

На правах рукописи



ТАРАСОВ Андрей Сергеевич

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Специальность 2.3.8. – Информатика и информационные процессы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (РГРТУ) на кафедре электронных вычислительных машин

Научный
руководитель:

Никифоров Михаил Борисович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электронных вычислительных машин
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический
университет им. В.Ф. Уткина»

Официальные
оппоненты:

Потехин Дмитрий Станиславович,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры вычислительной техники Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «МИРЭА – Российский
технологический университет»

Акименко Татьяна Алексеевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Робототехника и автоматизация
производства» ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет»

Ведущая
организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Казанский
национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань

Защита состоится 27 декабря 2023 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 99.2.113.02 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1, а.237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» и ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» и на сайтах университетов <https://rsreu.ru/> и <http://penzgtu.ru/>

Автореферат разослан _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Колесенков А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Системы видеонаблюдения применяются в разных областях человеческой деятельности, в местах общественного пользования, таких как метро, пешеходные переходы, вокзалы, офисы, банки и автовокзалы. Они выполняют различные задачи, включая наблюдение за дорожным движением и контроль погрузки и выгрузки товаров. В торговых центрах эти системы используются для предотвращения краж. Они также устанавливаются в частных домах и квартирах для повышения безопасности. Кроме записи видеосигнала, часто требуется его цифровая обработка.

Системы обработки и анализа видеoinформации являются оптико-электронными системами (ОЭС). Один из методов цифровой обработки - сопровождение объектов на видеопоследовательности – позволяет обнаруживать неподвижные и движущиеся объекты, определять их траектории, сравнивать их характеристики с характеристиками искомого объекта для определения срыва сопровождения.

Системы визуального сопровождения и обнаружения объектов применяются в следующих областях:

- автоматический подсчет пассажиров в общественном транспорте;
- оценка состояния водителя, машиниста поезда во время работы;
- исследование поведения животных в природе;
- выявление беспорядков и других противоправных действий;
- космический мониторинг Земли;
- захват и сопровождение подвижных объектов антропогенного происхождения в воздухе и на земле.

Основным требованием, предъявляемым к большинству описанным выше системам, является необходимость работы в режиме реального времени. Под режимом реального времени понимают такую скорость работы, при которой система должна реагировать на события во внешней среде в рамках требуемых временных ограничений. Подобные системы также должны иметь автоматизированный режим работы, не требующий от оператора (пользователя системы) серьезных усилий.

Система обнаружения подвижных объектов управляется посредством графического пользовательского интерфейса (ГПИ) и позволяет осуществлять наблюдение за несколькими объектами одновременно. ГПИ обеспечивает возможность выбора видеопоследовательности и области интереса для отслеживания. Область интереса может быть выбрана автоматически, на основе движения объектов, и/или задана оператором вручную. После того как область интереса была определена, начинается сопровождение выбранного объекта.

Для сопровождения объектов применяются методы, основанные на технологиях машинного обучения (каскады Хаара, YOLO, SSD и др.). Ключевой недостаток данных методов – это необходимость предварительного обучения, а также ориентированность на класс объекта. Такие методы, несмотря на высокую точность, не могут обеспечивать универсальность в задачах сопровождения объектов различных классов.

Для сопровождения объектов не определенного заранее класса существует ряд подходов (Median Flow, Boosting, TLD, GOTURN). На текущий момент данные алгоритмы являются неустойчивыми к сложным сценариям сопровождения, например в тех случаях, когда объект слежения меняет свои характеристики (форму, цвет, размер), скрывается за другими объектами, теряется в окружении подобных или же в условиях подвижной видеосистемы. Для разрешения всех вышеописанных случаев необходимо предусмотреть такой метод (или совокупность методов), который бы позволил снизить вероятность возникновения срыва сопровождения.

Степень проработанности темы исследования

Проблеме обнаружения и сопровождения объектов посвящено большое число работ как отечественных, так и зарубежных ученых.

Общие подходы к решению задач обнаружения объектов изложены в монографиях под редакцией Алпатова Б.А., Соифера В.А., Фурмана Я.А., Визильтера Ю. В., Костяшкина Л. Н., Бабаяна П. В., Итенберга И. И., Богуславского А. А., Варфоломеева А.Ю., Шведова А.П., Тихонова К.М., в монографиях Гонсалеса Р. с соавторами и в работах других авторов. Методы решения задачи обнаружения объектов основываются на многочисленных исследованиях в области цифровой обработки изображений и других авторов. Существенный вклад в развитие методов цифровой обработки изображений внесли отечественные ученые Журавлев Ю.И., Желтов С.Ю., Зубарев Ю.Б., Сергеев В.В. и другие, а также зарубежные ученые Блейхут Р., Понс Ж., Прэйт У., Форсайт Д., Кенни Д., Лукас Б., Канаде Т., Виола Д.

На данный момент разработано большое число эффективных узкоспециализированных алгоритмов, которые выполняют операции обнаружения и сопровождения с высокой точностью и скоростью. Известны и универсальные алгоритмы, однако все они обладают различными недостатками:

- срывы сопровождения при перекрытии другими объектами;
- срывы сопровождения при изменении условий освещенности;
- срывы сопровождения при появлении нескольких однотипных объектов в кадре;
- срывы сопровождения при резком изменении траектории или разделении объекта (тепловые ловушки);
- необходимость использования высокоточных дорогостоящих тепловизоров.

Тем не менее, несмотря на большое количество известных алгоритмов обнаружения и сопровождения, пока нет универсального эффективного метода решения поставленной задачи.

С учётом изложенного выше разработка алгоритмов обнаружения и сопровождения объектов, обладающих вычислительной точностью достаточной для сопровождения в условиях различных сценариев, и высокой скоростью, в настоящий момент является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка метода и алгоритмов обнаружения и сопровождения подвижных объектов различной конфигурации и физической природы, обеспечивающих сопровождение в условиях различных сценариев, а также проектирование программных средств, реализующих эти алгоритмы.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать актуальные подходы к решению задач обнаружения и сопровождения объектов.
2. Разработать алгоритм предварительной обработки изображений, позволяющий устранить помехи, обусловленные недостатками конструкции видеосистемы (дрожание камеры, наклон, изменение экспозиции).
3. Разработать метод обнаружения подвижных объектов различной природы, обеспечивающий захват нескольких объектов.
4. Разработать алгоритмы сопровождения подвижных объектов различной конфигурации и физической природы в сложных условиях.
5. Разработать алгоритм автоматического выбора наиболее эффективного алгоритма сопровождения на основании анализа сюжета.
6. Разработать программное обеспечение, выполняющее обнаружение и сопровождение объектов на основе представленных алгоритмов и метода, позволяющее выполнять сопровождение нескольких объектов в условиях реального времени (24 кадра в секунду) с наименьшим количеством срывов сопровождения.

Научная новизна

1. Предложен алгоритм предварительной обработки изображений, позволяющий устранить искажения, обусловленные недостатками конструкции видеосистемы, за счёт анализа оптического потока, снижающий ошибку при сопровождении до 13,5 %, а также уменьшающий вероятность ложного обнаружения подвижного объекта на 18,6 % в сравнении с алгоритмами обнаружения и сопровождения объекта без предварительной обработки.
2. Разработан метод обнаружения подвижных объектов, обеспечивающий снижение ошибки, на 27 % за счёт применения анализа векторов оптического потока и их кластеризации на основе метода k-средних в сравнении с методом обнаружения, построенным на межкадровом диспаратите.
3. Разработаны четыре алгоритма сопровождения.
 - Первый основан на корреляционном поиске и отличается от существующего тем, что корреляционный поиск применяется совместно с методом Нелдера–Мида и методом Мультистарт с расположением начальных точек в окрестностях предыдущего расположения объекта, что сокращает количество вызовов целевой функции не менее, чем в 7,2 раз при сравнении с полным перебором.

- Второй основан на вычислении оптического потока и отличается от существующего тем, что частично задействуются векторы, полученные на этапе обнаружения объектов, что сокращает вычислительную сложность не менее, чем в 1,9 раза.
 - Третий основан на сопоставлении особых точек и отличается от существующих решений тем, что применен подход группировки точек по квадратам, что сокращает время, затраченное на поиск пары, в 10 раз в сравнении с алгоритмом полного перебора всех точек-кандидатов.
 - Четвертый основан на сегментационной нейронной сети, которая работает на основе данных межкадрового диспаратета и оптического потока и позволяет определять области изображения, в которых происходило движение, что позволяет добиться показателей точности выше на 10,1 % в сравнении с аналогичным алгоритмом GOTURN.
4. Предложен алгоритм автоматического выбора алгоритма сопровождения, уменьшающая конечную ошибку сопровождения на 11,3 % в сравнении с принудительным использованием только одного алгоритма сопровождения.

Практическая значимость работы

Разработанные программное обеспечение и технические решения могут использоваться для обнаружения и сопровождения продукции, предупреждения нахождения людей в опасных зонах, мониторинга бесполётных зон, при построении систем обнаружения и сопровождения в охранных системах, в системах видеоинспекции на автодорогах и т.д.

Объект исследования – программно-алгоритмический комплекс обнаружения и сопровождения объектов различной природы на видеопоследовательности.

Предмет исследования – определен предметной областью пункта 4 паспорта специальности 2.3.8 – Информатика и информационные процессы:

Разработка методов и технологий цифровой обработки аудиовизуальной информации с целью обнаружения закономерностей в данных, включая обработку текстовых и иных изображений, видеоконтента. Разработка методов и моделей распознавания, понимания и синтеза речи, принципов и методов извлечения требуемой информации из текстов".

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту положения получены автором лично.

Основные результаты диссертации:

1. Внедрены в компании ООО «Квантрон Групп» в виде программного модуля, предназначенного для осуществления поиска подвижных объектов в видеопотоке.
2. Внедрены в компании ООО «Резилюкс-Волга» в виде программного модуля сопровождения преформ для дальнейшей дефектоскопии.
3. Внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина» в курсах «Машинное обучение» и «Обработка и распознавание изображений в системах автоматического обнаружения и сопровождения объектов», которые изучаются в рамках направления 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, «Обнаружение, сопровождение и указание объектов», которые изучаются в рамках направления 27.05.01 «Специальные организационно-технические системы».
4. Использованы в рамках хозяйственных работ, выполненных по заказу АО «ГРПЗ»: НИР 2-17 «Доработка и исследование способов визуализации информации в многоспектральной системе технического зрения».
5. Использованы в рамках хозяйственных работ, выполненных по заказу АО «НЕЙПРОКОМ»: НИР «Исследование и разработка архитектуры модульной системы для массового предрейсового контроля водителей транспортных средств».

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались:

1. На 6-й международной конференции Mediterranean Conference on Embedded Computing, Черногория, Бар, 2017.
2. На международной конференции «Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS2018)», Российская Федерация, Казань, 2018;
3. На международном научно-техническом форуме СТНО – 2019, Российская Федерация, Рязань, 2019;
4. На 13-ой международной конференции ELEKTRO 2020, Италия, Таормина, 2020;
5. На XXII международной научно-технической конференции «Нейроинформатика», Российская Федерация, Москва, МФТИ, 2020;
6. IX Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» ITNT-2023, Российская Федерация, Самара, 2023;

Публикации

По теме диссертации опубликованы 20 работ. Из них 4 опубликованы в журналах из Перечня ВАК, 6 работ – в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах, 4 программы для ЭВМ.

Методы исследования

При проведении исследований и разработке алгоритмического и программного обеспечения с целью решения поставленных в диссертационной работе задач использованы: методы вычислительной математики, методы линейной алгебры и математического анализа, цифровые методы обработки изображений и распознавания образов, методы математического моделирования, теории обработки изображений, методы обучения искусственных нейронных сетей.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм предварительной обработки изображений, позволяет устранить помехи, обусловленные недостатками конструкции видеосистемы, за счёт анализа оптического потока, уменьшающего вероятность срыва при сопровождении на 13,5 %, а также уменьшающий вероятность ложного обнаружения подвижного объекта на 18,6 % по сравнению с аналогичными алгоритмами обнаружения и сопровождения, работающими без предварительной стабилизации.
2. Метод обнаружения подвижных объектов различной природы, снижает ошибку на 27% за счёт применения анализа векторов оптического потока и их кластеризации на основе метода k-средних.
3. Четыре алгоритма сопровождения подвижных объектов различной конфигурации и физической природы, в сложных условиях, демонстрирует лучшее быстродействие (не менее чем на 20 %) или более высокую точность (не менее чем на 10 %) работы в сравнении с описанными ранее версиями данных алгоритмов.
4. Алгоритм автоматического выбора одного из четырех разработанных алгоритмов, обеспечивает наибольшую вероятность сопровождения подвижных объектов различной конфигурации и физической природы в сложных условиях без срывов, за счёт анализа текущего сюжета, демонстрирует снижение вероятности срыва на 11,3 % при работе в различных условиях.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается экспериментальными результатами, которые были получены при решении поставленных задач, а также их согласованностью с результатами работ, представленных в данной области.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемых источников и приложения. Текст работы содержит 134 страницы, 43 рисунка и 23 таблицы. Список использованных источников включает 102 наименования (из них 32 зарубежных источника).

В первой главе «Аналитический обзор методов обнаружения и сопровождения объектов» выполнен обзор основных методов решения задачи обнаружения и сопровождения подвижных объектов.

Рассмотрены методы и алгоритмы обнаружения объектов на основе межкадрового диспаратета, оптического потока и на основе искусственных

нейронных сетей. Отмечено, что существующие решения обладают низким качеством работы в условиях подвижной видеосистемы, несколько различных объектов могут быть объединены в один, с учётом из признаков движения, а для методов на основе искусственных нейронных сетей требуется предварительное обучение системы на заранее сформированные классы.

Проведен анализ алгоритмов сопровождения в 6-и различных сценариях:

- изменение освещения;
- изменение ракурса съемки/формы объекта;
- изменение размера объекта;
- частичное перекрытие объекта;
- движение оптической системы;
- размытие объекта.

Для численной оценки качества работы алгоритмов сопровождения предлагается использование формулы IoU (Intersection over Union), которая представляет собой отношение площади пересечения прямоугольников предсказанного и эталонного расположения объекта к площади объединения данных прямоугольников. Также данную формулу можно интерпретировать как отношение площади корректно выделенной зоны к сумме значений площадей корректно выделенной зоны (TP_c), ошибок I (FP_c) и II (FN_c) рода. Для расчёта ошибки алгоритма сопровождения на видеофрагменте, состоящем из $C + 1$ кадров, применяется усредненное значение данного выражения ($mean_IoU$):

$$IoU_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c + FN_c},$$
$$mean_IoU = \frac{1}{C} \sum_c IoU_c.$$

Из проведенного в первой главе анализа сделан вывод, что известные технические решения не эффективны в задачах обнаружения и сопровождения разнородных объектов, а также что ряд алгоритмов не соответствует заявленным требованиям реального времени. С учётом этого, следует, что для снижения ошибки работы необходимо применять не один алгоритм, а их совокупность, которая должна отвечать свойствам объекта интереса в разные моменты времени. Так как большинство методов не подтверждают одинаково высокие показатели точности на каждом сценарии, то требуется разработка алгоритмического и программного обеспечения для эффективного с точки зрения достоверности и точности решения задач выделения объекта, отслеживания траектории и сопровождения объекта интереса для системы сопровождения и обнаружения объектов.

Во второй главе «Разработка метода и алгоритмов обнаружения и сопровождения» изложены предлагаемые методы и алгоритмы предварительной обработки кадра, обнаружения и сопровождения объектов.

Глава разделена на 3 раздела:

1. Предварительная обработка кадра;
2. Обнаружение подвижных объектов;
3. Алгоритмы сопровождения объектов.

В первом разделе рассмотрены алгоритмы предварительной стабилизации, основанные на устранении движения видеосистемы.

Используется разреженный оптический поток Лукаса – Канаде в особых точках, выбранных FAST-детектором для формирования векторов перемещения.

Полученные векторы анализируются для определения направления движения видеосистемы. Разработанный алгоритм позволяет определять и устранять следующие виды движения ОЭС:

- перемещение;
- вращение;
- приближение/отдаление.

Значения смещения ОЭС определяются переменными Δ_x и Δ_y , вычисляемыми по следующим формулам:

$$\Delta_x = \frac{1}{mn} * \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m OF_{ij}[x];$$

$$\Delta_y = \frac{1}{mn} * \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m OF_{ij}[y],$$

где m, n – размер изображения, i, j – итерируемые переменные, $OF_{ij}[x]$ – проекция вектора OF перемещения оптического потока по оси Ox , $OF_{ij}[y]$ – проекция вектора OF перемещения оптического потока по оси Oy .

Угол поворота определяется значением r по следующим формулам:

$$cnt_{x,y} = \min_{i,j} |OF_{ij}|;$$

$$a = \sqrt{i^2 + j^2};$$

$$b = \sqrt{((i + OF_{ij}[x])^2 + ((j + OF_{ij}[y])^2);}$$

$$c = \sqrt{cnt_x^2 + cnt_y^2};$$

$$r = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right),$$

где $cnt_{x,y}$ – координата центра поворота.

После устранения указанных видов перемещения выполняется пересчёт векторов оптического потока, которые в дальнейшем используются в задачах обнаружения и сопровождения. Общая схема алгоритма сопровождения и обнаружения с детализацией процесса предобработки кадра представлена на рисунке 1.

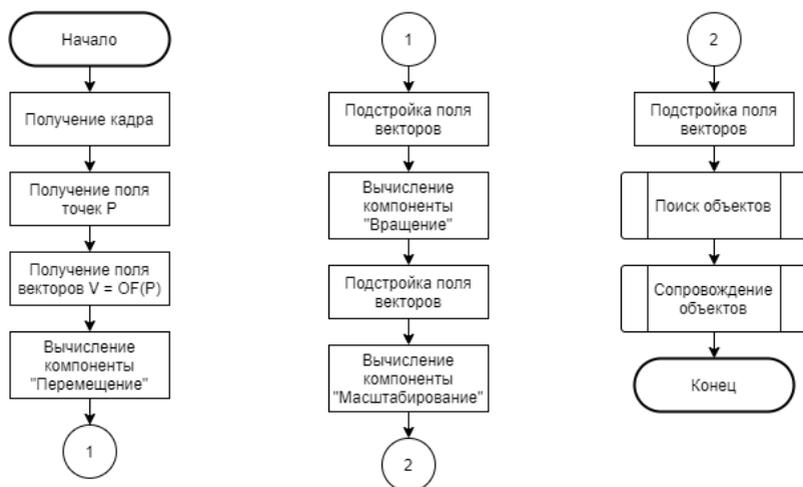


Рисунок 1 – Схема алгоритма стабилизации видеопоследовательности

Во втором разделе описывается метод обнаружения подвижных объектов.

Метод обнаружения объектов состоит из следующих шагов:

1. На первом этапе осуществляется вычисление межкадрового диспаратета.
2. Для того чтобы исключить срабатывание на шумовую составляющую, применяется детектор границ Canny (рисунок 2, б).
3. Далее поочередно выполняются операции морфологического закрытия для удаления шумовой составляющей и операции морфологического открытия для соединения некоторых контуров. Операции морфологического открытия и закрытия являются комбинациями операций эрозии и дилатации (рисунок 2, в).
4. Для каждого из захваченных объектов выполняется анализ векторов оптического потока. В случае возникновения разнородного движения векторов объект разделяется на несколько отдельных частей (рисунок 2, г).

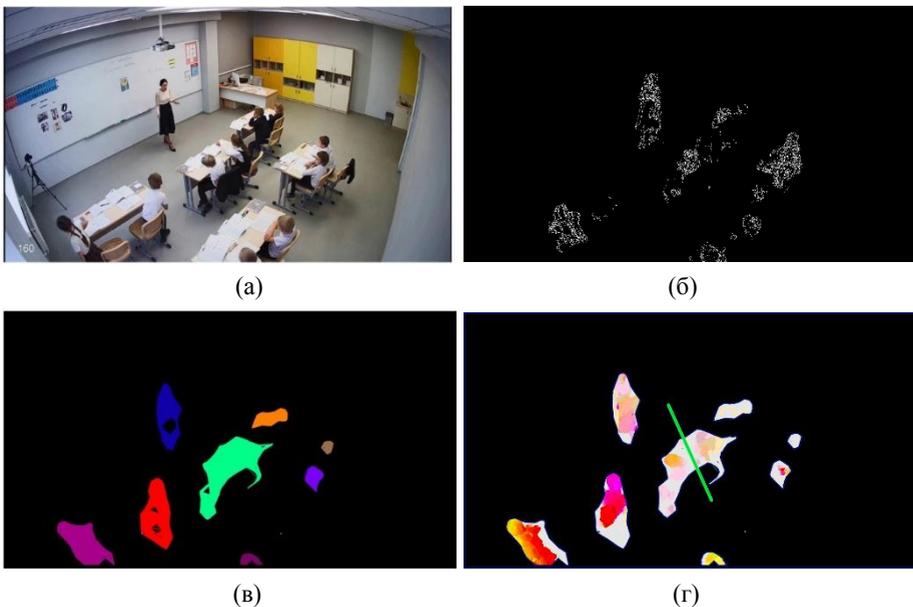


Рисунок 2 – Метод поиска подвижных объектов

- а) – исходное изображение (завершение занятия в колледже);
- б) – определение движения (межкадровый диспаритет и детектор границ);
- в) – объединение точек в многоугольники и разделение на отдельные объекты;
- г) – разделение склеенных объектов на отдельные, исходя из анализа оптического потока.

В третьем разделе описываются представленные алгоритмы сопровождения объектов. Разработаны 4 алгоритма:

1. Корреляционный поиск с использованием градиентного спуска и методом мултистарт по нерегулярной сетке (с применением уплотнения начальных точек в области объекта в прошлом кадре по нормальному закону распределения), а также с реализацией механизма активного обновления шаблона (рисунок 3);
2. Определение перемещения на основе оптического потока с анализом векторов, полученных в первом разделе второй главы. (рисунок 4);
3. Сопоставление ключевых точек на основе их дескрипторов с дополнительной группировкой точек на квадраты, исходя из их координат;
4. Сегментационная нейронная сеть Y-NET, выделяющая движение в окрестностях объекта.

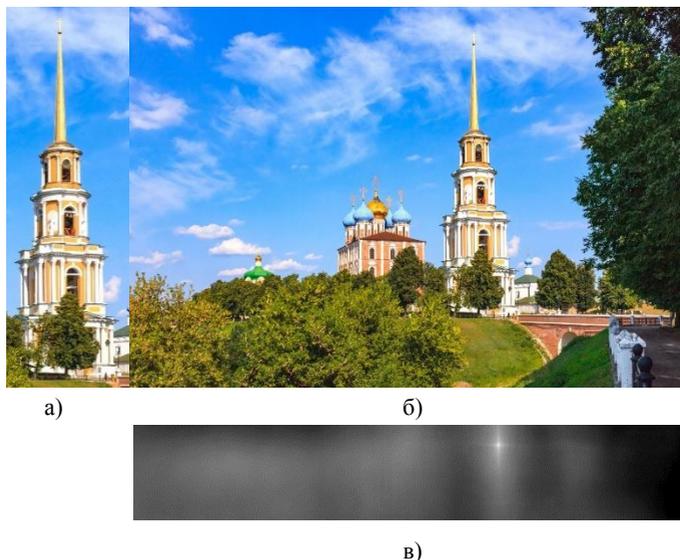


Рисунок 3 – Обнаружение объекта с использованием корреляционного поиска (идеальные условия)

а) – сопровождаемый объект;

б) – область обнаружения;

в) – матрица, полученная в результате вычисления корреляционной функции. Яркость пикселя прямо пропорциональна числовому значению характеристики, оценивающей вероятность расположения объекта в заданной точке (чем выше яркость, тем выше вероятность).



Рисунок 4 – Плотная карта оптического потока:

а) – один кадр из серии, для которой выполнено построение потока;

б) – отображение плотного потока с использованием псевдоцвета

Насыщенность цвета пикселя на рисунке 4, б определяется длиной, на которую переместилась точка, цветом определяется угол, в направлении которого она сместилась

Таким образом, во 2-й главе изложены разработанные автором алгоритм предварительной стабилизации кадра, метод обнаружения объектов и алгоритмы сопровождения объектов, что отвечает положениям 1-3, выносимым на защиту.

В третьей главе «Разработка экспертной системы выбора алгоритма сопровождения объектов» представлена искусственная классификационная нейронная сеть, которая на основе видеосюжета выбирает оптимальный алгоритм сопровождения для данной ситуации. Предлагаемое решение отличается от экспертных и мажоритарных систем тем, что выбор алгоритма осуществляется еще до выполнения просчёта всех алгоритмов. За счёт этого достигается значительно более высокая скорость работы.

Рассмотрены различные варианты конфигураций скоростных неглубоких сетей, а также различные наборы входных данных.

Для анализа качества работы применялась функция потерь (binary cross entropy), представляющая собой разницу между истинным и прогнозируемым значениями.

Исследовалось влияние на функцию потерь таких показателей, как:

- различные варианты входных изображений;
- различные варианты выделения фрагмента входного изображения;
- различные варианты размера входного изображения;
- различное количество ячеек памяти LSTM;
- различный формат выходных данных.

Доказано, что наибольшую эффективность демонстрирует набор данных, основанный на сочетании плотного оптического потока и изображения текущего кадра с обрезкой до двух размеров объекта, с одним слоем памяти и размером входного слоя 128x128 точек. В качестве выходного значения использовалась вероятность выбора того или иного алгоритма для данных условий. Итоговая метрика (categorical_accuracy) составила 84 %. Время вычисления предсказания с использованием нейронной сети не превышает 12 мс.

В четвертой главе «Экспериментальное исследование» проведено сравнение существующих решений в области обнаружения и сопровождения объектов. Для исследования алгоритмов обнаружения подвижных объектов были подготовлены видеофрагменты, на которых расположены в статичном состоянии от 1 до 8 объектов, которые затем начинают движение (одновременно или с небольшим интервалом).

Разработанная система должна отреагировать на движение объекта и выделить его с показателем IoU не ниже 50%. В этом случае объект на кадре видеопоследовательности считается корректно обнаруженным. Для получения численной оценки работы метода обнаружения применяется следующее отношение:

$$D = \frac{P}{P + E_1 + E_2},$$

где P – количество корректно обнаруженных объектов, E_2 – количество не обнаруженных алгоритмом подвижных объектов (ошибка II рода), E_1 – количество обнаруженных алгоритмом неподвижных объектов (ошибка I рода).

Для проведения эксперимента были выбраны следующие из методов:

- разработанный метод на основе оптического потока без предварительной стабилизации и с разделением объектов (М-0);
- разработанный метод на основе оптического потока с предварительной стабилизацией и разделением объектов (М-1);
- плотная карта оптического потока с бинаризацией и морфологией (М-2);
- межкадровый диспаратет с бинаризацией и морфологией (М-3);
- YOLO детектор, обученный на классы, аналогичные представленным (М-4).

В эксперименте не проводились исследования тепловизионных и радиолокационных изображений, поскольку для реализации данных решений необходимо дополнительное дорогостоящее оборудование, превышающее по стоимости готовое решение на телевизионных камерах.

В результате проведенного эксперимента получены следующие значения (Таблица 1):

Таблица 1. Точность и время работы методов обнаружения.

Метод	Точность, (%)	Время работы, (мс)
М-0	58	10
М-1	79	13
М-2	76	197
М-3	32	10
М-4*	54	45

** YOLO-детектор продемонстрировал высокую точность и выделил все объекты класса только на тех видео, где объект интереса близок по форме и тем данным, на которых обучалась данная нейронная сеть. Также он выделил и неподвижные объекты. Такие показания в данном исследовании не были помечены ни как ошибочные, ни как истинные.*

Таким образом, в ходе эксперимента получено следующее:

1. Метод, основанный на плотной карте оптического потока, не является эффективным по времени вычисления (более 40 мс), что делает его применение невозможным в реальном времени.
2. Предлагаемый метод для обнаружения подвижных объектов (М-0) снижает ошибку на 30 % в сравнении с существующими алгоритмами реального времени (доказывает положение 2).
3. Алгоритм предварительной стабилизации видеопотока (М-1) снижает ошибку на 15-20% в задаче обнаружения подвижных объектов (доказывает положение 1).

Эксперимент по сопровождению подвижных объектов проводился на наборах данных Visual Object Tracking и пользовательском наборе данных. Исследовалось значение показателя mean IoU для различных подходов к сопровождению.

В таблицах 2 и 3 использованы следующие сокращения:

Разработанные алгоритмы

- C – модифицированный корреляционного поиска;
- KP – алгоритм, основанный на сопряжении ключевых точек;
- OF – алгоритм на основе оптического потока;
- YN – результат работы нейросети YNET;
- LR – линейная регрессия;
- Complex – результат работы экспертной системы.

Существующие решения

- B – Boosting трекер;
- M – MIL (Multiple Instance Learning) трекер;
- T – TLD (Tracking-Learning-Detection) трекер;
- G – GOTURN трекер;
- X – CSRT (Discriminative Correlation Filter) трекер.

Сравнение производилось как для каждого алгоритма в отдельности, так и для экспертной системы в целом. Получены следующие результаты: для разработанных алгоритмов (таблица 2), для существующих решений (Таблица 3, 4)

Таблица 2. Усредненные показатели IoU

Показатели IoU						Время работы
C	KP	OF	YN	LR	Complex	
63	65	73	53	50	78	36 мс.

Примечание: разработанные алгоритмы сопровождения демонстрируют высокие (от 51 % до 57 %) показатели качества работы. При этом, добавление системы предвыборки снизило ошибку на 20-25 %. Время работы (система предсказания и выбранного им алгоритма) в среднем не превышает 36 мс.

Таблица 3. Усредненные показатели IoU

Показатели IoU				
Boost	TLD	GOTURN	MIL	CSRT
68	54	46	70	48

Примечание: существующие решения в области сопровождения имеют более высокие показатели качества. Однако все они немного (5-20%) проигрывают разработанному решению.

Таблица 4. Усредненные показатели времени работы

Среднее время работы				
Boost	TLD	GOTURN	MIL	CSRT
51 мс	53 мс	111 мс	76 мс	4 мс

Таким образом, алгоритмы MIL и GOTURN несмотря на высокую точность, имеют крайне низкую скорость вычисления, что делает их применение в реальном времени невозможным.

Остальные алгоритмы демонстрируют достаточно высокие показатели точности работы. Это связано с тем, что данные алгоритмы относятся к обучаемым системам сопровождения, и для их обучения как раз и применялся набор VOT 2014, точно так же, как применялся он и для построения системы предвыборки. Поэтому для получения результатов, независимых от данных, использованных для обучения, было принято решение использовать наборы видео, не входящие в VOT 2014 (таблица 5).

Таблица 5. Усредненные показатели IoU для пользовательского набора данных

Показатель IoU (%)								
Решение, описанное в работе						Существующие решения		
C	KP	OF	YN	LR	Complex	B	G	X
62	47	55	65	50	75	65	55	58

Из результатов, полученных в данной главе, можно сделать вывод, что предложенный подход, основанный на предвыборке алгоритма сопровождения, является эффективным в сравнении с существующими решениями. Полученные результаты демонстрируют увеличение точности работы на 10 % в сравнении с существующими самообучающимися решениями в области сопровождения и на 13 % в сравнении с аналитическими методами сопровождения (положения 4 и 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были выполнены разработка и исследование методов и алгоритмов обнаружения и сопровождения объектов. В результате проведенных исследований решена задача разработки метода и алгоритмов обнаружения и сопровождения разнородных объектов в различных условиях и сценариях.

При этом получены следующие основные научные результаты:

1. Выполнен анализ существующих методов и алгоритмов обнаружения и сопровождения объектов;
2. Разработан алгоритм предварительной обработки изображений, позволяющий устранить искажения, обусловленные недостатками

- конструкции видеосистемы, за счёт анализа оптического потока, снижающий ошибку при сопровождении на 13,5 %, а также уменьшающий вероятность ложного обнаружения подвижного объекта на 18,6 % в сравнении с алгоритмами обнаружения и сопровождения объекта без стабилизации.
3. Разработан метод обнаружения подвижных объектов, обеспечивающий снижение ошибки, на 27 % за счёт применения анализа векторов оптического потока и их кластеризации на основе метода k-средних в сравнении с методом обнаружения, построенным на межкадровом диспаратете.
 4. Разработаны четыре алгоритма сопровождения.
 - Первый основан на корреляционном поиске, и отличается от существующего тем, что корреляционный поиск применяется совместно с методом Нелдера–Мида и методом Мультистарт с расположением начальных точек в окрестностях предыдущего расположения объекта, что сокращает количество вызовов целевой функции не менее, чем в 7,2 раза при сравнении с полным перебором.
 - Второй основан на вычислении оптического потока, и отличается от существующего тем, что частично задействуются векторы, полученные на этапе обнаружения объектов, что сокращает вычислительную сложность в 1,9 раза.
 - Третий основан на сопоставлении особых точек и отличается от существующих решений тем, что применен подход разделения точек на квадраты, что сокращает время, затраченное на поиск пары, в 10 раз в сравнении с алгоритмом полного перебора всех точек-кандидатов.
 - Четвертый основан на сегментационной нейронной сети, которая работает на основе данных межкадрового диспаратета и оптического потока и позволяет определять места, в которых происходило движение, что позволяет добиться показателей точности выше на 10,1 % в сравнении с аналогичным алгоритмом GOTURN.
 5. Предложена алгоритм автоматического выбора алгоритма сопровождения, уменьшающая конечную ошибку сопровождения на 11,3 % в сравнении с принудительным использованием только одного метода сопровождения.
 6. На основе разработанных метода и алгоритмов разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять обнаружение и сопровождение нескольких объектов в условиях реального времени с наименьшим количеством срывов сопровождения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК РФ

1. **Тарасов А.С.** ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ В ЗАДАЧЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СВЯЗЫВАНИЯ ОСОБЫХ ТОЧЕК / Никифоров М.Б., Тарасов А.С. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 3 (63). С. 100-105.
2. **Тарасов А.С.** СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ/Никифоров

М.Б., Тарасов А.С. //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 3 (59). С. 39-44.

3. **Тарасов А.С.** ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ СЕГМЕНТАЦИОННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ / Тарасов А.С., Никифоров М.Б., Бакамбис Н.И // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 6. С. 3-10.
4. **Тарасов А.С.** РАЗРАБОТКА ВИДЕОСИСТЕМЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ / Тарасов А.С., Никифоров М.Б. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 187-192.

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах

5. **Tarasov A.S.** PIECEWISE-LINEAR CONTOUR APPROXIMATION AND LINEAR SECTIONS DETECTION / Tarasov A.S. Novikov A.I., Ustyukov D.I, Efimov A.I. // В сборнике: 2021 23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications, DSPA 2021. 23. 2021.
6. **Tarasov A.S.** ALGORITHMS FOR APPROXIMATING CONTOURS BY LINEAR SECTIONS / Novikov A.I., Efimov A.I., Ustukov D.I., Tarasov A.S. // В сборнике: 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2021. 10. 2021.
7. **Tarasov A.S.** VIDEO-COMPUTER TECHNOLOGY OF REAL TIME VEHICLE DRIVER FATIGUE MONITORING / Muratov Y.R., Nikiforov M.B., Tarasov A.S., Skachkov A.M. // Studies in Computational Intelligence. Scopus Q4 2020. Т. 856. С 106-115.
8. **Tarasov A.** INTELLIGENT VIDEO COMPUTER TRACKING SYSTEM / Tarasov A., Muratov Y., Nikiforov M., Baranchikov A. // В сборнике: 13th International Conference ELEKTRO 2020, ELEKTRO 2020 - Proceedings. 13. 2020.
9. **Tarasov A.** THE DEVELOPING OF TARGETS TRACKING COMPLEX / Tarasov A., V. Potapova, P. Belakov, O. Melnik. // В сборнике: Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2018. electronic publication. 2018.
10. **Tarasov A.** APPLICATION OF EM ALGORITHM IN PROBLEMS OF PATTERN RECOGNITION ON SATELLITE IMAGES / Akinin M.V., Akinina A.V., Tarasov A.S. //В сборнике: 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Proceedings. 6. 2017.

Работы, опубликованные в других изданиях

11. **Тарасов А.С.** ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ СОПРОВОЖДЕНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ / Тарасов А.С., Никифоров М.Б., Тарасова В.Ю. // В сборнике: НЕЙРОИНФОРМАТИКА-2020. XXII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ. Москва, 2020. С. 277-285.

12. **Тарасов А.С.,** РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛЕЙ / Тарасов А.С., Федяев Д.И. // В сборнике: Методы и средства обработки и хранения информации. Межвузовский сборник научных трудов; под ред. Б.В. Кострова. Рязань, 2018. С. 146-148.
13. **Тарасов А.С.** ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ.NETFRAMEWORK ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕБЕЗОПАСНЫХ ВЫЗОВОВ И ДОСТУПА К ПАМЯТИ / Тарасов А. С., Потапова В. Ю. //В сборнике: Методы и средства обработки и хранения информации: Межвузовский сборник научных трудов. Москва, 2017. С. 180-182.
14. **Тарасов А.С.** УВЕЛИЧЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМНОГО КЛАССА ВІТМАР ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УКАЗАТЕЛЕЙ// Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2016. С. 217.
15. **Тарасов А.С.** СОЗДАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ РАСПОЗНАВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ НОМЕРОВ//В сборнике: Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XX Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2015. С. 190-191.
16. **Тарасов А.С.** ПРЕДОСТАВЛЕНИЕ ДОСТУПА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОМУ ПО К ГЕОГРАФИЧЕСКИМ КООРДИНАТАМ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ// Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании "НИТ 2014": материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2014. С. 126-127.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

17. **Тарасов А.С.,** Пономарев Н.И., Филяк И.И., Шадрин М.В. KVANTRON SMART//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669791, 25.10.2022. Заявка № 2022668173 от 06.10.2022.
18. **Тарасов А.С.,** Шадрин М.В. KVANTRON PREFORM INSPECTION MACHINE//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022682667, 24.11.2022. Заявка № 2022668090 от 06.10.2022.
19. **Тарасов А.С.** ПРОГРАММА РАСПОЗНАВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВЫБРАННОГО ОБЪЕКТА И ОЦЕНКА ЕГО НАПРАВЛЕНИЯ//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022661299, 20.06.2022. Заявка № 2022619842 от 30.05.2022.
20. **Тарасов А.С.** ПРОГРАММА ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ//Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022618762, 13.05.2022. Заявка № 2022617925 от 27.04.2022.

ТАРАСОВ Андрей Сергеевич

Метод и алгоритмы обнаружения и сопровождения подвижных объектов на
видеопоследовательности

Подписано в печать 24.10.2023. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,25.

Тираж 100 экз. Заказ

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

Редакционно-издательский центр РГРТУ.