

На правах рукописи



ЕРШОВ Максим Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ
ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ВИДЕОАНАЛИТИКИ**

Специальность: 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ») на кафедре «Автоматика и информационные технологии в управлении».

Научный руководитель: **Бабаян Павел Варганович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «РГРТУ», г. Рязань, заведующий кафедрой автоматике и информационных технологий в управлении

Официальные оппоненты: **Приоров Андрей Леонидович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль, профессор кафедры инфокоммуникаций и радиофизики

Романчук Виталий Александрович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань, профессор кафедры информатики, вычислительной техники и методики преподавания информатики

Ведущая организация: ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва

Защита состоится **3 марта 2021 г. в 14 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте <http://rsreu.ru/>.

Автореферат разослан « » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.01
доктор технических наук, доцент



Пруцков Александр
Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наметилась устойчивая тенденция, связанная с широким внедрением систем видеоаналитики в различные сферы жизни человека. Значительный прогресс в этой области обусловлен появлением все более совершенных устройств получения изображений, вычислительных средств и каналов коммуникаций. Одними из перспективных и актуальных задач, решаемых системами видеоаналитики, являются: обнаружение и прослеживание в заданной части пространства объектов интереса или посторонних объектов; контроль появления человека в опасных зонах; подсчет числа посетителей или пассажиров; подсчет в реальном времени плотности автомобильного потока на дорогах; определение степени занятости парковочных зон; фиксация нарушений ПДД и опасных ситуаций на дорогах.

С задачей оценивания параметров движущихся объектов сталкиваются при разработке бортовых систем обработки информации и управления, в частности систем автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Также данная задача относится к области транспортной аналитики, что связано с постоянно растущей нагрузкой на обширную дорожно-транспортную инфраструктуру, решение же требует больших трудозатрат.

Системы транспортной аналитики являются одной из наиболее важных составляющих любой интеллектуальной транспортной системы (ИТС). ИТС представляет собой систему управления, интегрирующую современные информационные и телематические технологии. Создание подобных систем требует автоматизации процесса принятия решений с целью эффективного управления инфраструктурой, конкретным транспортным средством или группой транспортных средств. Развитие ИТС является одним из приоритетных направлений эволюции транспортных систем в мире и, в частности, в России, что декларирует решение ЕАЭС от 26 декабря 2016 года № 19.

Система видеоаналитики позволяет получать информацию, которая может включать число объектов, движущихся в интересующих направлениях; плотность потока объектов; параметры объектов: скорость, размеры, тип. Фактически без информации, получаемой от систем транспортной аналитики, невозможно обоснованное принятие решений в ИТС. Также требуются оперативность и точность такой информации при создании адаптивных систем управления. Разрабатываются специальные технические средства, называемые детекторами, которые осуществляют контроль над состоянием движения автотранспортных средств. С помощью детекторов можно обеспечивать динамическое и стратегическое управление движением, а также получать необходимую информацию о параметрах потока автомобилей.

Данная диссертационная работа посвящена разработке и исследованию алгоритмов оценки параметров движущихся объектов для использования в детекторе транспортных средств. Задачу предлагается решить путем разработки эффективных алгоритмов обнаружения и оценки параметров объектов – транспортных средств (ТС), при этом данные алгоритмы должны быть оптимизированы с точки зрения вычислительных затрат для применения на внутренней платформе интеллектуальных видеодатчиков.

Несмотря на то, что задачи обнаружения и оценки параметров объектов в своей общей постановке и не являются новыми, научное сообщество продолжает вести активную работу, направленную на преодоление недостатков в работе систем видеоаналитики. Об этом говорит анализ материалов всероссийских и международных конференций («Техническое зрение в системах управления», «Цифровая обработка сигналов и ее применение», «IEEE Computer Vision and Pattern Recognition», «IEEE International Conference on Computer Vision», «International Conference on Image Processing», «International Conference on Image Analysis and Recognition», «International Conference on Intelligent Transportation Systems» и др.) и ведущих журналов («Компьютерная оптика», «Автометрия», «Цифровая обработка сигналов», «Pattern Recognition», «Journal of Electronic Imaging», «International Journal of Computer Vision», «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence», «Pattern Recognition Letters», «Machine Vision and Applications» и др.). С учетом вышесказанного тема диссертационной работы является актуальной, а ее решение – востребованным.

Степень разработанности темы. Развитие систем видеоаналитики неразрывно связано с общим прогрессом теории и методов компьютерного зрения. Несмотря на широту спектра практических приложений видеоаналитики, можно установить, что в основе большинства из них лежат задачи обнаружения, распознавания, оценки параметров и прослеживания заданных или заранее неизвестных объектов в видеопотоке. Решению названных задач уделяется большое внимание в отечественной и зарубежной литературе. Значительный вклад в разработку методов и алгоритмов решения задач оценки параметров объектов, а также тесно связанных с ними подзадач внесли работы таких ученых, как Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, А.П. Трифонов, Ю.В. Визильтер, В.К. Баклицкий, И.С. Грузман, Е.П. Путятин, В. Coifman, W.K. Pratt, T. Bouwmans, T.Q. Pham, Zhong-ke Shi, J.M. Menendez и др.

Следует отметить, что в научной литературе рассматриваются способы построения принципиально новых алгоритмов анализа видеопоследовательностей, при этом вопросы обеспечения приемлемой вычислительной сложности остаются без должного внимания. Кроме того, в недостаточной степени проработана проблема автоматического анализа текущего характера сцены и условий наблюдения. На рынке представлены готовые технические средства, однако качество решений многих типовых задач, не говоря уже о перспективных, остается недостаточно высоким. Большое число ложных срабатываний и пропусков объектов приводит к необходимости контроля работы системы видеоаналитики человеком-оператором. Основные причины, приводящие к получению неудовлетворительных результатов работы, заключаются в следующем:

- отсутствуют достаточно универсальные алгоритмы анализа видеосюжетов и изображений, обеспечивающие приемлемое качество решения задач анализа видеопоследовательностей в самом широком диапазоне сцен и условий наблюдения;

- после первоначальной настройки система видеоаналитики не всегда способна адаптироваться к изменению условий наблюдения;

– многие современные алгоритмы анализа видео и изображений требуют чрезмерно большого объема вычислений, поэтому зачастую им на практике предпочитают более простые и менее эффективные алгоритмы.

Таким образом, существует научная проблема, связанная с необходимостью поиска новых подходов и алгоритмов для повышения степени автоматизации систем транспортной аналитики. Требуется разработать эффективные алгоритмы обработки данных с точки зрения качества и скорости решения задачи обнаружения объектов и точности оценки их параметров.

Цель и задачи работы. Цель диссертационного исследования состоит в разработке и исследовании эффективных алгоритмов оценивания параметров движущихся объектов в задачах видеоаналитики, позволяющих повысить вероятность обнаружения объектов и точность оценки их параметров в транспортных системах с применением интеллектуальных камер.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные задачи:

- анализ существующих методов обнаружения и оценивания параметров движущихся объектов в задачах видеоаналитики;
- разработка алгоритма обнаружения и оценивания параметров движущихся объектов;
- разработка алгоритма обнаружения остановившихся объектов;
- реализация алгоритмов на платформе интеллектуальных видеокамер;
- исследование эффективности разработанных алгоритмов.

Научная новизна

1. Разработан адаптивный алгоритм оценивания и обновления фоновой составляющей изображения, отличающийся учетом физики процесса движения объекта интереса через зону обработки.

2. Разработан алгоритм выделения движущегося объекта на изображении на основе вычитания оценки фона, отличающийся совместным анализом разностного и текущего изображений на этапе сегментации.

3. Разработан алгоритм слежения за объектом на основе метода оптического потока, инициализированного особыми точками. Алгоритм отличается процедурой фильтрации отслеживаемых точек с учетом изменения параметров объекта и его точек в процессе слежения. Разработан алгоритм прослеживания сегмента объекта, отличающийся вычислительной эффективностью.

4. Разработан алгоритм обнаружения остановившегося объекта в заданной области на основе адаптивного оценивания фоновой составляющей путем построения очереди оценок фона для разных малых промежутков времени. Алгоритм отличается вычислением разностного изображения на основе первой и последней оценок фона.

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертации рассмотрена и решена задача обнаружения и оценивания параметров объектов применительно к системам видеоаналитики: предложены и исследованы новые алгоритмы анализа данных, включая алгоритмы обнаружения остановившихся

и движущихся объектов, оценивания их параметров с использованием интеллектуального видеодатчика при различных условиях наблюдения.

Практическая ценность работы состоит в том, что предложенные алгоритмы обнаружения и оценивания параметров объектов в видеопоследовательности применимы для реализации на внутренней платформе интеллектуальных камер, что позволяет сократить затраты на каналы передачи данных и вычислительные серверы. Отдельное практическое значение имеет разработанное программное обеспечение для видеоаналитики.

Внедрение результатов диссертации. Результаты исследований использованы при выполнении ряда научно-исследовательских работ, проводимых в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по заказам Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (НИР 19-14Г, НИР 2-16Г, НИР 10-16Г, НИР 1-19Г), что подтверждается соответствующим актом внедрения. Разработанное программное обеспечение для видеоаналитики внедрено в ООО «ТехноГрупп» (г. Рязань), что подтверждается актом внедрения. Также на программы, в которых реализованы разработанные алгоритмы, получены свидетельства о государственной регистрации.

Методы исследования. Теоретические исследования в настоящей работе выполнены на основе методов теории статистических решений, теории вероятностей, теории цифровой обработки сигналов и изображений. Моделирование и экспериментальные исследования предлагаемых алгоритмов выполнялись как с использованием заранее записанных натуральных видеосюжетов, так и на внутренней платформе видеокamer при наблюдении за разными участками дорог в режиме реального времени.

Степень достоверности. Достоверность результатов и выводов диссертации подтверждается корректным использованием математического аппарата, результатами моделирования на ЭВМ и экспериментальными исследованиями, результатами сравнения с подобными алгоритмами из известных источников.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- всероссийских научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань – 2016, 2017, 2018);
- всероссийских научно-технических конференциях «Техническое зрение в системах управления» (Москва – 2017, 2019);
- международных конференциях «Mediterranean Conference on Embedded Computing» (Бар – 2017, Будва – 2018, 2020).
- международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань – 2017);
- международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва – 2018);
- международном научно-техническом форуме «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань – 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи, индексируемые в международных реферативных базах данных Web of

Science и/или Scopus; 2 статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Результаты исследований отражены в 4 отчетах о НИР.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)» в части следующих пунктов:

– пункт 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации;

– пункт 5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

Личный вклад. Автор диссертации сформулировал основные идеи разработанных подходов и алгоритмов, принимал участие в разработке и регистрации программного обеспечения, занимался проведением экспериментальных исследований и обработкой их результатов, принимал участие в написании научных статей в составе авторского коллектива, представлял доклады по теме диссертации на конференциях. Положения, выносимые на защиту и составляющие научную новизну диссертационной работы, получены автором лично.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный алгоритм обнаружения и оценивания параметров движущегося объекта (базовый алгоритм) решает поставленные задачи в режиме реального времени на базе интеллектуальной камеры, частота правильных обнаружений составляет 91,2 % при частоте ошибок первого и второго рода соответственно 1,2 % и 8,8 %, частота ошибок классификации составляет 16,2 %.

2. Разработанные алгоритмы слежения за объектом на основе метода оптического потока и прослеживания сегментов позволяют увеличить частоту правильных обнаружений по сравнению с базовым алгоритмом на 5 % при уменьшении суммарной частоты ошибок на 6 %, при этом увеличение частоты правильных обнаружений достигает 10 % по сравнению с широко используемыми алгоритмами, основанными на различных методах оценивания фона.

3. Совмещение в рамках единого подхода алгоритма обнаружения объекта на изображении и алгоритма межкадрового отслеживания перемещения объекта обеспечивает повышение точности оценки параметров объектов: частота ошибок классификации сократилась на 5-7 % по сравнению с базовым алгоритмом.

4. Разработанный алгоритм обнаружения остановившегося объекта на основе очереди оценок фона решает поставленную задачу в режиме реального времени, частота правильных обнаружений составляет 100 % при суммарной частоте ошибок (ложных обнаружений и пропусков), равной 7,5 %.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы (221 источник), изложенных на 231 странице, содержит 45 рисунков, 16 таблиц и 3 приложения.

Первая глава диссертации является вводной. В ней приведены обзор и анализ проблем и задач, возникающих в системах видеоаналитики, а также подходов к их решению. Сделаны следующие выводы.

1. Проблема анализа последовательностей изображений с целью оценки движения объектов интереса актуальна в различных областях. Развитие же систем видеоаналитики неразрывно связано с общим прогрессом теории и методов технического зрения, решающих задачи обнаружения, распознавания, оценивания параметров и прослеживания известных или случайных объектов.

2. Алгоритмы обнаружения и оценивания параметров объектов в системе видеоаналитики должны быть реализованы на внутренней платформе интеллектуальной видеокамеры. Разрабатываемые подходы предполагается использовать в сфере транспортной аналитики для оценки параметров транспортных потоков в режиме реального времени.

3. Дана качественная постановка задач, которые необходимо решить в ходе исследования. Можно выделить следующие основные моменты:

- первая задача связана с оцениванием глобальных параметров транспортного потока для каждой полосы движения: занятости дороги, среднего интервала следования ТС; количества ТС в потоке; средней скорости потока; количества ТС разных типов;

- вторая задача системы контроля дорожного движения предполагает обнаружение остановившихся ТС, которые могут являться помехой для движения и представлять собой серьезную угрозу;

- при разработке алгоритмов основной упор следует сделать на их вычислительную эффективность, так как ресурсы видеокамер сильно ограничены.

4. Выполнен обзор задач, решаемых системами видеоаналитики с использованием технического зрения. Рассмотрены проблемы текущего состояния исследований в этой области, выделены решаемые задачи цифровой обработки изображений: предобработка изображения; сегментация изображения; обнаружение объектов; слежение или сопровождение; оценивание параметров объектов; распознавание и классификация. Очевидно, что цель, поставленная перед диссертационным исследованием, может быть достигнута комплексным решением задач обработки изображений.

5. Проведен обзор методов и алгоритмов обнаружения и оценки параметров объектов в системах видеоаналитики:

- выделены разнотипные подходы, позволяющие решать исследуемую проблему с использованием датчиков различного типа, путем комплексирования информации от датчиков разного типа, на базе кооперативных интеллектуальных транспортных систем и др.;

- отмечены достоинства и недостатки разных подходов;

– выделены и рассмотрены методы обработки изображений для решения задач обнаружения, слежения и оценки параметров объектов: корреляционно-экстремальные методы; пространственная и пространственно-временная фильтрация; сегментация и др.

б. Для обнаружения объектов и оценки их параметров предлагается разработать алгоритмы, основанные на оценивании фонового изображения, сегментации, слежении за сегментами, выделении особых точек, слежении с применением оптического потока, повышении эффективности за счет оценивания траектории движения и многомасштабной обработки изображений.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов обнаружения и оценивания параметров объектов для решения задач видеоаналитики. В главе приведена аналитическая постановка задачи, представлены модель формирования изображения сцены и различные модели фоновой составляющей. Сформулированы требования к разрабатываемым алгоритмам исходя из особенностей решаемой задачи.

На основе проведенного анализа в первую очередь разработан *базовый алгоритм обнаружения и оценивания параметров движущегося объекта*. Обобщенная схема алгоритма приведена на рисунке 1 (базовый алгоритм не включает этап слежения).

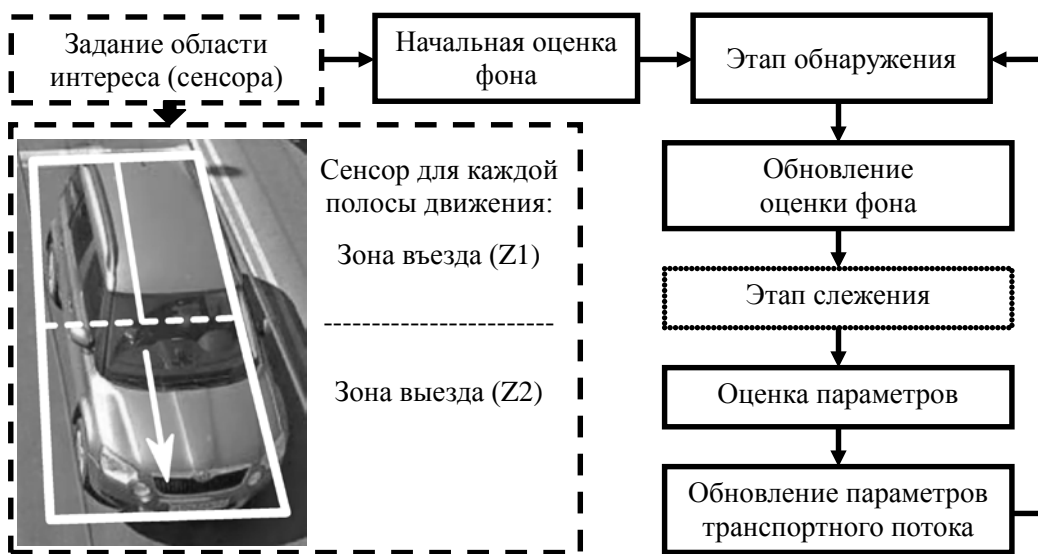


Рисунок 1 – Обобщенная схема алгоритма обнаружения и оценки параметров движущихся объектов

Алгоритм выполняет обработку двух связанных зон и основан на адаптивной процедуре оценивания и обновления фоновой составляющей изображения, а также на совместном анализе разностного и текущего изображений на этапе обнаружения. Базовый алгоритм предполагает задание для каждой полосы движения зоны интереса – сенсора.

Работа алгоритма начинается с начальной оценки фона в каждой зоне на основе межкадровой разности. На данном этапе важно выделить кадры, на которых отсутствует движение, что достигается, в том числе, за счет синхронизации работы двух зон сенсора. Если в течение заданного малого промежутка времени в зоне движения нет, то выбирается опорный кадр для оценки фона.

После нахождения опорного кадра на протяжении заданного интервала времени осуществляется проверка стабильности фона, для чего выполняется анализ разности опорного и текущего кадра.

Как только начальная оценка фона получена, сенсор переходит в режим основной работы, который состоит из следующих этапов:

- выделение движущегося объекта в каждой зоне;
- обновление оценки фона в каждой зоне;
- оценивание параметров объекта;
- обновление глобальных параметров транспортного потока.

Выделение движущегося объекта на изображении основано на вычитании фона, пороговой обработке и последующем разбиении точек на 4 категории: объект, фон, тень, засветка.

Когда на уровне сенсора фиксируется событие покидания автомобилем зоны въезда, то выполняется оценивание параметров объекта, увеличивается счетчик проехавших по полосе движения ТС. При фиксации названного события проверяется, что объект обнаружен в зоне выезда позже, чем в зоне въезда, что определяется алгоритмом выделения движущегося объекта.

Точность оценок параметров ухудшается из-за задержек в получении изображений с камеры, ошибок сегментации. С целью повышения точности предложено использовать слежение, так как в этом случае оценивается межкадровое смещение точек или сегментов объекта.

Слежение за объектом начинается с кадра видеопоследовательности, на котором объект был обнаружен в зоне въезда. С целью решения задачи слежения было реализовано два алгоритма:

- слежение на основе оптического потока;
- слежение за сегментами.

Алгоритм слежения за объектом на основе метода оптического потока объединяет следующие подходы:

- использование детектора особых точек в области изображения, принадлежащей объекту и локализованной на основе результатов сегментации;
- использование пирамидального метода Лукаса – Канаде для вычисления оптического потока при слежении за точками объекта;
- использование информации о движении для фильтрации точек и сокращения вычислительных затрат при расчете оптического потока.

Первым этапом алгоритма является инициализация, заключающаяся в формировании списка особых точек объекта. На данном этапе используется бинарная маска, полученная базовым алгоритмом при выделении объекта. Использование особых точек обусловлено существенным уменьшением вычислительных затрат при вычислении оптического потока по сравнению с использованием всех точек объекта. Для выделения особых точек можно воспользоваться одним из известных детекторов, а вычисление дескрипторов не требуется.

Основной этап алгоритма слежения заключается в вычислении оптического потока для найденного набора точек объекта, для чего применяется пирамидальный алгоритм Лукаса – Канаде. В алгоритме выполняется последова-

тельное уточнение оценок скорости оптического потока при переходе от самого высокого до самого низкого уровня представления изображения в многомасштабной пирамиде.

Пирамидальный алгоритм Лукаса – Канаде позволяет получить хорошие оценки смещения точек при заметных межкадровых смещениях объекта. Однако необходима дополнительная процедура фильтрации точек, так как при изменении локальной освещенности и ракурса наблюдения объекта слежение может быть нестабильным, часть точек будет уходить с истинной траектории движения. Фильтрация точек осуществляется с использованием информации об угле направления движения и межкадровом перемещении точек.

Алгоритм прослеживания сегмента объекта является альтернативой алгоритму слежения на основе вычисления оптического потока, обладающей меньшей вычислительной сложностью. Входными данными являются бинарные изображения для зон $Z1$ и $Z2$, полученные на этапе сегментации в базовом алгоритме. С целью повышения качества сегментации предложено обрабатывать цветное изображение. Алгоритм прослеживания сегмента объекта можно разделить на следующие этапы:

- инициализация алгоритма в момент фиксации въезда в зону $Z1$;
- слежение за сегментом объекта при передвижении через зону $Z1$;
- слежение за сегментом объекта при передвижении через зоны $Z1$ и $Z2$.

На рисунке 2 представлен пример движения объекта (его сегментов) через сенсор (где d_{in} – расстояние между объектом и линией въезда в $Z1$, d_{out} – расстояние между объектом и линией выезда из $Z2$).

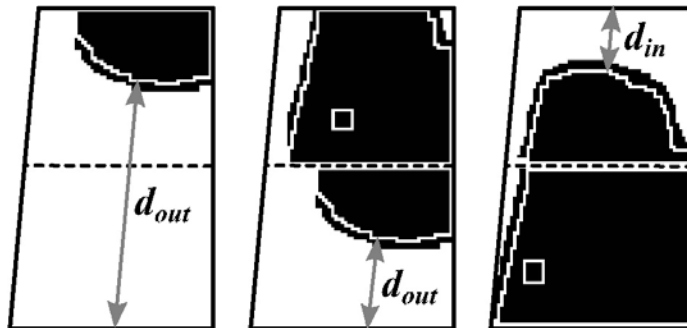


Рисунок 2 – Движение объекта через сенсор

Инициализация включает следующие этапы:

- постобработка результатов сегментации: дилатация и эрозия бинарного изображения;
- разметка и параметризация бинарного изображения с целью определения параметров сегментов;
- объединение всех сегментов, число точек которых больше порога;
- оконтуривание сегмента объекта;
- вычисление расстояний d_{in} и d_{out} .

При прослеживании сегмента также выполняются обработка бинарных изображений зон сенсора и вычисление расстояний до линий въезда и выезда. Когда расстояние d_{in} становится больше заданного значения, слежение прекращается, иначе выполняется расчет данных о траектории движения на текущем

кадре: расстояние до линии въезда в $Z1$, разница расстояний до линии въезда в $Z1$ между кадрами, расстояние до линии выезда из $Z2$, разница расстояний до линии выезда из $Z2$ между кадрами. На основе этих данных принимается решение о состоянии объекта (движется или остановился), а также в дальнейшем выполняется расчет длины и скорости объекта.

Разработан алгоритм обнаружения остановившихся объектов в заданной области на основе адаптивной оценки фоновой составляющей путем построения очереди оценок фона для разных малых промежутков времени. Первым этапом алгоритма является начальная оценка фона с применением усредняющего фильтра. Таким образом, выполняется накопление информации о яркости точек в течение достаточно большого промежутка времени.

Второй этап работы основан на очереди оценок фона. Очередь имеет заданную длину в N_{flt} фильтров, каждый фильтр накапливает оценку фона на протяжении Fr_{flt} кадров. Обобщенная схема основного этапа работы алгоритма приведена на рисунке 3 (где G_1 – оценка фона для самого раннего периода времени, G_t и I_t – текущая оценка фона и текущее изображение).

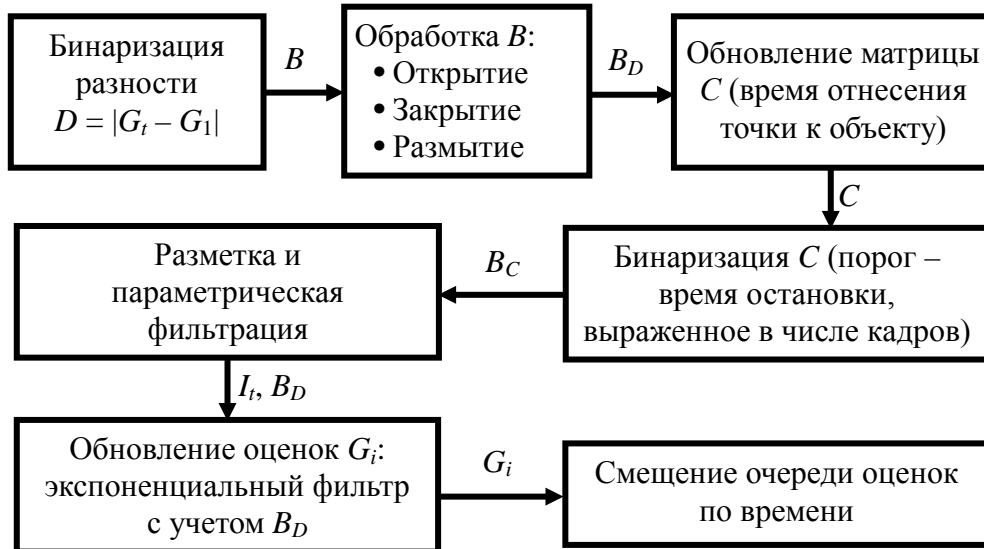


Рисунок 3 – Обобщенная схема этапа обнаружения остановившихся объектов

Пороговая обработка разностного изображения $D(x, y)$ выполняется следующим образом:

$$B(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{если } D(x, y) > \tau_{\Delta} \text{ и } D(x, y) > \tau_{\sigma} \cdot \sigma(x, y, t), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где x и y – пространственные координаты точки на изображении; t – номер кадра последовательности; τ_{Δ} – порог для сегментации разностного изображения; τ_{σ} – коэффициент порога сегментации с использованием СКО шума $\sigma(x, y, t)$.

Для учета временного порога обнаружения используется матрица C , хранящая для каждой точки число кадров, в которых точка была классифицирована как принадлежащая остановившемуся объекту. Обновление матрицы C выполняется на основе бинарного изображения B_D :

$$C(x, y) = \begin{cases} C(x, y) + 1, & \text{если } B_D(x, y) \neq 0, \\ C(x, y) - 2, & \text{если } B_D(x, y) = 0 \text{ и } C(x, y) > 1, \\ C(x, y) & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

Текущая (последняя в очереди) оценка фона обновляется путем подачи на вход экспоненциального фильтра текущего кадра:

$$G(x, y, t) = k_e \cdot G(x, y, t - 1) + (1 - k_e) \cdot I(x, y, t), \quad (3)$$

где $G(x, y, t)$ – текущая оценка фона для t -го кадра $I(x, y, t)$; $k_e \geq 0,9$ – коэффициент экспоненциального фильтра.

Также выполняется обновление оценки дисперсии шума:

$$\sigma^2(x, y, t) = k_e \cdot \sigma^2(x, y, t - 1) + (1 - k_e) \cdot (I(x, y, t) - G(x, y, t - 1))^2. \quad (4)$$

Обновление же ранних оценок фона $G_i(x, y)$ осуществляется только для точек, принадлежащих объектам, для чего используется маска объектов B_D :

$$G_i(x, y) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{N_{flt}-1} G_j(x, y) / (N_{flt} - 1), & \text{если } B_D(x, y) \neq 0, \\ G_i(x, y) & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где $i \in [2, N_{flt}]$, $j \in [1, N_{flt} - 1]$.

Через промежуток времени, заданный в кадрах Fr_{flt} , самая ранняя оценка $G_1(x, y)$ отбрасывается, очередь оценок фона сдвигается: $G_1(x, y) = G_2(x, y), \dots, G_{N_{flt}-1}(x, y) = G_{N_{flt}}(x, y), G_{N_{flt}}(x, y) = G(x, y, t)$.

В **третьей главе** приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований предложенных алгоритмов.

Исследования включали оценивание и сравнение качества работы предлагаемых алгоритмов: базового алгоритма обнаружения объектов, с использованием слежения на основе оптического потока и с использованием слежения за сегментами.

Исследования проводились на базе собственных видеосюжетов, а также на сюжетах из открытых баз GRAM и CDNet 2014. Сюжеты записаны неподвижной камерой при наблюдении за дорогами, число полос составляло от 2 до 5. Рассматривались 3 класса автомобилей: легковые (до 5 м), средние грузовые и пассажирские (от 5 м до 7,5 м) и большие грузовые и пассажирские (больше 7,5 м). Обобщенные результаты экспериментальных исследований алгоритмов обнаружения движущихся объектов представлены в таблице 1. Используются следующие обозначения характеристик эффективности работы:

- P_{eo} – частота правильных обнаружений объектов;
- P_I – частота ошибок первого рода (отношение числа ложных обнаружений к эталонному числу объектов);
- P_{II} – частота ошибок второго рода (отношение числа пропусков объектов к эталонному числу объектов);

– $P_{ок}$ – частота ошибок классификации.

Таблица 1 – Обобщенные результаты для всех алгоритмов обнаружения и оценки параметров движущихся объектов

Алгоритм	Характеристики, %			
	$P_{во}$	P_I	P_{II}	$P_{ок}$
Базовый	91,2	1,23	8,79	16,24
+ прослеживание сегментов	96,41	0,59	3,59	8,81
+ оптический поток	96,09	0,34	3,92	11,8

Исследования алгоритма обнаружения остановившихся объектов проводились с использованием натуральных видеосюжетов. Длина видеопоследовательностей составляла от 10 минут до 8 часов. Обобщенные результаты экспериментальных исследований алгоритма обнаружения остановившихся объектов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Обобщенные результаты для алгоритма обнаружения остановившихся объектов

Характеристики, %		
$P_{во}$	P_I	P_{II}
100	7,52	0

Результаты экспериментальных исследований показали, что разработанные алгоритмы обеспечивают решение поставленных задач при наблюдении неподвижным видеодатчиком при разных условиях наблюдения: время суток, погода, ракурс съемки.

Подход на основе слежения за сегментами позволяет добиться результатов, сравнимых со слежением на основе метода оптического потока. При этом для использования оптического потока необходимо задать увеличенную область обработки, что накладывает дополнительные требования к установке камеры и сенсоров.

Проведено сравнение с результатами обнаружения и подсчета автомобилей, полученными следующими известными алгоритмами.

1. Алгоритм обнаружения и слежения за объектами на основе адаптивной оценки фона с использованием смеси гауссиан (A1).
2. Алгоритм обнаружения объектов на основе оценки фона методом GoDecomposition: рандомизированное разложение матриц (A2).
3. Алгоритм обнаружения движущихся объектов методом Decolor (detecting contiguous outliers in the low-rank representation) (A3).
4. Алгоритм обнаружения движущихся объектов методом Corola (contiguous outliers representation via online low-rank approximation) (A4).
5. Алгоритм обнаружения объектов на основе оценки фона методом Incremental PCP (principal component pursuit) (A5).
6. Алгоритм подсчета на основе модифицированного метода PCP (A6).
7. Алгоритм подсчета ТС и слежения на основе фильтра частиц (A7).
8. Алгоритм обнаружения и слежения за объектами на основе разложения матриц и фильтра Калмана (A8).

Сравнение предложенных алгоритмов с А6, А7 и А8 произведено по частоте правильных обнаружений (P_{60}) при обработке сюжетов базы GRAM, результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение с представленными в литературе алгоритмами по частоте правильных обнаружений

Алгоритм	Сюжет, P_{60} , %	
	М-30	М-30-HD
Базовый	98,6	98,7
+ прослеживание сегментов	99,6	99,5
+ оптический поток	99,6	99,5
А6	97,41	92,86
А7	89,62	78,57
А8	92,2	88,1

В таблице 4 приведены показатели качества для предложенных алгоритмов и алгоритмов А1-А5 и А8. Сравнение приводится по усредненным по всем сюжетам показателям точности (precision, p), полноты (recall, r) и F -меры.

Таблица 4 – Сравнение с представленными в литературе алгоритмами по точности, полноте и F -мере

Алгоритм	p	r	F
Базовый	0,986	0,912	0,948
+ прослеживание сегментов	0,994	0,964	0,979
+ оптический поток	0,996	0,961	0,978
А1	0,004	0,568	0,008
А2	0,009	0,212	0,017
А3	0,584	0,861	0,696
А4	0,697	0,803	0,747
А5	0,512	0,407	0,454
А8	0,895	0,963	0,928

В четвертой главе приведена структура разработанного программного обеспечения (ПО) и продуктов фирмы Axis с возможностью встроенной обработки видео, рассматриваемых в качестве конечной платформы для реализации алгоритмов. Приведена краткая документация разработанного ПО с описанием особенностей работы и особенностей реализации на платформе интеллектуальных видеокамер Axis, а также предоставляемых инструментов для разработки приложений видеоаналитики. С целью обоснования выводов о возможности применения разработанных алгоритмов обнаружения и оценки параметров объектов на базе интеллектуальных камер выполнен анализ производительности. Можно сделать следующие выводы.

1. Разработано ПО для интеллектуальных камер, в котором реализованы предложенные в диссертации алгоритмы анализа видеопоследовательностей.

2. Разработано ПО для центра управления, позволяющее подключаться к камерам, выполнять настройку и получать статистические данные.

3. В качестве конечной платформы для реализации алгоритмов рассмотрены интеллектуальные видеокамеры фирмы Axis на базе процессоров ARTPEC-4, ARTPEC-5 и ARM v7, описаны достоинства и недостатки.

4. Среди рекомендаций к реализации можно выделить следующее:

- отказ от арифметики с плавающей точкой либо использование чисел с фиксированной точкой;
- использование параллельных вычислений;
- уменьшение разрешения обрабатываемого изображения.

5. Проведен анализ требуемой для работы алгоритмов оперативной памяти. При совместном решении задач обнаружения движущихся и остановившихся объектов в худшем случае требуется не более 50 МБ памяти при свободном на практике объеме в 90 МБ (общий объем памяти устройства 512 МБ).

6. Проведен анализ числа выполняемых алгоритмами операций при обработке одного кадра. Операции разделены на группы: арифметические аддитивные и мультипликативные, операции сравнения, операции присваивания. Приведена оценка асимптотической сложности алгоритмов.

7. Выполнена оценка времени обработки одного кадра разработанными алгоритмами при решении поставленных задач на указанных платформах:

- применение алгоритма слежения на основе оптического потока целесообразно на процессорах семейства ARTPEC из-за отсутствия FPU;

- базовый алгоритм обнаружения и оценивания параметров движущихся объектов позволяет решать соответствующие задачи в режиме реального времени: скорость обработки составляет не менее 40 кадров/сек (70 кадров/сек в режиме параллельной обработки полос движения) на процессоре ARTPEC-4 для типовой ситуации наблюдения за 4 полосами. На процессоре ARM v7 скорость обработки достигает 125 кадров/сек при тех же условиях;

- скорость обработки при использовании прослеживания сегментов составляет не менее 14 кадров/сек (26 кадров/сек в режиме параллельной обработки полос движения) на процессоре ARTPEC-4 при наблюдении за 4 полосами. На процессоре ARM v7 скорость обработки достигает 90 кадров/сек;

- скорость обработки для алгоритма обнаружения остановившихся объектов составляет от 2 до 6 кадров/сек на ARTPEC-4 и от 6 до 12 кадров/сек на ARM v7, этого достаточно для своевременного обнаружения остановившихся автомобилей;

- значительный вклад в сокращение времени обработки вносят уменьшение масштаба изображения и распараллеливание обработки сенсоров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен подход к решению задачи оценивания глобальных параметров транспортного потока для каждой полосы движения: количества ТС в потоке; средней скорости потока; количества ТС разных типов; средней скорости ТС разных типов. Также предложен подход к решению задачи обнаружения остановившихся ТС. Отличительной особенностью подходов является ориентация на их реализацию на платформе интеллектуальных камер с учетом их вычислительных возможностей.

2. Разработан вычислительно эффективный алгоритм обнаружения и оценки параметров движущихся объектов (ТС), основанный на адаптивной оценке и обновлении фона, совместном анализе разностного и текущего изображений на этапе сегментации, слежении за объектом на основе прослеживания сегментов или метода оптического потока, инициализированного особыми точками. Алгоритм позволяет выполнять обнаружение движущихся объектов и оценивать их скорость и размер при различных условиях наблюдения. Частота правильных обнаружений составила 91,2 % (96,4 % при использовании слежения) при частоте ошибок первого и второго рода соответственно 1,2 % (0,6 % при использовании слежения) и 8,8 % (3,6 % при использовании слежения). При этом обеспечивается увеличение частоты правильных обнаружений на 5-10 % по сравнению с известными алгоритмами, основанными на различных методах оценки фона, включая современные подходы на основе низкорангового приближения матриц.

3. Разработан вычислительно эффективный алгоритм обнаружения остановившихся объектов в заданной области на основе адаптивной оценки фоновой составляющей путем построения очереди оценок фона для разных малых промежутков времени. Алгоритм позволяет выполнять локализацию остановившихся в заданной области объектов при различных условиях наблюдения. Частота правильных обнаружений объектов составила 100 % при частоте ошибок первого и второго рода соответственно 7,5 % и 0 %.

4. Создано программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы. С его помощью выполнены экспериментальные исследования на обширной базе натуральных видеосюжетов. Численные показатели, приведенные выше, подтверждают работоспособность предложенных алгоритмов и их эффективность при использовании в системах транспортной аналитики.

5. Рассмотрены особенности реализации алгоритмов на платформе интеллектуальных видеодатчиков, разработаны рекомендации к реализации и проанализирована производительность алгоритмов. Предложенные подходы были реализованы в специальном программном обеспечении для интеллектуальных камер фирмы Axis, позволяющем решать поставленные задачи в режиме реального времени в условиях ограниченности вычислительных ресурсов. Обработка изображений и оценивание параметров транспортного потока ведутся на внутренней платформе камер, что позволяет упростить сетевую и серверную инфраструктуру системы управления дорожным движением.

6. Практическая ценность алгоритмов подтверждается развертыванием разработанного программного обеспечения на десятках интеллектуальных камер, установленных на оживленных перекрестках г. Рязани и г. Смоленска. Внедрение разработанных алгоритмов видеоаналитики позволило улучшить организацию дорожного движения.

7. Результаты исследований могут быть востребованы в системах автоматического или автоматизированного управления дорожным движением, в системах сбора статистики о дорожном движении с целью получения оценок эффективности существующей дорожной сети и планирования развития авто-

транспортной инфраструктуры, в системах обнаружения опасных ситуаций или аварий на дорогах.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Ершов М.Д., Шубин Н.Ю. Алгоритмы обработки изображений для решения задач анализа дорожной обстановки // Цифровая обработка сигналов. – М.: РНТОРЭС имени А.С. Попова, 2017. – № 3. – С. 63-67.

2. Смирнов С.А., Бабаян П.В., Ершов М.Д., Муравьев В.С. Разработка и оптимизация алгоритма слежения за транспортным средством в видеопотоке на основе пирамидального метода Лукаса – Канаде // Вестник кибернетики. – Сургут: СурГУ, 2020. – № 2 (38). – С. 58-67.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных (Web of Science и/или Scopus)

3. Alpatov B.A., Ershov M.D. Real-time stopped vehicle detection based on smart camera // Proc. of 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing. – IEEE, 2017. – P. 171-174.

4. Alpatov B.A., Babayan P.V., Ershov M.D. Vehicle detection and counting system for real-time traffic surveillance // Proc. of 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing. – IEEE, 2018. – P. 120-123.

5. Ershov M.D., Smirnov S.A., Strotov V.V. Segmentation-based Vehicle Tracker for Real-Time Parameter Estimation on Smart Camera // Proc. of 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing. – IEEE, 2020. – P. 401-404.

6. Alpatov B.A., Babayan P.V., Ershov M.D. Embedded Image Processing and Video Analysis in Intelligent Camera-based Vision System // Proc. of 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing. – IEEE, 2020. – P. 405-408.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

7. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020611995. Программа для определения параметров транспортных потоков по записанным сюжетам / ФГБОУ ВО «РГРТУ»; Бабаян П.В., Ершов М.Д., Смирнов С.А. – Дата приоритета 03.02.2020; зарег. 13.02.2020.

8. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020611996. Программа анализа транспортных потоков на базе интеллектуальной камеры / ФГБОУ ВО «РГРТУ»; Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Ершов М.Д. – Дата приоритета 03.02.2020; зарег. 13.02.2020.

Тезисы докладов на конференциях и семинарах

9. Алпатов Б.А., Ершов М.Д. Разработка алгоритма обнаружения остановившихся автомобилей при наблюдении за дорожной обстановкой // Материалы всеросс. науч.-техн. конф. «Техническое зрение в системах управления». – Москва, 2017. – С. 63-64.

10. Алпатов Б.А., Ерохин Д.Ю., Ершов М.Д. Обработка изображений в задачах видеоналитики // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». – Рязань: РГРТУ, 2017. – С. 360-362.

11. Ершов М.Д., Ерохин Д.Ю. Алгоритмы оценки фона для решения задач анализа видеопоследовательностей // Материалы всеросс. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». – Рязань: РГРТУ, 2017. – С. 204-205.

12. Ершов М.Д., Шубин Н.Ю. Алгоритмы анализа дорожной обстановки // Доклады междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA2018». – М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2018. – Т. 2. – С. 583-586.

13. Алпатов Б.А., Ершов М.Д. Некаузальная обработка видеопоследовательностей для обнаружения и оценки параметров объектов // Материалы всеросс. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». – Рязань: РГРТУ, 2018. – Т. 2. – С. 46-47.

14. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Ершов М.Д. Алгоритм обработки видеопоследовательности для обнаружения и подсчета автомобилей // Материалы всеросс. науч.-техн. конф. «Техническое зрение в системах управления». – М.: ИКИ РАН, 2019. – С. 5-6.

15. Ершов М.Д. Применение алгоритмов обработки изображений для оценки параметров транспортных потоков // Материалы всеросс. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях». – Рязань: РГРТУ, 2016. – С. 259-261.

16. Ершов М.Д. Особенности реализации алгоритмов анализа изображений на платформе интеллектуальных камер // Материалы междунар. науч.-техн. форума «Современные технологии в науке и образовании». – Рязань: РГРТУ, 2020. – Т. 5. – С. 116-121.

Ершов Максим Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ
ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ВИДЕОАНАЛИТИКИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.12.2020. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ .

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.