



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

12.02.2026 № 00-21-4-047

на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по ИР

Ю.В. Фомин

« 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертацию Гужвы Никиты Сергеевича «Идентификация светофоров на основе 3D измерений нейронных сетей в мультикамерных системах помощи водителя трамвая», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Актуальность темы диссертации

В условиях интенсивной урбанизации и цифровой трансформации транспортного комплекса автоматизация общественного транспорта приобретает стратегическое значение. Среди всех видов наземного транспорта трамвай обладает наибольшим потенциалом для автономного движения благодаря предсказуемости траектории, однако его эксплуатация в смешанном потоке с автомобилями и пешеходами сопряжена с высокими рисками. Для предотвращения аварийных ситуаций необходимо строгое соблюдение правил, регулируемых дорожной инфраструктурой. Критическим элементом безопасности здесь выступает надежное восприятие сигналов светофорного регулирования, которые определяют приоритет проезда перекрестков.

Специфика динамики рельсового транспорта — высокая инерционность и, как следствие, значительный тормозной путь, а также невозможность маневра уклонения — формирует комплекс жестких требований к системе технического зрения. С одной стороны, необходимо обеспечивать детектирование сигналов на больших дистанциях для плавного торможения, с другой — удерживать объект в поле зрения в непосредственной близости от стоп-линии. Существующие инфраструктурные решения (V2X) пока не имеют широкого распространения, а применение дорогостоящих наборов сенсоров,

008415

И.В. Кузнецова

обеспечивающих высокую точность измерений, экономически нецелесообразно для массового оснащения парка вагонов.

В сложившейся ситуации классические методы компьютерного зрения, оперирующие 2D-проекциями, исчерпывают свои возможности, так как не позволяют с достаточной точностью восстановить пространственную геометрию сцены, необходимую для принятия решений об управлении. В этой связи выбранное диссертантом направление, связанное с переходом к 3D-моделированию дорожной обстановки на основе бортовых мультикамерных систем и нейросетевых методов, представляется обоснованным и перспективным для реализации экономически эффективных систем помощи водителю. Работа Гужвы Н.С. направлена на разрешение фундаментального противоречия между необходимостью метрологической точности локализации объектов инфраструктуры и жесткими экономическими ограничениями на аппаратную часть системы.

Научная новизна и основные результаты исследований

В диссертационной работе получены новые научные результаты, развивающие методологию обработки информации в системах автономного управления.

1. В области комплексирования сенсорной информации автором разработан метод ассоциации объектов, наблюдаемых разнофокусными камерами. В условиях, когда традиционные геометрические критерии оказываются несостоятельными из-за параллакса и временных задержек, предложен подход, компенсирующий эти факторы. Новизна заключается в использовании комбинированной метрики, объединяющей проекционные ограничения с семантической близостью глубоких признаков, что обеспечивает формирование единой непротиворечивой модели дорожной сцены по данным асинхронных источников.

2. Принципиально новым является применение тесносвязанной архитектуры сигма-точечного фильтра Калмана для обработки измерений 3D-нейросети. Впервые в данном классе задач предложен метод, исключающий этап промежуточной триангуляции, вносящей критические ошибки при малых базисах камер. Коррекция вектора состояния производится непосредственно по измерениям на плоскости изображения, что позволило исключить этап линеаризации и существенно повысить точность локализации светофоров.

3. Развитие методологии оценки качества систем управления отражено в разработанной методике семантической валидации. Научная новизна состоит в формализации системы событий и состояний, позволяющей использовать управляющие воздействия водителя в качестве эталона. Это обеспечило переход от статических метрик детектирования к динамической оценке надежности принятия решений, что открывает возможность верификации алгоритмов на массивах данных естественного трафика без предварительной разметки.

Таким образом, научная новизна заключается в разработке комплексного алгоритмического обеспечения, позволяющего интегрировать высокоуровневые

детекции нейронных сетей в стохастическую модель движения рельсового транспортного средства с использованием априорных топологических ограничений (цифровой карты путей).

Степень обоснованности и достоверности научных положений

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается строгим использованием математического аппарата системного анализа, теории вероятностей и стохастической фильтрации. Теоретические выводы базируются на представительном объеме эмпирических данных (более 100 часов видеозаписей реальных рейсовых поездок), полученных в различных погодных условиях и режимах освещенности.

Ключевые этапы апробации и внедрения:

1. Научное признание: Основные результаты работы докладывались на ведущих международных и всероссийских научно-технических конференциях и в полной мере отражены в рецензируемых научных изданиях.
2. Промышленное внедрение: Разработанное алгоритмическое обеспечение внедрено в серийную эксплуатацию в составе систем активной помощи водителю (ADAS), производимых ООО «Когнитив Роботикс».
3. Эксплуатационная проверка: Системы успешно функционируют на подвижном составе СПб ГУП «Горэлектротранс» (г. Санкт-Петербург).
4. Публичная демонстрация: Особую значимость имеет успешная апробация алгоритмов в рамках Всероссийского конкурса профессионального мастерства водителей трамвая (2024 г.). В ходе соревнований беспилотный вагон, оснащенный разработанной системой, продемонстрировал точность остановки и соблюдение правил проезда регулируемых перекрестков на уровне, сопоставимом с показателями опытных водителей-инструкторов.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научно-методического аппарата комплексирования данных в системах технического зрения. Автором формализована задача ассоциации измерений в пространстве признаков различной природы (геометрических и семантических), что расширяет применимость методов трекинга на случай асинхронных сенсоров. Разработанные математические модели наблюдения для сигма-точечного фильтра Калмана, связывающие 3D-координаты объекта с их проекциями на плоскости изображения, вносят вклад в теорию оптимального оценивания, предлагая эффективный способ учета нелинейностей измерительного тракта без потери точности на линеаризацию. Обоснована эффективность применения неевклидова представления геометрии рельсовых путей («арочно-линейный вид»), что позволяет снизить вычислительную сложность алгоритмов сопоставления объектов с картой в задачах навигации и управления. Кроме того, развиты методы валидации информационно-управляющих систем: предложен формальный аппарат, позволяющий оценивать достоверность работы алгоритмов

технического зрения через анализ корреляции их выходных состояний с динамикой движения объекта.

Практическая значимость работы определяется созданием экономически эффективной технологии автономного восприятия, пригодной для массового внедрения.

Ключевые результаты практического применения включают:

1. Снижение себестоимости системы: предложенная архитектура комплексирования данных позволила исключить необходимость использования дорогостоящих лидарных сенсоров, обеспечив сопоставимую точность на базе монокулярных камер. Это существенно снижает стоимость бортового оборудования и барьеры для его массового внедрения.

2. Повышение эксплуатационной безопасности: применение разработанных методов нелинейной фильтрации обеспечило расширение зоны уверенного детектирования сигналов до 150 метров. Это позволяет системе заблаговременно и плавно инициировать алгоритмы торможения, что критично для тяжелого рельсового транспорта с большой тормозной дистанцией.

3. Модульность и масштабируемость программных решений: разработанное алгоритмическое обеспечение обладает свойством инвариантности к аппаратной платформе. Это позволяет интегрировать предложенные модули в системы управления различных моделей подвижного состава с минимальной адаптацией математического обеспечения.

4. Оптимизация производственного цикла: внедрение методики автоматизированной валидации позволило формализовать процесс тестирования, значительно сократив трудозатраты на отладку новых версий ПО и оценку корректности работы алгоритмов в различных сценариях.

Полученные программные решения и методики могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием интеллектуальных транспортных систем и разработкой автопилотов для городского рельсового транспорта.

Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования

Результаты диссертации рекомендуется использовать в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах профильных организаций, занимающихся разработкой беспилотного транспорта (ООО «Когнитив Роботикс», ПАО «КАМАЗ», ООО «ПК Транспортные системы»), а также в учебном процессе ФГАОУ ВО «СПбПУ», НИТУ МИСИС и МАДИ при разработке курсов по дисциплинам «Компьютерное зрение» и «Интеллектуальные транспортные системы».

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертационная работа изложена на 154 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Структура работы логична и соответствует поставленным задачам.

В первой главе автор проводит глубокий системный анализ предметной области. Диссертантом обоснован выбор пассивных оптических сенсоров (камер) как основного источника информации, с учетом ограничений по стоимости и надежности для городского транспорта. В главе представлен подробный сравнительный анализ существующих подходов, включая V2X-технологии и лидарные системы с HD-картами, где показаны их ограничения для массового внедрения (инфраструктурные затраты, проблемы актуализации карт). Также автором четко сформулирована проблема релевантности светофоров и предложена концепция использования “упрощенных” цифровых карт в сочетании с бортовым зрением, что является оптимальным компромиссом для систем уровня L2/L3.

Во второй главе детально проработана проблема ассоциации данных в мультикамерной системе. Автор предлагает научно обоснованный подход к построению комбинированного критерия сопоставления детекций, объединяющему анализ глубоких признаков (векторных представлений) и геометрических проекций. Диссертантом проведен анализ ограничений однокомпонентных метрик (IoU, косинусное расстояние) и предложена гибридная схема сопоставления, позволяющая компенсировать ошибки детектирования при частичных перекрытиях. Также в главе приведена методика экспериментального подбора весовых коэффициентов метрики на основе минимизации функции ошибки бинарной классификации, что свидетельствует о тщательной проработке алгоритмического обеспечения.

Третья глава является ядром исследования и содержит наиболее значимые теоретические выкладки. Представленный математический аппарат сигматочечного фильтра Калмана адаптирован под специфику задачи с учетом использования 3D детектирующих нейронных сетей. В главе приведено подробное описание синтеза тесносвязанной архитектуры фильтра, где вектор измерений формируется напрямую из выходов нейронной сети, что позволяет избежать ошибок линеаризации. Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами имитационного моделирования на синтетических данных, демонстрирующими превосходство UKF над EKF по скорости сходимости и точности оценки координат в условиях сильного шума (снижение СКО на 78-85%). Важным дополнением является методика привязки треков к цифровой карте перекрестка на основе метрики Махаланобиса, а также алгоритм классификации сигналов с механизмом временной фильтрации на основе параллельных гипотез.

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке и валидации разработанных алгоритмов. Автор вводит оригинальную методику оценки, основанную на анализе действий водителя как эталона, что позволяет перейти от

статических метрик к оценке качества принятия решений в динамике. В главе подробно описана система формализованных состояний и событий, формирующих граф переходов конечного автомата, моделирующего процесс проезда перекрестка. Приведенный сравнительный анализ трех конфигураций системы на выборке из 437 событий (более 100 часов видео) подтверждает эффективность предложенной двухкамерной схемы с UKF-фильтрацией, обеспечивающей полноту распознавания 97.46% и минимизацию критических ошибок второго рода.

Замечания и недостатки диссертации

Высоко оценивая работу, ведущая организация считает необходимым отметить следующие недостатки и дискуссионные моменты:

1. В работе недостаточно обосновано использование термина «измерения» применительно к выходным данным нейронных сетей. Не проводится четкого разграничения между процессом стохастического оценивания координат объектов нейронной сетью и метрологическим понятием «измерения», что порождает терминологическую двусмысленность при описании метрологических характеристик системы. В частности, в главе 3 (стр. 91–94) при описании регрессионного выхода нейронной сети для оценки расстояния не приводится анализ инструментальной погрешности, что критично для систем, претендующих на метрологическую достоверность.

2. Из представленных материалов следует, что обучение нейронных сетей проводилось на выборках, размеченных преимущественно в 2D-пространстве. При этом оценка точности построения 3D-сцены выполнена на основе имитационного моделирования, что оставляет открытым вопрос о верификации предложенных алгоритмов в реальных условиях эксплуатации при наличии динамических деформаций кузова и специфических вибраций рельсового транспорта. Результаты моделирования в параграфе 3.2 (табл. 4, стр. 88) демонстрируют преимущество UKF и EKF на синтетических данных, однако в работе отсутствует количественное сопоставление этих результатов с натурными физическими измерениями на линии, что затрудняет оценку реальной точности системы.

3. Автор заявляет об активном характере системы управления, реализующей функции автоматического торможения, однако в работе недостаточно внимания уделено анализу сценариев частичного или полного «отказа» алгоритма. В описании диаграммы состояний системы (рис. 4.1, стр. 107) не в полной мере раскрыты механизмы перехода в безопасное состояние при возникновении критической неопределенности в идентификации сигнала светофора или потере синхронизации сенсоров.

4. В диссертационной работе рассматриваются мультикамерные системы, однако вопросы динамической перекалибровки камер в процессе длительной эксплуатации затронуты лишь косвенно, что может ограничивать применимость метода в системах с длительными эксплуатационными интервалами без регулярной ручной юстировки сенсоров. Методика,

представленная как в части геометрических преобразований (п. 2.2.2), так и в описании алгоритмов фильтрации (параграф 3.2), базируется на функции измерения, которая предполагает неизменность параметров внешнего ориентирования камер. Это не учитывает возможные микро-смещения оптических осей из-за вибраций, характерных для рельсового транспорта.

5. Название работы и ряд формулировок содержат избыточное обобщение до «транспортных средств» в целом, в то время как вся доказательная база, специфика алгоритмов фильтрации и патентные решения (в частности, использование ограничений по рельсовой колее) жестко привязаны именно к рельсовому транспорту.

6. Несмотря на наличие патента на способ позиционирования с использованием «арочно-линейного вида» путей (Патент РФ № 2839177), в тексте диссертации недостаточно подробно раскрыта математическая связь между этим специфическим видом представления карты и процессом нелинейной фильтрации координат светофоров. В описании алгоритма ассоциации светофоров с картой (параграф 3.3, стр. 92, формула 3.34) в качестве метрики используется расстояние Махаланобиса. Однако, несмотря на декларацию учета неопределенности данных на карте, в расчетных моделях априорная точность цифровой модели пути (ЦМП) фактически принимается за абсолютную. В работе отсутствует анализ того, как вероятностная погрешность оцифровки путей (инструментальная ошибка карты) влияет на итоговую надежность идентификации объектов на участках с близко расположенными путями и сложными развязками.

В целом, приведённые недостатки не снижают научный уровень представленного исследования, не опровергают и не ставят под сомнение достоверности и значимости основных научных результатов рассматриваемой диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Гужвы Никиты Сергеевича «Идентификация светофоров на основе 3D измерений нейронных сетей в мультикамерных системах помощи водителя трамвая» на соискание ученой степени по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика является законченной научно-квалификационной работой.

Диссертация Гужвы Н.С. характеризуется новизной, актуальностью, теоретической значимостью и практической ценностью результатов. Результаты являются достоверными и научно обоснованными. В работе успешно решена актуальная научно-техническая задача повышения точности идентификации светофоров в условиях сложной городской среды.

К числу наиболее значимых достижений автора следует отнести:

1) научный синтез методов: автору удалось успешно реализовать конвергенцию современных глубоких нейронных сетей (архитектуры YOLO, RegNet) с классическим аппаратом нелинейной фильтрации (UKF/EKF), что позволило значительно повысить устойчивость системы к зашумленным входным данным.

2) инновационный подход к моделированию: разработанный оригинальный метод представления рельсовых путей в «арочно-линейном виде» (подтвержденный Патентом РФ № 2839177) является существенным вкладом в развитие систем технического зрения для рельсового транспорта, обеспечивая эффективное использование специфических ограничений движения.

3) методологическая полнота: работа охватывает полный цикл обработки информации — от детекции в 2D-плоскости и трансформации в 3D-пространство до принятия решений в системе управления, что свидетельствует о глубоком системном подходе автора.

4) практическая применимость: полученные результаты прошли успешную апробацию и внедрение, что подтверждает их востребованность для развития отечественных технологий автономного транспорта и систем активной безопасности пассажирских перевозок.

Диссертационная работа Гужвы Н.С. по содержанию, научному уровню и степени завершённости исследования соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Гужва Никита Сергеевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации.

Диссертационная работа и отзыв обсуждены и одобрены на расширенном научном семинаре Высшей школы управления киберфизических систем (ВШУКС) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», на котором присутствовало 16 сотрудников, протокол № 16 от «28» января 2026 г.

Отзыв подготовили:

Председатель:

доктор технических наук, профессор,
профессор ВШУКС

В. П. Шкодырев

Кандидат технических наук, доцент,
доцент ВШУКС

А. Н. Рассказова



Сведения о составителях отзыва:

ФИО: Шкодырев Вячеслав Петрович

уч. степень, уч. звание: д-р техн. наук, профессор

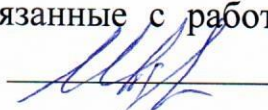
Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ

Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

Тел: +7 (812) 552-97-14

e-mail: shkodyrev@mail.ru

Я, Шкодырев Вячеслав Петрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

 В. П. Шкодырев

ФИО: Рассказова Альбина Николаевна

уч. степень, уч. звание: канд. техн. наук, доцент

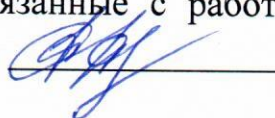
Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ

Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

Тел: +7 (812) 552-97-14

e-mail: an_rasskazova@mail.ru

Я, Рассказова Альбина Николаевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

 А. Н. Рассказова