен статистический анализ цветоярких характеристик пикселей слабоконтрастных участков изображений, в результате которого установлены законы распределений данных параметров: бета-распределение I рода и бимодальный закон распределения;

4) предложен алгоритм усиления контраста, включающий разработанные процедуру автоматического определения оптимальной степени усиления контраста каждого участка кадра и процедуру коррекции интенсивности и цветовой насыщенности с автоматическим определением степени коррекции для каждой точки кадра.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Законы распределений геометрических (размер, форма и ориентация) и цветоярких (интенсивность и насыщенность цвета пикселей) характеристик изображений частиц дождя и снега, а также параметров (насыщенность цвета и модуль вектора градиента интенсивности) точек слабоконтрастных участков кадров, установленные

в результате статистического анализа данных характеристик: бета-распределение I и II рода, распределение Пирсона IV типа, бимодальный закон распределения.

2) Алгоритм уменьшения видимости частиц атмосферных осадков на видеопоследовательностях, полученных с помощью неподвижных камер, обеспечивающий меньший нормированный уровень ошибок второго рода (до 67 % при обнаружении частиц снега и до 22 % при обнаружении частиц дождя) при сопоставимом или меньшем уровне ошибок первого рода, а также достигающий на 3...40 % лучших значений безэталонного критерия качества обработанных видеоизображений по сравнению с известными алгоритмами.

3) Алгоритм усиления контраста видеоизображений, полученных с помощью как неподвижных, так и подвижных камер, превосходящий известные алгоритмы по большинству из рассмотренных ПК, в том числе по многокритериальному показателю на 13...40 %.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в возможности применения разработанных алгоритмов для улучшения качества видеоизображений, снятых при неблагоприятных погодных явлениях и сложных условиях видимости, в системах телевидения, видеонаблюдения и технического зрения и реализации данных алгоритмов в реальном масштабе времени, а также в возможности использования результатов проведённого статистического анализа для других научных и практических целей.

Апробация результатов исследования производилась на следующих конференциях и форумах: XXIII, XXVI, XXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых учёных и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2018, 2021, 2023); 21-ая Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA» (Москва, 2019); Международная IEEE-Сибирская конференция по управлению и связи (SIBCON) (Томск, 2019); Международная научно-практическая конференция ICIT «Информационно-коммуникационные технологии в науке, образовании и производстве» (Саратов, 2019); Всероссийская научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления» (Москва, 2019); II, III, VI, VII Международный научно-технический Форум «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2019, 2020, 2023, 2024); 4-я международная научная конференция «Арктика: история и современность» (Санкт-Петербург, 2019); 3-я Международная научно-техническая конференция «Современные сетевые технологии» («Modern Network Technologies») (Москва, 2020); 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon (Рязань, 2022).

Публикации. По теме исследования, представленного в диссертации, опубликовано 22 работы, включая 5 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, и 5 работ, проиндексированных в базе Scopus. Получено свидетельство о государственной регистрации программы автоматического определения оптимальной степени усиления контраста на различных участках изображения.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 96 наименований, и приложения. Общий объём диссертации составляет 162 страницы, включающих 30 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена информация об актуальности и степени разработанности темы исследования, приведены цель работы и основные задачи, описаны методы исследования, а также его теоретическая и практическая значимость, представлены научная новизна, основные положения диссертации, выносимые на защиту, и сведения об апробации результатов.

В **первой главе** диссертации выполнен обзор и анализ известных алгоритмов уменьшения видимости частиц атмосферных осадков на видеоизображениях, которые основаны на: пространственной медианной фильтрации (алгоритм-1); фотометрической и динамической моделях дождя (алгоритм-2); использовании характеристик формы частиц дождя (алгоритм-3); временной кластеризации пикселей видеоизображения (алгоритм-4). Установлены особенности и недостатки данных подходов, например, снижение резкости и размытие границ объектов кадра, недостаточно полное или, наоборот, «ложное» обнаружение частиц, слабая степень уменьшения видимости обнаруженных пикселей осадков при использовании только двух соседних по времени кадра.

Также в первой главе рассмотрены следующие известные алгоритмы усиления контраста видеоизображений, основанные на: технологии Retinex (одномасштабный (SSR), одномасштабный в яркостном канале (SSR-V), многомасштабный (MSR), многомасштабный с восстановлением цвета (MSRCR) и его модификация (MSRCR-мод.), многомасштабный с сохранением цветности (MSRCP)); модели атмосферной оптики (Dehazing); гистограммной обработке (выравнивание гистограммы (HE), адаптивное выравнивание гистограммы (AHE), адаптивное выравнивание гистограммы с ограничением контраста (CLAHE) и его модификация (CLAHE-мод.)). В качестве недостатков известных подходов отмечены недостаточное усиление контраста тёмных или светлых областей кадра, усиление шумов и артефактов сжатия, ослабление цветовой насыщенности и осветление кадра.

Во **второй главе** представлены результаты статистического анализа динамических, геометрических и цветоярких параметров изображений частиц дождя/снега и пикселей слабоконтрастных участков кадров, а также описан процесс разработки алгоритмов уменьшения видимости частиц атмосферных осадков и усиления контраста.

По результатам анализа скорости движения изображений капель дождя и снежинок в кадре предложена модификация логического выражения процедуры предварительного обнаружения пикселей осадков с помощью выделения движущихся объектов при сопоставления трёх последовательных монохромных кадров:

$$(I_k(x, y) - I_{k-1}(x, y) \geq c) \vee (I_k(x, y) - I_{k+1}(x, y) \geq c), \quad (1)$$

где $I_k(x, y)$ – значение пикселя в позиции (x, y) k -го кадра, c – пороговое значение, равное 3 согласно рекомендациям авторов известных алгоритмов. Предложенная модификация позволяет дополнительно выделять до 25 % дождевых или снеговых пикселей на видеоданных с интенсивными осадками.

Бинарный массив, полученный с помощью процедуры порогового сравнения, имеет вид набора связанных групп точек, которые названы группами-кандидатами. Чтобы классифицировать данные группы-кандидаты, то есть определить, относятся ли они к классу частиц атмосферных осадков, или соответствуют посторонним движущимся объектам, необходимо применение специальных правил в составе разрабатываемого алгоритма. Такие правила сформированы по результатам статистического анализа геометрических и цветоярких особенностей изображений частиц осадков. При проведении анализа учтены следующие физические свойства атмосференных осадков:

1) частицы среднего и большого размера, которые вносят наибольший вклад в ухудшение видимости объектов сцены, как правило, имеют вытянутую по вертикали форму;

2) угол наклона к вертикальной оси практически одинаков для всех частиц одного видеокдра, поскольку направление ветра в координатах данного кадра, как правило, также одинаково.

Таким образом, в диссертации исследованы три геометрических параметра изображений частиц дождя и снега в кадре, расчёт которых выполнен с помощью метода геометрических моментов:

- 1) площадь S_p – количество пикселей в p -ой группе;
- 2) коэффициент формы, вычисляемый как соотношение полуосей аппроксимирующего эллипса $\Phi_p = a_p / b_p$;
- 3) отклонение $\theta'_p = \theta_p - \theta_0$ угла наклона p -ой частицы от среднего значения θ_0 ориентации всех частиц в кадре.

В процессе статистического анализа сформированы гистограммы распределения выбранных характеристик, а затем полученные гистограммы аппроксимированы известными теоретическими законами распределения. Для решения задачи аппроксимации на первом этапе определяется тип оцениваемого распределения с помощью метода семейства кривых Пирсона. Далее с целью точной оценки формы исследуемого эмпирического распределения определяются параметры функции плотности вероятности (ФПВ), аппроксимирующей данную гистограмму и соответствующей выбранному типу распределений классификации Пирсона. Для решения задачи точечной оценки параметров распределения предложено применение метода минимизации целевой функции, за которую принята функция критерия согласия Колмогорова, симплекс-алгоритмом Нелдера – Мида. В результате описанного статистического анализа установлено, что эмпирические распределения геометрических параметров частиц снега и дождя аппроксимируются бета-распределением II рода, обобщённым бета-распределением I рода и распределением Пирсона IV типа.

Также выполнен анализ двух цветоярких характеристик пикселей частиц осадков: интенсивности I_{Int} и насыщенности цвета I_{St} ; полученных при переходе к цветовой модели HSI (цветовой тон, насыщенность, интенсивность). Установлено, что распределения данных параметров описываются обобщённым бета-распределением I рода и бета-распределением II рода.

При разработке решающих правил выделения частиц осадков из совокупности всех движущихся объектов в кадре за нулевую гипотезу принято, что группа-кандидат точек представляет частицу. В качестве критериев проверки нулевой гипотезы используются значения характеристик изображений частиц осадков, законы распределения которых получены в процессе статистического анализа. Для проверки нулевой гипотезы в соответствии с принятым уровнем значимости соискателем определены значения каждого критерия, разделяющие область принятия гипотезы и критическую область. Объединением полученных ограничений геометрических и цветоярких параметров групп-кандидатов образованы решающие правила, которые для снеговых осадков имеют вид

$$\begin{aligned} & [S_p \geq 484] \vee [(7 \leq S_p < 69) \wedge (\Phi_p < 1,23)] \\ & \vee [(69 \leq S_p < 484) \wedge (\Phi_p < 1,24)] \quad (2) \\ & \vee [(69 \leq S_p < 484) \wedge ((\theta'_p < -67,8^\circ) \vee (\theta'_p \geq 70,8^\circ))], \\ & [I_{Int-p}(x, y) < 56,6] \vee [I_{St-p}(x, y) \geq 54,5]. \quad (3) \end{aligned}$$

Если для (x, y) -го пикселя p -ой совокупности логические выражения (2) и (3) ИСТИННЫ, то разрабатываемым алгоритмом будет принято решение, что данная точка изображения не относится к осадкам, и её необходимо исключить из дальнейшего действия алгоритма, то есть нулевая гипотеза отвергается.

Аналогичные решающие правила для обнаружения частиц дождя:

$$\begin{aligned} & [S_p \geq 727] \vee [(6 \leq S_p < 76) \wedge (\Phi_p < 1,29)] \\ & \vee [(76 \leq S_p < 727) \wedge (\Phi_p < 1,45)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \vee [(76 \leq S_p < 727) \wedge ((\theta'_p < -28,9^\circ) \vee (\theta'_p \geq 31,7^\circ))], \\ & [I_{Int-p}(x, y) < 52,9] \vee [I_{St-p}(x, y) \geq 82]. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, разработанный алгоритм уменьшения видимости частиц атмосферных осадков, функциональная схема которого представлена на рисунке 1, включает два основных этапа:

- 1) обнаружение капель дождя или снежинок в текущем кадре;
- 2) удаление из кадра пикселей обнаруженных частиц.

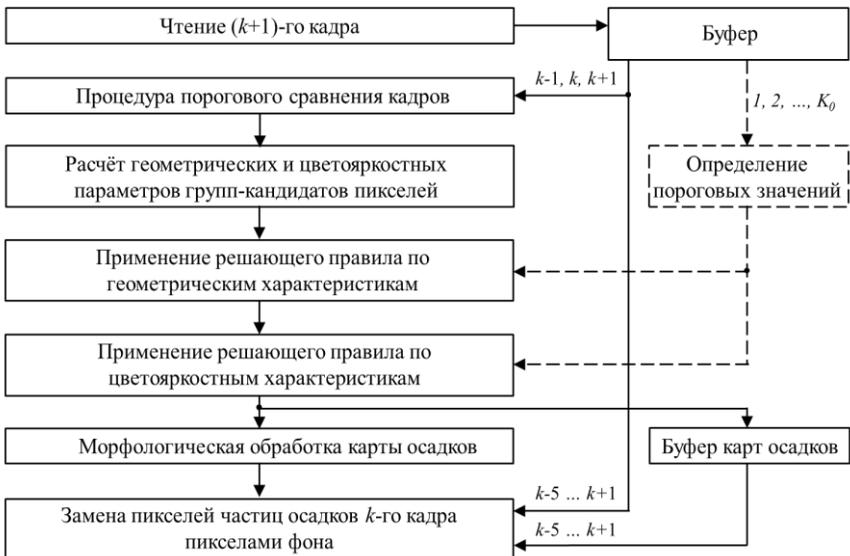


Рисунок 1 – Схема алгоритма снижения видимости частиц осадков

Если в условиях снега или дождя имеется возможность перед проведением основной съёмки получить кадры, на которых двигаются только частицы осадков (с похожим задним планом), то эти кадры можно использовать в качестве обучающей последовательности для

предложенного алгоритма с целью уточнения пороговых значений в универсальных решающих правилах (2), (3), (4) и (5) обнаружения изображений частиц для каждой конкретной ситуации. При этом автоматически проводится статистический анализ параметров снежинок или капель дождя, подобный представленному в диссертации.

С целью разработки алгоритма усиления контраста видеоизображений проведён статистический анализ характеристик (насыщенность цвета I_{St} и модуль вектора градиента M интенсивности) точек слабоконтрастных областей изображений, по итогам которого выявлены законы распределения исследуемых параметров: бимодальный закон с компонентами в виде бета-распределения I рода и нормального распределения для I_{St} ; бета-распределение I рода для M .

За основу разработанного подхода взят алгоритм CLANE, который позволяет усиливать контраст как в осветлённых, так и в затемнённых областях изображений, внося при этом меньше искажений по сравнению с другими алгоритмами на основе гистограммной обработки. В данном методе коэффициент ограничения гистограммы ε , который определяет степень усиления контраста, является глобальным, то есть одинаковым для всего кадра, и задаётся пользователем. Разработана процедура автоматического определения оптимальной степени усиления контраста каждой области кадра на основе сведений об информативности (градиент) и искажениях (насыщенность) данной области. В предложенной процедуре осуществляется интеллектуальный выбор параметра ε_p в зависимости от степени влияния на p -й прямоугольный блок кадра мешающих факторов, ухудшающих различимость предметов видеосцены:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{\max} (\omega \varepsilon_{M-p} + (1-\omega) \varepsilon_{St-p}), \quad (6)$$

где $\varepsilon_{M-p} = f_M(\overline{M}_p) / f_{M-\max}$, $\varepsilon_{St-p} = f_{St}(\overline{I}_{St-p}) / f_{St-\max}$ – составляющие ограничения, $f_{M-\max}$, $f_{St-\max}$ – максимальные значения функций плотности вероятности f_M , f_{St} , которыми в процессе статистического анализа аппроксимированы распределения значений модуля вектора градиента и насыщенности пикселей соответственно, \overline{M}_p и \overline{I}_{St-p} – усреднённые по блоку значения этих характеристик, ω – весовой коэффициент, $\varepsilon_{\max} = 0,02$ – максимальный параметр ограничения.

Поскольку на видеоизображениях, снятых в условиях тумана или дыма, наблюдаются увеличение яркости и снижение насыщенности цвета, которые ещё больше усугубляются после выравнивания гистограммы, предложено использование процедуры коррекции цветояркихостных искажений, которая представляет собой поэлементное умножение

значений пикселей компонент $I_{Int}(x, y)$ и $I_{St}(x, y)$ кадра с увеличенным контрастом на карты коэффициентов

$$K_{Int}(x, y) = B_{Int} \cdot \varepsilon_p \cdot I_{Int_n}(x, y) + 1, \quad (7)$$

$$K_{St}(x, y) = A_{St} \cdot \varepsilon_p^2 + B_{St} \cdot \varepsilon_p \cdot I_{St_n}(x, y) + (150 - 0,02A_{St} - B_{St}) \cdot \varepsilon_p, \quad (8)$$

где $I_{Int_n}(x, y)$, $I_{St_n}(x, y)$ – нормированные значения интенсивности и насыщенности пикселей, A_{St} , B_{Int} , B_{St} – константы. Вид функций (7) и (8) обоснован с помощью граничных положений, описанных в диссертации.

Разработанный алгоритм усиления контраста можно представить в виде выполняемых для каждого кадра процедур:

- 1) автоматического определения оптимальной степени усиления контраста;
- 2) увеличения контрастности, представляющая собой алгоритм адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контраста;
- 3) коррекции интенсивности и цветовой насыщенности.

На рисунке 2 представлена схема разработанного алгоритма.

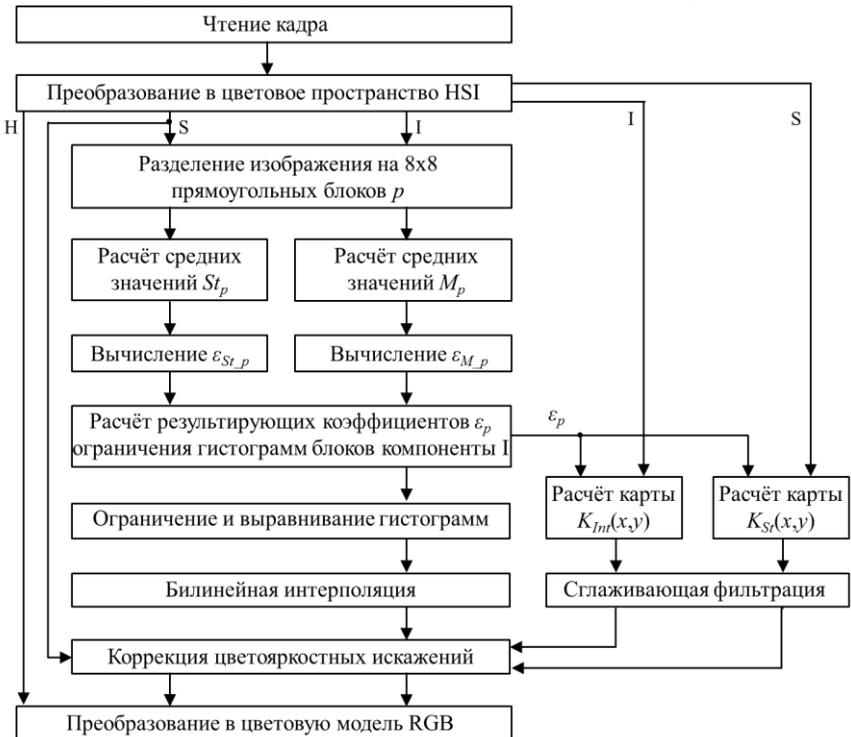


Рисунок 2 – Функциональная схема алгоритма усиления контраста

В **третьей главе** в целях оценки работы предложенных и известных алгоритмов обработки обосновано применение известных эталонных и безэталонных объективных ПК, характеризующих:

- контраст (коэффициент контраста Михельсона C_M , глобальный фактор контраста Q_{GCF});
- полноту цвета Q_{Cif} ;
- цветояркие и градиентные искажения (сквозная цветовая разность в цветовых пространствах CIELAB $\overline{\Delta E}_{Lab}$ и HSI $\overline{\Delta E}_{HSI}$, сквозное отношение максимального сигнала к шуму Q_{PSNR_Lab} и Q_{PSNR_HSI} , сквозная оценка качества в пространственно-частотной области ΔW , индекс структурного сходства Q_{SSIM} , показатель качества границ Q_{QE} , оценка взаимной информации об особенностях градиентов изображений Q_{FMI});
- общее качество видеокадров (оценка качества изображения на основе восприятия Q_{PIQUE});
- правильность обнаружения частиц атмосферных осадков на видеоизображениях (нормированные уровни ошибок первого и второго рода K_1 и K_2).

Предложен и обоснован с помощью метода анализа иерархий многокритериальный ПК, равный весовой сумме

$$Q = 0,423C_M + 0,123Q_{Cif} / 100 + 0,227Q_{SSIM} + 0,227(1 - Q_{PIQUE} / 100). \quad (9)$$

Выполнена оценка оптимальных значений параметров разработанного алгоритма усиления контраста, которые определены с применением метода максимизации значений многокритериального ПК симплекс-алгоритмом Нелдера – Мида и равны $\omega = 0,74$, $A_{Si} = 0,007$, $B_{int} = -10,09$, $B_{St} = -813,87$.

По итогам экспериментального сравнительного анализа разработанного и известных алгоритмов уменьшения видимости частиц атмосферных осадков установлено, что предложенный алгоритм обеспечивает меньший нормированный уровень ошибок второго рода (на 0,57...66,7 % при обнаружении частиц снега и на 5,7...21,9 % при обнаружении частиц дождя) при сопоставимом или меньшем уровне ошибок первого рода, а также показывает на 3,2...40 % лучшие значения безэталонного ПК PIQUE обработанных видеоизображений по сравнению с известными подходами.

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчётов показателей качества сравниваемых алгоритмов, усреднённых по всем анализируемым видеосценам.

Таблица 1 – Значения ПК алгоритмов уменьшения видимости частиц осадков при обработке видеоизображений со снегом

	алгоритм-1	алгоритм-2	алгоритм-3	алгоритм-4	предложенный
$K_1, \%$	–	0,61	0,35	7,46	0,81
$K_2, \%$	–	45,7	77,85	11,7	11,13
Q_{PIQUE}	77,73	50,71	52,68	50,83	47,24

Таблица 2 – Значения ПК алгоритмов уменьшения видимости частиц осадков при обработке видеопоследовательностей с дождём

	алгоритм-1	алгоритм-2	алгоритм-3	алгоритм-4	предложенный
$K_1, \%$	–	0,79	0,43	5,68	0,57
$K_2, \%$	–	28,91	16,72	12,67	7,01
Q_{PIQUE}	79,34	51,76	49,19	49,8	47,6

По итогам экспериментального сравнения алгоритмов усиления контраста установлено, что разработанный подход:

- сопоставим по характеристикам контрастности обработанных кадров (контрасту Михельсона и глобальному фактору контраста) с модификацией алгоритма CLANE и выигрывает по данным ПК у всех остальных рассмотренных известных подходов (за исключением АНЕ) до 85,4 % и 99,4 % соответственно; при этом обработка видеоизображений алгоритмом АНЕ характеризуется чрезмерно сильным увеличением контрастности, сопровождающимся усилением шумов, артефактов сжатия и цветоярких искажений;

- обеспечивает выигрыш по ПК полноты цвета в 2...3 раза по сравнению с другими известными подходами, за исключением алгоритма Dehazing, обеспечивая значительно меньшие искажения цвета в сравнении с этим подходом;

- показывает улучшение значений эталонных ПК обработанных видеоизображений Q_{SSIM} – на 18,1...63,6 %, Q_{FMI} – на 3,1...15,5 %, Q_{QE} – до 130 % (около 1 % уступая лишь алгоритмам MSR и MSRCR), $\overline{\Delta E}$ в цветовых пространствах CIELAB и HSI – на 8,6...18,9 % и 9,1...49,4 % соответственно, ΔW – на 3,3...7,3 % по сравнению с известными методами;

- обеспечивает улучшение значений безэталонной оценки качества обработанных видеоизображений Q_{PIQUE} на 3,2...29,6 %, а также значений многокритериального ПК на 12,9...39,9 % относительно известных подходов (без учёта алгоритма АНЕ, показывающего чрезмерное усиление контраста и шумов, по сравнению с которым данное улучшение составляет около 1 %).

В таблицах 3 и 4 представлены значения многокритериального ПК рассмотренных алгоритмов увеличения контрастности, усреднённые по всем используемым сюжетам.

Таблица 3 – Значения ПК работы алгоритмов усиления контраста на основе технологии Retinex и модели атмосферной оптики

	SSR	MSR	MSRCR	MSRCR-мод.	MSRCP	Dehazing
Q	0,363	0,383	0,389	0,427	0,427	0,45

Таблица 4 – Значения ПК работы алгоритмов усиления контраста на основе метода преобразования гистограмм изображений

	HE	AHE	CLAHE	CLAHE-мод.	Предложенный
Q	0,411	0,503	0,442	0,444	0,508

Установлено, что предложенный алгоритм уменьшения видимости частиц осадков позволяет обрабатывать кадры размером 1280×720 пикселей со скоростью ≈ 7 кадров/с, а предложенный алгоритм усиления контраста – со скоростью ≈ 18 кадров/с, при реализации данных алгоритмов на компьютере с процессором Intel Core i5-3550 3,3ГГц. При этом использование графических процессоров или ПЛИС позволит значительно увеличить скорость обработки и обеспечить реализацию разработанных алгоритмов в реальном масштабе времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертации получены следующие результаты:

1. Произведён анализ скорости движения частиц атмосферных осадков на видеоизображениях, по результатам которого предложена модифицированная процедура порогового сравнения трёх последовательных кадров для первичного обнаружения пикселей осадков.

2. Выполнен статистический анализ геометрических (размер, форма и ориентация) и цветоярких (интенсивность и насыщенность цвета пикселей) параметров изображений частиц дождя и снега, в результате которого установлены законы распределений данных характеристик и обоснованы решающие правила выделения пикселей частиц осадков из совокупности точек всех движущихся объектов кадра.

3. Выполнен статистический анализ характеристик (насыщенность цвета и модуль вектора градиента интенсивности) пикселей слабоконтрастных участков изображений, в результате которого установлены законы распределений данных параметров и разработана процедура автоматического определения оптимальной степени усиления контраста каждого участка кадра.

4. Разработана процедура коррекции интенсивности и насыщенности цвета обработанного видеокadra с автоматическим определением степени коррекции для каждого пикселя.

5. Разработан алгоритм уменьшения видимости атмосферных осадков, позволяющий снизить влияние динамических помех на видеоизображениях, снятых неподвижными камерами.

6. Разработан алгоритм усиления контраста, позволяющий снизить степень проявления статических помех на видеоданных, снятых как неподвижными, так и подвижными камерами.

7. Выполнен экспериментальный сравнительный анализ разработанных и известных алгоритмов, в результате которого установлено преимущество над известными подходами практически по всем рассмотренным ПК.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. Кириллов, С. Н. Алгоритмы формирования телевизионного изображения улучшенного качества для дистанционного управления робототехническими комплексами / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, А. А. Бауков, П. Н. Сконников // Радиотехника. – 2019. – Т. 83. – № 5(II). – С. 205-214.

2. Кириллов, С. Н. Сравнение алгоритмов улучшения низкоконтрастных изображений и оценок качества комплексирования разноспектральных изображений для цифровых систем видеонаблюдения / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, П. Н. Сконников, А. А. Бауков // Цифровая обработка сигналов. – 2019. – № 1. – С. 52-58.

3. Дмитриев, В. Т. Многокритериальный синтез алгоритма обнаружения частиц дождя на видеоизображениях в цифровых системах телевидения / В. Т. Дмитриев, А. А. Бауков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 79. – С. 20-30.

4. Дмитриев, В. Т. Алгоритм обнаружения атмосферных осадков для задач компьютерной обработки видеоизображений / В. Т. Дмитриев, А. А. Бауков // Программирование. – 2023. – № 3. – С. 13-25.

5. Дмитриев, В. Т. Разработка алгоритма улучшения контраста видеоизображений для применения в системах цифрового телевидения / В. Т. Дмитриев, А. А. Бауков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 84. – С. 77-87.

Работы, входящие в базу данных Scopus:

6. Kirillov, S. Improved Quality Video Transmission by Optical Channel from Underwater Mobile Robots / S. Kirillov, V. Dmitriev, L. Aronov, P. Skonnikov, A. Baukov // Сборник трудов конференции ICIT-2019 “Recent Research in Control Engineering and Decision Making”, серия “Studies in Systems, Decision and Control”. – 2019. – Vol. 199. – Pp. 227-239.

7. Kirillov, S. N. Contrast Enhancement Algorithm Modification and Comparative Analysis of Image Fusion Quality Indices for Enhanced Vision Systems of Robotic Complexes / S. N. Kirillov, A. A. Baukov, P. S. Pokrovsky, P. N. Skonnikov // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – 2019. – Pp. 1-6.

8. Kirillov, S. N. Multispectral image processing algorithms for enhanced vision systems in the Arctic / S. N. Kirillov, P. S. Pokrovskij, A. A. Baukov, P. N. Skonnikov // Proceedings of 4th International Scientific Conference “Arctic: History and Modernity”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 302. – Pp. 1-8.

9. Kirillov, S. N. Adaptive software-configurable system development to receive, transmit and process information / S. N. Kirillov, A. Lisnichuk, A. V. Batishchev, L. V. Aronov, A. A. Baukov // Сборник трудов 3-й Международной научно-технической конференции «Современные сетевые технологии» («Modern Network Technologies, MoNeTeC»). – 2020.

10. Dmitriev, V. T. An Algorithm for Detecting Precipitation in Computer Processing of Video Images / V. T. Dmitriev, A. A. Baukov // Programming and Computer Software. – 2023. – Vol. 49. – No. 3. – Pp. 140-150.

Работы, опубликованные в других изданиях:

11. Бауков, А. А. Модифицированный алгоритм улучшения качества видеоизображений при действии мешающих факторов для систем связи / А. А. Бауков // Сборник материалов XXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях». – 2018. – Т.1. – С.127-129.

12. Кириллов, С. Н. Сравнение оценок качества комплексирования разноспектральных изображений и алгоритмы улучшения качества низкоконтрастных изображений для систем видеонаблюдения / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, П. Н. Сконников, А. А. Бауков // Сборник докладов 21-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019». – 2019. – С. 403-408.

13. Покровский, П. С. Алгоритм обработки изображений в условиях недостаточной видимости для передачи по системам связи / П. С. Покровский, А. А. Бауков // Сборник трудов II Международного научно-технического Форума «Современные технологии в науке и образовании». – 2019. – Т. 1. – С. 161-166.

14. Кириллов, С. Н. Алгоритм уменьшения влияния атмосферных осадков на качество видеоизображений в системах управления / С. Н. Кириллов, П. С. Покровский, А. А. Бауков // Сб. тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления». – 2019. – С. 34-35.

15. Бауков, А. А. Разработка алгоритма интеллектуальной обработки видеоизображений при действии мешающих факторов для систем связи / А. А. Бауков // Сборник материалов V научно-технической конференции магистрантов РГРТУ. – 2019. – С. 6.

16. Бауков, А. А. Разработка решающего правила обнаружения частиц дождя в целях улучшения качества видеоизображений / А. А. Бауков // Сборник трудов III Международного научно-технического Форума «Современные технологии в науке и образовании». – 2020. – Т. 1. – С. 157-163.

17. Бауков, А. А. Обоснование решающих правил детектирования частиц атмосферных осадков для алгоритма интеллектуальной обработки видеоизображений / А. А. Бауков // Сборник материалов VI научно-технической конференции магистрантов РГРТУ. – 2020. – С. 4.

18. Бауков, А. А. Разработка показателя качества алгоритмов уменьшения видимости частиц дождя на видеоизображениях / А. А. Бауков // Сборник материалов XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях». – 2021. – С. 86-88.

19. Dmitriev, V. Procedure for Detecting Rain and Snow Particles on Digital Television Images / V. Dmitriev, A. Baukov // Сборник трудов 32-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению GraphiCon-2022. – 2022. – Рр. 455-461.

20. Бауков, А. А. Многокритериальный анализ методов увеличения контрастности, основанных на преобразовании гистограмм изображений / А. А. Бауков // Сборник трудов VI Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании». – 2023. – Т. 1. – С. 202-207.

21. Бауков, А. А. Алгоритм улучшения качества видеоизображений, снятых в условиях недостаточной видимости / А. А. Бауков // Сборник материалов XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях». – 2023. – С. 134-136.

22. Бауков, А. А. Сравнение результатов работы алгоритмов усиления контраста по критериям качества изображений в системах видеосвязи / А. А. Бауков // Сборник трудов VII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании». – 2024. – Т. 1. – С. 134-138.

Свидетельство о регистрации ПО:

23. Дмитриев, В. Т. Программа автоматического определения оптимальной степени усиления контраста на различных участках изображения / В. Т. Дмитриев, А. А. Бауков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024614417.

Бауков Андрей Алексеевич

**АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ВИДИМОСТИ,
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЕЛЕВИДЕНИЯ И
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____.____.2025 г. Формат бумаги 60x84 1/16.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.