

На правах рукописи



**Рощин Дмитрий Александрович**

**КОМПЛЕКСНАЯ ВИДЕОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении "Научно-исследовательский испытательный центр Железнодорожных войск" Министерства обороны Российской Федерации.

Научный консультант: доктор технических наук **Сахаров Константин Юрьевич**

Официальные оппоненты: **Бусурин Владимир Игоревич**, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Системы автоматического и интеллектуального управления», профессор

**Соколов Сергей Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», главный научный сотрудник

**Щербаков Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Инженерная геодезия», заведующий

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г. в \_\_\_ на заседании диссертационного совета 32.1.008.01 при «Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений» по адресу: 119361, г. Москва, ул. Озерная, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «ВНИИОФИ» и на сайте <http://www.vniiofi.ru/disser.html>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук

**Минаев Владимир Леонидович**

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АФК – аэрофотокамера;

АФС – аэрофотоснимок;

БД – база данных;

БПЛА – беспилотный летательный аппарат;

ВЛС – воздушный лазерный сканер;

ВСКЗ – видеограмметрическая система компьютерного зрения;

ВУ – видеограмметрическое устройство;

ВЦ – визирная цель;

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система;

ГРК – геометрия рельсовой колеи;

ГВЧ – генератор времени и частоты;

Ж/д – железнодорожный;

ИИУС – информационно-измерительная и управляющая система;

ОП – опорный пункт;

ПЗС – прибор с зарядовой связью;

ПН – пункт наблюдения;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ЭВМ – электронная вычислительная машина.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Процесс развития измерительной техники идет по пути ее узкой специализации и неразрывно связан с появлением высоких технологий. Причиной их появления обычно является лучшая конкурентоспособность новых технических решений по сравнению со старыми. Основные тенденции развития измерительной техники направлены на постоянное повышение точности, производительности и диапазона измерений. Также можно выделить тенденцию к комплексному подходу в решении задач организации измерений, который направлен на создание специализированной измерительной техники и методов измерений, в том числе для качественного обслуживания транспортной отрасли.

Транспортная стратегия РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства РФ № 3363-р от 27.11.2021) устанавливает требования по увеличению пропускной и провозной способности ж/д магистралей в целях повышения пространственной связанности и транспортной доступности территорий, что предполагает ускоренные темпы строительства и реконструкции железных дорог на основе применения информационных технологий обработки больших данных, а также интеллектуальной технологии компьютерного зрения, объединяющей оптико-электронные устройства и методы цифровой обработки оптических изображений, основанные на применении законов геометрической оптики, физики, теории обучения, статистических методов и математических моделей.

Очевидно, что реализация данной стратегии не представляется возможной без современной измерительной техники, которая может быть представлена не только разрозненными средствами измерений, но также интеллектуальными многоканальными измерительными информационными системами, которые обеспечивают комплексные измерения различных параметров и совместную математическую обработку результатов измерений. Такие системы могут быть использованы для получения более полной и достоверной информации о техническом состоянии железных дорог, необходимой для безопасной эксплуатации ж/д транспорта, планирования и проведения ремонтных работ. Однако для практического применения технологии компьютерного зрения в измерительных целях требуется научный подход. Научным изучением оптических методов измерения дальности, координат, перемещений в пространстве и скоростей объектов занимается новая научная дисциплина «Видеограмметрия». Интеграция видеограмметрии и технологии компьютерного зрения позволит совместно реализовать наиболее эффективные методы обнаружения, отслеживания, идентификации объекта измерений, определения его геометрических параметров, скорости и вектора перемещения, что обеспечит увеличение производительности видеограмметрических систем и значительно расширит область их применения.

Следует также отметить, что требования к качеству железных дорог становятся все более строгими – это вызвано стремлением к повышению безопасности и скорости грузопассажирских перевозок. Согласно правилам

технической эксплуатации железных дорог (утверждены приказом Минтранса России № 250 от 23.06.2022) эксплуатация ж/д пути не допускается в случае отступления параметров, характеризующих положение рельсовых нитей в профиле, плане, по уровню и по ширине колеи от нормативов. В процессе эксплуатации железных дорог под влиянием различных природных и техногенных факторов происходит естественный износ строения ж/д полотна, приводящий к деформациям формы, изменению геометрических размеров и взаимного положения отдельных элементов конструкции, что в целом негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках ж/д пути. Для выявления деформаций ж/д пути применяются контрольно-диагностические комплексы, передвигающиеся по рельсовым путям. Однако, при возникновении стихийных бедствий и техногенных аварий, влекущих повреждение ж/д пути, применение таких комплексов становится не эффективным.

В соответствии с инструкцией по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов (утверждена распоряжением ОАО "РЖД" № 436/р от 28.02.2020) длинные неровности пути в профиле и в плане, длиной до 200 м относятся к нарушениям характеристик устройства пути, возникающих при выполнении работ по ремонту пути и осадкой основной площадки земляного полотна. Они влияют на плавность хода скоростных поездов. Отступления положения пути в плане и профиле более чем на 20 мм приводят к ограничению максимальной скорости движения поездов до 40 км/ч. Однако, большинство из существующих средств контроля осуществляют только привязку измеренных параметров к системе координат, что препятствует выявлению длинных неровностей рельсовой колеи – это снижает скорость движения ж/д транспорта и пропускную способность железных дорог.

Действующий свод правил СП 238.1326000.2015 «Железнодорожный путь» (утвержден приказом Минтранса России № 209 от 06.07.2015) устанавливает, что проектирование, строительство и реконструкция ж/д пути должны осуществляться в высокоточной системе координат, а при ее отсутствии – в системе координат, обеспечивающей единое координатное пространство и заданную точность измерений. На сегодняшний день наиболее высокоточными средствами измерений координат являются геодезические приборы. В основе их принципа работы лежат технологии лазерной съёмки и координатных измерений по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Однако, существуют ограничения по применению спутниковых систем позиционирования в шахтах, тоннелях, глубоких карьерах. Кроме этого, существуют достаточно обширные географические области с неблагоприятными условиями для приёма сигналов ГНСС. Также на результирующую точность координатных измерений большое влияние оказывает расстояние между опорным (база) и подвижным (ровер) ГНСС-приемниками. Соответственно, по мере увеличения расстояния между ними возрастают погрешности координатных измерений вектора базисной линии.

Таким образом, **актуальность** диссертационного исследования определяется потребностью в оперативной и достоверной информации о

техническом состоянии ж/д путей, необходимой для безопасной эксплуатации ж/д транспорта и планирования ремонтных (восстановительных) работ. В связи с этим, возникает **научная проблема**, связанная с отсутствием знаний о способах оперативного контроля геометрических параметров строящихся, а также поврежденных участков железных дорог в условиях частичной или полной недоступности сигналов ГНСС. Решение этой проблемы направлено на повышение безопасности высокоскоростных перевозок ж/д транспортом и сокращение времени строительно-восстановительных работ на железных дорогах, что имеет важное социально-экономическое значение для удовлетворения современным требованиям повышения пропускной и провозной способностей высокоскоростных ж/д магистралей в России. При этом обобщенными целевыми показателями разрабатываемой комплексной видеограмметрической системы является достижение следующих допустимых погрешностей измерений геометрических параметров ж/д пути: 2 мм для верхнего строения пути, 50 мм для нижнего строения пути.

**Степень разработанности темы исследования.** Основу методологической и теоретической базы исследования составили научные труды отечественных и зарубежных видных ученых: И. С. Грузмана, В. Jahne, A. Rosenfeld, W. K. Pratt, R. C. Gonzalez, R. E. Woods, D. A. Forsyth в области цифровой обработки изображений; В. П. Андреева, Г. Н. Солопченко, Н. А. Рубичева и др. в области разработки и совершенствования ИИУС; Р. Н. Парахуда, Б. Я. Литвинова в области анализа и синтеза ИИУС; В. И. Павлова, В. Б. Дубиновского, Б. В. Краснопевцева в области фотограмметрии; В. Д. Большакова, К. М. Антоновича, М. Я. Брыня в области инженерной геодезии; В. И. Мошкина, В. Я. Колючкина, Ю. В. Визильтера, С. Ю. Желтова, L. Shapiro в области компьютерного зрения; В. В. Малинина, Ю. Г. Якушенкова Л. П. Лазарева в области компьютерного моделирования и оптимизации оптико-электронных приборов; И. Н. Розенберга, Б. М. Лapidуса, И. В. Белова, В. О. Певзнера, Ю. И. Ефименко, В. Г. Козубенко в области управления ж/д транспортом; П. Ф. Бестемьянова, В. В. Щербакова в области контроля технического состояния ж/д путей; А. О. Куприянова, К. Одуана, Б. Гино в области спутниковой навигации; А. В. Комиссарова, Ю. М. Климков, A. Rietdorf в области прикладной лазерной оптики.

В существующих публикациях в недостаточной степени раскрыты физические основы и математические принципы применения технологии компьютерного зрения в целях контроля геометрических параметров ж/д пути. Не в полной мере исследовано влияние условий рабочей среды на метрологические характеристики оптико-электронного устройства, которые напрямую зависят от температуры, освещенности объекта измерения, отражающих свойств его поверхности, уровня оптических и электрических помех в каналах передачи информации и т.п. Недостаточное внимание уделено гибкости ИИУС, проявляющейся в сохранении метрологических и других характеристик ИИУС при изменении условий рабочей среды, смене решаемой задачи или переходе к новому классу объектов измерений.

**Объект исследования** – информационно-измерительная и управляющая система в области контроля геометрических параметров ж/д путей, а также факторы, ограничивающие их пропускную способность.

**Предмет исследования** – методы и средства цифровой обработки видеоизображений, обеспечивающие получение актуальной и достоверной измерительной информации о геометрических параметрах железных дорог.

**Цель диссертационной работы** – формирование на основе технологии компьютерного зрения научного подхода к проектированию новой информационно-измерительной и управляющей системы в области контроля геометрических параметров ж/д пути, позволяющей повысить оперативность применения и точность позиционирования средств контроля в условиях неуверенного приема спутниковых сигналов для обеспечения безопасности высокоскоростных грузопассажирских ж/д перевозок и увеличения пропускной способности железных дорог.

**Задачи исследования:**

1. Разработка концепции проектирования на единой принципиальной, конструктивной, технологической и метрологической основе комплексной видеограмметрической системы, позволяющей решать широкий спектр разнотипных контрольно-измерительных задач в процессе строительства, ремонта и содержания железных дорог.

2. Определение целевых показателей и формирование требований к комплексной видеограмметрической системе для повышения безопасности высокоскоростных грузопассажирских перевозок и сокращения времени ремонтно-восстановительных работ на поврежденных участках ж/д пути;

3. Конструирование физической модели видеограмметрической системы на элементной базе радиоэлектронных и оптико-электронных средств измерений, а также отработка измерительных операций, связанных с применением технологии компьютерного зрения;

4. Спектральный анализ шумов матричного фотоприемника оптико-электронных приборов и разработка методов цифровой обработки изображений, обеспечивающих подавление источников шума и повышение точности координатных измерений видеограмметрической системы.

5. Разработка видеограмметрических методов цифровой обработки видеоизображений на основе технологии компьютерного зрения для обнаружения объекта измерений, а также определения его геометрических параметров, угловых координат, скорости и вектора перемещения.

6. Разработка метода калибровки видеограмметрической системы, позволяющего определять её динамические погрешности в целях повышения точности определения геометрических параметров движущихся объектов.

7. Формирование теоретических основ и технических решений для оперативного контроля геометрических параметров железных дорог с применением БПЛА, позволяющих в условиях неуверенного приема спутниковых радионавигационных сигналов оперативно обнаруживать повреждения верхнего строения и дефекты земляного полотна ж/д пути.

8. Совершенствование процесса проектирования железных дорог на основе применения трехмерных моделей, позволяющих описать структуру путевого развития с учетом топографических, климатических, экологических условий местности, в которых планируется осуществлять строительство, а также экономических факторов, обуславливающих минимизацию расходов на проведение строительно-восстановительных работ.

9. Повышение точности привязки геометрических параметров ж/д пути к геоцентрической системе координат с помощью статистических методов обработки радионавигационных спутниковых сигналов.

10. Разработка на основе технологии компьютерного зрения методов для контроля геометрических параметров верхнего и нижнего строения ж/д пути в процессе строительства, ремонта и эксплуатации, обеспечивающих повышение точности и оперативности получения измерительной информации о техническом состоянии контролируемого участка железной дороги.

**Методы исследований.** Теоретические исследования базируются на теории построения ИИУС, а также на основных положениях геометрической оптики, классической механики, прикладной метрологии, математических теорий (матриц, множеств, вероятности и математической статистики). В теоретических исследованиях применялись принципы и методы системного анализа, фотограмметрии, фазовой дальнометрии, цифровой обработки изображений, имитационного стохастического моделирования. Для решения контрольно-измерительных задач применялись методы аналоговой и цифровой обработки измерительных сигналов, прикладной статистики, фото- и видеограмметрии, геодезических измерений, картографии, имитационного моделирования процессов проведения аэрофотосъемки и лазерного сканирования местности, спутниковой навигации и позиционирования по сигналам ГНСС.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивалась аналитическими, вычислительными и экспериментальными методами верификации разработанных технических решений, а также методами планирования эксперимента и компьютерной обработки данных.

**Внедрение результатов работы.** Настоящая диссертация выстраивалась в порядке выполнения исследований от практики к научным изысканиям по результатам проектных работ и ввода в эксплуатацию объектов строительства восточного плеча Байкало-Амурской магистрали железной дороги, начиная с 2016 года. В результате принятых мер по форсированию строительства за 2022 год в ходе реализации II этапа развития Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей выполнен рекордный объём работ, в 1,8 раза выше, чем годом ранее. В частности, основные результаты диссертационного исследования были внедрены в следующие комплексы и систему:

1. Многофункциональный комплекс с БпЛА легкого класса (акт внедрения от 01.09.2022), применяемый в целях мониторинга и диагностики ж/д путей, особенно в случаях их повреждения, когда применение традиционных средств контроля становится невозможным. Применение данного комплекса до 75 % ускоряет обнаружение мест повреждений на ж/д пути и позволяет определять объемы грунта для его восстановления.



2. Программный комплекс (акт внедрения от 01.09.2022), применяемый для высокоточной оценки объемов грунта при строительстве (восстановлении) земляного полотна железной дороги, с помощью которого строятся трехмерные модели участка ж/д пути из загруженных аэрофотоснимков и данных лазерного сканирования. Данный комплекс уменьшает до 14 % погрешность определения объемов земляных работ по сравнению с результатами, полученными с помощью геодезических планов местности. При этом использование трехмерных моделей в САПР железных дорог позволяет до 10 раз сократить время выполнения проектных работ, а также снизить вероятность появления ошибок на этапе проектирования.

3. Интеллектуальная система автоматизированного управления беспилотной строительной и специальной техникой, выпускаемой на заводе ДСТ Урал (акт внедрения от 12.10.2022). Данная система обладает следующими функциями: определение текущего состояния и положения рабочих органов, расчет необходимых значений корректирующих воздействий на рабочие органы в соответствии с заданием на производство работ, формирование управляющих сигналов в соответствии с принятыми протоколами (на всех уровнях). В результате оснащения этой системой беспилотных дорожно-строительных машин до 2 раз повышается их производительность, а также безопасность выполнения строительно-восстановительных работ.

Основные научные результаты диссертации, на которых базируются перечисленные внедрения, получены лично автором в процессе: создания и обучения интеллектуальных систем автоматического управления спецтехникой, исследования комплексов с БПЛА, разработки моделирующих комплексов для проектирования железных дорог, исследования аддитивных технологий для обоснования разработки перспективных образцов ж/д техники, разработки имитационных моделей технологических процессов восстановления ж/д объектов, оптимизации производственных процессов сооружения верхнего строения пути, разработки программно-аппаратного комплекса и интегрированной информационно-вычислительной среды центра коллективного доступа. Данные работы выполнялись в рамках реализации национального проекта "План комплексной модернизации и расширения магистральной инфраструктуры" на период до 2024 года, что подтверждает высокий уровень, обоснованность и достоверность результатов исследований, направленность на решение крупных научных и практических задач.

Разработки, выполненные по материалам диссертационной работы, многократно экспонировались на выставках и конкурсах, были отмечены: дипломом лауреата конкурса «Лучший проект в сфере информационных технологий в интересах обеспечения обороны и безопасности Российской Федерации» в 2022 году, дипломом лауреата LXII Международной научно-практической конференции «Вопросы технических и физико-математических наук в сфере современных исследований» в 2023 году, дипломом лауреата конкурса «Прорыв в будущее» («Лучший инновационный проект в интересах вооруженных сил Российской Федерации») в 2024 году и др.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Метод цифровой обработки изображений в частотной области на основе спектрального анализа шумов матричного фотоприемника и фильтрации гармонических составляющих спектра Фурье развернутой профилограммы контура визирной цели обеспечивает подавление аддитивных шумов на изображении, компенсирует искажения контура визирной цели и приводит погрешность измерения видеограмметрической системой угловых координат визирной цели в пределы 20" на дальности более 1 м.

2. Метод калибровки видеограмметрической системы по видеоизображению физического маятника, совершающего плоскопараллельные затухающие колебания с траекторией движения, рассчитанной на основе элементарной функции для вычисления эллиптического интеграла 1-го рода, позволяет определить калибровочную кривую, с относительной погрешностью не более 1%, для компенсации динамической составляющей погрешности измерений скорости движения объектов.

3. Аэрофотопографический метод формирования трехмерных моделей ж/д пути на основе аэрофотосъемки и лазерного сканирования позволяет обнаруживать рельсовую колею на изображении и определять коэффициент масштабирования аэрофотоснимков по нормируемому значению параметра ширины рельсовой колеи, что обеспечивает уменьшение до 2 раз средней квадратической погрешности измерения координат точек сканируемой поверхности участка ж/д пути.

4. Видеограмметрический метод решения задачи обратной однократной угловой засечки из одной точки съемки трех равноудаленных друг от друга визирных целей активного типа позволяет на основе элементов внутреннего ориентирования снимка определять координаты и пространственное положение рабочего органа дорожно-строительной машины, что обеспечивает операционный контроль геометрических параметров земляного полотна ж/д пути в процессе производства земляных работ с погрешностью до 22 мм в радиусе до 100 м.

5. Статистический метод несмещенной оценки времени прохождения радионавигационного спутникового сигнала по выборке результатов сравнений системной шкалы времени спутника со шкалой опорного генератора сигналов времени и частоты позволяет до 2 раз уменьшить среднюю квадратическую погрешность измерения на суточном интервале времени наблюдения и до 10 % уменьшает погрешность определения координат опорного пункта в геоцентрической системе координат.

6. Метод цифровой обработки изображений визирных целей, размещенных на путеизмерительной тележке, позволяет определять координаты точек рельсовых нитей с погрешностью до 2 мм в пределах звена рельсошпальной решетки, что обеспечивает выявление длинных неровностей рельсовой колеи на кривых участках пути.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Указанная область исследования соответствует п.п. 1-4 и 8 паспорта специальности 2.2.11 – «Информационно-измерительные и управляющие системы».

### **Научная новизна работы:**

1. Сформирована концепция проектирования комплексной видеограмметрической системы компьютерного зрения на элементной базе радиоэлектронных и оптико-электронных средств измерений утвержденного типа, позволяющая увеличить диапазон измерений и уменьшить погрешность системы более чем в 2 раза, а также расширить область возможного применения ИИУС, обеспечивая решение более 10 разнотипных контрольно-измерительных задач в процессе строительства, содержания и ремонта железных дорог (*патенты на изобретения РФ №№ 2769637, 2686341, 2779703*).

2. На основе режекторного и идеального низкочастотного фильтров, а также двумерного преобразования Фурье разработан метод фильтрации шумов матричного фотоприемника, позволяющий подавить аддитивный шум на изображении и скомпенсировать искажения контура визирной цели, что обеспечивает уменьшение погрешности измерения угловых координат визирной цели (*патент на изобретение РФ № 2655467*).

3. Разработан метод калибровки видеограмметрической системы по видеоизображению тест-объекта с контролируемыми динамическими параметрами перемещения, представляющего собой физический маятник, совершающий плоскопараллельные затухающие колебания, траектория движения которого рассчитывается на основе полученной элементарной функции для вычисления эллиптического интеграла 1-го рода. Данный метод позволяет оценить погрешность видеограмметрической системы при измерении геометрических параметров движущихся объектов (*патент на изобретение РФ № 2823551*).

4. На основе проекционного метода регистрации изображений, триангуляционного метода определения дальности, а также метода сегментации изображений разработан новый метод построения трехмерных панорамных изображений объектов, позволяющий осуществлять цифровую обработку стереопар разноракурсных изображений, формируемых в процессе вращения оптико-электронного устройства и определять дальности объектов, которые попадают в поле его зрения (*патент на изобретение РФ № 2680852*).

5. На основе методов аэрофотопографической съемки и воздушного лазерного сканирования разработан новый метод построения цифровой трехмерной модели участка ж/д пути, в котором для ориентирования используются нити рельсовой колеи, расположенные на нормированном расстоянии друг относительно друга, что обеспечивает курсовую устойчивость и навигацию БпЛА на низких высотах в условиях неуверенного приема спутникового радионавигационного сигнала, а также уменьшает погрешность координатных измерений точек на сканируемой поверхности ж/д пути (*патент на изобретение РФ № 2726256*).

6. Разработан метод определения координат точек на местности, находящихся вне зоны прямой оптической видимости видеограмметрической системы, обеспечивающий планово-высотное обоснование и вынос проекта железных дорог в натуру с помощью БпЛА по результатам измерений его зенитного и азимутального углов, дальности и возвышения над местностью (*патент на изобретение РФ № 2809177*).

7. На основе метода решения геодезической задачи обратной однократной угловой засечки разработан видеограмметрический метод, позволяющий определять координаты и пространственное положение рабочих органов дорожно-строительных машин в локальной системе координат, образованной с помощью трех визирных целей активного типа, что обеспечивает операционный контроль параметров земляного полотна ж/д пути в процессе производства земляных работ (*патент на изобретение РФ № 2752687*).

8. Разработан видеограмметрический метод для контроля параметров геометрии рельсовой колеи, который позволяет определять положение рельсовых нитей в плане и профиле с помощью визирных целей, установленных на путеизмерительной тележке, что обеспечивает обнаружение длинных неровностей на криволинейных участках пути (*патент на изобретение РФ № 2686341*).

#### **Теоретическая и практическая ценность работы:**

1. Разработана видеограмметрическая система для определения дальности и координат в локальной системе координат, образованной тремя равноудаленными друг от друга визирными целями активного типа, мигающими с заданными частотами (*патент на изобретение РФ № 2779703*).

2. Разработана видеограмметрическая система для операционного контроля геометрических параметров земляного полотна железной дороги в процессе производства земляных работ, обеспечивающая навигацию дорожностроительных машин и позиционирование их рабочих органов с помощью визирных целей активного типа, установленных на строительном участке (*патент на изобретение РФ № 2769637*).

3. Разработано видеограмметрическое устройство для измерения дальности, положения в пространстве, габаритов, координат, мгновенной скорости и вектора перемещения объектов по их цифровым видеоизображениям (*патент на изобретение РФ № 2689848*).

4. Разработано фотограмметрическое устройство для формирования панорамных пространственных изображений, позволяющее измерять расстояния до окружающих его объектов, а также их отдельных частей, отличающихся по цвету, посредством цифровой обработки стереопар изображений (*патент на изобретение РФ № 2804376*).

5. Разработан видеограмметрический способ для определения параметров погрузки гусеничной техники своим ходом на грузовую платформу, по результатам измерений азимутальных углов визирных целей, установленных на грузовой платформе, а также габаритов грузовой платформы и транспортируемой техники, обеспечивающий безопасность погрузо-разгрузочных работ дорожно-строительных машин (*патент на изобретение РФ № 2022661514*).

6. Разработан алгоритм для обнаружения и идентификации визирных целей активного типа с вероятностью до 99,6 % по визуальным признакам (*свидетельство на программу для ЭВМ № 2022661237*).

7. Разработаны алгоритмы для высокоточной оценки объемов грунта при возведении земляного полотна железных дорог, повышающие точность расчетов и скорость формирования проектных решений на производство

земляных работ с применением трехмерных моделей рельефа местности (*свидетельство на программу для ЭВМ № 202161358*).

8. Разработан алгоритм для обработки радионавигационных спутниковых сигналов, обеспечивающий уменьшение погрешности определения координат средства контроля геометрических параметров ж/д пути и более точную привязку измеренных параметров к глобальной системе координат посредством предложенного метода несмещенной оценки времени прохождения радионавигационных спутниковых сигналов с помощью опорного генератора сигналов времени и частоты (*свидетельство на программу для ЭВМ № 2017661435*).

**Апробация работы.** Материалы, полученные в ходе исследования, докладывались на 33 вузовских, всероссийских и международных научно-практических конференциях, а также семинарах: «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях», ЮЗГУ, г. Курск, 19-21 мая 2011 г.; «Научная сессия ТУСУР-2011», ТУСУР, г. Томск, 4-6 мая 2011 г.; «Информационные системы и технологии», Госуниверситет-УНПК, г. Орёл, апрель-май 2011 г.; «Метрология в XXI веке», ВНИИФТРИ, г. Менделеево, 20 марта 2014 г.; «Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития», ИЦРОН, г. Волгоград, 10 октября 2015 г.; «Теоретические и практические проблемы развития современной науки», НИЦ «Апробация», г. Махачкала, 2016 - 2018 гг.; «Перспективные средства измерений и методы испытаний технических средств и строительных конструкций», НИИЦ ЖДВ, г. Москва, 2017 - 2022 гг.; «Инновационные подходы в современной науке», «Интернаука», г. Москва, 2018 - 2022 гг.; «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований», «Сибирская академическая книга», г. Новосибирск, 2022-2023 гг.; «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022», ЯГТУ, г. Ярославль, 12-14 октября 2022 г.; «Научно-технические вопросы проведения испытаний робототехнических комплексов», ГНИИМЦ ПВ, г. Москва, 2 марта 2023 г. Москва, 2023; «XLV International Multidisciplinary Conference», Primedia E-launch LLC, Shawnee, USA; «Применение информационных технологий обработки больших объемов данных в автоматизированных системах военного назначения», 27 ЦНИИ МО РФ, г. Москва, 16-17 октября 2023 г.; «Актуальные задачи военной метрологии», ГНМЦ МО РФ, г. Кубинка, 17 апреля 2024 г.; Объединенный семинар по робототехническим системам, ИПМ РАН и МГТУ, 2022 г.; Объединенный семинар кафедры «Информационно-измерительные системы и технологии» и кафедры «Лазерные измерительные и навигационные системы», ЛЭТИ, 2023 г.; Объединенный семинар кафедры «Электротехника» и кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования», ВолГТУ, 2024 г.

**Личный вклад автора** заключается в следующем: постановка цели и задач исследования; разработка методов измерений, видеограмметрических устройств и систем, программ для ЭВМ; моделирование и проведение экспериментов, обработка полученных результатов; формулировка выводов. Личный вклад автора в опубликованных работах по теме диссертационного исследования составляет 94% (91 работа опубликована без соавторов).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 97 печатных работах, из которых 32 в центральных изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 18 в журналах, индексируемых в наукометрической базе RSCI (на платформе Web of Science), 4 в журналах, индексируемых в наукометрической базе Scopus, получено 12 патентов на изобретения, 12 свидетельств на программы для ЭВМ.

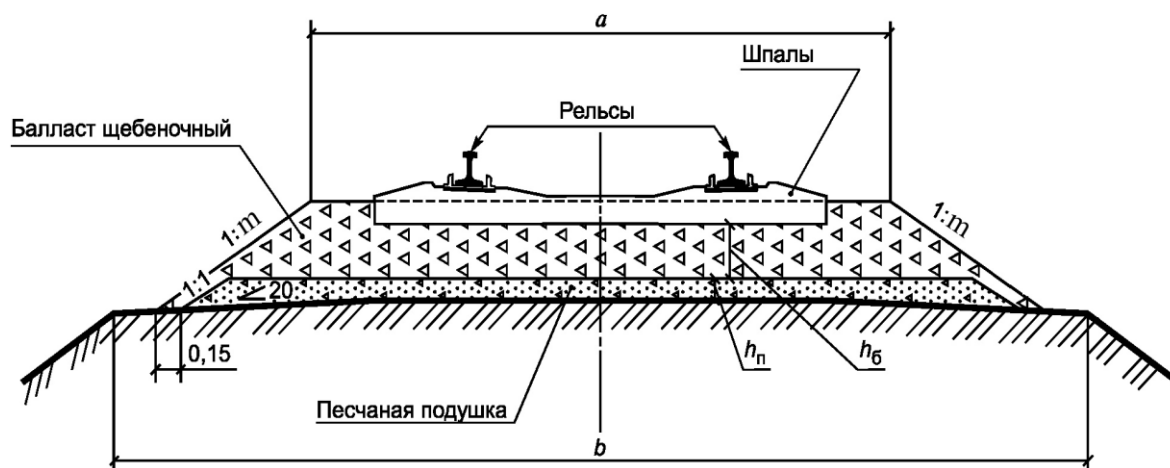
**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 441 страницах машинописного текста, содержит 203 рисунка, 14 таблиц и 359 наименований библиографического указателя.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи исследований, раскрыты научная новизна и практическая ценность, приведены результаты реализации и апробации.

**В первой главе** научно обоснованы требования к видеограмметрической системе компьютерного зрения (ВСКЗ) для контроля геометрических параметров ж/д пути, определены ее структура и состав элементной базы средств измерений (СИ) утвержденного типа.

На рисунке 1 изображено строение ж/д пути в соответствии с ГОСТ 21.702-2013. В процессе производства работ по строительству, текущему содержанию и ремонту ж/д пути контролируются следующие параметры земляного полотна, влияющие на устойчивость рельсовой колеи: ширина основной площадки земляного полотна, крутизна откосов, положение оси ж/д пути в плане и профиле.



$a$  – ширина основной площадки земляного полотна;  $b$  – ось железнодорожного пути;  
 $h_б$  – толщина слоя балласта;  $h_п$  – толщина слоя песка;  $1:m$  – крутизна откосов

Рисунок 1 – Схема железнодорожного пути

Транспортно-эксплуатационное состояние ж/д пути характеризуется параметрами геометрии рельсовой колеи (таблица 1): ширина рельсовой колеи, взаимное положение головок рельсов по уровню, стрелы изгиба рельсовых нитей (в плане и профиле).

Таблица 1 – Параметры геометрии рельсовой колеи

| Параметры  | Графическое представление |
|--|---------------------------|
| $P_1$ – разность отметок головок рельсов в одном поперечном сечении,<br>$P_2$ – ширина колеи   |                           |
| $P_3$ – сужение или расширение колеи рельсового пути ( $S$ – отклонение размера пролета в плане)<br>$P_4$ – взаимное смещение торцов стыкуемых рельсов |                           |
| $P_5$ – зазоры в стыках рельсов<br>$P_6$ – разность высотных отметок головок рельсов на пути, длиной $L$   |                           |
| $R_1, R_2$ – стрелы изгиба рельсовых нитей, радиусами и возвышения оси пути $h_1, h_2$ с прямой вставкой пути, длиной $L$                              |                           |

В путевом хозяйстве используются средства контроля различных типов: измерительный инструмент (ИИ), путеизмерительные тележки (ПТ), путеизмерительные вагоны (ПВ) и беспилотные летательные аппараты (БпЛА). Сравнительный анализ характеристик существующих типов средств контроля параметров ж/д пути приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики типов путеизмерительных средств

| № | Контролируемые параметры ж/д пути                 | ИИ    | ПТ         | ПВ     | БпЛА   |
|---|---|-------|------------|--------|--------|
| 1 | Ширина рельсовой колеи                            | +     | +          | +      | +      |
| 2 | Положение рельсовых нитей по уровню               | +     | +          | +      | +      |
| 3 | Положение рельсовых нитей в плане                 | +     | +          | +      | +      |
| 4 | Просадки рельсовых нитей в вертикальной плоскости | +     | +          | +      | –      |
| 6 | Длинные неровности в плане и профиле              | +     | +          | –      | +      |
| 7 | Короткие неровности на поверхности катания рельса | +     | +          | +      | –      |
| 8 | Подуклонка и наклон поверхности катания рельсов   | +     | +          | +      | –      |
| 9 | Параметры формы земляного полотна                 | +     | –          | +      | +      |
| № | Характеристики средств контроля                   | ИИ    | ПТ         | ПВ     | БпЛА   |
| 1 | Возможность применения на поврежденных участках   | +     | +          | –      | +      |
| 2 | Контроль параметров ж/д пути под нагрузкой        | –     | –          | +      | –      |
| 3 | Погрешность измерений, мм                         | <3    | <3         | <3     | >30    |
| 4 | Производительность контроля, км/ч                 | <1    | <2         | >100   | >50    |
| 5 | Оценочная стоимость                               | низк. | средн.     | высок. | средн. |
| 6 | Уровень реализации                                | ручн. | ручн./авт. | авт.   | авт.   |

Данные средства контроля решают близкие контрольно-измерительные задачи, но имеют разные нагрузки на путь, рабочую скорость, погрешность измерений и форму представления контролируемых параметров. Они могут включать в свой состав оптические и геодезические приборы, оснащаться различными типами гироскопов и приемниками сигналов спутниковых систем позиционирования (ГЛОНАСС, GPS и др.).

При ремонте земляного полотна и реконструкции балластной призмы ж/д пути в основном применяются визирные оптические приборы, нивелиры, теодолиты, цифровые тахеометры. Они обладают высокой точностью и выдают результаты измерений в абсолютных координатах путем привязки к реперной или геодезической сети, однако имеют низкую производительность. Путьеизмерительные тележки имеют сложную конструкцию, включающую датчики ширины колеи, уровня, а также блок гироскопов, которые требуют периодической калибровки и настроек. Кроме этого, необходимо обеспечивать синхронизацию ГНСС аппаратуры позиционирования и блока гироскопов (инерциальной системы) и датчиков. Принцип измерения путьеизмерительных вагонов основан на сравнении положения трех точек на измерительной базе равной 20 м, что ограничивает, или полностью исключают контроль длинных неровностей в плане и профиле. Выявленные недостатки средств контроля могут быть устранены путем перехода к пространственным данным на основе координатного принципа измерений геометрических параметров ж/д пути.

На основе анализа ряда отечественных и зарубежных публикаций разработана и обоснована новая классификация измерительных технологий по области прикладных технических наук. Применение технологического подхода позволяет объединить измерительные устройства и методы измерений, используемые в технологических процессах, что необходимо для качественного обслуживания соответствующей области науки и техники. К измерительным технологиям в области «Электроника, фотоника, приборостроение и связь» отнесены «Компьютерное зрение» и «Лазерное сканирование». К радиоэлектронным измерительным технологиям — навигация и позиционирование. Отдельно выделены информационные технологии, направленные на информационное обеспечение ИИУС.

Сформирована концепция разработки видеограмметрической системы на основе технологии компьютерного зрения, которая способствует совершенствованию создаваемых образцов ИИУС для контроля геометрических параметров железных дорог, улучшению их технических характеристик, расширению функциональных возможностей и области возможного применения за счет новых методов измерений, повышающих точность и оперативность получения измерительной информации (рисунок 2).



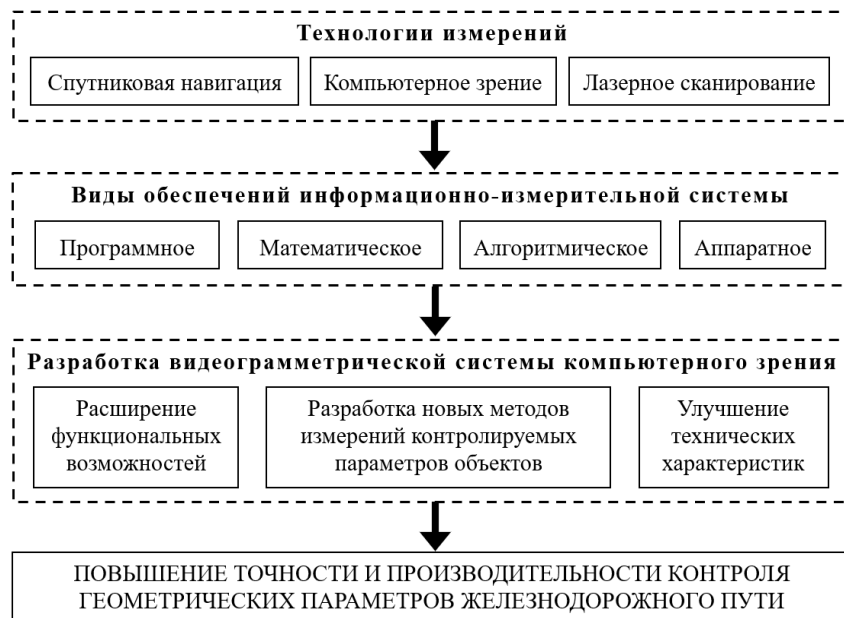
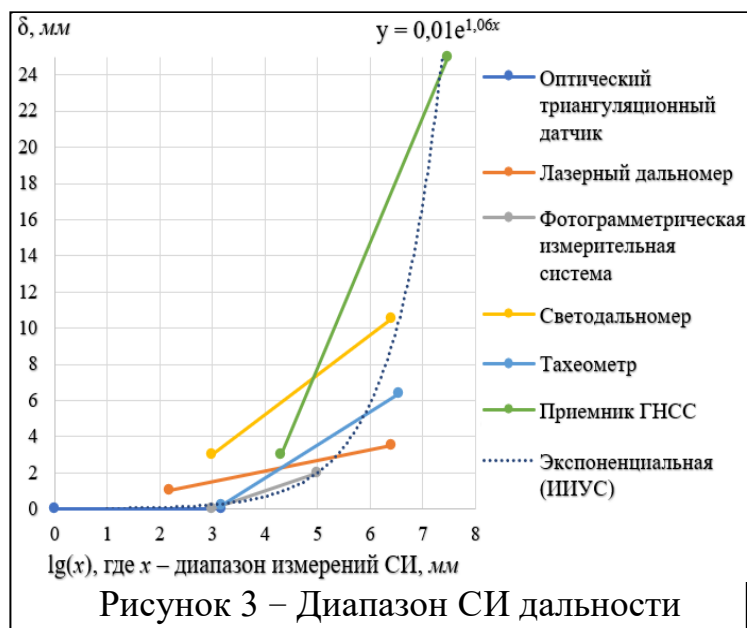


Рисунок 2 – Концепция разработки видеограмметрической системы на основе технологии компьютерного зрения

Для увеличения диапазона измерений в состав ВСКЗ целесообразно включить следующие утвержденные типы радиоэлектронных и оптико-электронных средств измерений (СИ): фотограмметрическую измерительную систему [ $10^3$ – $10^5$ ] мм, лазерный дальномер [ $10^5$ – $10^{6,4}$ ] мм и ГНСС-приемник [ $10^{6,5}$ – $10^{7,5}$ ] мм. Наиболее точным СИ для измерения угловых величин является кодовый теодолит. На графике (рисунок 3)



представлена погрешность измерения ВСКЗ на основе отобранных типов СИ.

В ходе анализа существующей элементной базы СИ были сформированы следующие основные **требования, предъявляемые к ВСКЗ** в целом и к ее функциональным возможностям. В частности, система должна: решать координатно-измерительные задачи с точностью измерений, не уступающей геодезическим приборам, при этом обладать производительностью и функциональностью фотограмметрических систем; обеспечивать автоматический поиск и обнаружение требуемых объектов в зоне прямой видимости, отслеживать их перемещение в пространстве, определять координаты и пространственное положение этих объектов в режиме реального времени; иметь модульную конструкцию, технические и метрологические характеристики которой определяются характеристиками СИ, входящих в ее

состав; обладать гибкой структурой, обеспечивая выполнение измерительных, информационных, вычислительных и логических функций; быть адаптивной к изменениям условий эксплуатации. Основные преобразования измерительной информации в ВСКЗ изображены на рисунке 4.



Рисунок 4. – Схема преобразований измерительной информации в ВСКЗ для контроля геометрических параметров железнодорожного пути

Множество  $A$  результатов измерений геометрических параметров  $U(a)$  объекта измерений определяется оптико-электронными средствами измерений и представляется в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$ , поступают на вход радиоэлектронных средств измерений в момент времени  $t$ , преобразуются в цифровой сигнал и привязываются к глобальной системе координат  $(\varphi, \lambda, h)$ , затем поступают на вход вычислительного устройства в котором сравниваются с параметрами математической модели объекта измерений и вычисляются величины отклонений  $\Delta$  параметров объекта измерений от номинальных значений. Данные преобразования можно записать в графическом виде:

$$\begin{array}{ccccc} (r, \theta, \varphi) & & (\varphi, \lambda, h) & & M(a, \varphi, \lambda, h) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ A \rightarrow \oplus \rightarrow U(a, r, \theta, \varphi) \rightarrow \oplus \rightarrow \Phi(a, \varphi, \lambda, h, t) \rightarrow \ominus \rightarrow \Delta(a, \varphi, \lambda, h, t) \end{array}$$

Структурно-функциональная схема ВСКЗ изображена на рисунке 5. Для получения информации о техническом состоянии железной дороги, применяются различные средства контроля. Затем расчетным путем определяются геометрические параметры ж/д пути. В случае выхода контролируемых параметров за пределы допусков ВСКЗ формирует управляющий сигнал для последующего воздействия на ж/д путь с целью приведения его параметров к допустимым значениям.

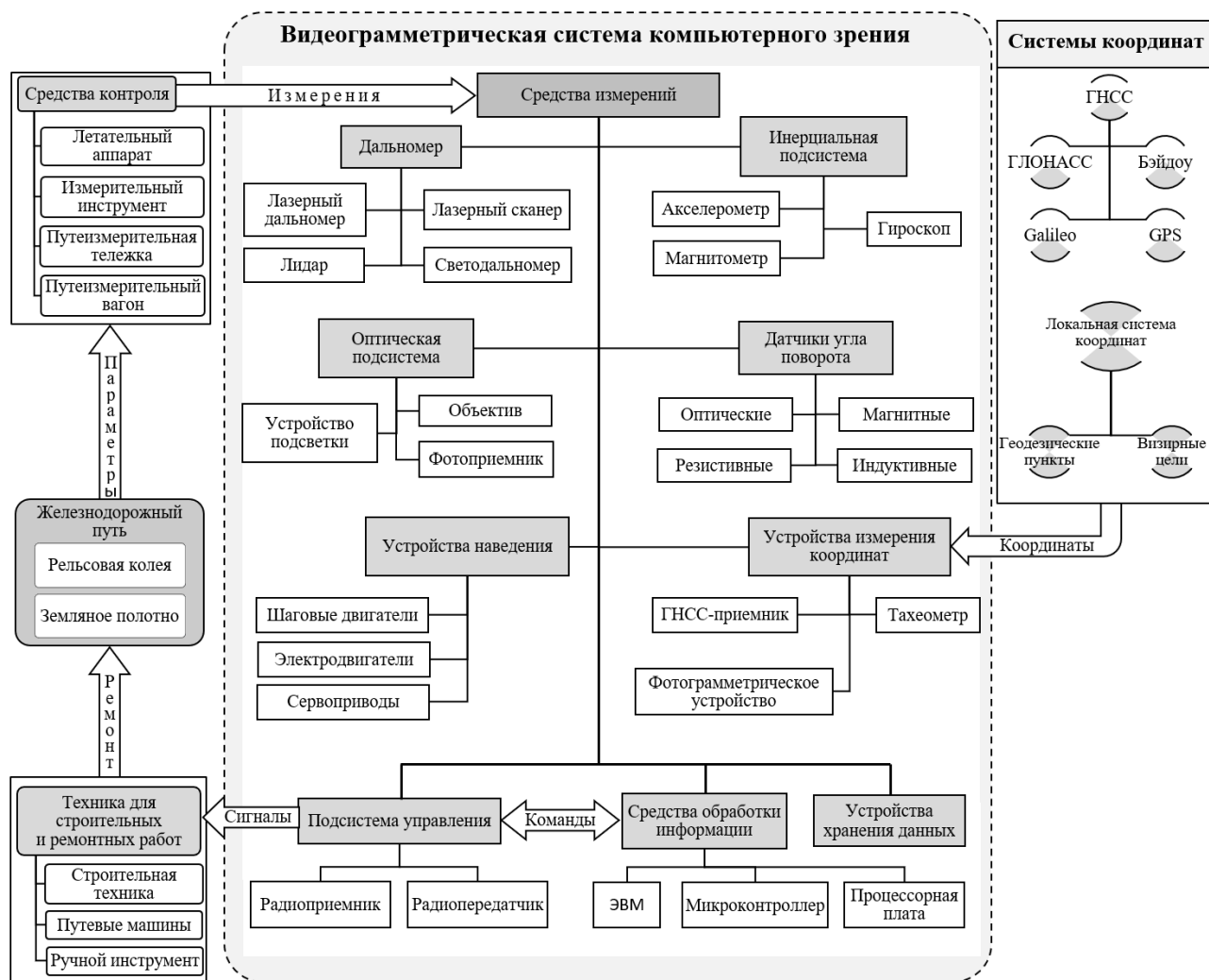


Рисунок 5 – Структурно-функциональная схема ВСКЗ

Дальнейшее развитие ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути целесообразно рассматривать в структурном и функциональном аспектах. Структурный аспект заключается в интегрировании различных подсистем и средств вычислительной техники, позволяющих создать систему с гибкой структурой, а функциональный аспект характеризуется увеличением числа функций, в основном информационных.

**Вторая глава** посвящена обзору и анализу общих принципов и физико-математических основ измерений геометрических параметров ж/д пути.

В целях удовлетворения возрастающих потребностей к пропускной способности железных дорог необходимо развитие методического аппарата и качественное изменение ИИУС, обеспечивающих: повышение точности и скорости измерений, удешевление измерительной процедуры, автоматизацию и снижение трудоемкости измерений, а также использованием более совершенных вычислительных средств и алгоритмов обработки информации. Физические принципы действия СИ в составе ИИУС в значительной степени определяют выбор наиболее подходящих методов измерений.

Существующие методы измерения основаны на различных физических принципах и зависят от вида контроля. Принцип действия бесконтактных методов основан на зондировании рельсовой колеи звуковыми или

электромагнитными волнами. Использование ультразвуковых методов ограничивается невысокой разрешающей способностью, сильным затуханием ультразвука в воздухе, зависимостью от состояния атмосферного давления, температуры, что негативно сказывается на точности результатов измерений. Радиолокационные и магнитные методы применяются в основном для выявления скрытых дефектов в рельсах и обнаружения препятствий на путях.

Оптические методы обеспечивают наивысшую точность в широком диапазоне измерений. Наибольшее распространение получили такие оптические методы, как стереовидение и триангуляция. Одним из проблемных мест данных методов является определение зависимости между координатами на изображении и угловыми координатами пришедшего от изображаемой точки оптического луча. Также возникают проблемы при определении общей точки на стереоизображениях и установлении соответствия друг другу детектированных на разных камерах изображений объекта измерений. Общими недостатками оптических методов являются: сложность конструкции и высокая стоимость оборудования, большое энергопотребление, высокие требования к качеству поверхности измеряемого объекта и к условиям проведения измерений (температура, влажность, запыленность и т.п.).

Все измеренные параметры привязываются к местности с помощью системы навигации ГНСС или реперов (опорных пунктов), устанавливаемых вдоль ж/д пути. Принцип действия ГНСС основан на методе засечки положения мобильного приемника от известных положений навигационно-космических аппаратов. Данный метод обеспечивает оперативное определение координат приемника ГНСС в реальном масштабе времени. С базовой станции через модем на приемник передаётся информация со спутников и дифференциальные поправки. В качестве опорного пункта применяются пункты локальной, региональной или широкозонной дифференциальной подсистем ГНСС.

Разработана блок-схема (рисунок 6), отображающая всю совокупность измерительных операций с помощью ВСКЗ, построенной на базе радиоэлектронных и оптико-электронных средств измерений.

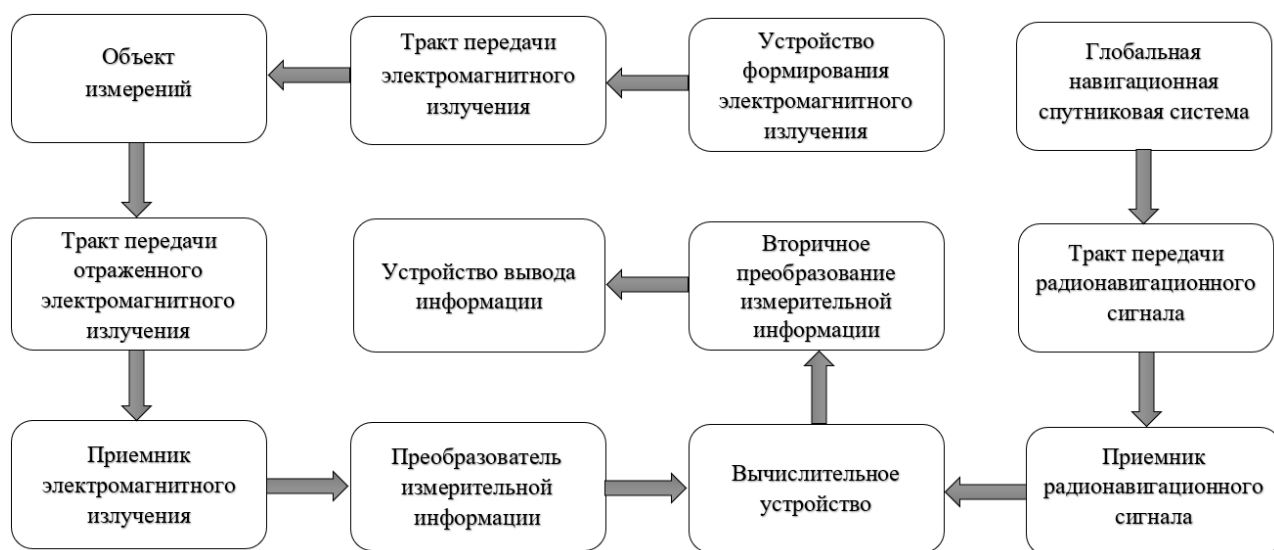


Рисунок 6 – Блок-схема преобразования измерительной информации в ВСКЗ

Несмотря на достаточно развитый научно-методический аппарат по определению параметров, характеризующих техническое состояние ж/д пути, присутствует еще нераскрытый потенциал для уменьшения погрешности измерений этих параметров и более точной их привязки к реперной или геодезической сети. Кроме этого, постоянное повышение требований к пропускной способности железных дорог обуславливает необходимость повышения оперативности и точности существующих средств контроля, достижение которых возможно с помощью технологий компьютерного зрения, лазерного сканирования и спутниковой навигации.

**Третья глава** посвящена разработке видеограмметрического устройства (ВУ) в составе ВСКЗ и совершенствованию координатных методов измерений. Принцип работы видеограмметрического устройства основан на технологии компьютерного (технического) зрения, позволяющей получать информацию об объекте измерений из его оптических изображений путем применения законов геометрической оптики, физики, теории обучения, статистических методов и математических моделей. Включение в состав ВСКЗ фото-видеограмметрических устройств и методов цифровой обработки изображений способствует повышению точности измерений и оперативности применения средств контроля геометрических параметров ж/д пути.

Основным элементом ВСКЗ является оптико-электронное СИ, обеспечивающее обнаружение объекта измерений и определение его геометрических параметров. На рисунке 7 изображена модель разработанного ВУ, размещенного на треноге с трегером, обеспечивающим горизонтирование фото-видеокамеры и дальномера, главная оптическая ось и лазерный луч которых сонаправлены. Путем обработки видеоизображения, результатов измерений дальномера и энкодеров на ЭВМ, определяется направление главной оптической оси и вычисляются координаты объекта измерений.

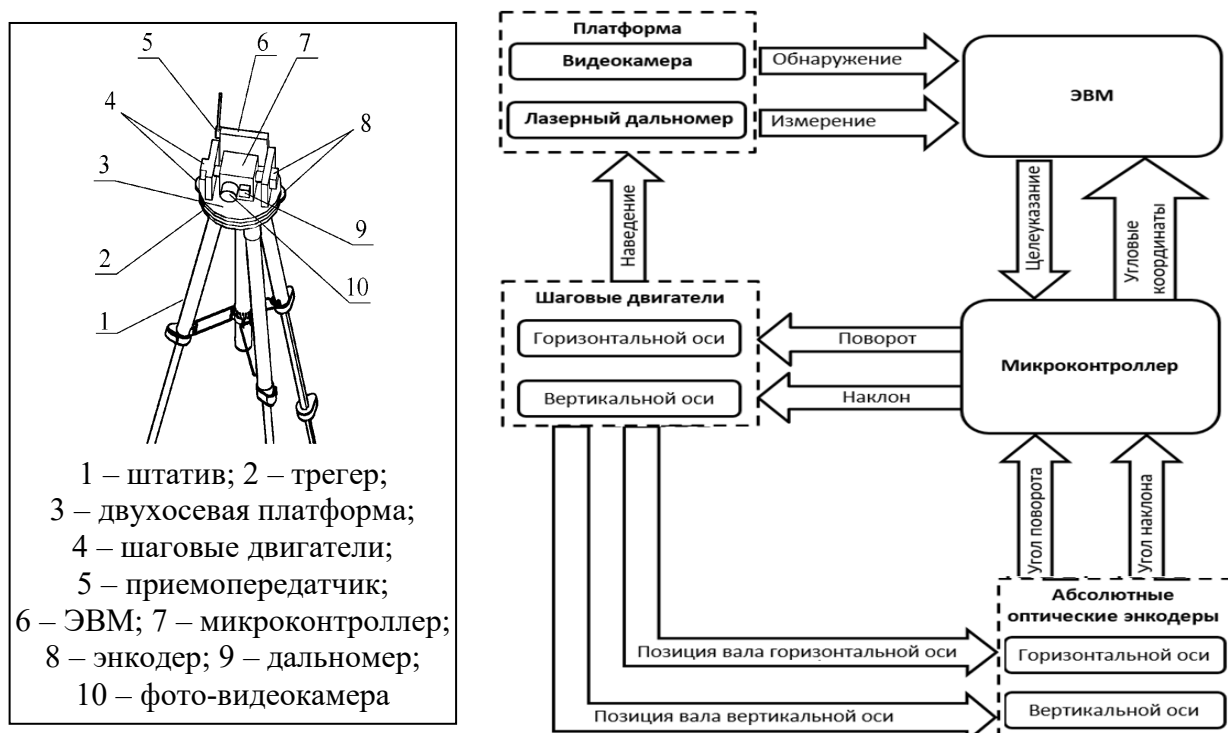


Рисунок 7 – Состав и функциональная схема видеограмметрического устройства

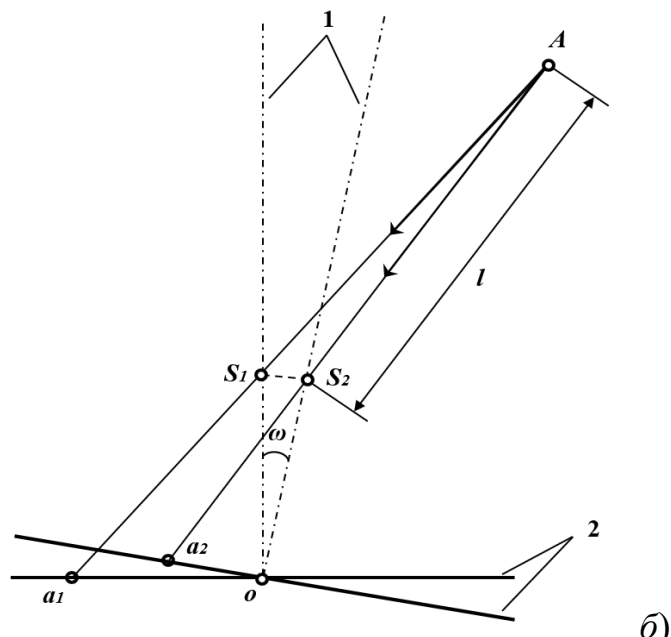
Разработана полнофункциональная физическая модель ВУ, с помощью которой проведен анализ достижимости требований, предъявляемых к функциональному назначению ВСКЗ, и выполнен поиск путей для удовлетворения этих требований. Для решения измерительных задач разработаны методы, позволяющие с высокой вероятностью и точностью обнаруживать объекты измерений в режиме реального времени по визуальным признакам (излучаемая тепловая энергия, движение, цвет, видимые размеры, форма объекта на изображении, частота мигания) и определять их параметры: дальность, положение в пространстве, видимые размеры, координаты, мгновенную скорость и вектор перемещения. На основе ВУ разработано устройство для создания панорамных пространственных изображений путем корреляционной обработки стереопар изображений объектов (рисунок 8). Выведена формула для определения дальности объектов по их стереопаре изображений:

$$l = \frac{f \sqrt{2(1 - \cos \omega)} \sin \left( \frac{\pi + \omega}{2} - \arctg \left( \frac{x_1}{f} \right) \right)}{\sin(\arctg(x_1/f) - \arctg(x_2/f) - \omega)},$$

где  $x_1, x_2$  – абсциссы центров объекта на первом и втором фотоснимках.



а)



б)

1 – оптическая ось объектива; 2 – плоскость изображения;  $\omega$  – угловой шаг поворота;  $S_1, S_2$  – передние узловые точки объектива до и после поворота;  $a_1, a_2$  – проекции объекта из точки A на плоскость изображения до и после поворота фотокамеры

Рисунок 8 – Устройство (а) и принципиальная схема создания панорамных пространственных изображений (б)

Разработан метод сегментации изображений, позволяющий составить карту глубины изображения и объединить смежные сегменты, которые находятся на одинаковом удалении от точки съемки, что повышает вероятность идентификации нужного объекта по сигнатуре его изображения:

$$P(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \sum_{y=0}^n \frac{|r|}{n} T(\varphi, y) d\varphi, \quad T(\varphi, n) = \begin{cases} 1 & \text{если } T(\varphi, y) \in Z \\ 0 & \text{если } T(\varphi, y) \notin Z \end{cases},$$

где  $Z$  – множество пикселей, составляющих изображение объекта;

$T(\varphi, y)$  – пиксел изображения;

$\mathbf{r}$  – радиус-вектор изображения объекта в направлении  $\varphi$ ;

$n$  – ширина изображения объекта в пикселах.

Для решения задачи пространственной ориентации объекта измерений применялся метод главных компонент, в соответствии с которым объект представлялся в собственной системе координат с помощью ортонормированного базиса собственных векторов. Положение объекта в плоскости изображения  $\theta$  определялось скалярным произведением вектора  $\mathbf{v}_n$  и нормированного вектора  $\mathbf{e}_n$ , задающего ось вращения:

$$\cos \theta = \frac{(\mathbf{v}_n, \mathbf{e}_n)}{\|\mathbf{v}_n\| \|\mathbf{e}_n\|}$$

Для повышения вероятности обнаружения объекта измерений применялись ВЦ активного типа, периодически излучающие свет с заданной частотой мигания. Разработаны методы цифровой обработки изображений ВЦ активного типа, позволяющие повысить вероятность их обнаружения до 0,996 по совокупности визуальных признаков: цвет, форма, частота мигания. При этом, в соответствии с теоремой Котельникова, кадровая частота оптоэлектронного устройства должна превышать частоту мигания ВЦ в два и более раза. Выделение ВЦ на изображении осуществлялось с помощью векторной функции разности по двум последовательным кадрам видеоизображения:

$$v(x, y) = \sum_{i=0}^{fps} \begin{cases} 1 & \text{если } b_{i+1}(x, y) - b_i(x, y) > k, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases},$$

где  $fps$  – кадровая частота видеоизображения;

$k$  – пороговое значение изменения яркости пиксела на изображении;

$b_i(x, y)$  – яркость пиксела на  $i$ -м кадре видеоизображения.

Точность измерения параметров объекта зависит от фотоприёмного устройства (фотоприемника) в составе оптической системы ВУ. Основными факторами, влияющими на шумовые характеристики фотоприёмника, являются температура, освещенность, электрические и электромеханические помехи в каналах связи. Периодический шум приводит к появлению пиков в частотной области изображения. Уменьшение влияния шума на точность измерений осуществлялось посредством охлаждения фотоприемника, повышения уровня освещенности объекта измерений и фильтрацией шума в частотной области изображения. Для фильтрации изображения  $f(x, y)$ , имеющего разрешение  $M \times N$  пикселей, определялась двукратно-периодическая функция фурье-образа:

$$f(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(ux/M + vy/N)}.$$

Аддитивный шум устранялся с помощью гауссова узкополосного режекторного фильтра с центром в точке  $(u_0, v_0)$ :

$$h(u, v) = 1 - e^{-\frac{1}{2} \sqrt{\frac{[(u-M/2-u_0)^2 + (v-N/2-v_0)^2][(u-M/2+u_0)^2 + (v-N/2+v_0)^2]}{D_0}}}.$$



Фурье-спектр изображения ВЦ определяется из выражения:

$$\left| \mathfrak{F} \left[ f(x, y) (-1)^{x+y} \right] \right| = \sqrt{R^2(u - M/2, v - N/2) + I^2(u - M/2, v - N/2)}.$$

Фильтрованное изображение получали обратным преобразованием Фурье:

$$g(x, y) = \mathfrak{F}^{-1} \left[ h(u, v) f(u, v) \right].$$

Посредством фильтрации изображения ВЦ значение сигнал-шум увеличилось на 67,3% (с 31,5 дБ до 46,7 дБ), а относительная погрешность измерения радиуса ВЦ уменьшилась до 0,1 %. Для повышения точности измерения угловых координат ВЦ разработан метод цифровой обработки изображения её контура в частотной области, с помощью которого контур ВЦ представлялся в комплексной плоскости посредством построения его развернутой профилограммы относительно базовой окружности. Фурье-образ данной профилограммы получали дискретным фурье-преобразованием:

$$f(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-i2\pi(ux/M)}.$$

Поскольку высшая гармоническая составляющая  $k$  ограничивается номером гармоники  $p$ , с которой начинается отсчет микрогеометрии, применялся идеальный фильтр низких частот, в пределах этой гармоники:

$$h(u) = \begin{cases} 0 & \text{при } f(u) \geq \sigma_k \\ 1 & \text{при } f(u) < \sigma_k \end{cases} : u \leq p,$$

где  $\sigma_k$  – СКО высшей гармонической составляющей  $k$ .

Фильтрованную профилограмму контура ВЦ получали вычислением обратного преобразования Фурье (рисунок 9). Параметры контура ВЦ определяли по формулам Спрэгга путем решения оптимизационной задачи на вычисление минимума гладкой целевой функции:

$$\min_{x, y, r} \sum_{i=1}^n \left( \sqrt{\left( x_i - \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 + \left( y_i - \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \right)^2$$

где  $x_i, y_i$  – координаты точек контура, взятые с равным угловым шагом;

$r_i$  – длины радиус-векторов точек контура.

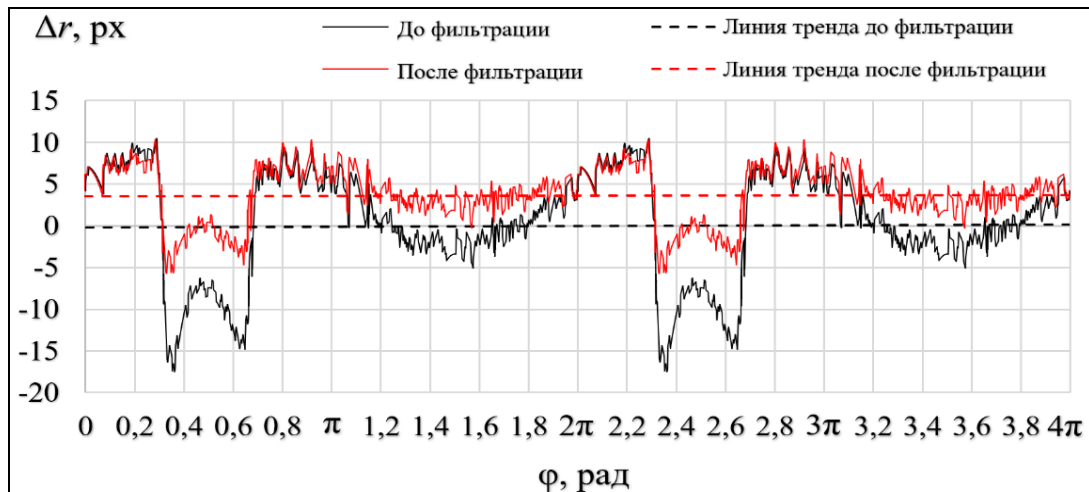


Рисунок 9 – Развернутая профилограмма контура ВЦ до и после фильтрации



Смещенная оценка дисперсии координат точек контура ВЦ по результатам обработки изображения в частотной области уменьшилась в 2,85 раза по сравнению с оценкой этих параметров методом наименьших квадратов и составила 20", что соответствует погрешности измерения углов тахеометром технического класса точности (в соответствии с ГОСТ Р 51774-2001).

В целях калибровки ВУ разработан способ применения физического маятника, совершающего плоскопараллельные затухающие колебания (рисунок 10), с помощью которого оценивались погрешности измерения ВУ динамических параметров движущихся объектов. При малых амплитудах физический маятник колеблется так же, как математический с приведённой длиной. Задав параметры физического маятника, вычислялись его координаты в требуемый момент времени. В случае малой угловой амплитуды маятника ( $\theta_0 < 20^\circ$ ) справедливо равенство:

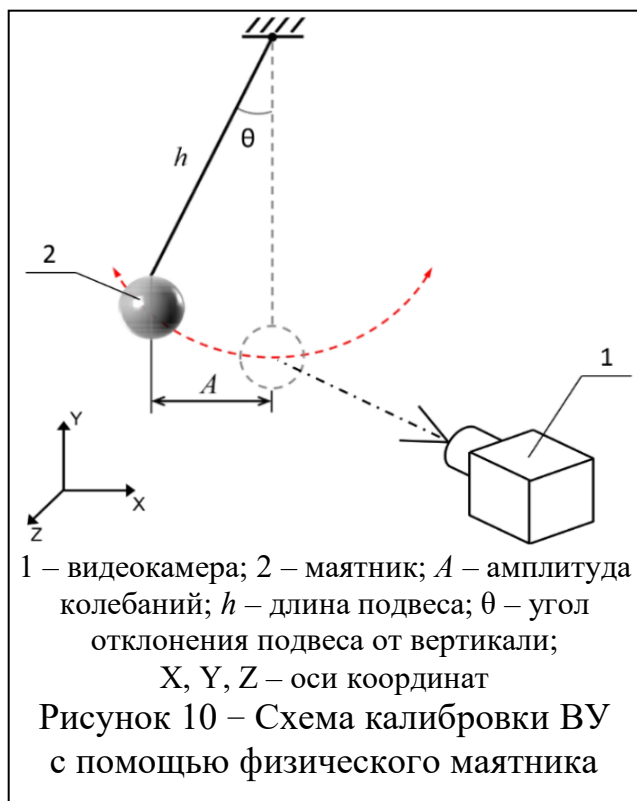
$$t = \frac{2K}{\pi\omega_0} \arcsin \frac{1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta}}{(1 - \sqrt{1 - \lambda^2}) \sin \theta},$$

где  $K$  – полный эллиптический интеграл 1-го рода.

Для определения значения интеграла (с погрешностью  $< 1\%$ ) применялись расчетные зависимости на основе элементарной функции:

$$K = \pi/2 + \ln \sqrt{1 - \lambda^2} / \ln \left[ 0,35 \left( 1 - 0,2\sqrt{1 - \lambda^2} \right) \right].$$

где  $\lambda$  – модуль эллиптического интеграла 1-го рода.



Получена функциональная зависимость положения маятника от продолжительности колебаний:

$$\theta(t) = 2e^{-\delta t} \arcsin \frac{2\lambda(1 - \sqrt{1 - \lambda^2}) \sin(\pi t / 2K\omega_0)}{(1 - \sqrt{1 - \lambda^2})^2 \sin^2(\pi t / 2K\omega_0) + \lambda^2},$$

где  $t$  – продолжительность колебаний;

$e^{-\delta t}$  – декремент затухания колебаний.

При калибровке ВУ горизонтировалось и устанавливалось на известном расстоянии от плоскости колебаний маятника. Затем маятник отклонялся от вертикали на заданный угол в пределах угла обзора ВУ, начиная совершать свободные затухающие колебания под действием силы тяжести. На графиках (рисунок 11) изображена функция изменения абсциссы центра маятника, на которую

наложены результаты измерений ВУ, а также представлены погрешности результатов измерений.

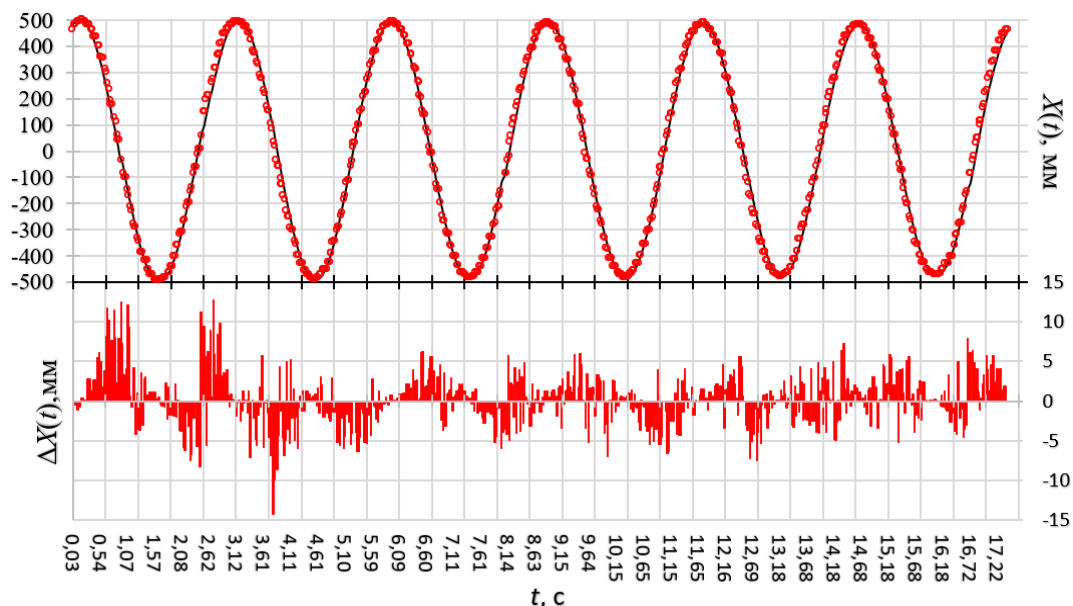


Рисунок 11 – График погрешности измерения абсциссы маятника

Наибольших значений погрешность измерения скорости маятника принимала в точке равновесия, когда его скорость достигала наибольшего значения за период колебания. При этом погрешность измерения ВУ скорости маятника в каждом периоде колебаний на интервале времени усреднения 0,25 с имела линейную зависимость от скорости маятника  $\Delta v = 0,0044v$ .

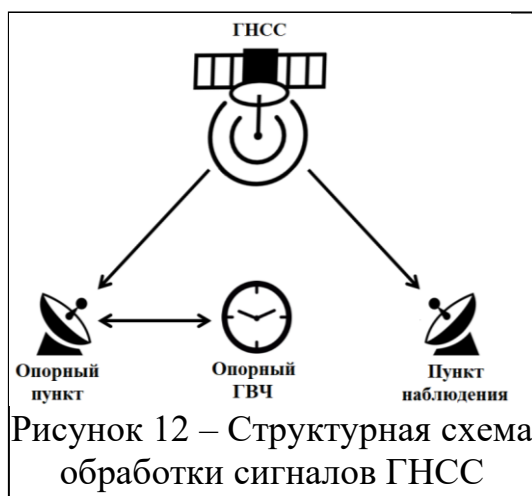


Рисунок 12 – Структурная схема обработки сигналов ГНСС

Основным источником погрешности определения координат опорного пункта (ОП) являются задержки прохождения радионавигационного сигнала в атмосфере и ошибки многолучевости спутниковой аппаратуры. Повышение точности измерения координат ОП осуществлялось с помощью разработанного итерационного метода несмещенной оценки времени прохождения радионавигационного сигнала посредством опорного генератора сигналов ГВЧ (рисунок 12). На ОП и пункте наблюдения (ПН)

синхронно измерялись псевдодальности навигационных космических аппаратов. Затем определялись разности координат пунктов ПН и ОП. По ним составлялась и решалась система уравнений для определения поправок времени прохождения сигнала в атмосфере. Под несмещенной оценкой поправки к часам приемника принималось нахождение такого усредненного значения  $\overline{dt}$  на интервале времени наблюдений, точечная оценка, которого соответствовала бы математическому ожиданию конечной выборки результатов измерений. Для этого, в первом приближении, производится оценка математического ожидания по генеральной совокупности в виде линейной функции регрессии, аппроксимирующей облако точек результатов измерений:

$$\overline{dt} = kt + b,$$

где  $k$ ,  $b$  – коэффициенты уравнения прямой.

Первичная оценка математического ожидания является смещенной из-за наличия грубых погрешностей в выборке. Для выявления таких погрешностей вычислялось среднеквадратическое отклонение случайной величины от этой функции и задавался доверительный интервал:

$$P = \{\Delta T \mid (\bar{dt} - U(p, n) \leq dt \leq \bar{dt} + U(p, n)), p \in (0, 1)\},$$

где  $U(p, n)$  – функция, определяющая границу доверительного интервала.

Затем определялись границы интервала для распределения Стьюдента:

$$U(p, n) = \tau_{p, n-1} s,$$

где  $\tau_{p, n-1}$  – квантиль распределения Стьюдента для уровня доверия  $p$  и числа степеней свободы  $n - 1$ ;

$s^2$  – исправленная выборочная дисперсия.

Исправленная выборочная дисперсия определяется из выражения:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (dt_i - \bar{dt})^2,$$

где  $dt_i$  – значения точечной оценки поправки к часам приемника в момент  $t_i$ .

Если задать отклонение поправки от среднего значения через выражение:

$$L_i \in \mathbb{Q} : L_i = |dt_i - \bar{dt}| = |kt_i + b|$$

и представить облако точек результатов измерений  $\{\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n\}$  в виде упорядоченного множества  $S = \{\Delta T_i \mid L_{i-1} \leq L_i \leq L_{i+1}, i \in \mathbb{N} : 0 \leq i \leq n\}$ , то необходимо найти такое подмножество  $S' \subset S$ , элементы которого, соответствовали бы условию  $S' = \{\Delta T_i \mid (i \leq np), i \in \mathbb{N} : 0 \leq i \leq n\}$ . При этом исключается множество элементов  $E = S / S'$ .

Уровень доверия  $p$  определялся исходя из значения квантили  $\tau_{p, n-1}$  путем аппроксимации, с погрешностью  $\leq 10^{-4}$ , по формулам:

$$p = 1 - \left[ \sum_{i=1}^6 c_i |\tau_{p, n-1}^{i-1}| \right]^{-8}, \quad c_i = \sum_{j=1}^5 a(i, j) n^{-j+1} \left/ \left[ 1 + \sum_{j=1}^2 b(i, j) n^{-j} \right] \right.,$$

где  $a(i, j)$  и  $b(i, j)$  – элементы матриц  $A$  и  $B$  в строке  $i$  и столбце  $j$ ,

$$A = \begin{pmatrix} 0,09879441 & -0,58121 & 1,390993 & -1,222452 & 2,151185 \\ 0,04431742 & -0,2206018 & 0,03317253 & 5,679969 & -12,96519 \\ 0,009694901 & -0,1408854 & 1,88993 & -12,75532 & 25,77532 \\ -0,000091822 & 0,03789901 & -1,280346 & 9,249528 & -19,08115 \\ 0,000579602 & -0,0276333 & 0,4517029 & -2,657967 & 5,127212 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -5,537409 & 11,42343 \\ -5,166733 & 13,49862 \\ -4,233736 & 14,3963 \\ -2,777816 & 16,46113 \\ -0,565718 & 21,83269 \end{pmatrix}.$$

Результаты измерений, выходящие за доверительный интервал, исключались, после чего процедура повторялась до тех пор, пока в конечной выборке не оставалось грубых погрешностей за пределами заданного доверительного интервала  $P$ :

$$S' = S = \{\Delta T_i \mid U(p, n) \geq L_i, i \in \mathbb{N} : 0 \leq i \leq n\}, \text{ т.е. } E = S / S' = \emptyset.$$

Таким образом, распределение случайной величины в конечной выборке можно считать нормальным, а оценку результата измерений несмещенной. Данный метод позволил в среднем на 12% уменьшить погрешность измерения времени прохождения радионавигационного сигнала по сравнению с фильтром Калмана (рисунок 13) и повысить точность определения координат ПН.

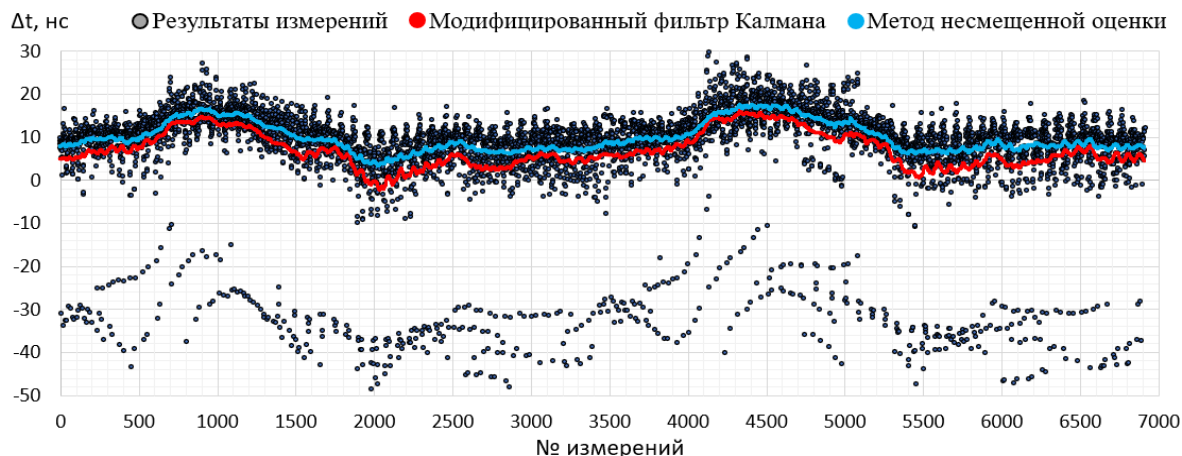


Рисунок 13 – Сравнение результатов обработки измерений модифицированным фильтром Калмана и методом несмещенной оценки

Разработанные ВУ и методы могут применяться для решения разных контрольно-измерительных задач, расширяя функциональные возможности ВСКЗ в области бесконтактных измерений координат, габаритов, скорости и вектора перемещения движущихся объектов. При этом, благодаря применению ВЦ активного типа была устранена основная проблема применения технологии компьютерного зрения, связанная с необходимостью обработки больших объемов оптической информации в режиме реального времени.

**Четвертая глава** посвящена применению результатов исследований для решения различных прикладных контрольно-измерительных задач, возникающих в процессе строительства, ремонта и эксплуатации ж/д пути (рисунок 14).



Рисунок 14 – Область применения комплексной ВСКЗ

Разработана комплексная видеограмметрическая система для контроля геометрических параметров ж/д пути, состоящая из четырех основных сегментов (рисунок 15). Первый сегмент ВСКЗ, предназначен для мониторинга железных дорог, выявления дефектов земляного полотна и формирования 3-D

моделей поврежденных участков ж/д пути. Применение БПЛА для мониторинга железных дорог способствует повышению оперативности получения первичной информации об их техническом состоянии. Сформированная с помощью данного сегмента ВСКЗ модель участка ж/д пути загружается в САПР и формируется проект ремонта (восстановления) поврежденного участка пути.

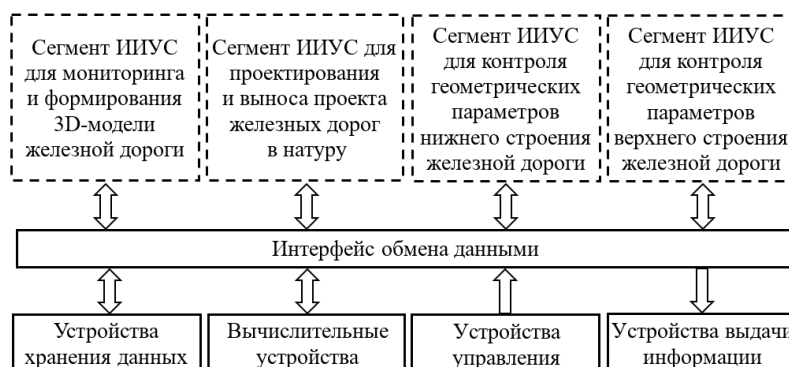


Рисунок 15– Схема взаимодействия сегментов ВСКЗ

Второй сегмент ВСКЗ обеспечивает выполнение работ по планово-высотному обоснованию и выносу проекта строительства (восстановления) железной дороги в натуру. С помощью третьего сегмента ВСКЗ осуществляется операционный контроль геометрических параметров земляного полотна железной дороги в процессе производства земляных работ. Четвертый сегмент ВСКЗ обеспечивает контроль геометрических параметров рельсовой колеи. Информационное взаимодействие между средствами контроля и сегментами ВСКЗ обеспечивает получение актуальной и достоверной информации о техническом состоянии участка железной дороги на разных этапах его обслуживания (рисунок 16).

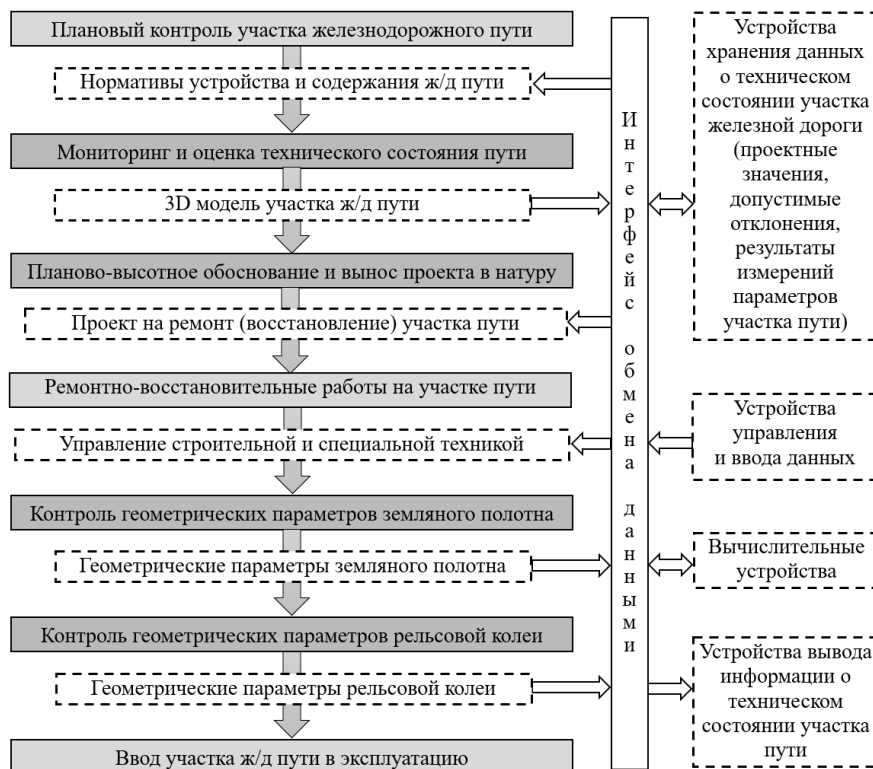
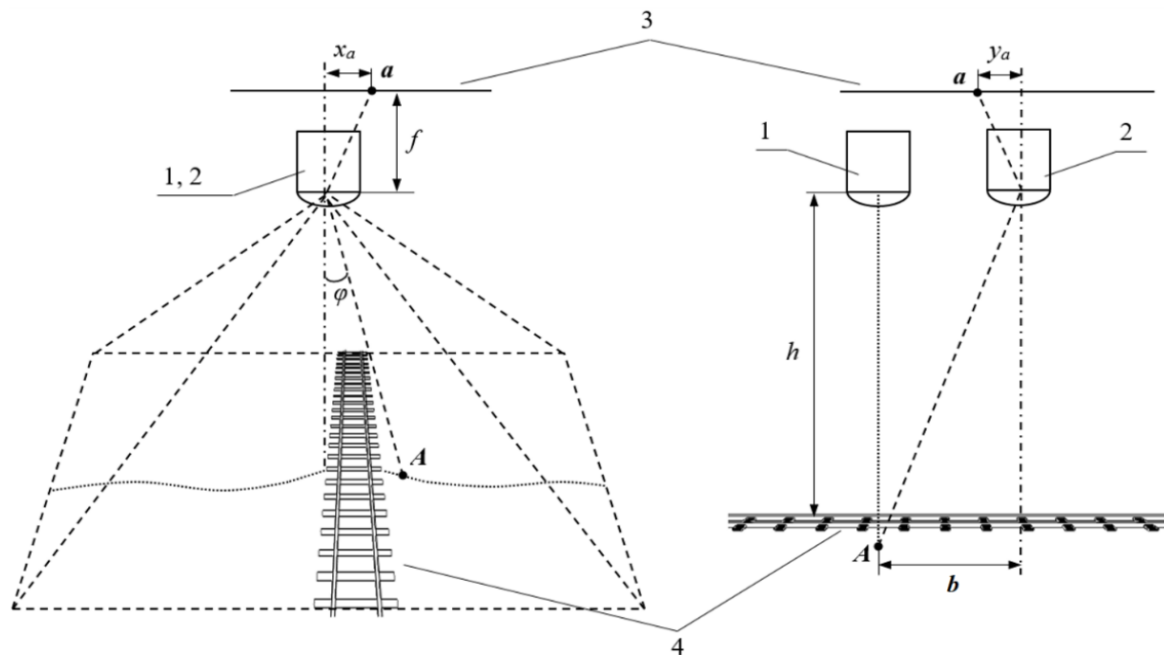


Рисунок 16 – Схема обмена данными с видеограмметрической системой

На первом этапе контроля для регистрации профиля ж/д пути, определения негабаритных объектов ж/д инфраструктуры, а также в целях своевременного выявления деформаций балластной призмы и основной площадки земляного полотна, разработан способ формирования 3D модели ж/д пути посредством компьютерной обработки аэрофотоснимков (АФС) и данных лазерного сканирования (рисунок 17). На гиростабилизированной платформе БПЛА, вдоль направления полета, устанавливаются аэрофотокамера (АФК) и воздушный лазерный сканер (ВЛС), с помощью которых получают АФС и облако точек.



1 – аэрофотокамера; 2 – лазерный сканер; 3 – плоскость изображения; 4 – рельсовая колея  
Рисунок 17 – Принципиальная схема создания цифровой модели ж/д пути

Цифровая обработка полученных АФС позволяет выделить множество пикселей, принадлежащих рельсовым нитям, компоненты цвета которых  $[H_R, H_G, H_B]$  ограничены значениями в занимаемой части пространства RGB. Вводится функция, определяющая дисперсию компонентов цвета пикселей на изображении АФС относительно средних значений компонентов цвета рельсовых нитей:

$$I(x, y) = \sqrt{\left( (\bar{H}_R - C_R(x, y))^2 + (\bar{H}_G - C_G(x, y))^2 + (\bar{H}_B - C_B(x, y))^2 \right) / 3},$$

где  $\mathbf{c}(x, y)$  – произвольный вектор в цветовом пространстве RGB.

Установив для функции некоторое пороговое значение  $k$ , характеризующее допустимое отклонение значений компонентов цвета рельсовых нитей, можно обнаружить их на изображении из условия:

$$\mathbf{c}(x, y) \in H: I(x, y) \leq k \mid k \in \mathbb{R}$$

Минимальные значения, которые принимает функция  $I(x, y)$  в каждой строке на изображении, указывают на наличие рельсовых нитей. Аппроксимируя множество пикселей  $H$ , определяется расстояние  $q$  между рельсовыми нитями на изображении. Тогда пересечение оси абсцисс в системе

координат изображения с рельсовыми нитями произойдет в некоторых точках  $x_1, x_2$  на этой оси, где  $x_1 < x_2$ . Все АФС приводятся к единому масштабу по вычисленным значениям ширины рельсовой колеи на изображениях.

Подсистема развертки ВЛС формирует лазерные лучи с постоянным угловым шагом  $d\varphi$ . Линия развертки ВЛС образуется множеством лучей, количество  $n$  из которых окажется в поле зрения АФК. ВЛС располагается так, чтобы его центральный лазерный луч был направлен параллельно главной оптической оси АФК, а линия развертки ВЛС была перпендикулярна направлению полета ЛА. Тогда угол наклона  $i$ -го лазерного луча составит:

$$\varphi_i = |(n - 2i + 1)/2| d\varphi$$

Индексы  $i_1, i_2$  для лазерных лучей фиксирующих точки на двух рельсовых нитях определяются из выражений:

$$i_1 = \left[ (n+1)/2 - \arctg(x_1 / f) / d\varphi \right]; \quad i_2 = \left[ (n+1)/2 - \arctg(x_2 / f) / d\varphi \right],$$

где  $f$  – фокусное расстояние объектива АФК.

После этого вычисляется высота полета БПЛА над рельсовой колеёй и коэффициент масштабирования изображений местности на АФС из выражения:

$$m = h_u / h = \sum_{i=i_1}^{i_2} (l_i \cos \varphi_i) / h(i_2 - i_1 + 1),$$

где  $h_u$  – измеренная высота аэрофотосъемки над рельсовой колеёй;

$h$  – требуемая высота аэрофотосъемки;

$l_i$  – расстояние до рельсовой колеи, измеренное ВЛС.

Далее изображения на АФС масштабируются по методу билинейной интерполяции. После чего все АФС разбиваются на стереопары, которые затем взаимно ориентируются. Для этого изображения стереопары, длиной  $N_x$  и шириной  $N_y$  пикселей, представляется в виде множества пикселей:

$$I = \{ \mathbf{c}(x, y) : x \leq N_x, y \leq N_y | x, y \in \mathbb{R} \}.$$

На АФС накладывается комбинация маркеров, равномерно распределенных по кадру в форме прямоугольной матрицы с шагом  $k$ , кратным длине и ширине кадра. Для каждой области стереопары, на которую попадает маркер, рассчитывается векторная функция, определяющая суммарные значения компонентов цвета по области:

$$\mathbf{s}_1(k_x, k_y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \mathbf{c}(k_x dx + i, k_y dy + j),$$

где  $k_x, k_y$  – позиция маркера в строке и столбце прямоугольной матрицы.

На втором изображении стереопары задается смещение  $(\Delta x, \Delta y)$  и определяется радиальное расстояние по осям  $X$  и  $Y$  каждого маркера:

$$L(k_x, \Delta x) = k_x dx - x_0 + \Delta x; L(k_y, \Delta y) = k_y dy - y_0 + \Delta y$$

Изменяя угол поворота  $\Delta\psi$  первого АФС относительно второго, на втором АФС определяются суммарные значения компонентов цвета по окрестностям, обозначенных маркерами:

$$\mathbf{s}_2(k_x, k_y, \Delta x, \Delta y, \Delta\psi) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \mathbf{c}(X, Y).$$



Аргументы векторной функции  $\mathbf{c}(X, Y)$  вычисляются из выражений:

$$X = \left[ x_0 + \sqrt{L^2(k_x, \Delta x) + L^2(k_y, \Delta y)} \cos \left( \arctg(L(k_y, \Delta y)/L(k_x, \Delta x)) + \Delta \psi \right) \right],$$

$$Y = \left[ y_0 + \sqrt{L^2(k_x, \Delta x) + L^2(k_y, \Delta y)} \sin \left( \arctg(L(k_y, \Delta y)/L(k_x, \Delta x)) + \Delta \psi \right) \right].$$

В зависимости от величины смещения маркеров и относительного угла поворота АФС, определялись значения целевой функции, выраженные через сумму квадратов разностей векторных функций:

$$\delta(\Delta x, \Delta y, \Delta \psi) = \sum_{k_y=1}^{k-1} \sum_{k_x=1}^{k-1} \left[ \mathbf{s}_1(k_x, k_y) - \mathbf{s}_2(k_x, k_y, \Delta x, \Delta y, \Delta \psi) \right]^2 \rightarrow \min$$

Относительная величина смещения и угол поворота определялись значениями аргументов целевой функции, при которых она принимает минимальное значение, не превышающее установленного порогового коэффициента. По аргументам функции  $\delta(\Delta x, \Delta y, \Delta \psi)$  определялось перемещение точки съемки  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  за период фотографирования  $(t_\varepsilon, t_{\varepsilon+1})$ :

$$\Delta X = h \Delta x / f, \Delta Y = h \Delta y / f, \Delta Z = f Q (q_2 - q_1) / q_1 q_2 \text{ pix},$$

где  $h$  – требуемая высота аэрофотосъемки;

$Q$  – нормированное расстояние между рельсовыми нитями;

$q_1, q_2$  – расстояния между рельсовыми нитями на изображениях стереопары.

$\text{pix}$  – физический размер пиксела на изображении.

По сумме этих перемещений определялись координаты точки съемки в декартовой системе координат модели местности. За начало координат принимались координаты первой точки съемки в последовательности  $\{1, \dots, \varepsilon, \dots\}$ . Координаты последующих точек вычислялись из выражений:

$$Px_\varepsilon = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta X_i, Py_\varepsilon = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta Y_i, Pz_\varepsilon = Qf / q_\varepsilon \text{ pix}.$$

Угол поворота  $j$ -го АФС определялся из выражения:  $\Psi_\varepsilon = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta \Psi_i$

Координаты точки  $A$  определялись в системе координат АФК:

$$X_A = l_A m \sin \varphi_i, Y_A = b, Z_A = l_A m \cos \varphi_i.$$

Получены выражения для преобразования координат точки  $A$ , зафиксированной из точки съемки  $(Px_\varepsilon, Py_\varepsilon)$ , в систему координат модели:

$$X'_A = Px_\varepsilon + X_A \cos \psi_\varepsilon - Y_A \sin \psi_\varepsilon,$$

$$Y'_A = Py_\varepsilon + Y_A \cos \psi_\varepsilon + X_A \sin \psi_\varepsilon,$$

$$Z'_A = h - Z_A.$$

Чтобы в формируемой трехмерной модели местности не возникало разрывов выполняется интерполяция по области сканирования. Для этого отношение частоты сканирования  $\nu_c$  к кадровой частоте АФК задается натуральным числом  $k_j = j \nu_{АФК} \nu_c$ . Коэффициент  $j$  позволяет рассчитать положение БПЛА в момент формирования линии развертки  $j \in \{1, \dots, j, \dots\}$  относительно его положения в момент фотографирования  $t_\varepsilon$ . Координаты точек в промежуточных линиях развертки определяются из выражений:



$$\begin{aligned}
X'_i &= Px_\varepsilon + k_j \Delta X + X_i \cos(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi) - Y_i \sin(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi), \\
Y'_i &= Py_\varepsilon + k_j \Delta Y + Y_i \cos(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi) + X_i \sin(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi), \\
Z'_i &= h + k_j \Delta Z - Z_i.
\end{aligned}$$

Линии развертки ВЛС помещаются в систему координат съемочного участка и на них накладывается координатная сетка. В процессе интерполяции по области ячеек сетки, формируется облако точек, на которое накладываются АФС и образуется трехмерная модель ж/д пути (рисунок 18). Данная модель позволяет контролировать геометрические параметры ж/д пути и оценивать его техническое состояние.

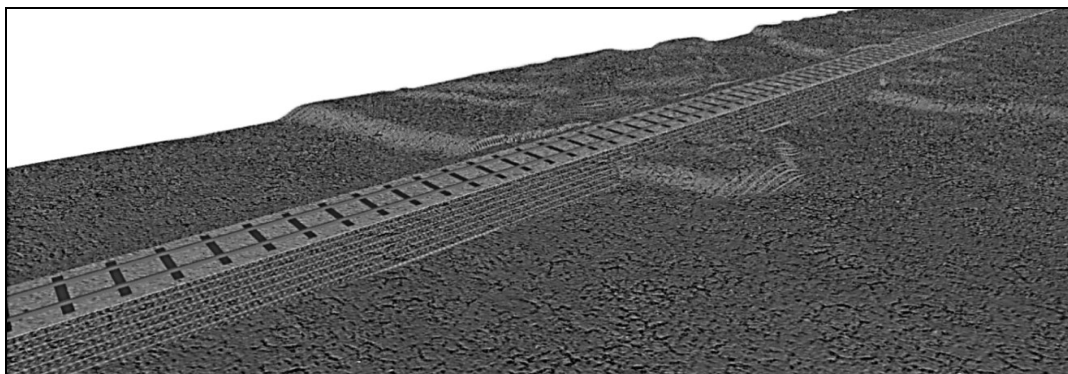


Рисунок 18 – Трехмерная модель железнодорожного пути

В целях проведения планово-высотной съемки участка строительства, выноса проекта железных дорог в натуру и оперативного определения координат точек на поверхности земли, находящихся вне зоны прямой оптической видимости ВУ разработано техническое решение для координатных измерений с помощью БПЛА, на гиростабилизированной платформе которого установлены ВЦ, видеокамера и лазерный дальномер (рисунок 19).

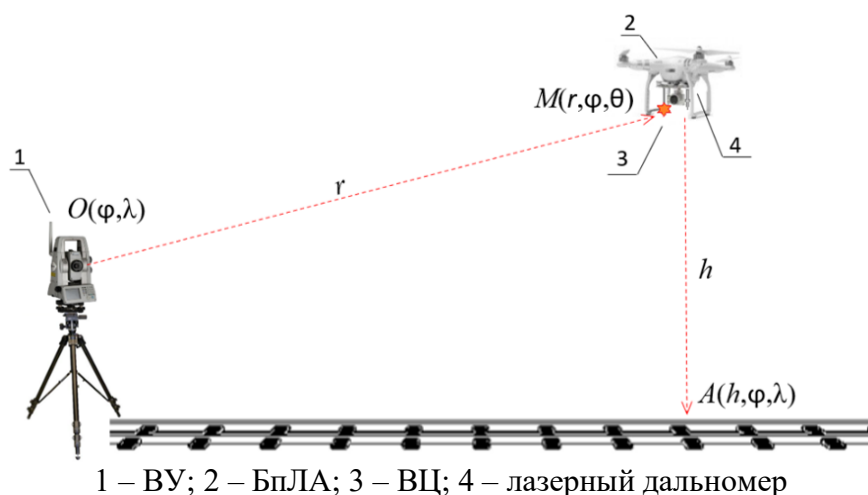


Рисунок 19 – Схема выноса проекта железных дорог в натуру

С помощью данного сегмента ВСКЗ осуществляется зависание БПЛА над точкой с требуемыми координатами, которая подсвечивается лучом лазерного дальномера. ВУ отслеживает БПЛА по визуальным признакам ВЦ, определяет

дальность  $r_0$ , зенитный  $\varphi_0$  и азимутальный  $\theta_0$  углы ВЦ, а также возвышение БПЛА  $h$  над точкой на поверхности местности и вычисляет координаты точки:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 \\ \theta = \frac{\pi}{2} + \arctg\left(\frac{h}{r_0 \sin \theta_0} - \operatorname{ctg} \theta_0\right) \\ r = \sqrt{h^2 + r_0^2 - 2hr_0 \cos \theta_0} \end{cases}$$

Следующее техническое решение разработано для операционного контроля геометрических параметров земляного полотна ж/д пути в процессе его ремонта или строительства. ВЦ размещаются в горизонтальной плоскости на строительном участке, образуя локальную систему координат с началом в геометрическом центре этих ВЦ (рисунок 20).

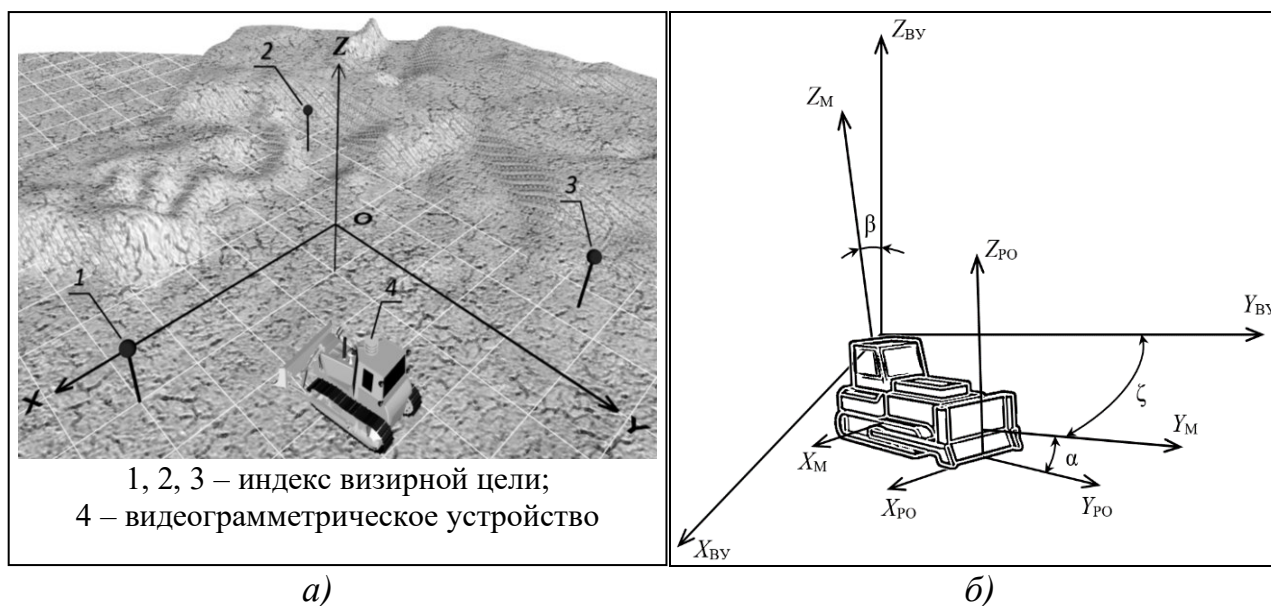


Рисунок 20 – Принципиальная схема размещения ВЦ на строительном участке (а), системы координат (б): видеограмметрического устройства ( $X_{ВУ}$   $Y_{ВУ}$   $Z_{ВУ}$ ), строительной машины ( $X_M$   $Y_M$   $Z_M$ ) и рабочего органа ( $X_{РО}$   $Y_{РО}$   $Z_{РО}$ )

ВУ устанавливается на кабине строительной техники. В его состав входят три видеокамеры, обеспечивающие одновременное и непрерывное отслеживание, а также идентификацию ВЦ. Каждая ВЦ имеет отличительную частоту мигания  $\nu_i$ , излучая видимый свет в заданном диапазоне длин электромагнитных волн. Горизонтальный угол ВЦ вычислялся методом обратной пространственной фотограмметрической засечки:

$$\psi_i = \psi_0 + \arctg(x_i/f),$$

где  $x_i$  – абсциссы ВЦ на изображении.

Затем определяется модуль разности между горизонтальными углами для каждой пары ВЦ в этой последовательности  $\lambda_i = |\psi_i - \psi_{i-1}|$ . Все обнаруженные ВЦ упорядочиваются путём нахождения индекса первого элемента, с наибольшим значением модуля разности горизонтальных углов:

$$i = 1, \text{ если } \Delta\lambda_{i-1} < \Delta\lambda_i > \Delta\lambda_{i+1}.$$

В результате получается упорядоченный кортеж ВЦ  $\langle \text{ВЦ}_1, \text{ВЦ}_2, \text{ВЦ}_3 \rangle$ . Дирекционный угол ВЦ<sub>1</sub> в полученном кортеже определяется из выражения:

$$\omega_1 = 11\pi/6 - \Delta\lambda_1 + \arctg\left(\left(\sqrt{3}\text{ctg}\Delta\lambda_2 + 1\right) / \left(2\text{ctg}\Delta\lambda_1 + \text{ctg}\Delta\lambda_2 + \sqrt{3}\right)\right)$$

Плановое положение ВУ определяется методом обратной однократной угловой засечки из выражений:

$$\begin{cases} x_{\text{ВУ}} = b / [\text{tg}(\omega_1 + \lambda_1 + \lambda_2) - \text{tg}\omega_1] - b/2\sqrt{3} \\ y_{\text{ВУ}} = b/2 - (X_p + b/2\sqrt{3})\text{tg}(\omega_1 + \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2) \end{cases}$$

Затем вычисляется зенитный угол ВУ:

$$\theta_{\text{ВУ}} = \pi - \text{arccctg}\left(\left(\sum_{i=1}^3 \sqrt{(x_{\text{ВУ}} - x_i)^2 + (y_{\text{ВУ}} - y_i)^2} \text{tg}\theta_i\right) / \left(3\sqrt{x_{\text{ВУ}}^2 + y_{\text{ВУ}}^2}\right)\right),$$

где  $\theta_i$  – вертикальный угол направления на ВЦ  $V_i$ ;

Высотное положение устройства рассчитывается по формуле:

$$z_{\text{ВУ}} = \sqrt{x_{\text{ВУ}}^2 + y_{\text{ВУ}}^2} \text{ctg}\theta_{\text{ВУ}}.$$

Положение рабочего органа в пространстве определяется значениями углов поворота машины вокруг координатных осей ( $X_{\text{ВУ}}, Y_{\text{ВУ}}, Z_{\text{ВУ}}$ ) в матрице:

$$A = \begin{pmatrix} \cos\beta\cos\varsigma - \sin\beta\sin\alpha\sin\varsigma & -\cos\beta\sin\varsigma - \sin\beta\sin\alpha\cos\varsigma & -\sin\beta\cos\alpha \\ \cos\alpha\sin\varsigma & \cos\alpha\cos\varsigma & -\sin\alpha \\ \sin\beta\cos\varsigma + \cos\beta\sin\alpha\sin\varsigma & -\sin\beta\sin\varsigma + \cos\beta\sin\alpha\cos\varsigma & \cos\beta\cos\alpha \end{pmatrix}.$$

Углы поворота  $\alpha, \beta$  машины вокруг осей  $X_{\text{ВУ}}, Y_{\text{ВУ}}$  измеряются датчиками, угол поворота машины вокруг оси  $Z_{\text{ВУ}}$  вычисляется из выражения:

$$\varsigma = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\lambda_i - \omega_i).$$

После этого определяются координаты рабочего органа машины:

$$\begin{bmatrix} x_{\text{РО}} \\ y_{\text{РО}} \\ z_{\text{РО}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\text{ВУ}} \\ y_{\text{ВУ}} \\ z_{\text{ВУ}} \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} 0 \\ y_{\text{РО}} - y_{\text{М}} \\ h_{\text{РО}} - h_{\text{М}} \end{bmatrix},$$

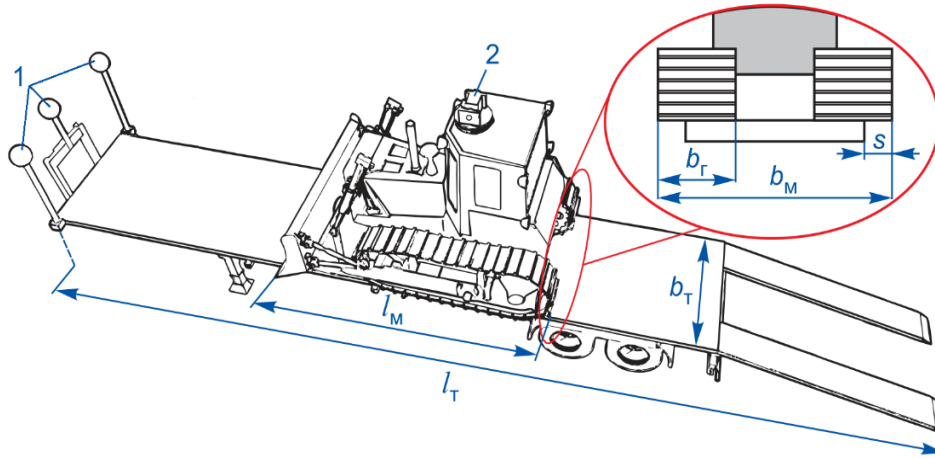
где  $(x_{\text{ВУ}}, y_{\text{ВУ}}, z_{\text{ВУ}})$  – координаты ВУ;

$\Delta l$  – расстояние от ВУ до рабочего органа;

$h_{\text{М}}$  – высота машины;

$h_{\text{РО}}$  – высота подъема рабочего органа машины.

Таким образом, определялись координаты и траектория движения рабочего органа строительной техники, осуществляя тем самым операционный контроль геометрических параметров земляного полотна ж/д пути в процессе производства земляных работ. Данное техническое решение может применяться в целях повышения безопасности транспортировки строительной техники к месту проведения строительно-восстановительных работ посредством контроля параметров её погрузки на грузовую платформу транспортного средства своим ходом (рисунок 21).



1 – визирные цели; 2 – видеограмметрическое устройство;  $b_T$  – ширина грузовой платформы;  $b_M$  – ширина шасси гусеничной техники;  $b_Г$  – ширина гусеницы;  $s$  – свес гусениц техники с края грузовой платформы;  $l_T$  – длина полуприцепа;  $l_M$  – длина гусеничного шасси

Рисунок 21 – Принципиальная схема погрузки строительной техники на грузовую платформу полуприцепа

Для контроля параметров погрузки строительной техники применялись ВЦ активного типа, которые размещались по дальнему краю грузовой платформы на одинаковом расстоянии друг от друга. ВУ устанавливалось на кабине строительной техники вдоль оси вращения гусеничного шасси. С его помощью вычислялись зенитные и азимутальные углы ВЦ, после чего определялись параметры погрузки из системы уравнений:

$$\begin{cases} \chi = \left| \pi/2 - \arctg \left[ \sin (\lambda_2 - \lambda_1) / (2 \sin \lambda_1 \sin \lambda_2) \right] \right| \\ s = \left[ b_M + b_T \sin^2 \chi (\operatorname{ctg} \chi \operatorname{ctg} \lambda_2 - 1) - b_T \right] / 2 \\ \psi = |\omega_3 - \omega_1| \end{cases}$$

где  $\chi$  – угол между продольными осями грузовой платформы и техники;

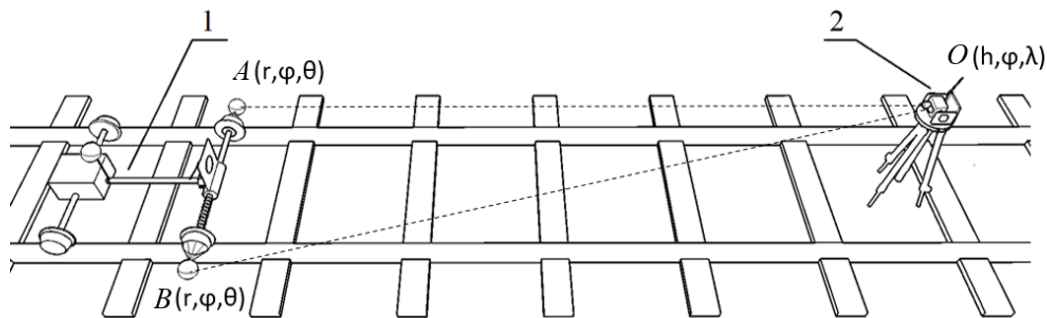
$\psi$  – крен грузовой платформы;

$\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – модули разностей азимутальных углов ВЦ;

$\omega_1$  и  $\omega_3$  – зенитные углы ВЦ.

По измеренным параметрам погрузки корректировалось направление движения строительной техники своим ходом в процессе погрузки на транспортное средство. При этом погрузка беспилотной строительной техники своим ходом может выполняться под управлением ВСКЗ в автоматическом режиме даже в условиях недостаточной видимости.

В целях проведения сплошного контроля участка ж/д пути в процессе его строительства или ремонта разработано техническое решение, позволяющее определять параметры ГРК с привязкой к реперной ж/д сети или к геодезическим координатам. В состав сегмента ВСКЗ для контроля параметров ГРК входит путеизмерительная тележка и ВУ, с помощью которого регистрируется пространственное положение рельсовых нитей (рисунок 22).



1 – путеизмерительная тележка; 2 – видеограмметрическое устройство;  
Рисунок 22 – Принципиальная схема размещения элементов ВСКЗ  
для контроля параметров геометрии рельсовой колеи

ВУ, находящееся в точке  $O$  (рисунок 23, а), обнаруживает визирную марку на отражательной пластине и наводит оптическую ось видеокамеры, а также луч лазерного дальномера в некоторую точку  $C$ . Точками  $A$ ,  $B$  и  $D$  обозначены центры ВЦ. При этом расстояние  $AC$  является известным и неизменным,  $BC$  зависит от ширины рельсовой колеи. Дальность пластины отражателя  $r$  измеряется лазерным дальномером. ВУ определяет угловое положение ВЦ ( $\Delta\omega$ ,  $\Delta\psi$ ) относительно направления главной оптической оси ( $\varphi$ ,  $\theta$ ). Координаты центров ВЦ вычисляются в сферической системе координат.

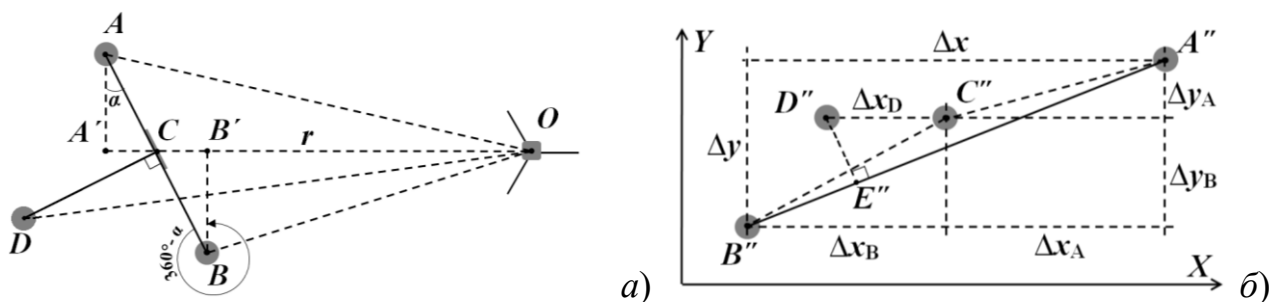


Рисунок 23 – Принципиальная схема вычисления координат визирной цели:  
а) вид сверху; б) на координатной плоскости изображения

ВЦ и марка находятся в точках  $A''$ ,  $B''$ ,  $C''$  и  $D''$  на изображении (рисунок 23, б). В системе координат изображения вычисляются координаты центра колеса в точке  $M(r_M, \varphi_M, \theta_M)$  на прямой  $AB$ . Угловое положение ВЦ в точке  $A$  определяется в сферической системе координат из выражения:

$$A(\arctg \Delta x_A \text{pix}/f, \arctg \Delta y_A \text{pix}/f).$$

Для выражения длины отрезка  $A''C'' = \sqrt{\Delta x_A^2 + \Delta y_A^2}$  на плоскости изображения в метрических единицах рассчитывается коэффициент преобразования  $k = |OC| \text{pix}/f$  с помощью которого определяется угол между прямой  $AB$  и плоскостью изображения  $\alpha = \arccos(kA''C''/AC)$ .

Расстояние до точки  $A$  вычисляется из выражения:

$$r_A = \sqrt{(AA')^2 + (OC + CA')^2} = \sqrt{(A''C'' \cdot k)^2 + (r + AC \cdot \sin \angle A'AC)^2}.$$

Расстояние до точки  $B$  также вычисляется из выражения:

$$r_B = \sqrt{(BB')^2 + (OC - CB')^2} = \sqrt{(B''C'' \cdot k)^2 + (r + BC \cdot \sin \angle B'BC)^2}.$$

Координаты ВЦ вычисляются в прямоугольной системе координат из параметрических систем уравнений направляющего вектора прямой  $\overline{AB}$ :

$$\begin{cases} x = x_A - AB_x \cdot \lambda \\ y = y_A - AB_y \cdot \lambda \\ z = z_A - AB_z \cdot \lambda \end{cases}, \begin{cases} x = x_B + AB_x \cdot \lambda \\ y = y_B + AB_y \cdot \lambda \\ z = z_B + AB_z \cdot \lambda \end{cases}$$

где  $\lambda = AM/AB$  – параметр уравнения,

$$AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2}.$$

Вычислив координаты центров колес  $M$  и  $N$ , определяются текущие координаты оси рельсовой колеи:

$$x_{MN} = (x_M + x_N)/2, y_{MN} = (y_M + y_N)/2, z_{MN} = (z_M + z_N)/2.$$

Затем координаты центров колес  $(x_{MN}, y_{MN}, z_{MN})$  редуцируются на уровень головок рельсов и строятся две пространственные кривые, характеризующие положение рельсовых нитей в плане и профиле, по которым определяются основные параметры ГРК.

Область применения ВСКЗ не ограничивается контролем геометрических параметров ж/д пути. С ее помощью можно измерять линейные величины (габариты, деформации, перемещения и напряжения в элементах строительных конструкций, уклоны и крены, просадки опор, осадки понтонов и т.д.), ускорение, частоту вращения валов, муфт и колес машин (механизмов). Разработанная ВСКЗ также может использоваться для обработки данных от дефектоскопов, что позволяет автоматизировать процесс контроля сварных швов и ускоряет процесс обнаружения дефектов в рельсах.

**В пятой главе** проводится метрологический анализ ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути в процессе строительства, ремонта и эксплуатации ж/д пути.

Погрешности определения ВСКЗ параметров ж/д пути оценивались средствами имитационного моделирования процессов аэрофотосъемки и лазерного сканирования участка ж/д пути. Координаты точек съемки определялись с помощью разработанных методов обработки АФС и сравнивались в произвольные моменты времени на различных участках маршрута с действительными значениями координат АФК в модели. При этом абсолютная погрешность измерения координат АФК не превысила 1 пикс.

Оценка погрешности измерения координат точек ж/д пути проводилась на примере среднеформатной цифровой АФК со следующими техническими характеристиками: разрешение  $11608 \times 8708$ , физический размер пиксела 4,6 мкм, фокусное расстояние 50 мм. На графике (рисунок 24, а) изображены требуемые значения высоты аэрофотосъемки в соответствии с отклонениями БпЛА от маршрута, обеспечиваемого ГНСС. На следующем графике (рисунок 24, б) показана зависимость погрешности измерения координат точек от высоты проведения аэрофотосъемки.



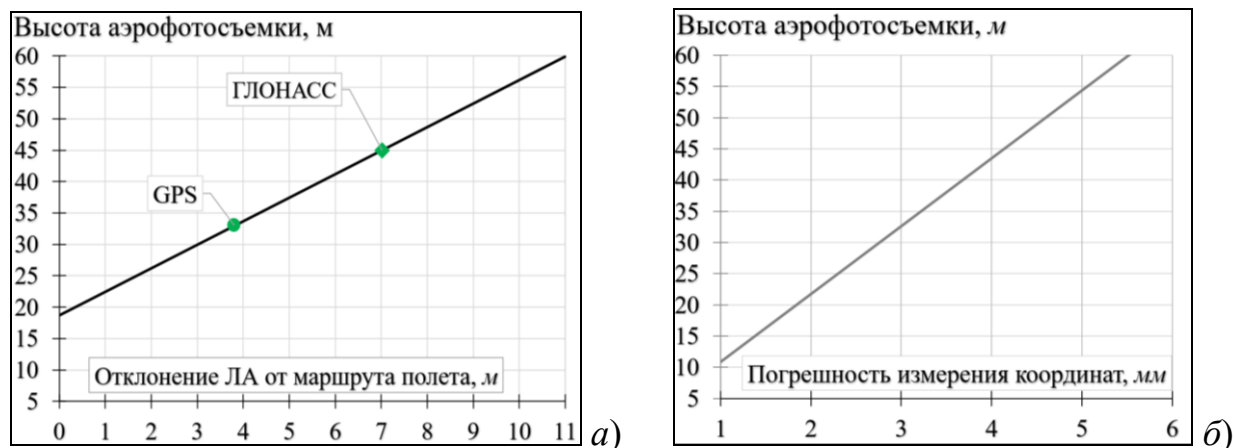


Рисунок 24 – Графики отклонения БПЛА от маршрута (а) и погрешность измерения координат точек (б) в зависимости от высоты аэрофотосъемки

Из первого графика следует, что спутниковая система навигации не обеспечивает допустимые отклонения БПЛА от маршрута полета на низких высотах (~ 35 м для GPS и ~ 45 м для ГЛОНАСС). Второй график показывает, что на высоте аэрофотосъемки до 50 м, ВСКЗ позволяет определять координаты точек сканируемой поверхности с погрешностью до 5 мм.

Погрешность определения координат точек ж/д пути оценивалась с учетом реальных условий проведения аэрофотосъемки ж/д пути на высоте 60 м при скорости переменного ветра до 12 м/с (рисунок 25). Погрешность горизонтирования АФК гиростабилизирующей установкой принята  $\Delta\omega = \pm 0,1^\circ$ . Погрешность измерения координат приемником сигналов ГНСС в режиме «Кинематика с постобработкой» находилась в пределах  $\Delta_{ГНСС} = \pm 15$  мм. Погрешность измерения координат точек вычислялась по формуле:

$$\Delta_{XYZ} = (h + \Delta_{ГНСС}) \operatorname{tg}(\omega + \Delta\omega) \sin \Delta\omega + \Delta_{ГНСС},$$

где  $\omega$  – угол отклонения ЛА от курса (рыскание).



Рисунок 25 – Результаты имитационного моделирования аэрофотосъемки

На гистограммах представлены распределения погрешности измерения координат точек ж/д пути, полученные до и после компьютерной обработки материалов аэрофотосъемки и массива данных лазерного сканирования. До компьютерной обработки стандартное отклонение результатов измерений координат составляло 7,9 мм, после обработки СКО уменьшилось до 3,5 мм. Следовательно, доверительный интервал распределения погрешности измерения координат точек ж/д пути уменьшился более чем на 50%.

Погрешность измерения координат рабочего органа строительной техники (рисунок 26) оценивалась в ходе натурных экспериментов с помощью полнофункциональной физической модели бульдозера, выполняющей профилирование земляного полотна в соответствии с проектным заданием. Действительные значения координат рабочего органа определялись роботизированным тахеометром. Вблизи описанной окружности, на пересечении с которой расположены ВЦ, возникает эффект «опасного круга», приводящий к росту погрешности измерения координат. Для его устранения, на строительном участке устанавливались дополнительные ВЦ.

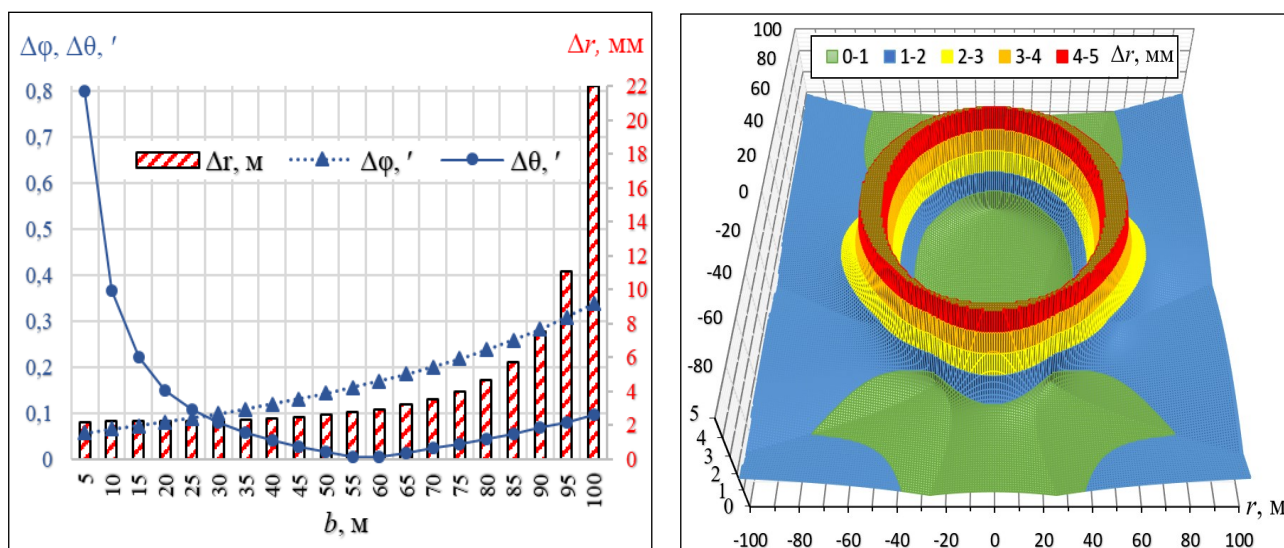


Рисунок 26 – Графики погрешностей определения координат:  $\Delta r$ ,  $\Delta \phi$ ,  $\Delta \theta$ .

Погрешность измерения дирекционных углов ВЦ составила  $0^{\circ}0'4,54''$ . В зависимости от базисного расстояния  $b$  [2; 100] м между ВЦ, погрешности определения дальности и азимутального угла находились в диапазонах  $\Delta r$  [2; 23] мм,  $\Delta \phi$  [5,75; 48,04]" , а погрешность зенитного угла в диапазоне  $\Delta \theta$  [3,43; 20,24]" . При базисном расстоянии 50 м между ВЦ, погрешность определения планового и высотного положения рабочего органа дорожно-строительной машины в радиусе 50 м составила 3 мм.

Методическая погрешность ВСКЗ при определении параметров ГРК с помощью разработанной путеизмерительной тележки оценивалась средствами имитационного моделирования по результатам сравнений измеренных и действительных значений координат точек рельсовых нитей в модели. Построены графики (рисунок 27, а), изображающие продольный профиль, рихтовку и уровень рельсовых нитей.



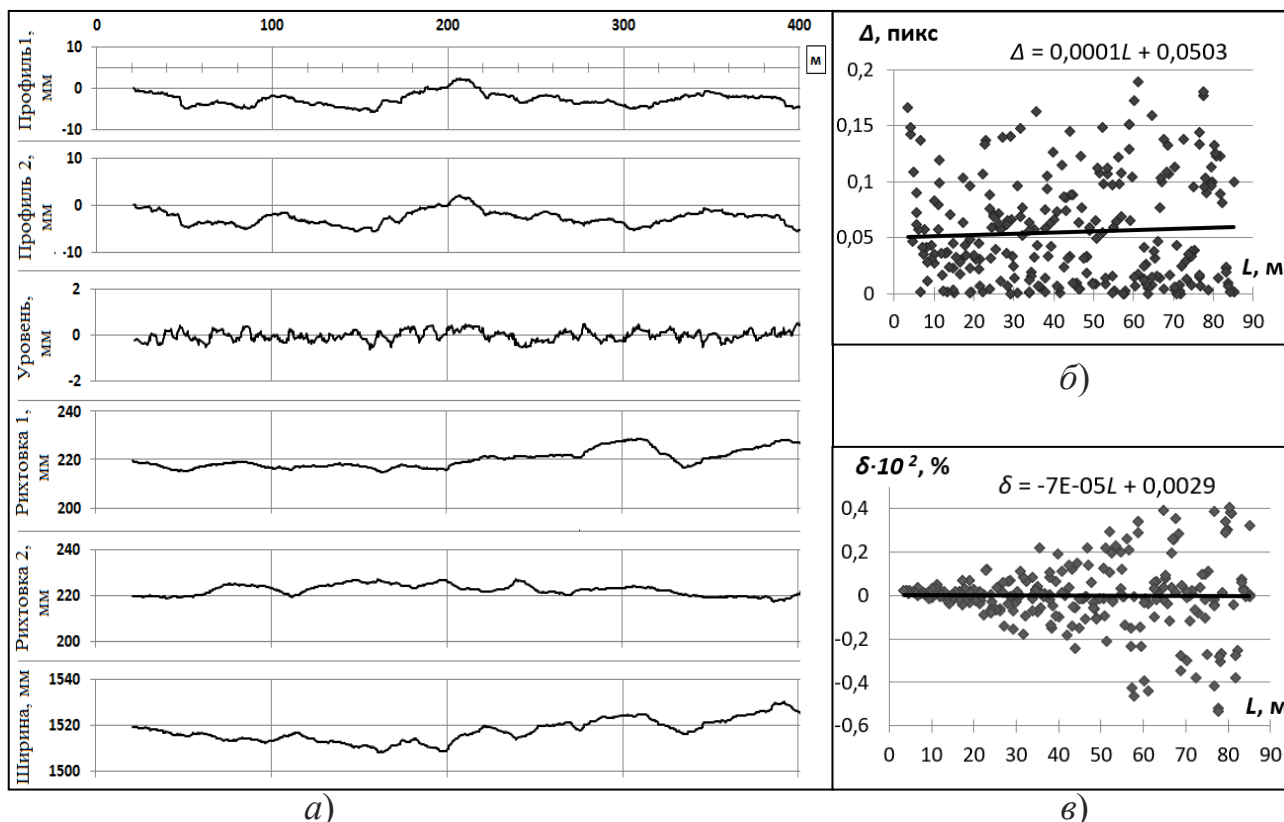


Рисунок 27 – Графики: параметры ГРК (а), абсолютная (б) и относительная (в) погрешности измерений координат точек рельсовых нитей

Погрешность измерений незначительно возрастает с увеличением дальности путеизмерительной тележки (рисунок 27, б) и в среднем составила 0,06 пиксела в диапазоне измерений до 100 м. Относительная погрешность измерения ширины рельсовой колеи (рисунок 27, в) на дистанции до 100 м не превысила 0,6 %. Погрешность измерения угловых координат ВЦ составила 2,7" на расстоянии до 100 м что сопоставимо с погрешностью геодезических приборов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны научные основы для построения ИИУС на базе технологии компьютерного зрения, а также комплекс научно-обоснованных технических решений, методов и передовых разработок в области метрологического обеспечения железных дорог, позволивших научно обосновать комплексную ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути с расширенными функциональными возможностями и улучшенными техническими характеристиками, обеспечивающими высокую гибкость и устойчивость к внешним факторам, при одновременной оптимизации трудозатрат на обслуживание в целях удовлетворения современным тенденциям повышения скоростей движения ж/д транспорта на проектируемых и строящихся высокоскоростных ж/д магистралях.

2. Создана методологическая основа для проектирования ВУ на элементной базе радиоэлектронных и оптико-электронных средств измерений утвержденного типа, обеспечивающих решение ряда разнотипных контрольно-

измерительных задач, возникающих в процессе строительства, эксплуатации и ремонта железных дорог. Применение ВУ в составе ВСКЗ позволяет до 2 раз повысить точность и оперативность средств контроля геометрических параметров железных дорог, что способствует увеличению темпов строительства новых линий и пропускной способности существующих участков железных дорог.

3. Разработаны высокоточные методы цифровой обработки изображений в частотной области, обеспечивающие увеличение до 67% значения сигнал-шум на изображении объекта измерений, и повышающие до 0,996 вероятность идентификации объектов или ВЦ по визуальным признакам. По результатам фильтрации изображения ВЦ с помощью идеального фильтра низких частот, абсолютная погрешность измерения угловых координат ВЦ уменьшилась более чем в 9 раз относительно результатов, полученных с помощью метода наименьших квадратов, что позволило привести погрешность измерения угловых координат ВСКЗ в пределы средней квадратической погрешности для тахеометра технического класса точности.

4. Разработан метод калибровки и алгоритмы для определения метрологических характеристик видеограмметрической системы, предназначенной для измерения угловых координат, скорости и вектора перемещения движущихся объектов, посредством выведенной расчетной функции времени, позволяющей с погрешностью  $<<1\%$  вычислить координаты простого физического маятника, совершающего плоскопараллельные затухающие колебания. Существующие методы калибровки с помощью тест-объектов не обеспечивают определение погрешности измерения видеограмметрической системой скорости и вектора перемещения движущихся объектов.

5. Разработаны теоретические основы повышения точности формирования цифровых моделей ж/д пути и прилегающей территории. В основу теории положены методы компьютерной обработки АФС ж/д пути и данных лазерного сканирования, с помощью которых устраняется влияние условий приёма сигналов ГНСС на точность определения координат точек сканируемой поверхности ж/д пути. Таким образом, точность получаемых трехмерных моделей становится приемлемой для использования их в целях диагностики и контроля геометрических параметров ж/д путей. Кроме этого, появляется возможность использовать полученные трехмерные модели в САПР и оценивать с их помощью объемы земляных работ, требуемые для ремонта или реконструкции участка ж/д пути, что позволяет производить многовариантные расчеты и повышает эффективность проектных решений.

6. Разработан метод несмещенной оценки времени прохождения радионавигационных спутниковых сигналов по выборке результатов сравнений системной шкалы времени спутника со шкалой опорного генератора сигналов времени референционной станции, позволяющий снизить погрешность усредненной оценки результатов этих измерений на интервале времени наблюдения, за счет чего снижается погрешность определения псевдодальности спутников и уменьшается погрешность координатных измерений ВСКЗ по сигналам ГНСС. Стандартное отклонение по выборкам результатов сравнений шкал времени, полученных с помощью данного метода, уменьшилась до 50 %.

В результате погрешность координатных измерений ВСКЗ уменьшилась, в среднем, на 12 % по сравнению с модифицированным фильтром Калмана.

7. Применение трехмерных моделей позволило автоматизировать процесс формирования проекта решения и производить многовариантные расчеты, реализуя диалоговую схему взаимодействия программного обеспечения и опыта пользователя, что обеспечивает значительное повышение эффективности работ при осуществлении проектных решений. Применение трехмерных моделей местности позволяет в среднем на 4 % уменьшить погрешность результатов расчета объемов земляных работ в процессе проектирования ж/д путей по сравнению с результатами, полученными с помощью геодезических планов местности. При этом до 10 раз повышается производительность выполнения проектных работ, а также снижается вероятность появления ошибок на этапе проектирования.

8. Разработано техническое решение для сплошного контроля параметров ГРК с помощью ВЦ, установленных на путеизмерительной тележке. Применение в ИИУС технологии компьютерного зрения позволило достигнуть более высокого уровня автоматизации процесса контроля и скорости измерения параметров ГРК, обеспечив обнаружение длинных неровностей рельсовой колеи. Погрешность измерения угловых координат составила 1,4", что сопоставимо с погрешностью геодезических приборов. При этом абсолютная погрешность координат точек рельсовых нитей составляет 3 мм на дистанции до 100 м.

9. Исследована проблема операционного контроля геометрических параметров земляного полотна железной дороги посредством позиционирования рабочего органа строительной техники в процессе производства земляных работ. При этом решена геодезическая задача обратной однократной угловой засечки по трем равноудаленным друг от друга ВЦ активного типа, что позволяет создавать реперные системы координат, обеспечивающие контроль планового и высотного положения рабочего органа строительной техники с погрешностью измерений координат до 3 мм в радиусе 50 м от начала координат. В результате на порядок уменьшается погрешность определения геометрических параметров земляного полотна по сравнению с существующими локальными технологиями позиционирования и до 2 раз увеличивается производительность дорожно-строительных машин. Таким образом, разработанное техническое решение повышает эффективность применения беспилотной строительной техники (бульдозеров, экскаваторов, автогрейдеров и т.п.) и обеспечивает автоматизацию технологических процессов производства земляных работ, что в конечном итоге способствует повышению безопасности, качества и скорости строительства железных дорог.

10. В диссертационной работе создана методологическая основа для совместного применения технологий компьютерного зрения, лазерной съемки и координатных измерений по сигналам ГНСС в целях получения актуальной и достоверной информации о техническом состоянии ж/д пути, а также решения с помощью разработанных сегментов ВСКЗ ряда разнотипных координатно-измерительных задач, возникающих в процессе строительства, эксплуатации и ремонта ж/д пути.

11. Совокупность полученных теоретических и технических результатов исследования позволяет сделать вывод о том, что в диссертационной работе решена научная проблема создания методов и средств оперативного контроля геометрических параметров в условиях неуверенного приема спутниковых радионавигационных сигналов, которые имеют важное социально-экономическое значение для удовлетворения современным требованиям повышения безопасности, сокращения времени строительства (ремонта) железных дорог, а также увеличения пропускной и провозной способностей ж/д магистралей в России.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Результаты данного исследования в дальнейшем могут быть использованы для проектирования координатно-измерительных систем подобного типа. Применение технологии компьютерного зрения позволяет существенно расширить функциональные возможности информационно-измерительных систем, повышает точность координатных измерений и ускоряет процесс создания трехмерных изображений. Эта технология является крайне важной при решении координатно-измерительных задач в режиме близком к реальному времени, что открывает новые возможности по созданию на базе разработанной ВСКЗ различных систем дополненной реальности.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи по научной специальности 2.2.11 в журналах из перечня ВАК РФ**

1. **Рошин, Д.А.** Технология видеограмметрического позиционирования рабочего органа строительной техники в задачах автоматизации производства земляных работ / Д.А. Рошин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 12. – С. 27-35.
2. **Рошин, Д.А.** Калибровка видеограмметрической системы с помощью физического маятника / Д.А. Рошин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 1. – С. 1-9.
3. **Рошин, Д.А.** Разработка программно-методического комплекса на основе метода главных компонент для системы сопоставления объектов с шаблонами. Метрология. – 2011. – № 7. – С. 3-11.
4. **Рошин, Д.А.** Повышение эффективности систем распознавания контуров деталей на основе преобразования Хафа / Д.А. Рошин // Метрология. – 2011. – № 10. – С. 35-45.
5. **Рошин, Д.А.** Классификация и представление образов деталей машиностроения с помощью системы машинного зрения под управлением SQL Server / Д.А. Рошин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2011. – Т. 9. – № 12. – С. 111-120.
6. **Рошин, Д.А.** Оценка возможностей фотокамеры в качестве средства измерения расстояний / Д.А. Рошин // Информационно-измерительные и управляющие системы, № 11, 2016, с. 34-40.
7. **Рошин, Д.А.** Оценка влияния визуальных признаков визирных целей на вероятность их обнаружения оптико-электронным устройством. Информационно-измерительные и управляющие системы, № 1, 2021, с. 5-13.
8. **Рошин, Д.А.** Методика применения устройств компьютерного зрения для повышения безопасности движения железнодорожного транспорта / Д.А. Рошин // Информационно-измерительные и управляющие системы, № 11, 2017, с. 47-53.
9. **Рошин, Д.А.** Способ применения автоматизированной фотограмметрической системы для контроля параметров геометрии рельсовой колеи / Д.А. Рошин // «Информационно-измерительные и управляющие системы», № 7, 2018, с. 23-27.
10. **Рошин, Д.А.** Способ применения технологии "Лидар" в фотограмметрической координатно-измерительной системе / Д.А. Рошин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16. – № 10. – С. 19-24.
11. **Рошин, Д.А.** Повышение точности формирования трехмерной модели местности / Д.А. Рошин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019, – № 3. – С. 46-53

12. **Шилин, А.Н.** Применение частотного метода обработки изображения для повышения точности определения параметров визирной цели / А.Н. Шилин, Д.А. Рошин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 3. С. 199—208.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых МБД Scopus**

13. **Roshchin, D.A.** Increasing the efficiency of systems for the detection of the contours of parts on the basis of hough's transformation / D.A. Roshchin // Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 54. – No 12. – P. 1357-1364.

14. **Roshchin, D.A.** Improving the Accuracy of Forming a Digital Terrain Model Along a Railway Track / D.A. Roshchin // Measurement Techniques. – 2021. – Vol. 64. – No 2. – P. 100-108.

15. **Roshchin, D.A.** Loading of Tracked Vehicles under their Own Power on a Trailer under the Control of a Machine Vision System / D.A. Roshchin // Measurement Techniques. – 2022.

16. **Roshchin, D.A.** Application of a Machine Vision System for Controlling the Spatial Position of Construction Equipment / D.A. Roshchin // Measurement Techniques. 65, – 2022.

#### **Другие публикации в изданиях, индексируемых RSCI (не по специальности 2.2.11)**

17. **Рошин, Д.А.** Оценка влияния шума фотограмметрической системы на точность определения параметров визирной цели. Электромагнитные волны и электронные системы / Д.А. Рошин // –2022. –Т.27. –№5.–С. 34-41.

18. **Рошин, Д.А.** Методика построения чертежей деталей с применением оптической подсистемы САПР для идентификации объектов / Д.А. Рошин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т. 18. – № 11. – С. 058-065.

19. **Рошин, Д. А.** Сравнительный анализ технических средств контроля параметров геометрии рельсовой колеи/ Д. А. Рошин // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2023. – № 3(63). – С. 40-48.

20. **Рошин, Д.А.** Применение систем технического зрения в интересах Железнодорожных войск / Д.А. Рошин, О.И. Косенков // Военная мысль. – 2018. – № 2. – С. 49-56.

21. **Рошин, Д.А.** Повышение эффективности оптических систем распознавания образов на основе цветовой гистограммы / Д. А. Рошин // Прикладная информатика. – 2011. – № 4(34). – С. 120-124.

22. **Рошин, Д.А.** Модернизация программно-математического обеспечения эталонного комплекса частоты и времени / Д.А. Рошин // Прикладная информатика. – 2015. – Т. 10. – № 6(60). – С. 60-69.

23. **Рошин, Д.А.** Модернизация программно-математического комплекса для сравнения шкал времени эталонов времени и частоты по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем / Д.А. Рошин // Прикладная информатика. 2016. – Т. 11. – № 1(61). – С. 93-105.

24. **Рошин, Д.А.** Повышение точности обнаружения контура на цифровых изображениях для объектов, имеющих форму шара / Д.А. Рошин // Прикладная информатика, № 5, 2016, с. 97-107.

25. **Рошин, Д.А.** Модель видеограмметрической координатно-измерительной системы / Д.А. Рошин // Прикладная информатика, № 6, 2016, с. 65-77.

26. **Рошин, Д.А.** Методика применения систем технического зрения для бесконтактных измерений параметров объектов на примере решения задач воздушной разведки / Д.А. Рошин // Прикладная информатика, № 5, 2017, с. 107-121.

27. **Рошин, Д.А.** Способ применения компьютерного зрения для повышения точности проведения аэрофототопографической съемки местности / Д.А. Рошин // Прикладная информатика, № 6, 2017, с. 58-70.

28. **Рошин, Д.А.** Применение трехмерных моделей местности для оценки объемов грунта при возведении земляного полотна железных дорог / Д.А. Рошин // Прикладная информатика, № 3, 2019, с. 103-113.

29. **Рошин, Д.А.** Имитационная модель процесса укладки верхнего строения железнодорожного пути с применением перспективного путеукладчика / Д.А. Рошин, Д.И. Адволоткин // Прикладная информатика. – 2020. – Т. 15. – № 1(85). – С. 57-67.

#### **Патенты и свидетельства на объекты интеллектуальной собственности**

30. Пат. 2655467 на изобретение «Способ измерения расстояния на цифровой видеокамере при помощи мишени с формой шара» / Д.А. Рошин. – 2018.

31. Пат. 2685761 на изобретение «Фотограмметрический способ измерения расстояний вращением цифрового фотоаппарата» / Д.А. Рошин. – 2019.

32. Пат. 2686341 на изобретение «Способ определения параметров геометрии рельсовой колеи и система для его осуществления» / Д.А. Рошин. – 2019.

33. Пат. 2689848 на изобретение «Измеритель расстояний на цифровой видеокамере» / Д.И. Адволоткин, Д.А. Рошин. – 2019.

34. Пат. 2726256 на изобретение «Способ построения трехмерной модели местности вдоль полотна железнодорожного пути» / Д.А. Рошин. – 2020.

35. Пат. 2752687 на изобретение «Способ определения дальности с помощью цифровой видеокамеры и трех источников света» / Д.А. Рошин. – 2021.
36. Пат. 2779703 на изобретение «Видеограмметрическая система для определения собственных координат по трем источникам света» / Д.А. Рошин. – 2022.
37. Пат. 2769637 на изобретение «Способ и видеограмметрическая система для определения собственных координат по трем визирным целям» / Д.А. Рошин. – 2022.
38. Пат. 2804376 на изобретение «Устройство для панорамной пространственной фотосъемки» / Д.А. Рошин. – 2023.
39. Пат. 2808213 на изобретение «Способ определения параметров погрузки гусеничной техники своим ходом на грузовую платформу с помощью системы компьютерного зрения» / Д.А. Рошин. – 2023.
40. Пат. 2809177 на изобретение «Способ применения роботизированного тахеометра и беспилотного летательного аппарата для определения координат наземного объекта» / Д.А. Рошин. – 2023.
41. Пат. 2823551 на изобретение «Способ калибровки видеограмметрической системы с помощью физического маятника» / Д.А. Рошин. – 2024.
42. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2017618224 «Программа определения расстояний с использованием видеокамеры» / Д.А. Рошин. – 2017.
43. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2017661435 «Программа для сравнения шкал времени по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем» / Д.А. Рошин. – 2017.
44. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2017661249 «Программа для формирования шкалы времени группового хранителя частоты» / Д.А. Рошин. – 2017.
45. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2019616210 «Программа для расчета параметров геометрии рельсовой колеи с помощью фотограмметрической системы» / Д.А. Рошин. – 2019.
46. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2021613583 «Программа для высокоточной оценки объемов грунта при возведении земляного полотна железных дорог» / Д.А. Рошин. – 2021.
47. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2022661237 «Программа для идентификации источника света по визуальным признакам» / Д.А. Рошин. – 2022.
48. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2022661446 «Программа для определения характеристик гармонических колебаний маятника» / Д.А. Рошин. – 2022.
49. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2022661474 «Программа для вычисления координат точки съемки по изображению трех опорных пунктов с известными координатами» / Д.А. Рошин. – 2022.
50. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2022661514 «Программа для контроля параметров погрузки транспортируемой техники своим ходом на полуприцеп» / Д.А. Рошин. – 2022.
51. Свид. о рег. прог. для ЭВМ 2022663547 «Программа для создания панорамных пространственных изображений» / Д.А. Рошин. – 2022.