

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВОЙСК» МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант: доктор технических наук Сахаров Константин Юрьевич

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОНТРОЛЯ	
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	23
1.1 Концепция разработки видеограмметрической системы компьютерного зрения для контроля геометрических параметров железнодорожного пути	30
1.2 Обзор технических средств для контроля геометрических параметров железнодорожного пути	38
1.3 Метрологический анализ средств измерений геометрических величин.....	52
1.3.1 Средства измерений координат	52
1.3.2 Средства измерений дальности	57
1.3.3 Средства измерений углов	60
1.3.4 Средства измерений геометрических параметров и пространственного положения объектов	62
1.4 Формирование требований к видеограмметрической системе компьютерного зрения	66
1.5 Выводы по первой главе	74
2 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ	
ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	76
2.1 Оптические методы измерений	77
2.2 Акустические методы измерений	86
2.3 Магнитные методы дефектоскопии рельсов.....	93
2.4 Радиоволновые методы измерений	95
2.5 Основные принципы формирования и обработки изображений	100
2.6 Обобщенная технология компьютерного зрения	106
2.7 Методические и технологические основы координатно-временной привязки результатов измерений	114
2.8 Выводы по второй главе	124
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВИДЕОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	
КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ	
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	126
3.1 Конструирование физической модели видеограмметрической системы....	127
3.2 Оптические методы обнаружения объекта измерений	134
3.2.1 Метод обнаружения объектов, излучающих тепловую энергию	135
3.2.2 Метод обнаружения движущихся объектов	137
3.2.3 Метод обнаружения объектов по цвету в оптическом диапазоне электромагнитного излучения	138
3.2.4 Метод обнаружения объектов по габаритам на изображении	142

3.2.5 Метод обнаружения объектов по форме поверхности	143
3.2.6 Метод обнаружения объектов по частоте мигания	149
3.3 Оценка влияния визуальных признаков на вероятность обнаружения визирной цели.....	150
3.3.1 Оценка вероятности обнаружения визирной цели по цвету	152
3.3.2 Оценка вероятности обнаружения визирной цели по форме.....	154
3.3.3 Оценка вероятности обнаружения визирной цели по частоте мигания	156
3.4 Разработка фотограмметрических методов определения дальности и пространственного положения объекта измерений	158
3.4.1 Определение дальности объектов произвольной формы	159
3.4.2 Определение дальности объекта с помощью визирной цели	163
3.4.3 Определение скорости и направления движения объектов	169
3.4.4 Определение пространственного положения и параметров объекта с помощью метода главных компонент	170
3.4.5 Определение геометрических параметров объекта	176
3.4.6 Определение геометрических параметров визирной цели.....	182
3.5 Определение координат объекта измерений	187
3.5.1 Определение положения объекта в локальной системе координат	188
3.5.2 Определение положения объекта в глобальной системе координат ...	195
3.6 Выводы по третьей главе	207
4 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	210
4.1 Оперативный контроль состояния железной дороги	214
4.2 Проектирование железнодорожных путей	239
4.3 Контроль геометрических параметров земляного полотна железнодорожного пути	257
4.4 Контроль параметров геометрии рельсовой колеи	277
4.5 Повышение безопасности грузопассажирских перевозок	286
4.6 Выводы по четвертой главе	294
5 МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИДЕОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ	299
5.1. Источники шума в оптико-электронных приборах и их влияние на погрешность определения геометрических параметров	306
5.1.1 Подавление темнового и фотонного шума на изображении.....	307
5.1.2 Фильтрация остаточного шума в частотной области изображения	309
5.2 Оценка погрешностей измерения параметров визирной цели	314

5.2.1 Погрешность измерения дальности	315
5.2.2 Погрешность измерения углов	321
5.2.3 Инструментальная погрешность измерения координат визирных целей.....	324
5.2.4 Сравнительная оценка вычислительной погрешности измерения координат визирных целей	329
5.2.5 Динамическая погрешность измерения параметров визирной цели	335
5.2.6 Погрешность определения собственных координат видеограмметрического устройства.....	344
5.2.7 Оценка суммарной стандартной неопределенности результата измерений координат визирной цели	347
5.3 Оценка погрешности определения координат точек железнодорожного пути	357
5.4 Оценка погрешностей определения координат рабочего органа строительной техники	365
5.5 Оценка погрешности определения геометрических параметров рельсовой колеи	369
5.6 Оценка погрешностей определения координат по спутниковым сигналам.....	382
5.7 Сравнительный анализ метрологических характеристик видеограмметрической системы компьютерного зрения	386
5.8 Выводы по пятой главе	389
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	393
Список сокращений и условных обозначений	401
Список литературы	402
Приложение А. Утвержденные типы средств измерений.....	402
Приложение Б. Метрологические характеристики средств измерений	448
Приложение В. Патенты на изобретения.....	452
Приложение Г. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	464

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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.

В целях повышения пространственной связанности и транспортной доступности территорий распоряжением Правительства РФ № 3363-р от 27.11.2021 утверждена Транспортная стратегия РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, которая устанавливает требования по увеличению пропускной и провозной способности ж/д магистралей. Реализация данной стратегии планируется посредством планомерного увеличения темпов строительства и реконструкции железных дорог за счет 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 величин или 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 планирования и своевременного проведения ремонтных работ в целях безопасной эксплуатации ж/д транспорта. Однако для практического применения технологии компьютерного зрения в измерительных целях требуется научный подход.

Научным изучением оптических измерений дальности, координат, перемещений в пространстве и скоростей объектов, занимается видеограмметрия – новая научная дисциплина, направленная на практическое освоение высокоэффективных методов обработки цифровой видеоинформации. Эта научная дисциплина выделяет ряд основных видеограмметрических методов для получения пространственной информации об объекте измерений с помощью различных оптико-электронных систем. Интеграция технологии компьютерного зрения и видеограмметрии направлена в первую очередь на увеличение производительности видеограмметрических систем за счет реализации наиболее эффективных методов обнаружения, отслеживания, идентификации объекта измерений, а также достижение более высокой точности определения его геометрических параметров, скорости и вектора перемещения, что в конечном итоге будет способствовать значительному расширению области применения видеограмметрических систем.

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 нормированных значений. 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.

Выявленные недостатки существующих средств контроля могут быть устранены путем перехода к пространственным данным на основе координатного принципа измерения геометрических параметров ж/д пути. Применение координатных методов измерений будет не только обеспечивать привязку измеренных параметров ж/д пути к одной из систем координат, но и способствует значительному приросту производительности средств контроля, позволив достигнуть более высокого уровня автоматизации технологических процессов строительства и восстановления железных дорог.

Таким образом, **актуальность** настоящего диссертационного исследования определяется потребностью в получении более оперативной и достоверной информации о техническом состоянии ж/д путей, которая необходима для обеспечения безопасной эксплуатации ж/д транспорта и планирования ремонтных (восстановительных) работ. Данная информация также может применяться в целях повышения темпов строительства, транспортного развития (реконструкции) сети железных дорог, сокращения времени восстановления путевого сообщения, повышения пропускной способности ж/д путей и увеличения объемов грузопассажирских ж/д перевозок.

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 научной 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 ж/д пути.

Цель работы – исследование технологии компьютерного зрения и формирование на её основе 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.

Достижение поставленной цели направлено в первую очередь на решение координатно-измерительных задач с высокой точностью измерений, свойственной геодезическим приборам, при обеспечении многофункциональности и производительности, характерной для фото-видеограмметрических систем. При этом требуется решить следующие основные **задачи**:

1. Разработка концепции проектирования комплексной ВСКЗ на единой принципиальной, конструктивной, технологической и метрологической основе, 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 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.

Поставленные задачи решались посредством применения технологии компьютерного зрения и более совершенных методов цифровой обработки изображений, направленных на повышение точности и диапазона измерений ИИУС, а также расширение её функциональных возможностей.

Научная новизна работы состоит в следующем:

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 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 точек на сканируемой поверхности ж/д (*патент на изобретение РФ № 2726256*).

6. Разработан метод определения координат точек на местности, находящихся вне зоны прямой оптической видимости видеограмметрической системы, обеспечивающий плано-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 значимость результатов диссертационного исследования

Разработана концепция совершенствования ИИУС с помощью технологии компьютерного зрения, а также комплекс научно-обоснованных технических решений, методов и передовых разработок в области метрологического обеспечения железных дорог, позволивших научно обосновать перспективную ИИУС для контроля геометрических параметров ж/д пути, расширить её функциональные возможности, улучшить технические характеристики, обеспечить высокую гибкость и устойчивость к внешним факторам, что способствовало повышению точности и оперативности применения технических средств контроля ж/д пути в условиях неуверенного приема спутниковых радионавигационных сигналов 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.

Разработаны теоретические основы повышения точности цифровых моделей ж/д пути и прилегающей территории с помощью технологий компьютерного зрения, лазерного сканирования и координатных измерений по сигналам ГНСС. Необходимость данного теоретического исследования обусловлена наличием зон неуверенного приёма радионавигационных спутниковых сигналов и снижением точности построения цифровых моделей в этих зонах. В основу теории положен 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. Также появляется возможность использовать полученные трехмерных 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.

Исследована проблема операционного контроля геометрических параметров земляного полотна железной дороги посредством позиционирования рабочего органа строительной техники в процессе производства земляных работ, что в конечном итоге способствует повышению безопасности, качества и скорости их выполнения. С помощью разработанной ИИУС решена геодезическая задача обратной однократной угловой засечки по трем равноудаленным друг от друга ВЦ активного типа, по которым определяются координаты и пространственное положение ИИУС. Решение данной задачи позволяет строить реперные системы координат, обеспечивающие контроль планового и высотного положения рабочего органа строительной техники в пределах допуска 2 мм. Таким образом, стало возможным применение беспилотной строительной техники (бульдозеров, экскаваторов, автогрейдеров и т.п.), обеспечивающей автоматизацию технологических процессов производства земляных работ и операционный контроль геометрические параметров земляного полотна железных дорог.

Разработан комплекс программного обеспечения (свидетельства о регистрации программ для ЭВМ 2017661435, 2017661249), предназначенный для обработки результатов сравнения шкал времени с помощью сигналов времени и частоты, передаваемых космическими аппаратами. В алгоритме применен метод несмещенной оценки времени прохождения радионавигационного сигнала по трассе «Спутник-Приемник», позволяющий снизить до 12 % погрешность определения координат референцной станции. Данное программное обеспечение было апробировано на эталонном комплексе времени и частоты Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли в целях мониторинга за поведением шкал времени, а также для сравнения шкал времени, которые формируются территориально удаленными комплексами времени и частоты.

Методология и методы исследования. 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.

Диссертационное исследование соответствует следующему перечню направлений исследований паспорта научной специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы»:

1) Научное обоснование перспективных ИИУС, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышение эффективности существующих систем.

2) Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов структуры и образцов ИИУС, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений.

3) Математическое, алгоритмическое, информационное, программное и аппаратное обеспечение ИИУС.

4) Расширение функциональных возможностей ИИУС на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования.

7) Методы и системы программного и информационного обеспечения процессов исследования и испытаний образцов ИИУС, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта.

8) Новые методы и технические средства контроля и испытаний образцов ИИУС.

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, 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.

Реализация научно-технических результатов. 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 объем работ, в 1,8 раза выше, чем годом ранее. В частности, основные результаты диссертационного исследования были внедрены в следующие комплексы и систему:

1. Разработан многофункциональный комплекс с БПЛА легкого класса (акт внедрения от 01.09.2022), который в настоящее время применяется в целях мониторинга и диагностики ж/д путей, особенно в случаях их повреждения, когда применение традиционных средств контроля становится малоэффективным. Данный комплекс позволяет до 75 % сократить время обнаружения мест повреждений ж/д пути, определять причины и производить оценку степени их повреждений.

2. Разработан программный комплекс (акт внедрения от 01.09.2022), который в настоящее время применяется для высокоточной оценки объемов грунта при

строительстве (восстановлении) земляного полотна железной дороги, с помощью которого строятся трехмерные модели участка железной дороги 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 железных дорог в системе автоматизированного проектирования позволяет до 10 раз повысить производительность выполнения проектных работ, а также снизить вероятность появления ошибок на этапе проектирования, что имеет важное социально-экономическое значение.

3. Разработана интеллектуальная система автоматизированного управления базовым техническим средством (БТС) строительной и специальной техники, предназначенная для выполнения следующих информационно-измерительных и управляющих процессов БТС: определение текущего состояния, положения и конфигурации рабочих органов; расчет необходимых значений корректирующих воздействий на состояние БТС и конфигурацию его рабочих органов в соответствии с заданием на производство работ; формирование управляющих сигналов в соответствии с принятыми в системе управления БТС протоколами (на всех уровнях); доведение управляющих сигналов до системы управления БТС. При этом использование интеллектуальной системы автоматизированного управления повышает до 2 раз производительность строительной и специальной техники, а также обеспечивает безопасность выполнения строительно-восстановительных работ, что имеет важное социально-экономическое значение. Данная интеллектуальная система реализована в системе автоматизированного управления беспилотной строительной техники, выпускаемой на заводе ДСТ Урал (акт внедрения от 12.10.2022).

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" до 2024 года, что подтверждает высокий уровень, обоснованность и достоверность результатов исследований, направленность на решение крупных научных и практических задач.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена использованием классических методов исследований и фундаментальных положений оптики, строгими математическими выводами, результатами экспериментальных исследований и компьютерного моделирования с применением программными средств, разработанных на основе современных апробированных методик получения и обработки данных. Полученные выводы подтверждаются высокой степенью сходимости результатов моделирования, теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов исследования. 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, Курск, 2011; «Метрология в XXI веке», ВНИИФТРИ, Менделеево, 2014; «Развитие технических наук в современном мире», Воронеж, 2015; «Тенденции, перспективы и технологии развития», Волгоград, 2015; «Теоретические и практические проблемы развития современной науки», Москва, 2016; «Научный поиск в современном мире», Москва, 2017; «Перспективные средства измерений и методы испытаний технических средств и строительных конструкций», НИИЦ ЖДВ, Москва, 2017; «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании»,

БГТУ, 2021; «Технические науки: проблемы и решения», Москва, 2018-2023; «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований», Новосибирск, 2021-2023 г; «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022», ЯГТУ, 2022; «Научно-технические вопросы проведения испытаний робототехнических комплексов с элементами искусственного интеллекта», ГНИИМЦ ПВ, Москва, 2023; «XLV International Multidisciplinary Conference», Primedia E-launch LLC, Shawnee, USA. 15-17 марта 2023 г. «Применение информационных технологий обработки больших объемов данных в автоматизированных системах военного назначения», 27 Центральный научно-исследовательский институт Минобороны России, Москва, 16-17 октября 2023 г.; «Актуальные задачи военной метрологии», Главный научный метрологический центр Минобороны России, г. Кубинка, 4-6 марта 2024 г.; "Информационные технологии в Вооруженных Силах Российской Федерации", ВИТ "ЭРА", г. Анапа, 21–22 марта 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», СпБГЭТУ «ЛЭТИ», 2023 г.; Объединенный семинар кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования» и кафедры «Электротехника», ВолгГТУ, 2024 г.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 97 печатных работ, из них 32 в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ, 18 входят в перечень наукометрической базы RSCI на платформе Web of Science, 4 статьи опубликованы в международных журналах, входящих в перечень наукометрической базы Scopus, получено 12 патентов на изобретение (прил. В), 12 свидетельств на программы для ЭВМ (прил. Г). Результаты исследования также опубликованы в 31 сборниках по материалам вузовских, всероссийских и международных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и 4 приложений. Основная часть работы изложена на 441 страницах, приложения – на 34 страницах. Работа содержит 203 рисунков и 14 таблиц, список литературы из 359 наименований.

Личный вклад автора заключается в следующем: постановка цели исследования; составление программы исследования; решение научных задач для достижения поставленной цели исследования; разработка методов измерений, физических и имитационных моделей, программ для ЭВМ, технических устройств, видеограмметрических систем и средств контроля, а также технических решений и способов их применения; моделирование, планирование и проведение экспериментов, обработка полученных результатов; формулировка основных положений, выносимых на защиту, выводов и рекомендаций. Личный вклад автора в опубликованных работах по теме диссертационного исследования составляет 94% (91 работа опубликована без соавторов).

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

В масштабах территории Российской Федерации для связи промышленных центров и обеспечения бесперебойных поставок ресурсов необходима развитая транспортная сеть протяженных участков железных дорог. Важным преимуществом грузопассажирских ж/д перевозок является относительно низкая себестоимость, которая на порядок ниже, чем автомобильным транспортом [1]. Это обусловлено высокими показателями удельной грузоподъемности ж/д состава и средней дальности перевозки грузов [2] [3]. По данным информационно-статистического бюллетеня Минтранса России за I квартал 2023 года ж/д транспортом в России перевозится в среднем 1350 млн. *т.* груза в год, а грузооборот составляет 2500 млрд. *т-км*, в то время как совокупный грузооборот автомобильным транспортом составляет всего 250 млрд. *т-км* (рис. 1.1).

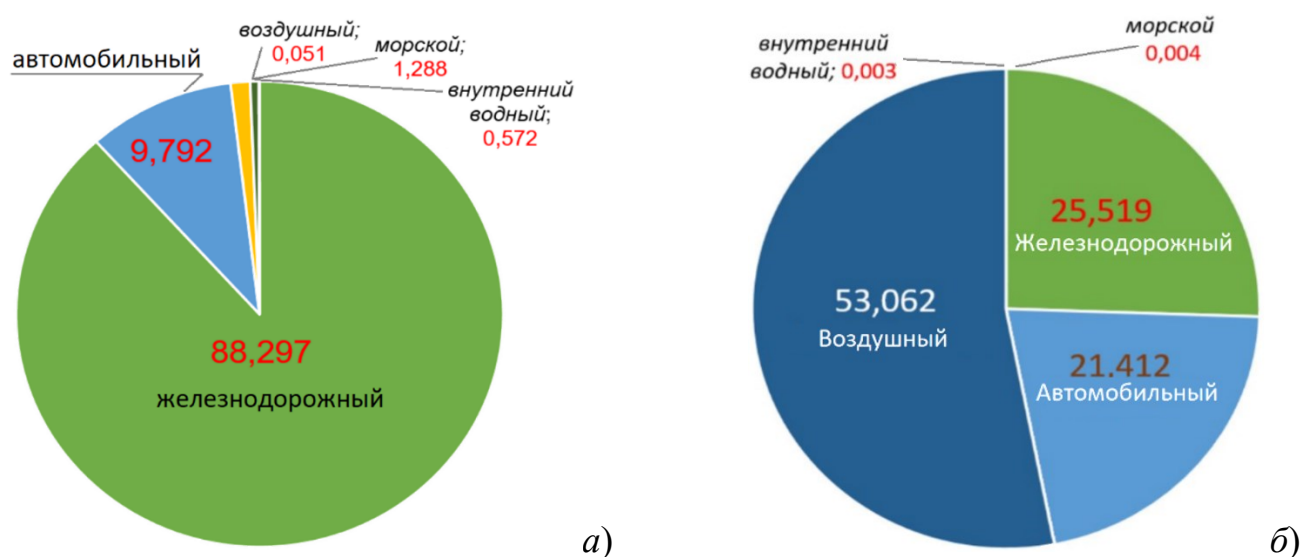


Рисунок 1.1 – Графики грузопассажирских перевозок разными видами транспорта за I квартал 2023 г.: а) структура грузооборота ; б) структура пассажирооборота

Однако пропускная способность существующей сети железных дорог в России, исходя из статистических данных Росстата [4] по интенсивности перевозок ж/д транспортом (табл. 1.1), уже достигла своего предела, что препятствует дальнейшему росту грузопассажирских перевозок. Для обеспечения устойчивого

развития сети железных дорог необходимо строительство новых линий и увеличение их пропускной способности. Пропускная способность ж/д участков может быть увеличена за счет планомерного повышения качества железных дорог и допустимой скорости движения поездов, а также за счет сокращения времени проведения строительных и ремонтных работ. Масштабное развитие транспортной инфраструктуры предполагает увеличение темпов строительства железных дорог, которых невозможно достигнуть без автоматизации технологических процессов на всех этапах строительства, начиная от проектирования и заканчивая вводом в эксплуатацию. Сокращение трудозатрат и сроков строительства железных дорог достигается также посредством автоматизации технологических процессов контроля и повышением оперативности его проведения [5] .

Таблица 1.1 – Статистические данные по протяженности эксплуатационных путей и наличию железнодорожного транспорта в России за 2010-2021 гг.

Показатели	2010	2015	2019	2020	2021
Эксплуатационная длина железнодорожных путей – всего, тыс. км	86	86	87	87	87
Удельный вес в общей эксплуатационной длине железнодорожных путей участков, процентов:					
электрифицированных	50,4	50,6	51,0	51,2	51,2
с тепловозной тягой	49,6	49,4	49,0
двухколейных и многоколейных	43,7	44,0	44,5
Плотность железнодорожных путей общего пользования, км на 1000 км ² территории	5,0	5,0	5,1	5,1	5,1
Интенсивность перевозок на 1 км длины железнодорожных путей общего пользования:					
грузов, млн т·км	23,5	26,7	29,9	29,3	30,3
пассажиров, млн пассажиро-км	1,6	1,4	1,5	0,9	1,2
Рабочий парк груженых железнодорожных вагонов (в среднем в сутки), тыс. шт	328	327	388	342	396
Рабочий парк пассажирских вагонов, тыс. шт	22,5	17,3	14,8	11,7	12,1

Комплексная автоматизация технологических процессов строительства и последующего технического обслуживания железных дорог не представляется возможной без применения информационно-измерительных и управляющих

систем (ИИУС), которые позволяют объединять разные типы средств измерений, обеспечивая комплексные измерения большого числа параметров ж/д пути и совместную математическую обработку полученных результатов измерений, учитывающую или определяющую их взаимозависимость [6]. Такие системы позволяют получить более полную и достоверную информацию о техническом состоянии ж/д путей, необходимую для безопасной эксплуатации ж/д транспорта, а также для планирования и проведения ремонтных работ.

Из определения, данного в РМГ 29-2013, следует что измерительная система функционально объединяет в себе различные средства измерений и вспомогательные технические устройства, которые устанавливаются в разных частях объекта измерений, обеспечивая измерение физических величин, характеризующих свойства данного объекта. В соответствии с РМГ 29-99 измерительные системы подразделяются по своему назначению на измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие системы и др. Объект измерений и ИИУС связаны между собой измерительными каналами, которые в реальном времени обеспечивают измерение контролируемых параметров [7]. Сами значения параметров получают расчетным путем на основе известных функциональных зависимостей между ними и измеряемыми физическими величинами.

Пропускная способность ж/д пути, в первую очередь определяется его техническим состоянием. В процессе эксплуатации ж/д пути очень важно поддерживать его технические и эксплуатационные характеристики [5]. Ж/д путь (согласно СП 238.1326000.2015) включает в себя верхнее строение пути, земляное полотно, водоотводные, водопропускные, противодеформационные, защитные и укрепительные сооружения земляного полотна, расположенные в полосе отвода, а также искусственные сооружения. На схеме (рис. 1.2) в соответствии с ГОСТ 21.702-2013 изображены основные элементы ж/д пути: рельсовая колея, балластная призма, земляное полотно и песчаная подушка.

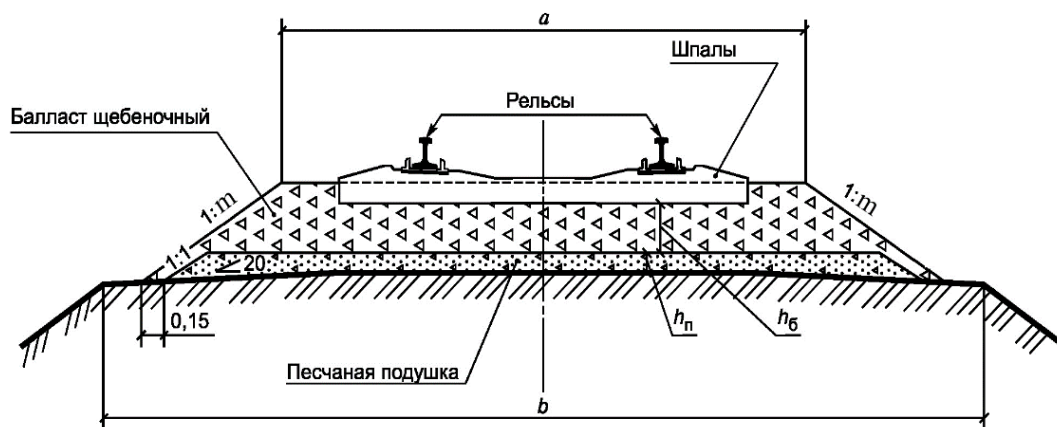


Рисунок 1.2 – Схема ж/д пути: b – ширина основной площадки земляного полотна; $1:m$ – крутизна откосов; $h_{зп}$ – толщина земляного полотна; 1 – рельсовая колея; 2 – балластная призма; 3 – земляное полотно; 4 – песчаная подушка

Рельсовая колея представляет собой рельсовые нити, расположенные параллельно на определённом расстоянии друг от друга и прикреплённые к подрельсовому основанию ж/д пути шпалам, плитам или брускам [8]. Из определения термина «Рельсовая колея», данного профессором В. М. Панским, следует, что положение рельсовой колеи в пространстве задается двумя геометрическими линиями, проходящими вдоль пути по внутренним граням головок рельсов на уровне их контакта с гребнями колес. Условно считают, что эти линии проходят по внутренним (рабочим) граням головок рельсов на уровне, находящемся на 13 мм ниже их поверхности катания [9].

На плане пути проекция рельсовой колеи отображается на горизонтальную плоскость. Элементами линии плана являются прямые и кривые участки пути [10]. Чем больше длина элементов профиля и меньше разность уклонов смежных элементов, тем меньше возникают продольные усилия и ускорения при движении поездов [11]. Кривые участки пути возникают при необходимости обхода препятствий или приближении линии к населенным пунктам, а также для удешевления строительства. При необходимости поворота трассы под некоторым углом, который образуется между начальным направлением линии и новым её положением, направление трассы меняется постепенно. Поворот трассы осуществляется по круговой кривой с радиусом, величина которого не может превышать определенного значения, зависящего от категории ж/д линии и условий

местности. Радиус криволинейных участков пути в плане также является контролируемым параметром ГРК.

Основная площадка и балластная призма земляного полотна железной дороги оказывают большое влияние на стабильность ГРК [12]. Анализ изменений геометрии пути и причин их вызывающих, показывает, что в зависимости от конкретных условий эксплуатации (топографии, климата, гидрологии) нижнее строение ж/д пути подвержено влиянию геологических эрозионных процессов, протекающих в грунте [13]. Под влиянием различных природных и техногенных факторов происходит естественный износ строения ж/д пути [14], приводящий к деформациям формы, изменению геометрических размеров и взаимного положения отдельных элементов конструкции [15], что в целом негативно сказывается на его эксплуатационных характеристиках [16].

Воздействие водной и ветровой эрозии, в том числе карст и криогенное пучение грунта вызывают просадки пути, толчки, перекосы, разжижение и выплески балласта, трещины на поверхности балластного слоя, трещины на откосах и обочинах, выпирание грунтов на междупутья и в кюветы, что приводит к повреждению ж/д пути [17]. При недостаточной толщине балластного слоя также возникают и развиваются до опасных размеров деформации основной площадки земляного полотна [18]. Если верх балластной призмы имеет недостаточную ширину, то снижается поперечная устойчивость рельсошпальной решетки [19]. Для выявления таких деформаций применяются различные контрольно-диагностические комплексы [20] [21].

Контроль параметров ж/д пути позволяет своевременно выявить отклонения параметров от допустимых значений, скомпенсировать или устранить их влияние посредством замены несоответствующих требованиям элементов. Основной задачей контроля является обеспечение стабильности значений геометрических размеров, пространственного положения и формы рельсовой колеи, а также соответствие параметров ж/д пути проектным значениям. Контроль выполняется, как визуальным осмотром ж/д пути, так и с применением различных контрольно-измерительных систем, комплексов и средств измерений, которые могут включать

в свой состав различные оптические устройства, гироскопы, а также приемники сигналов спутниковых систем позиционирования (ГЛОНАСС, GPS и др.) [22].

Техническое состояние ж/д пути в основном определяется ГРК [23], параметры которой в соответствии с ПБ 10-382-00 характеризуют пространственное положение рельсовых нитей в профиле, плане, по уровню и ширине (табл. 1.2). Основная задача, решаемая в процессе контроля параметров ж/д пути, заключается в оценке его состояния и обнаружении отклонений параметров ж/д пути от установленных норм, что необходимо для предупреждения выхода этих отклонений за пределы допусков. По результатам контроля оценивается состояние ж/д пути и планируется проведение ремонтно-восстановительных работ.

Таблица 1.2 – Основные параметры геометрии рельсовой колеи

Параметры	Графическое представление
Разность отметок головок рельсов в одном поперечном сечении P_1 , мм S — размер колеи (пролет)	
Сужение или расширение колеи рельсового пути (отклонение размера пролета — S в плане)	
Взаимное смещение торцов стыкуемых рельсов в плане и по высоте P_4	
Зазоры в стыках рельсов P_5	
Разность высотных отметок головок P_6 рельсов на длине пути L	
Стрелы изгиба рельсовых нитей, радиусами R_1 , R_2 и возвышениями оси пути h_1 , h_2 с прямой вставкой пути длиной L	

Нормы содержания пути в период его сооружения и эксплуатации установлены СНиП 32-01-95. Величины отступлений от номинальных значений параметров и норм устройства ж/д пути устанавливаются в зависимости от скорости движения поездов и приводятся в инструкциях по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам, предпринимаемым для обеспечения безопасности движения [24]. Согласно ГОСТ 34783-2021 в целях обеспечения безопасности движения ж/д транспорта устанавливаются следующие требования к ж/д пути:

- все составные части ж/д пути по прочности, несущей способности и устойчивости должны обеспечивать безопасное движение высокоскоростного ж/д подвижного состава с наибольшими скоростями в пределах допустимых значений;
- верхнее строение пути, земляное полотно и его сооружения, а также искусственные сооружения должны обеспечивать стабильность положения ж/д пути в плане и продольном профиле. Геометрические параметры кривых должны устанавливаться таким образом, чтобы обеспечивать устойчивость высокоскоростного ж/д подвижного состава, препятствующую сходу его колес с рельсов и опрокидыванию.

Выполнение установленных требований осуществляется посредством проведения технического диагностирования и мониторинга состояния ж/д пути, его составных частей и элементов составных частей. Измерение параметров ГРК проводится систематически, что позволяет оценивать влияние различных эксплуатационных факторов на ее стабильность и прогнозировать появление характерных расстройств, представляющих опасность. Под опасным состоянием понимается такое состояние ж/д пути, при котором создается опасность для здоровья и жизни потребителей услуг и работников, занятых на его обслуживании. Физическую опасность представляют движущийся подвижной состав и работающие на пути машины, и механизмы. Под последствиями опасности понимается не только крушение, аварию, сход, но и превышение показателей, характеризующих состояние ж/д пути сверх установленных норм, которое требует ограничения скорости на участке как предохранительная мера от аварии [25].

В настоящее время наметилась тенденция увеличения пропускной способности ж/д участков за счет повышения скорости движения поездов. Увеличение скоростей движения поездов, предъявляет более высокие требования к состоянию ж/д пути и, соответственно, к допустимым отклонениям его геометрических параметров, которые могут приводить к нарушению плавности хода подвижного состава, увеличивая динамику расстройства пути и износ элементов его верхнего строения [26]. Для скоростных участков железных дорог предъявляются повышенные требования, как на этапе их строительства, так и в процессе эксплуатации [27] [28] [29], что также вызывает необходимость в повышении точности средств измерений, применяемых для контроля геометрических параметров высокоскоростных участков железных дорог. Повышение точности средств измерений может достигаться за счет введения поправочных множителей на известные систематические погрешности для исключения или снижения их влияния на точность результата измерений [30]. При этом возникает проблема информационного отбора достоверных результатов измерений и последующего исключения грубых погрешностей [31].

1.1 Концепция разработки видеограмметрической системы компьютерного зрения для контроля геометрических параметров железнодорожного пути

Концепция разработки любой ИИУС определяет цель, задачи, основные принципы построения и направления работ, необходимые для ее создания. Разрабатываемая ВСКЗ относится к области информационно-измерительных систем и предназначена для решения задач, связанных с измерением и контролем геометрических параметров ж/д пути, определения пространственного положения рельсовых нитей в профиле, плане, по уровню и по ширине колеи, которые характеризуют техническое состояние ж/д пути. К перечню решаемых ВСКЗ задач, обеспечивающей контроль геометрических параметров ж/д пути, относится:

- получение первичной измерительной информации о геометрических размерах и координатах отдельных элементов ж/д пути;

- преобразование измерительной информации в форму удобную для дальнейшей обработки;
- контроль геометрических параметров ж/д пути;
- выработка управляющего сигнала для изменения контролируемых параметров [32].

Концепцию создания ВСКЗ целесообразно рассматривать в двух аспектах: структурном и функциональном. Первый отражает интегрирование различных подсистем, широкое использование средств вычислительной техники, что позволит создать систему с гибкой структурой, обладающей возможностью перестраиваться в зависимости от решаемой измерительной задачи. Второй аспект характеризует резкое возрастание числа функций, выполняемых системой. При этом центр тяжести переносится с измерительных функций на информационные, связанные с использованием полученных результатов измерений [33].

В концепцию создания ВСКЗ заложено совершенствование процесса контроля геометрических параметров ж/д пути на основе применения измерительных технологий. Процесс совершенствования измерительных технологий тесно связан с общемировой тенденцией появления высоких технологий [34]. Причиной их появления обычно является лучшая экономическая конкурентоспособность новых технических решений по сравнению со старыми. При этом наблюдаются следующие тенденции развития средств измерений: повышение точности, производительности, расширение функциональных возможностей и, как следствие, усложнение. В условиях рыночных отношений экономический фактор в конечном итоге является решающим. Также можно выделить тенденцию к комплексному подходу в решении задач организации измерений. Исходя из этого, технологический подход к организации измерений позволяет систематизировать специализированную измерительную технику и методы измерений для качественного обслуживания транспортной отрасли.

Технологический подход к организации измерений указывает на необходимость разработки более эффективных методов контроля, а также

алгоритмов обработки и представления получаемых пространственных данных, обеспечивающих решение более сложных контрольно-измерительных и информационных задач, недоступных в настоящее время традиционным ж/д диагностическим комплексам. Данный подход предъявляет более высокие требования к средствам контроля в части точности и скорости обработки результатов измерений, что обуславливает необходимость управления технологическими процессами с применением ИИУС, которая позволит автоматизировать большой объем работ и перейти от простой регистрации результатов измерений к непосредственному воздействию на объект контроля [35].

Поскольку развитие измерительной техники идет по пути ее высокой специализации, то для организации процессов контроля возникают потребности, связанные с описанием специализированной измерительной техники и методов, представленных на современном мировом рынке измерений, оценкой динамики развития средств измерений, выработкой конкретных подходов к организации измерений и интерпретации полученных результатов. Удовлетворение этих потребностей без технологического подхода не представляется возможным [36]. На основе анализа ряда отечественных и зарубежных публикаций разработана и обоснована новая классификация измерительных технологий по области прикладных технических наук [37]. Применение технологического подхода позволяет объединить измерительные устройства и методы измерений, используемые в технологических процессах, что необходимо для качественного обслуживания соответствующей области науки и техники.

Выделяют следующие области технических наук (рис. 1.3), которые носят преимущественно прикладной характер и для которых создаются измерительные технологии: строительство и архитектура; электроника, фотоника, приборостроение и связь; энергетика и электротехника; информационные технологии и телекоммуникации; химические технологии, науки о материалах, металлургия; недропользование и горные науки; машиностроение; транспортные системы; биотехнологии [38] [39]. Отдельно следует выделить информационные технологии измерений, которые направлены на обеспечение информационного

взаимодействия измерительной техники с объектом измерений. Благодаря применяемым методам получения, обработки, представления и передачи количественной информации о значениях измеряемых величин обеспечивается требуемая достоверность и сохранность этой информации.

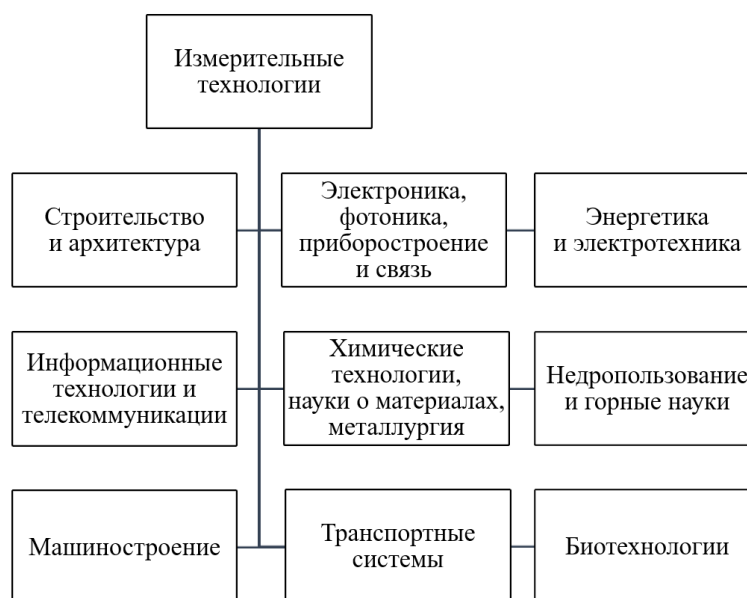


Рисунок 1.3 – Классификация измерительных технологий по области технических наук

Каждая технология измерений представляет собой совокупность трех взаимосвязанных основных компонентов: научного, формально-описательного и процессуально-действенного [40]. Формально-описательный аспект технологии выражается в логике и четкости действий, зафиксированных в различных документах (проект, программа, методика, инструкция, руководство, технологическая карта) и оснащении средствами для измерений физических величин. Измерение физических величин осуществляется с помощью специально предназначенных для этого устройств (средств измерений), имеющих нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и (или) хранящие единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. В соответствии с ГОСТ Р 8.674-2009 все средства измерений, подразделяются на типы в зависимости от области измеряемой физической величины, принципа действия и конструкции.

Измерительные технологии позволяют объединять измерительные устройства и методы измерений, используемые в той или иной области технических наук. Так, технологии измерений в области электроники определяют подходы к организации измерений с помощью различных электронных устройств, к которым также относятся оптико-электронные и радиоэлектронные средства измерений [37]. Принцип действия этих устройств основан на электрических методах обработки, хранения и передачи информации [41]. Выбор типа электронного устройства в значительной степени определяет и выбор метода измерений, который является наиболее подходящим для данного устройства. Радиоэлектронные устройства применяются для связи, навигации, локации и видения в темноте с помощью инфракрасных (тепловых) лучей, для контроля изделий (ультразвуковая дефектоскопия), пайки, стирки, а также во многих других случаях [42]. Оптико-электронные приборы позволяют получать сведения о размерах, форме, положении и энергетическом состоянии тела, содержащиеся в потоке излучения, которые извлекаются путем его специальной обработки и преобразования в электрический сигнал, который также обрабатывается с целью выделения из шумов и последующей регистрации [43].

Интеграция информационных, радиоэлектронных и оптико-электронных измерительных технологий в ВСКЗ направлена на развитие видов ее обеспечений, улучшение технических характеристик, расширение функциональных возможностей и области применения за счет разработки новых методов измерений, направленных на повышение точности и оперативности контроля геометрических параметров железных дорог. Это отражено на схеме концепции разработки ВСКЗ (рис. 1.4). Совместное применение информационных, радиоэлектронных и оптико-электронными технологий измерений позволяет решить одну из основных информационных проблем, связанную с обработкой больших массивов измерительной информации в режиме близком к реальному времени.

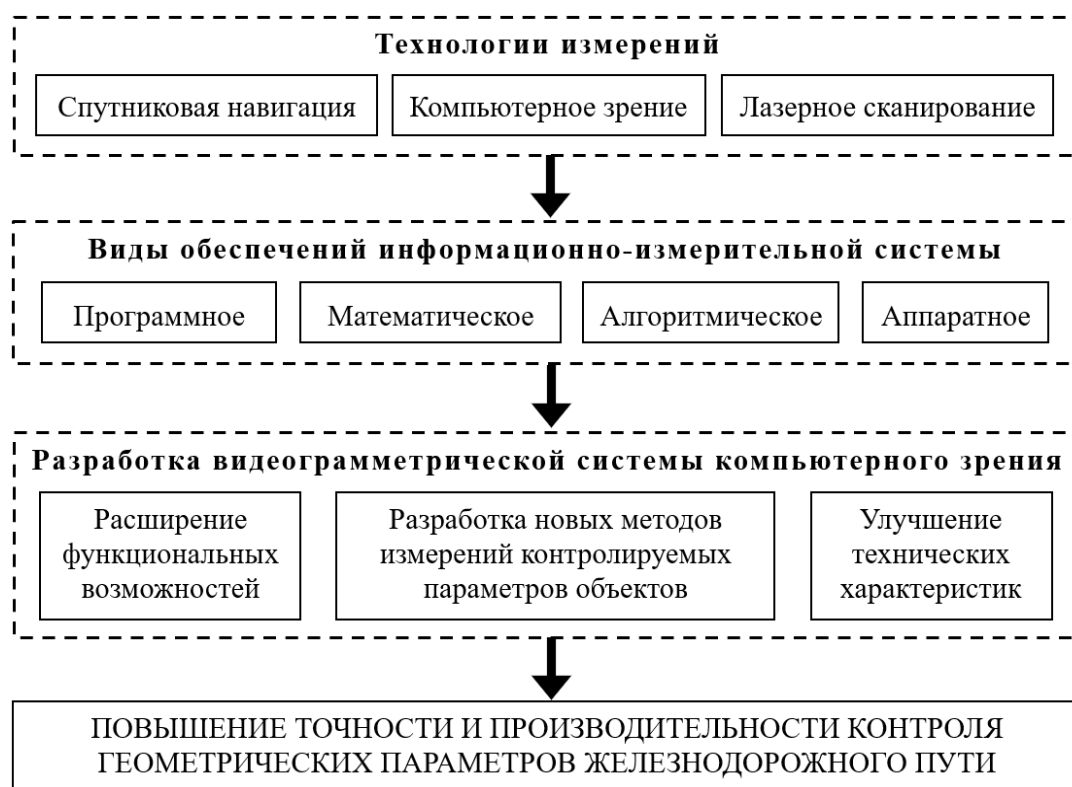


Рисунок 1.4 – Концепция разработки стереофотограмметрической системы компьютерного зрения

Информация о техническом состоянии ж/д пути формируется на основе комплексных измерений большого числа геометрических параметров, как верхнего, так и нижнего строений пути, с помощью средств контроля, в качестве которых могут применяться ручной измерительный инструмент, путевые измерительные комплексы, а также летательные аппараты. Затем с помощью средств измерений координат осуществляется привязка измеренных параметров к одной из существующих систем координат. Сравнивая измеренные параметры с проектными значениями контролируемого участка ж/д пути, определяют отклонения значений этих параметров от проектных и нормируемых показателей, что дает информацию о техническом состоянии участка ж/д пути. После этого формируются управляющие сигналы для последующего воздействия на ж/д путь с целью приведения его параметров к допустимым значениям [32]. Структурно-функциональная схема ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути, представлена на рисунке 1.5.

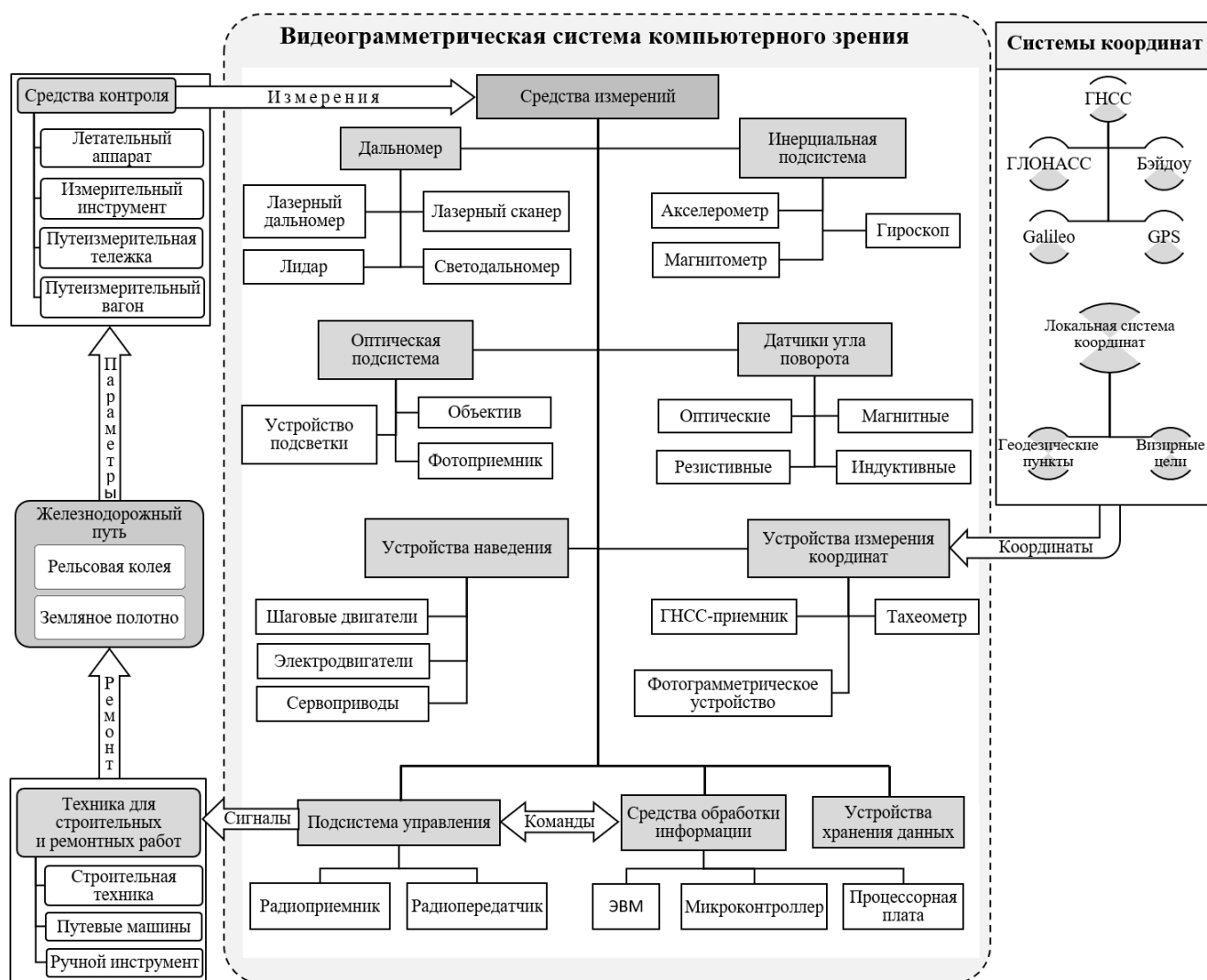


Рисунок 1.5 – Структурно-функциональная схема видеogramметрической системы для контроля геометрических параметров ж/д пути

В соответствии с ГОСТ Р 8.596-2002, все элементы в составе ВСКЗ подразделяются функционально на измерительные, связующие, вычислительные, информационные, управляющие и вспомогательные. Измерительные функции выполняются средствами измерений. Вычислительное устройство с помощью программного обеспечения обрабатывает результаты измерений геометрических параметров ж/д пути. Подсистема управления производит выработку управляющих воздействий и выдачу командной информации, реализуя функции телемеханики для объекта управления. Связующий элемент ВСКЗ (проводная линия связи, радиоканал и т.п.) предназначен для передачи с минимально возможными искажениями информации между компонентами ВСКЗ. Вспомогательный элемент

ВСКЗ представляет собой техническое устройство (блок питания, система вентиляции и т.п.), обеспечивающее нормальное функционирование ВСКЗ, но не участвующее непосредственно в измерительных преобразованиях. При этом все элементы ВСКЗ должны функционировать как единое целое и обеспечивать:

- получение информации о состоянии ж/д пути с помощью измерительных преобразований множества, изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин;
- машинную обработку результатов измерений;
- регистрацию и индикацию результатов измерений и параметров, а также преобразование этих данных в выходные сигналы системы;
- выработку управляющих сигналов для воздействия на геометрические параметры ж/д пути [32].

ВСКЗ может быть представлена в виде мультисегментной системы, состоящей из полнофункциональных электронных модулей – сегментов, взаимодействующих друг с другом для оценки технического состояния контролируемого участка ж/д пути. Модульная архитектура предполагает наличие в каждом сегменте собственной ИИУС, реализованной на встраиваемых системах. Модульное решение позволяет существенно снизить себестоимость ВСКЗ и реализовать её оперативное реконфигурирование в целях охвата большей области возможного применения. Межмодульное информационное и управляющее взаимодействие в этом случае организуется по иерархическому принципу – группа полнофункциональных сегментов, предназначенных для измерения геометрических параметров отдельных элементов конструкции ж/д пути, передают информацию в единый центр сбора и обработки данных, в котором на основе данной информации определяется техническое состояние контролируемого участка ж/д пути. В этой иерархической структуре ВСКЗ прослеживается аналогия с такими направлениями научных исследований в области информационных технологий, как распределенные информационные системы, компьютерные сети,

методы искусственного интеллекта, объединенные под общим названием «Многоагентная система» [44].

Процесс проектирования ВСКЗ включает несколько стадий [45]: формирование требований, предъявляемых к системе; разработка структуры, состава и определение принципа действия системы; математическое моделирование работы системы; разработка подсистемы управления; построение кинематической схемы и т.д. Для проектирования ВСКЗ необходимо выполнить обзор и анализ существующих средств измерений и контроля геометрических параметров ж/д пути. На их основе сформировать цель разработки ВСКЗ и требования, предъявляемые к ней для достижения поставленной цели, а также определить задачи, которые должна решать ВСКЗ. Формулировка целевых показателей, к которым должна стремиться разрабатываемая ВСКЗ и её отдельные сегменты, должны быть выражены не только в качественном, но и количественном виде [32].

1.2 Обзор технических средств для контроля геометрических параметров железнодорожного пути

В процессе эксплуатации рельсовой колеи по мере наработки тоннажа происходят процессы износа, смятия, коррозии и усталости металла, в том числе контактной изгибной и коррозионной усталости. В результате этих процессов образуются различные дефекты и повреждения рельсов. Выявление дефектов и повреждений осуществляется в процессе контроля геометрических параметров ж/д пути с помощью различных путеизмерительных устройств и диагностических комплексов [46]. Наиболее распространенный вид контроля заключается в визуальном осмотре рельсов, а также с помощью ручного измерительного инструмента [47]. Скоростной контроль рельс под нагрузкой осуществляется с помощью путеизмерительных вагонов. Существуют также магнитные, ультразвуковые дефектоскопные автодрезины и совмещенные вагоны-дефектоскопы, предназначенные для обнаружения внутренних дефектов в рельсах и земляном полотне ж/д пути [48].

Современные путеизмерительные системы для измерения динамической деформативности рельсовой колеи, профиля поперечного сечения, боковых и вертикальных отклонений рельсов полностью или частично основаны на применении бесконтактных оптоэлектронных датчиков [49] [50]. В настоящее время для контроля состояния ж/д путей под нагрузкой получили широкое распространение путевые диагностические комплексы пространственного сканирования, построенные на базе путеизмерительных вагонов или тележек [48] [51] [52]. Они позволяют выявлять опасные деформации балластной призмы и земляного полотна, а также нарушения габаритов приближения строений ж/д инфраструктуры в соответствии с допусками, установленными ГОСТ 9238-2013 «Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений».

Путеизмерительный вагон позволяет осуществлять контроль ГРК под нагрузкой с наивысшей доступной скоростью, составляющей более 100 км/ч [55]. Например, компьютеризированный вагон-лаборатория путеизмерительный КВЛ-П1МП (рис. 1.6), выполняет скоростной контроль порядка 20 различных параметров ж/д пути. Для этого данный вагон оснащается гироскопической установкой и скользящей вдоль пути хордой, по длине равной базе вагона. Такая конструкция позволяет осуществлять непрерывные измерения стрелы прогиба рельсовых нитей в процессе движения вагона. Замер взаимного положения рельсовых нитей по уровню выполняется путем измерения положения одной оси тележки вагона относительно искусственного горизонта, создаваемого гироскопом. С помощью базы данных реперной системы и данных, получаемых вагоном-путеизмерителем, строится цифровая модель верхнего строения ж/д пути [47].

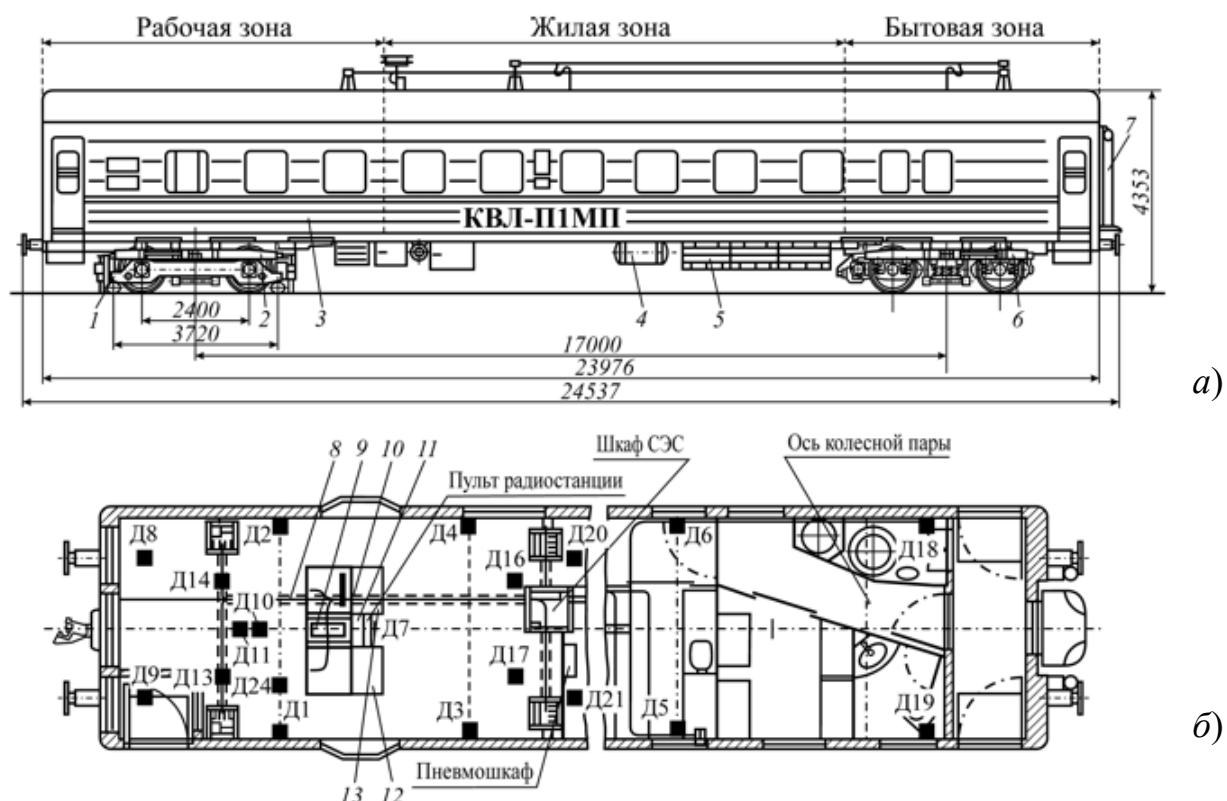


Рисунок 1.6 – Компьютеризированный вагон-лаборатория КВЛ-П1МП:
 а) общий вид; б) схема расположения основных элементов; 1 – навесные балки с измерительными устройствами; 2 и 6 – задняя и передняя ходовые тележки; 3 – кузов; 4 – тормозная и рабочая пневмосистемы; 5 – ящик с аккумуляторными батареями; 7 – кабельная сеть; 8 – датчик измерения угла наклона кузова к горизонту; 9 и 11 – аппаратно-программные комплексы; 10 – пульт управления

На железных дорогах России созданы центры диагностики, в которых концентрируется и обрабатывается информация вагонов-путеизмерителей и вагонов-дефектоскопов. В этих центрах сформированы и постоянно обновляются базы данных, что позволяет обеспечивать глобальный мониторинг состояния пути на железной дороге [55]. Однако информация, получаемая механическими измерительными системами в виде стрел изгиба, не описывает реальной кривизны, а отображает формы неравенств пути в приближенном виде. Из-за этого снижается эффективность ее обработки и дальнейшего применения [53]. Кроме этого, путеизмерительные вагоны имеют ограниченные пределы измерений и не обладают высокой точностью привязки полученных результатов измерений к одной из существующих систем координат. Перечень и характеристики основных

контролируемых параметров компьютеризированного вагона-лаборатории путеизмерительного КВЛ-П2.1 представлены в таблице Б.1 (прил. Б).

В настоящая время также применяется путеобследовательская станция ЦНИИ-4МДУ, которая оснащена оптическими и электромеханическими системами для определения основных параметров геометрического положения рельсовых нитей, а также дополнительными оптическими измерительными системами определения зазоров в рельсовых стыках, бокового износа, температуры рельсов и системой контроля неровностей на поверхности катания рельсов. В состав измерительной системы данной станции входят инерциальная гироскопическая навигационная система и спутниковая навигационная система ГЛОНАСС/GPS [54].

ЦНИИ-4МДУ измеряет ширину рельсовой колеи с помощью двух источников оптического излучения 3 и 6, которые формирует оптическую измерительную подсистему (рис. 1.7). Объективы 2 и 7 проецируют на боковые поверхности рельсовых нитей 10 и 11 горизонтальные линии света на расстоянии 15 мм от уровня внутренней грани головки рельса. Отраженное от рельсов электромагнитное излучение проецируется с помощью объективов 1 и 8 фотоприемными устройствами 4 и 5, закрепленными к неподрессоренной балке 9, которые регистрирует координаты этих линий на матрицах засвечиваемых светодиодов. Для уменьшения засвети от солнечного света в оптической системе используется монохромный луч лазера. Фотоприемные устройства конструктивно схожи с цифровыми фотоаппаратами, в которых вместо ПЗС-матриц светодиодов применяются аналогичные линейные матрицы засвечиваемых светодиодов, с более высоким разрешением [55].

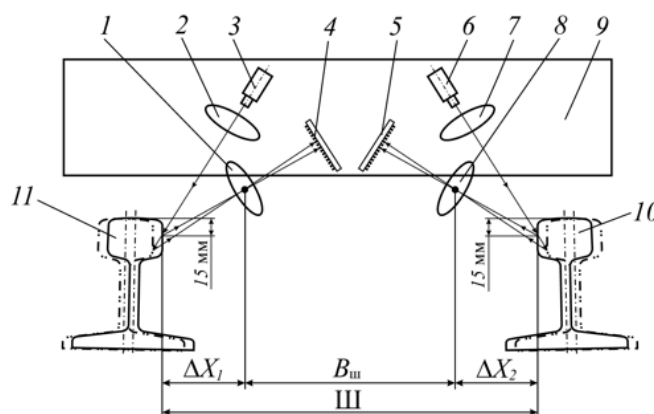


Рисунок 1.7 – Схема измерения ширины колеи оптическими датчиками

Формула для определения ширины рельсовой колеи:

$$\text{Ш} = \Delta X_1 + \Delta X_2 + B_{\text{ш}}. \quad (1.1)$$

Расстояния до рельсов вычисляется относительно базы B_6 из выражения:

$$\Delta X_1, \Delta X_2 = (N_j(1,2) - N_0(1,2))dS / f_{\text{пр}}, \quad (1.2)$$

где $N_j(1,2)$ – порядковые номера светочувствительных элементов на линейных матрицах 4 и 5, обозначающие геометрический центр изображения, проецируемых на них световых полос;

$N_0(1,2)$ – начальные номер светочувствительного элемента линейных матриц;

d – физический размер засвечиваемых светодиодов;

S – возвышение объективов фотоприемных устройств над рельсами;

$f_{\text{пр}}$ – фокусное расстояние объектива фотоприемных устройств;

$B_{\text{ш}}$ – расстояние между объективами фотоприемных устройств [56].

Измерение ширины рельсовой колеи осуществляется с частотой 250 Гц, что при скорости движения путеобследовательской станции 100 км/ч составляет шаг равный 70 мм. Для определения пространственного положения рельсовых нитей применяется следующая оптическая (рис. 1.8), которая состоит из двух оптических источников лазерного излучения 1 и 2, объективов 3 и 4, фокусирующих лазерные лучи на рельсовых нитях и двух зеркал 5 и 8, с помощью которых изменяется направление лазерных лучей. Отраженный от поверхности лазерный луч проецируется на фотоприёмное устройство 10, которое имеет узкое поле зрения,

что позволяет фиксировать только лучи, отраженные от боковой грани головки рельса. При этом определяются углы поворота зеркал a_1 и a_2 [56].

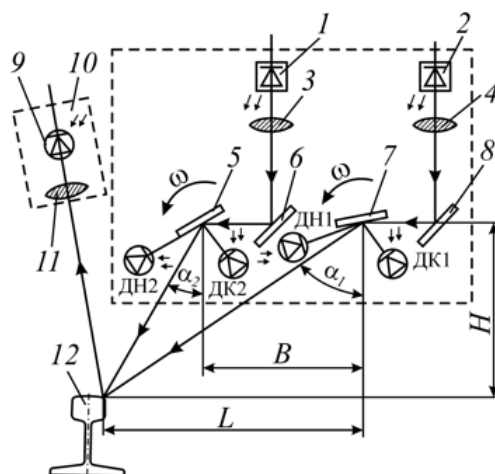


Рисунок 1.8 – Схема измерения горизонтальных и вертикальных перемещений головки рельса относительно кузова оптическим датчиком

По известным углам a_1 и a_2 , определяется вертикальное H , и горизонтальное L , расстояния от датчика до рельса из выражений:

$$H = B / (\operatorname{tg} a_1 - \operatorname{tg} a_2), \quad (1.3)$$

$$L = B \operatorname{tg} a_1 / (\operatorname{tg} a_1 - \operatorname{tg} a_2), \quad (1.4)$$

где B – фиксированное расстояние между осями вращающихся зеркал.

Положение рельсовых нитей определяется с частотой 70 Гц , что при скорости путеобследовательской станции 144 км/ч определяет шаг измерений равный $0,4 \text{ м}$. При этом допустимая погрешность измерений составляет $\pm 2,5 \text{ мм}$. Для измерения стыковых зазоров между рельсами используется оптическая система (рис. 1.9), которая состоит из источника инфракрасного излучения 5, объектива 6 и оптических призм 7, проецирующих на поверхность головки рельса две линии инфракрасного излучения, расположенные на фиксированном расстоянии a . Отраженное от поверхности головок рельсов инфракрасное излучение проецируется с помощью объективов 3 и 6 на фотоприёмные устройства 1 и 2. Таким образом, когда отражается только один луч – это свидетельствует о наличии открытого зазора между рельсами [56].

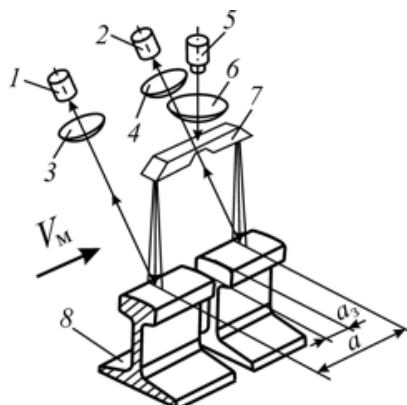


Рисунок 1.9 – Схема измерения величины стыкового зазора

Размер зазора между рельсами определяется из выражения:

$$a_3 = at_3/t_a, \quad (1.5)$$

где t_3 – время отсутствия сигнала от второго источника инфракрасного излучения;

t_a – время прохода путеобследовательской станции базового расстояния a , на скорости V_M [56].

В тех случаях, когда необходима более высокая точность измерений и их привязка к реперной ж/д сети, применяют ручной измерительный инструмент или автоматизированные комплексы (тележки), работающие совместно с геодезическими приборами [57]. В информационном фонде государственного реестра средств измерений [58] представлены сведения об утвержденных типах средств измерений параметров ж/д пути (прил. А, табл. А.1). Наиболее точным путеизмерительным шаблоном, из представленных, является шаблон ШП-01 (рис. 1.10). Его метрологические характеристики приведены в таблице Б.2 (прил. Б).



Рисунок 1.10 – Внешний вид шаблонов ШП

Измерения, производимые шаблонами, подразделяются на измерения горизонтальных параметров и вертикальных параметров. К горизонтальным параметрам относится измерение ширины колеи. Принцип действия шаблонов при измерении ширины колеи основан на преобразовании перемещения подвижных

упоров относительно неподвижных упоров при установке шаблона на ж/д пути, в значения измеренного параметра на измерительной шкале шаблона. Измерение вертикальных параметров производится с помощью датчика шаблона и датчика угла поворота – энкодера. Измерение относительного возвышения рельсов (уровень) основано на преобразовании угла поворота прецизионного кулачка (улитки) лимба уровня при выведении ампулы уровня в горизонтальном положении в значение измеренного параметра на лимбе шаблона [47].

В отличие от шаблона путеизмерительная тележка позволяет осуществлять сплошной контроль геометрических параметров рельсовой колеи. Ее принцип действия заключается в получении измерительной информации о параметрах пути при помощи датчиков, последующем её преобразовании и передаче на переносной или планшетный компьютер для дальнейшей обработки полученных результатов измерений. Например, принцип работы путеизмерительной тележки АПК «Профиль-М» (рис. 1.11) основан на применении спутниковой аппаратуры позиционирования, состоящей из двух синхронизированных антенн, с помощью которых производятся дифференциальные измерения их пространственного и взаимного положения. Наличие двух антенн позволяет определять пространственную ориентацию осей ходовой тележки и векторы движения в двух плоскостях. В конструкции тележки отсутствуют гироскоп и акселерометр, а также дорогостоящая инерциальная система, работа с которыми требует калибровок и настроек, как в процессе подготовки, так и в процессе измерений [59].



Рисунок 1.11 – Внешний вид АПК «Профиль-М»

Устройство связывается с базовой спутниковой референционной станцией ГНСС с помощью спутникового приемника, модема и антенны. На опорной геодезической точке (с известными координатами) запускается базовая станция. С базовой станции через модем на приемник передаётся информация о дифференциальных поправках. Данные о текущих координатах фазовых центров спутниковых антенн $\Phi 1 (X_1, Y_1, H_1)$ и $\Phi 2 (X_2, Y_2, H_2)$ принимаются спутниковым приемником и регистрируются в каждой i -й точке на рельсовом пути над правой и левой рельсовой нитью с заданным интервалом. После чего эти данные поступают в компьютер, который с использованием координатных методов последовательно осуществляет расчет и визуализацию геометрических параметров рельсовой колеи (ширина колеи, возвышение рельса, просадка) [59].

Ширина колеи (шаблон) определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} l = \sqrt{\Delta X_{2-1}^2 + \Delta Y_{2-1}^2} \\ \Delta X_{2-1} = X_2 - X_1 \\ \Delta Y_{2-1} = Y_2 - Y_1 \end{cases} \quad (1.6)$$

Возвышение рельса (уровень) определяется из выражения:

$$\Delta H_{2-1} = H_2 - H_1, \quad (1.7)$$

где $(X_1, Y_1, H_1), (X_2, Y_2, H_2)$ – координаты фазового центра первой и второй спутниковой антенн, соответственно [59].

Наиболее точным, из представленных в информационном фонде государственного реестра типов средств измерений [58], является тележка путеизмерительная ПТ-12-01 (рис. 1.12). Метрологические характеристики тележек путеизмерительных ПТ-12-01 представлены в таблице Б.3 (прил. Б).



Рисунок 1.12 – Внешний вид тележек путеизмерительных ПТ-12-01.

Данная тележка применяется в процессе строительства, эксплуатации и ремонтно-восстановительных работ ж/д пути. Она предназначена для измерения ширины рельсовой колеи (шаблон), взаимного положения обеих рельсовых нитей по высоте (уровень), стрел изгиба каждой рельсовой нити в горизонтальной плоскости (рихтовка), стрел изгиба каждой рельсовой нити в вертикальной плоскости (просадка).

Главным недостатком путеизмерительных шаблонов и тележек является низкая скорость измерений. Современные путеизмерительные тележки АПК «Профиль» и его зарубежные аналоги (Leica GRP 3000 System FX, Swiss Trolley и т.п.) позволяют контролировать геометрические параметры рельсовой колеи с помощью электронного тахеометра, однако производительность этих комплексов в среднем составляет 1 км/ч с интервалом проводимых измерений 2,5 м [60].

Высокую точность измерений при определении положения рельсов под статической и динамической нагрузкой обеспечивает лазерная измерительная система Nivemat 2003 К (рис. 1. 13), которая приспособлена к различной ширине головок рельса. Для получения измеряемой линии в конечной точке рельсов устанавливается лазерный указатель направления с выходной мощностью 1–1,5 мВт и автоматическим нивелированием. Измерительная система монтируется на рельсы и с помощью радио- и телеуправления передвижная лаборатория перемещается в одном цикле измерения (прямой и обратный ход) до конечной

точки рельса. Приемник регистрирует лазерное излучение и автоматически определяет отклонение высоты и боковое отклонение рельса относительно измеряемой линии. Телеметрическая установка передает измеряемые значения на приемную станцию, расположенную в произвольном месте [35].

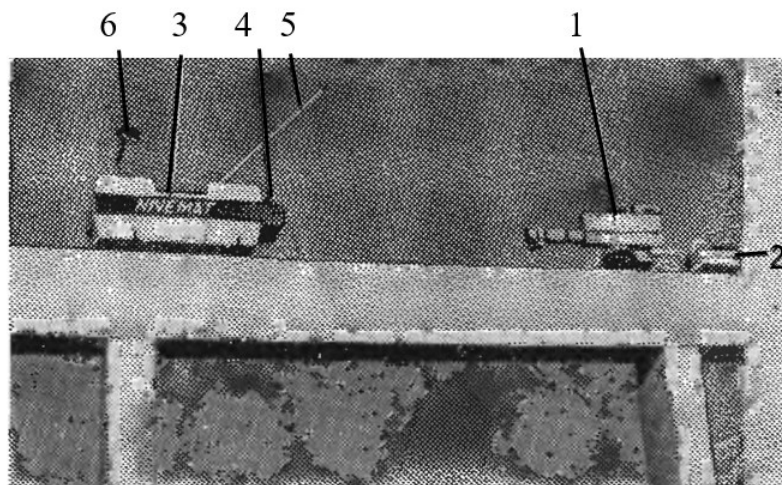


Рисунок 1.13 – Автоматическая измерительная система Nivemat 2003 К:
1 – лазерное устройство; 2 – источник питания; 3 – передвижная лаборатория;
4 – поисковое приемное устройство; 5 – приемная и передающая антенна;
6 – цифровая индикация результатов измерений

Измерительная система Nivemat 2003 К обладает техническими характеристиками:

- рабочая дальность действия 100 м;
- погрешность измерения (стандартное отклонение) $\pm 0,3$ мм/100 м;
- скорость перемещения 0,3–0,5 м/с [34].

Недостатком данной измерительной системы является низкая производительность и отсутствие привязки результатов измерений к одной из систем координат. Несмотря на возможность контроля длинных неровностей рельсовой колеи на прямолинейных участках, данная система не позволяет контролировать длинные неровности на изгибах участка железной дороги.

Измерительные работы на ж/д пути, определение геометрических форм, размерных параметров при достаточной точности и полноте информации также можно выполнять, используя простые оптические инструменты: визирные оптические приборы, нивелиры, теодолиты, цифровые тахеометры. С учетом

постоянно совершенствующихся компьютерных технологий и развитием СКЗ, более высокой производительности следовало бы ожидать от оптических систем контроля параметров рельсовой колеи, совмещающих в себе функции теодолита и нивелира. Однако такие из существующих оптических систем как ПРП (рис. 1.14) и его более современный аналог ВОГ-1 являются уже технически устаревшими и не могут конкурировать с современными путеизмерительными тележками.



Рисунок 1.14 – Оптический прибор рихтовки пути ПРП

В основе технологии проведения измерительных работ с помощью оптических приборов лежит метод проективных координат. Такая технология измерений достаточно эффективна для контроля просадки земляного полотна эксплуатируемого участка ж/д пути, состояние которого во времени существенно нарушается проявлением деформативности (рис. 1.15).

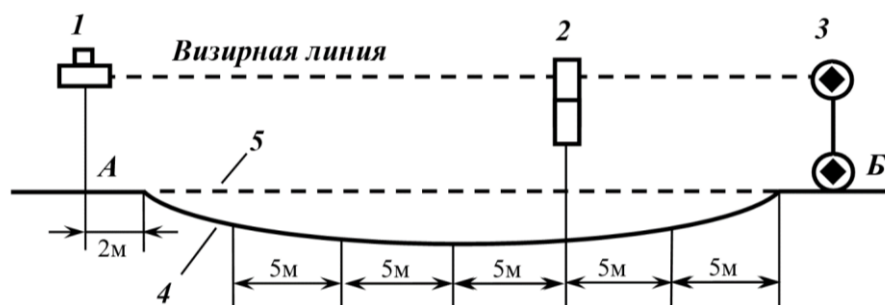


Рисунок 1.15 – Схема измерения величины просадки пути: 1 – оптический прибор; 2 – измерительная рейка; 3 – визирная рейка; 4 – профиль рельса; 5 – проектное положение головки рельса в профиле

Просадки пути определяются с помощью оптического прибора в промежуточных точках i на отрезке пути AB по шкале измерительной рейки относительно линии визирования, расположенной на высоте h от прямой AB [61]:

$$\Delta y_i = h - y_i. \quad (1.8)$$

Появление технологий лазерного сканирования и координатных измерений по сигналам ГНСС в процессе проведения аэрофотосъёмочных работ способствовало разработке новых современных технических решений для мониторинга и диагностики линейных объектов и их инфраструктуры с применением летательных аппаратов [62]. Подобные способы оценки состояния сетей газопроводов, трасс пролегания магистральных нефтепроводов и их инфраструктуры описаны в научных трудах [63] [64] [65].

В настоящее время наиболее широкое распространение получила аэрофотосъемка с применением БПЛА. При этом резко возросла роль программного управления БПЛА, что связано с общемировой тенденцией увеличения уровня их автономности [66]. Навигационная аппаратура современных БПЛА в основном содержит приемник сигналов ГНСС, который выдает текущие координаты и составляющие скорости БПЛА в геодезических или геоцентрических прямоугольных системах координат [67]. Также существуют БПЛА оснащенные блоком автоматического управления с инерциальной навигационной системой, позволяющей совершать полет по маршруту с отклонением, не превышающим 10-15 м при скорости ветра до 7 м/с [68].

Благодаря своим высоким аэродинамическим качествам БПЛА самолетного типа отлично подходят для работы на значительном удалении для съемки обширных территорий и протяженных объектов, таких как ж/д путь. Например, российская группа компаний Геоскан, разрабатывает и производит БПЛА различных типов (рис. 1.16), а также программное обеспечение для фотограмметрической обработки данных и трехмерной визуализации. Модель БПЛА «Геоскан 401 Лидар» оснащается лазерным сканером АГМ-МС,

погрешность определения координат которого составляет 3-5 см. Технические и метрологические характеристики данного сканера приведены в таблице Б.11.

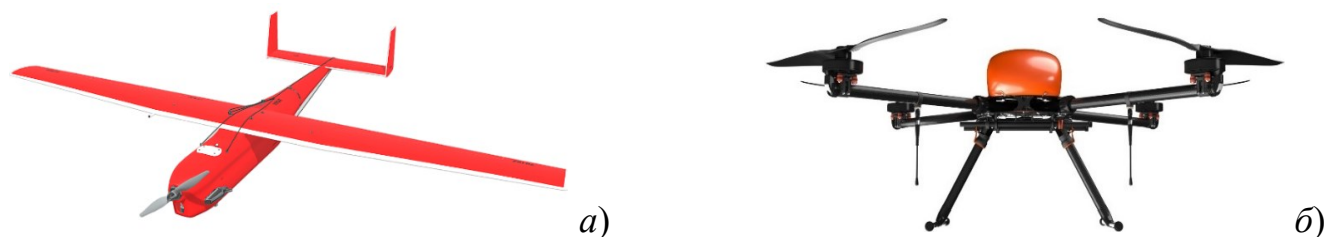


Рисунок 1.16 – БПЛА: а) планер Геоскан 701; б) квадрокоптер Геоскан 401

Материалы аэрофотосъемки представляют собой набор снимков с точными моментами фотографирования и данные ГНСС-приемника геодезического класса. Результатами дальнейшей обработки данных с помощью специального программного обеспечения являются ортофотопланы, цифровые модели рельефа и местности в любой системе координат, в том числе без использования в планово-высотном обосновании опорных точек [69]. В таблице 1.3 приведен сравнительный анализ характеристик существующих типов путеизмерительных средств: РИ – ручной измерительный инструмент, ПТ – путеизмерительные тележки, ПВ – путеизмерительные вагоны, БПЛА – беспилотные летательные аппараты [47].

Таблица 1.3 – Характеристики типов путеизмерительных средств

№	Контролируемые параметры ж/д пути	РИ	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 на кривых участках пути	+	–	–	–
7	Короткие неровности на поверхности катания рельса	+	+	+	–
8	Подуклонка и наклон поверхности катания рельсов	+	+	+	–
9	Параметры формы земляного полотна	+	+	+	+
№	Характеристики средств контроля	РИ	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.

Все найденные геометрические параметры ж/д пути привязываются к местности с помощью системы спутниковой навигации ГНСС или с помощью системы маркеров (реперов), устанавливаемых вдоль рельсовой колеи [70]. Координаты обнаруженных дефектов и повреждений участка ж/д пути определяются в системе координат специальной ж/д реперной сети, пунктов государственной геодезической сети или в условной системе координат, посредством установки на местности реперов [71].

1.3 Метрологический анализ средств измерений геометрических величин

Для достижения цели данного исследования необходимо решить задачи, связанные с определением геометрических параметров ж/д пути. Эти задачи относятся к области информационно-измерительных систем [72] и для их решения ВСКЗ должна обеспечивать возможность измерения дальности, углов направления, координат, линейных и угловых величин. Соответственно, на первом этапе разработки ВСКЗ необходимо сформировать её технический облик и наиболее приемлемую конфигурацию, которая позволит достичь поставленной цели. Поскольку одной из основных задач ВСКЗ является определение геометрических параметров, то необходимо провести метрологический анализ существующих типов СИ и подобрать наиболее подходящие средства для измерения линейных и угловых величин, а также средства для измерения собственных координат ВСКЗ.

1.3.1 Средства измерений координат

Для установления координат объектов на поверхности Земли, в атмосфере или в околоземном космическом пространстве применяется спутниковая система позиционирования (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou и др.), использующая радиопередающие станции, расположенные на искусственных навигационных спутниках земли, и специализированные приёмники пользователей, чувствительные к радиосигналам спутников данных систем [73]. В состав спутниковой системы позиционирования также входит сеть наземных станций

контроля и управления, осуществляющих слежение за спутниками и транслирующих корректировочные радиосигналы.

В соответствии с ГОСТ Р 52928-2010 российская ГНСС ГЛОНАСС предназначена для определения пространственных координат, составляющих вектора скорости движения, поправки показаний часов и скорости изменения поправки показаний часов потребителя ГНСС в любой точке на поверхности Земли, акватории Мирового океана, воздушного и околоземного космического пространства. Согласно ГОСТ Р 57656-2017 пространственные данные – это данные о пространственных объектах, включающие сведения об их форме, местоположении и свойствах, в том числе представленные с использованием координат. Под параметром, в технике, подразумевается величина, характеризующая какое-либо свойство объекта измерения, например, масса, плотность, длина, форма поперечного сечения и т.д. Количественное выражение свойств ж/д пути задается физическими величинами. Соответственно, пространственные параметры ж/д пути – это физические величины, характеризующие его свойства, представленные с использованием координат.

Повышение точности и достоверности определения пространственных параметров, составляющих вектора скорости движения и поправки показаний часов, обеспечивается комплексами радиоэлектронных и технических средств, расположенный в точках с известными координатами. С их помощью осуществляется прием и обработка радионавигационных сигналов ГНСС, вычисление поправок к пространственным координатам точки и передача их по каналам связи потребителю ГНСС в радиусе действия дифференциальных поправок.

В информационном фонде государственного реестра средств измерений [58] представлены сведения об утвержденных типах ГНСС устройств (прил. А, табл. А.1). Из проведенного сравнительного анализа метрологических характеристик приемников сигналов ГНСС [74] следует, что на текущий момент времени наиболее точными СИ являются спутниковый геодезический многочастотный ГНСС-приемник TRIUMPH-3 и система высокоточного взаимного

позиционирования объектов по сигналам ГНСС ИВЯФ.466453.067. Данные типы СИ предназначены для измерений приращений координат и геодезических определений относительного местоположения объектов, а также изменения во времени их положения.

Многосистемность приемника TRIUMPH-3 (рис. 1.17) обеспечивает возможность одновременного использования спутников ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou и Compass, что позволяет существенно сократить время получения результатов измерений в режиме “кинематики реального времени” – широко используемом для получения высокоточных данных. Конструктивно приемник представляет собой модульную систему, состоящую из спутниковой геодезической антенны и приёмника радиосигналов. Подавление многолучевости и внутриполосных помех, позволяют приемнику более устойчиво принимать слабые сигналы. Принцип работы системы ИВЯФ.466453.067 основан на определении взаимного положения двух внешних измерительных модулей ЦДКТ.464316.157 (ИМ), один из которых установлен в контролируемой, а другой – в опорных точках, а также изменения во времени этого положения. ИМ принимает эфемеридную информацию, измеряет кодовые и фазные псевдодалности до спутников ГЛОНАСС и GPS, находящихся в его зоне видимости.



а)



б)

Рисунок 1.17 – Общий вид приемников: а) TRIUMPH-3; б) ИМ ЦДКТ.464316.157

В таблице Б.4 (прил. Б) приведены метрологические характеристики спутникового геодезического многочастотного ГНСС-приемника TRIUMPH-3. Из представленных характеристик, можно сделать вывод, что при соблюдении требований помехоустойчивости, установленных в ГОСТ Р 55539-2013, в

соответствии с которым при уровне полезных сигналов, не ниже минус 161 $\delta BВm$ (ГЛОНАСС) и минус 158 $\delta BВm$ (GPS), соответственно, а также при воздействии гармонических помех не превышающих пороговые уровни значений, абсолютная погрешность самого высокоточного из приведенных средств измерений, при определении координат вектора базисной линии $L\{x,y,z\}$, находится с доверительной вероятностью 0,67 в пределах $\pm 5,1$ мм при длине базиса до 3 км.

Из описания типа следует, что с помощью ГНСС-приемников можно определять координаты объектов и вектор скорости их движения, однако распределение спутников на орбитах и структура их сигналов устанавливают ограничения, которые необходимо учитывать при выборе места размещения спутниковых антенн. В ГОСТ Р 56424-2015 указано, что опорная станция осуществляет прием сигналов, формирование и передачу дифференциальных поправок для спутников с углами возвышения над горизонтом свыше $7,5^\circ$. Строения, вышки, мачты, возвышенности, окружающий лес и другие мешающие объекты могут вызывать затенение антенн в горизонтальной плоскости, что приводит к прерыванию приема сигналов от спутников. Поэтому спутниковые антенны должны располагаться в местах, где воздействие окружающих объектов в горизонтальной плоскости диаграммы направленности антенн минимально [75].

В случае отсутствия условий для применения спутниковой системы позиционирования используется тахеометр, представляющий собой электронно-оптический прибор, предназначенный для высокоточных измерений длин (приращений координат), горизонтальных и вертикальных плоских углов. Определение координат объектов тахеометром осуществляется с помощью предварительной привязки к реперной геодезической сети. Геодезические сети предназначены для построения координатной основы на всю территорию страны, геодезического обеспечения картографирования этой территории, изучения поверхности и гравитационного поля Земли и их изменений во времени, а также для решения научных, экономических и технических задач [76].

Тахеометр применяется также для определения координат объектов. Принцип его действия основан на измерении углов поворота линии визирования

зрительной трубы в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной) с одновременным измерением расстояния до нужного объекта вдоль линии визирования. В информационном фонде государственного реестра средств измерений представлены сведения об утвержденных типах электронных тахеометров (прил. А, табл. А.2). Из описания типов представленных средств измерений следует, что на текущий момент времени наиболее точными электронными тахеометрами из представленных являются: Leica TS60 I, NET05AXII (рис. 1.18). Данные приборы используются также для определения координат пунктов при выполнении геодезических построений на местности.



Рисунок 1.18 – Внешний вид тахеометра NET05AXII

Принцип действия лазерного дальномера в составе электронного тахеометра основан на методе сравнения фаз излучаемого и принимаемого сигналов. Лазерный дальномер имеет два режима работы: отражательный режим, основанный на отражении лазерного излучения от отражательной призмы, а также диффузный режим, основанный на отражательных свойствах произвольных объектов. Отражательная призма может применяться в качестве вспомогательного устройства, от которого отражается формируемый с модулированной интенсивностью дальномером оптический пучок лазерного излучения. Измеряя разность фаз излучаемого дальномером и отраженного призмой сигналов, вычисляется расстояние до призмы [77]. Метрологические характеристики тахеометра NET05AXII представлены в таблице Б.5 (прил. Б).

Диапазон измерения расстояний данного тахеометра составляет от 1,5 м до 3,5 км и зависит от размера, а также отражающих свойств поверхности объекта измерения. Роботизированный тахеометр позволяет отслеживать и определять координаты объектов в автоматическом режиме с помощью специальных отражающих призм. Электронный тахеометр является высокоточным средством измерения, однако в настоящее время не позволяет выполнять комплексные измерения, направленные на определение геометрической формы и пространственного положения объекта измерения.

1.3.2 Средства измерений дальности

Для определения дальности некоторой точки, расположенной на поверхности объекта измерений, могут применяться различные типы дальномеров: ультразвуковые (акустические), оптические (лазерные, светодальномеры), радиодальномеры. В основе принципа действия дальномеров лежат физические процессы зеркального или диффузного отражения электромагнитных волн от поверхности объекта и последующего измерения разности моментов времени или фазы излучаемого и отражённого акустического или электромагнитного сигналов. Принцип действия радиодальномеров основан на применении сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн электромагнитного излучения, которые могут излучаться, как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Фазовые радиодальномеры имеют наименьшую относительную погрешность измерений 0,0003% [8].

Из описания типов средств измерений (прил. А, табл. А.3), представленных в информационном фонде государственного реестра [58] следует, что на текущий момент времени наиболее точными оптическими дальномерами являются триангуляционные датчики серии Polaris (рис. 1.19). Метрологические характеристики этих оптических датчиков приведены в таблице Б.6 (прил. Б).



Рисунок 1.19 – Внешний вид триангуляционных датчиков серии Polaris

Принцип действия этих датчиков основан на лазерной триангуляции. Резко сфокусированный лазерный луч создает на поверхности измеряемого объекта точку света, и изображение этой точки регистрируется объективом однострочной камеры с ПЗС-матрицей, расположенной на фиксированном расстоянии от источника лазерного излучения. Позиция облучаемых отражённым лазерным излучением пикселей на строке ПЗС-матрицы будет изменяться в зависимости от расстояния между источником лазерного излучения и объектом измерения [58]. Цифровой сигнальный процессор (DSP) подсчитывает облучаемые отражённым лазерным излучением пиксели и использует их для вычисления расстояния до объекта. Диапазон измерения расстояний оптического триангуляционного датчика (0-1,5 м) доходит до нижней границы диапазона измерений тахеометра. Соответственно, данные средства измерения могут дополнять друг друга.

Светодальномеры состоят из источника видимого или инфракрасного оптического излучения, фотоприёмного устройства, а также измерителя интервалов времени, с помощью которого определяется время прохождения импульса оптического сигнала до объекта измерения и в обратном направлении. Дальность объекта также может определяться по разности фаз опорного генератора оптических сигналов и отраженного от объекта сигнала, посредством подсчета количества импульсов. Диапазон измерений светодальномера может достигать 50 км. Погрешность измерения дальности составляет 5–20 мм. Также существуют прецизионные светодальномеры с дальностью действия до 1 км погрешностью измерений 0,3–0,5 мм [8].

В информационном фонде государственного реестра средств измерений [58] представлены сведения об утвержденных типах дальномеров (прил. А, табл. А.4).

Например, в нём содержится описание типа светодальномера DISTOMAT WILD DI2002, который предназначен для высокоточного измерения расстояний. Область применения данного средства измерения является измерение базисных линий, наблюдение за деформациями в строительстве и прикладная геодезия. Принцип действия светодальномера DISTOMAT WILD DI2002 реализует фазовый метод измерения расстояний, основанный на регистрации и сравнении фаз лазерного излучения выходящего из светодальномера и входящего, после его отражения от призмного отражателя установленного в точке измерения. Светодальномер DISTOMAT WILD DI2002 представляет собой устройство, содержащее оптические и электронные элементы. Конструктивно, светодальномер DISTOMAT WILD DI2002 выполнен в виде насадки, устанавливаемой на зрительную трубу теодолита с помощью пружинного захвата. Основные технические характеристики этого светодальномера приведены в таблице Б.7 (прил. Б).

Из описания типов, представленных в информационном фонде государственного реестра средств измерений следует, что на текущий момент времени наиболее точными фазовыми дальномерами из представленных являются: LDM51 (рис. 1.20). Метрологические характеристики лазерных дальномеров LDM приведены в таблице Б.8 (прил. Б). Принцип измерения расстояний этих дальномеров основан на определении разности фаз излучаемых и отраженных сигналов. Лазерный дальномер LDM51 соответствует 2 классу безопасности лазерных изделий по IEC 60825-1, формируя длину волны лазерного излучения в диапазоне 635-905 нм, мощностью 1 мВт [78].



Рисунок 1.20 – Общий вид лазерных дальномеров LDM301 и LDM51

Выпускаемые модификации лазерных дальномеров различаются диапазоном и погрешностью измерений, а также прочими техническими характеристиками. При этом диапазоны измерений расстояний приведенных типов дальномеров также отличаются. Характерно то, что погрешность измерения расстояния дальномером возрастает с увеличением дальности объекта измерения.

1.3.3 Средства измерений углов

Измерение геометрических параметров, в том числе угловых размеров изделий сложной формы, можно осуществлять координатным методом с помощью координатно-измерительных машин. Для контроля крупногабаритных объектов, проведения измерений в ходе технологического процесса были созданы мобильные КИМ. Для измерения угловых размеров различных объектов сложной формы используют инструментальные микроскопы. Универсальные измерительные микроскопы отличаются от инструментальных увеличенным диапазоном измерений и повышенной точностью. Для измерения угловых размеров и контроля мелкоразмерных деталей сложной формы также используются оптические приборы – проекторы. Принцип их действия основан на нормированном увеличении объекта измерений и последующего измерения угловых размеров с помощью специальных устройств или сравнения полученного изображения с чертежом.

Измерение углов может выполняться с помощью транспортиров, экеров и эклиметров. Угломеры транспортирные предназначены для измерения наружных углов различных изделий. Измерение углов транспортирным угломером производят путем наложения на стороны объекта, образующими измеряемый угол и считывании со шкалы или цифрового дисплея угломера значений измеряемого угла [79]. Угломер универсальный предназначен для измерения наружных и внутренних углов различных изделий. Пределы допускаемой абсолютной погрешности наиболее точного угломера универсального, из представленных средств измерений в информационном фонде государственного реестра (прил. А, табл. А.4), составляет $\pm 2'$.

Наиболее точными из представленных средств измерения углов являются инкрементные оптические датчики ЛИР-4200 (Россия) и RON-905 (Германия), точность которых составляет $\pm 0,2''$ [80]. Они предназначены для преобразования угловых перемещений валов различных устройств и механизмов в последовательность электрических сигналов, позволяющих измерить перемещение и определить его направление. Принцип действия энкодеров основан на определении углового положения вала путем оптоэлектронного считывания штрихового кода с градуированного оптического диска, жестко закрепленного на валу энкодера. Шкала ЛИР-4200 формируется голографическими методами и содержит 324 000 линий на полный оборот, что почти на порядок больше, чем у RON-905 [81]. Конструктивно энкодеры (рис. 1.21) представляют собой цилиндрический корпус со встроенным в него полым валом и разъемом для подключения кабеля.



Рисунок 1.21 – Внешний вид энкодера абсолютного многооборотного

На валу энкодера жестко закреплен оптический диск, который имеет прозрачные и непрозрачные области, расположенные в виде концентрических дорожек таким образом, чтобы обеспечить уникальный цифровой код для любого углового положения вала в пределах максимального диапазона измерений. Оптический диск просвечивается оптоэлектронным устройством, после чего код диска вводится в микропроцессор энкодера. Для измерения количества оборотов энкодеров используется редуктор. Энкодер также определяет угловое положение вала в случае исчезновения и восстановления питания. Метрологические и технические характеристики энкодера абсолютного многооборотного программируемого GM400.Z52 приведены в таблице Б.9 (прил. Б).

Увеличение объёмов работ в прикладной геодезии привело к созданию ряда специализированных приборов. Так, для измерения углов применяются теодолиты, электронные тахеометры и лазерные рулетки, с помощью которых в полевых условиях можно измерять расстояния, горизонтальные и вертикальные углы, автоматически выполнять необходимые вычисления по плановому и высотному положению определяемых точек местности. Альтернативный подход к выполнению измерений углов состоит в использовании пространственных методов измерений с применением в качестве опорных точек мгновенных положений искусственных спутников Земли. Измерительные комплексы, базирующиеся на этом принципе измерений, являются спутниковые системы позиционирования.

1.3.4 Средства измерений геометрических параметров и пространственного положения объектов

Основными задачами фотограмметрии является определение геометрических параметров, формы, размера и положения в пространстве объекта измерений с помощью его оптических изображений [82]. Параметры в геометрии характеризуют признаки фигур, которые являются моделями оригинала (реального объекта), и отражают его геометрические свойства (форму, величину, расположение в пространстве оригинала и его отдельных частей). Все геометрические параметры объектов подразделяются на параметры положения и формы. Измерение параметров производится с помощью систем параметризации, которые реализуются системами координат [83]. Под параметрами положения ж/д пути следует понимать параметры, однозначно определяющие его положение в пространстве. Параметры формы определяют форму ж/д пути [32]. Например, в соответствии с Инструкцией по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи МПС РФ № ЦП-515 от 14.10.1997 параметрами рельсовой колеи являются: ширина колеи, положение рельсовых нитей по уровню, просадки рельсовых нитей, положение пути в плане с привязкой к координатам участка ж/д пути. Также, согласно Инструкции №436/р по оценке состояния рельсовой колеи от 28.02.2020,

параметры ГРК характеризуются положением рельсовых нитей в профиле, плане, по уровню и по ширине.

Фотограмметрические средства измерений могут быть задействованы при решении широкого круга задач в процессе строительства, например при проведении геодезических работ, или при оценке процессов деформации зданий, мостов и других сооружений [84]. Эффективность работы данных средств измерений во многом зависит от качества оптической системы, на основе которых они построены. Если съемка объектов на местности осуществляется с помощью прецизионных фото-видеокамер, а обработка снимков проводится строгими методами на точных приборах и программных комплексах, то результаты измерений будут иметь приемлемую точность для большинства измерительных задач. При этом фото-видеограмметрические системы отличаются высокой производительностью измерений, поскольку одновременно определяется несколько различных геометрических параметров объекта измерений по их изображению [85]. При этом измерения выполняются бесконтактным методом, что очень важно в тех местах, где существует опасность для человека [5].

В информационном фонде государственного реестра средств измерений [58] представлены сведения об утвержденных типах видео-фотограмметрических систем и комплексов (прил. А, табл. А.5). Приведенные там фото-видеограмметрические системы и комплексы предназначены для бесконтактных оптических измерений длины, геометрических размеров и формы поверхностей объектов сложной формы, перемещений движущихся объектов в трехмерном пространстве, скоростей и угловых скоростей объектов. Данные системы могут быть использованы в целях: измерений отклонений формы и расположения поверхностей элементов деталей, вызванных изменением температуры или нагрузки [84].

Конструктивно фотограмметрические средства измерений могут состоять из одной или нескольких фото-видеокамер и вычислительного устройства, используемого для обработки изображений с помощью специального

программного обеспечения. Из всех, представленных средств измерений можно выделить два основных типа, отличающихся по принципу действия:

- фотограмметрические измерительные системы AICON MoveInspect HF4;
- оптические координатно-измерительные топометрические системы ATOS 5 Airfoil и ATOS Q.

Фотограмметрические измерительные системы AICON MoveInspect HF4 (рис.1.22) предназначены для измерений перемещений движущихся объектов в трехмерном пространстве, мгновенных и угловых скоростей объектов.



Рисунок 1.22 – Общий вид системы фотограмметрической измерительной AICON MoveInspect HF4

Принцип действия системы AICON основан на получении и анализе с помощью программного обеспечения изображений, поступающих с различных ракурсов. По результатам анализа проводится определение координат точек триангуляционным методом и построение трехмерной модели пространства с объектом измерений. Для идентификации точек, координаты которых надо измерить, используются самоклеящиеся точечные маркеры, толщина которых известна. Маркеры, видимые на изображениях, имеют фиксированное взаимное расположение. Определение трехмерных координат маркеров осуществляется с помощью изображений, полученных с различных ракурсов, по которым можно

рассчитать положение камеры, используя соотношение расстояний между точечными маркерами. Система определяет координаты каждого наклеенного маркера. Тем самым, эти координаты описывают точку на поверхности объекта. Метрологические характеристики данного типа средства измерений приведены в таблице Б.10 (прил. Б).

Из приведенных метрологических характеристик видно, что диапазон дальности проводимых измерений фотограмметрическими средствами сильно ограничен и не может конкурировать со спутниковыми системами позиционирования или такими геодезическими приборами, как электронный тахеометр. Ниже представлена сводная таблица (табл. 1.4) метрологических характеристик приведенных ранее типов средств измерения дальности.

Таблица 1.4 – Метрологические характеристики средств измерения дальности

Средство измерения	Диапазон измерений дальности, мм	Погрешность измерения дальности, мм
Оптический триангуляционный датчик	от 0 до 1500	0,04
Лазерный дальномер	от 150 до 5×10^5	от 1 до 50 мм
Фотограмметрическая измерительная система	от 10^3 до 1×10^6	от 0,005 до 20 мм
Светодальномер	от 10^3 до $2,5 \times 10^6$	от 3 до 10,5 мм
Тахеометр	от $1,5 \times 10^3$ до $3,5 \times 10^6$	от 0,2 до 6,4 мм
Приемник ГНСС	от 2×10^4 до 3×10^7	от 3 до 25 мм

Из таблицы видно, что представленные типы средств измерений имеют разные диапазоны измерений и погрешности. Поэтому включение в состав ВСКЗ нескольких типов средств измерений позволит значительно увеличить ее диапазон измерений, снизит погрешность и существенно расширит область ее возможного применения. В состав ВСКЗ для увеличения её диапазона измерений целесообразно включить следующие средства измерений: оптический триангуляционный датчик для измерений в диапазоне $[0-10^3]$ мм, фотограмметрическую систему с диапазоном измерений $[10^3-10^5]$ мм, лазерный дальномер в диапазоне $[10^5-10^{6,5}]$ мм и ГНСС-приемник в диапазоне $[10^{6,5}-10^{7,5}]$ мм [32]. На рисунке 1.23 изображены графики погрешностей рассмотренных типов средств измерений.

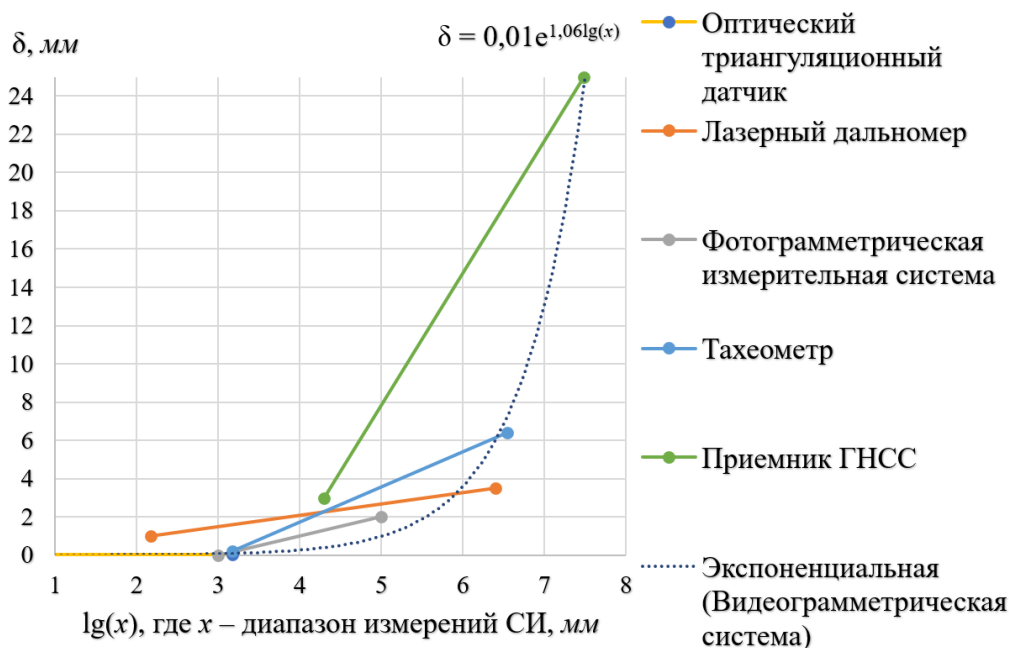


Рисунок 1.23 – Диапазон измерений разных типов средств измерения дальности

Усредненная оценка, характеризующая погрешность измерения перспективной ВСКЗ, выражена через экспоненциальное уравнение:

$$\delta(x) = 0,01e^{1,06\lg(x)}, \quad (1.9)$$

где x – расстояние до объекта измерения.

Также следует отметить, что спутниковые системы позиционирования и геодезические приборы являются высокоточными средствами измерений, тем не менее они в отличие от фотограмметрических систем не способны за короткий промежуток времени выполнить комплексные измерения, направленные на определение формы или положения объекта в пространстве [86]. Соответственно возникает необходимость интеграции разных типов средств измерений в единую ИИУС, которая позволит реализовать их преимущества и устранить недостатки, а также значительно расширит диапазон и область совместного применения [87].

1.4 Формирование требований к видеограмметрической системе компьютерного зрения

Формирование требований к ВСКЗ осуществляется в соответствии с нормативными документами по созданию автоматизированных систем [88] и выполняется на предпроектной стадии. Эти требования учитываются в дальнейшем

при разработке концепции ВСКЗ [32]. Контроль геометрических параметров ж/д пути предполагает применение сложных измерительно-контролирующих систем с большим количеством измерительных каналов, что предъявляет повышенные требования к метрологическим характеристикам измерительных каналов, поскольку учитываются влияние не только всех включенных в измерительный канал блоков, но и временные влияния каналов друг на друга [33].

Конечной целью настоящего исследования является повышение точности и производительности средств контроля геометрических параметров ж/д пути и определения пространственного положения его элементов. В ГОСТ 21778-81 установлены основные показатели по обеспечению точности геометрических параметров рельсовой колеи. Точность геометрического параметра, представляющего собой случайную величину, определяют характеристиками точности. При этом точность угловых величин характеризуется точностью линейных размеров, которыми определяются эти величины. Точность геометрических параметров на всех этапах проектирования и эксплуатации ВСКЗ устанавливается в зависимости от функциональных, конструктивных, технологических и экономических требований, предъявляемых к ж/д пути и его отдельным элементам. Правила контроля, в том числе геометрические параметры, выбранные для контроля, средства, методы, условия и число проводимых измерений, а также правила обработки их результатов должны обеспечивать необходимую точность и сопоставимость результатов измерений геометрических параметров ж/д пути с установленными значениями в нормативно-технической документации.

Одно из главных требований к ВСКЗ заключается в обеспечении выполнения своих функций в режиме реального времени. Под реальным временем понимается такая производительность ВСКЗ, при которой время, в течение которого показания датчиков измерительной системы актуальны, а реакция системы управления заканчивается до того, когда эти показания перестанут быть актуальными. Данное требование накладывает жёсткие ограничения на допустимое время анализа получаемой информации и формирование управляющего сигнала. Организация

обработки информации и управления в реальном времени возможна только при реализации в системе управления распределённых вычислений [89].

Создание новых высокоэффективных ИИУС возможно на основе применения инновационных структурно-алгоритмических принципов их построения, снижения габаритов, массы средств измерений и потребляемой ими электрической энергии, повышения точности, производительности и расширения диапазонов измерений, совершенствования методик, автоматизации методов обработки и протоколирования результатов измерений [31]. Бортовое исполнение ВСКЗ, даже без повышенной степени автономии, накладывает ограничения как на энергетику, массово-габаритные характеристики, так и на вычислительные ресурсы, которые могут быть задействованы в реализации алгоритмического обеспечения ВСКЗ. При этом требуется интеграция и учёт особенностей аппаратного обеспечения всех уровней системы управления [90].

Также необходимо учитывать требования, предъявляемые к железным дорогам, которые становятся все более строгими, что вызвано стремлением к повышению скорости и безопасности грузопассажирских перевозок. Этим объясняется необходимость повышения точности контроля геометрических параметров всех элементов ж/д пути, для чего задействуют различные средства измерений и путеизмерительную технику [32]. Виды, порядок, сроки осмотров и проверок ж/д пути, а также сооружений на перегонах или станциях установлены правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [91] и инструкцией по текущему содержанию ж/д пути [92].

Конструкции верхнего строения пути и земляного полотна рассчитываются по нормам воздействия на ж/д путь подвижного состава в соответствии с ГОСТ Р 55050 исходя из требуемых скоростей движения ж/д транспорта. Отвод ширины рельсовой колеи для ж/д магистралей с максимальной скоростью движения поездов менее 80 км/ч составляет 4 мм/м, а для скоростей более 140 км/ч составляет 2 мм/м. Расчетная допустимая деформация земляного полотна для 1 и 2 категории ж/д линии составляет 20 мм, а для скоростной категории уже 10 мм. Запрещается превышать величину уклона отвода возвышения наружного рельса в кривых

участках высокоскоростного пути более чем на 2 мм/м по всей длине переходной кривой. Величины отклонений от номинальных размеров ширины колеи, не требующие устранения на прямых и кривых участках ж/д пути, не должны превышать по уширению +8 мм, по сужению -4 мм. Эти требования, обуславливают необходимость повышения точности средств для контроля геометрических параметров высокоскоростных линий железных дорог.

Под влиянием различных природных и техногенных факторов в процессе эксплуатации железных дорог 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. В случаях повреждения ж/д пути для оценки его технического состояния применяются мобильные измерительные комплексы на комбинированном ходу, максимальная скорость которых по железным дорогам не превышает 45 км/ч, что увеличивает время ремонтно-восстановительных работ. Для оперативного мониторинга железных дорог могли бы применяться комплексы с БПЛА, развивающие скорость свыше 100 км/ч, но погрешность координатных измерений существующих комплексов с БПЛА составляет более 30 мм, что является недостаточной для контроля геометрических параметров железных дорог. Это указывает на необходимость повышения точности комплексов с БПЛА для применения их в целях мониторинга поврежденных участков железных дорог.

Характеристики ВСКЗ определяются характеристиками входящих в ее состав элементов. К примеру, современный светодальномер способен определять расстояние до объекта, в зависимости от его отражающей поверхности, на дистанции до 3 км с погрешностью измерения ± 20 мм. Современная видеокамера высокого разрешения, оснащенная объективом с 30-кратным оптическим увеличением, способна в зоне прямой видимости обнаруживать мишень радиусом 50 мм приблизительно на такой же дистанции [93]. Зона обзора оптико-электронного устройства имеет форму конуса, но из-за прямоугольной формы матрицы фотоприемника представляет собой пирамиду [87]. На рисунке 1.24

схематично отображена зависимость размера области сцены от угла обзора оптоэлектронного устройства (фото- или видеокамеры).

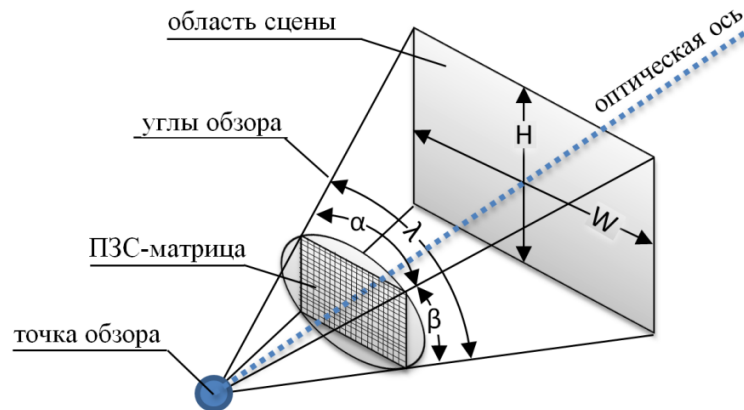


Рисунок 1.24 – Область сцены, попадающая в кадр видеокамеры в зависимости от углов обзора

Угол обзора λ , подразделяется на горизонтальный и вертикальный – α и β , соответственно. Чем больше фокусное расстояние объектива, тем меньше угол обзора [94], некоторые длиннофокусные объективы (Leica APO-Vario-Elmarit-SL) обладают малым углом обзора, порядка 5° , что приблизительно составляет $4,2^\circ$ по горизонтали и $2,8^\circ$ по вертикали (для матрицы с соотношением сторон $2/3$). Шаг изменения значения угла, фиксируемый видеокамерой, зависит от размера пиксела ее ПЗС-матрицы [87]. Если принять во внимание, что современная фотокамера (Leica SL2) способна делать снимки с разрешением $W \times H = 8368 \times 5584$ и более, то минимальный угол, фиксируемый фотокамерой, составит:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\alpha}{W} = \frac{4,2^\circ}{8368} \\ \frac{\beta}{H} = \frac{2,8^\circ}{5584} \end{array} \right\} \approx 0,0005^\circ \approx 0^\circ 0' 1,8'' . \quad (1.10)$$

Дивергенция лазерного луча современного дальномера составляет в среднем $0,6 \text{ mrd}$, то есть на дистанции 1 км диаметр луча будет равен 600 мм . Соответственно наведение на цель должно производиться с погрешностью не более $\arctg(600/10^6) \approx 2'$. Диапазон измерения расстояния оптико-электронным устройством напрямую зависит от размера объекта измерения и фокусного расстояния используемого объектива, чем они больше, тем дальше и с большей

точностью можно измерить расстояние до этого объекта. На рисунке 1.25 представлена принципиальная схема формирования цифрового изображения объекта измерений шарообразной формы на ПЗС-матрице фотокамеры.

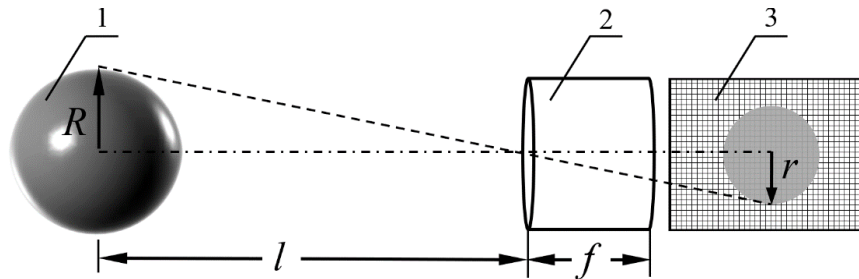


Рисунок 1.25 – Принципиальная схема формирования цифрового изображения объекта измерений: 1 – объект измерений, 2 – объектив, 3 – ПЗС-матрица

При удалении объекта измерений от фотокамеры его размер на изображении будет пропорционально уменьшаться [93]. Зависимость дальности такого объекта от физического размера его проекции на изображении можно выразить формулой:

$$L = \frac{(R+r)f}{r}, \quad (1.11)$$

где r – радиус окружности на изображении;

R – радиус объекта измерения

f – фокусное расстояние объектива.

ПЗС-матрица формирует изображение, состоящее из множества ячеек, обладающих цветом – пикселов [94]. Соответственно, и радиус окружности r на изображении исчисляется их количеством. Для перевода в физический размер значения r (мм), необходимо знать физический размер пиксела r_p , который в свою очередь зависит от физического размера ПЗС-матрицы и выбранного разрешения изображения [95]. Физический размер сторон или диагонали ПЗС-матрицы обычно указывается производителем фотокамеры в технических характеристиках изделия. Используя следующее соотношение, можно осуществить перевод радиуса окружности на изображении в физический размер:

$$r = r_p p_x, \quad (1.12)$$

где p_x – физический размер пиксела в мм.

В качестве примера, оценивалась максимальная дальность измерения расстояний, которую может обеспечить современная фотокамера (Leica SL2), обладающая фокусным расстоянием фотообъектива 280 мм (Leica APO-Vario-Elmarit-SL) и имеющая матрицу с физическим размером пиксела 4,3 мкм. Для оценки использовалась мишень сферической формы, радиусом 50 мм. Минимально возможный размер радиуса мишени, который можно получить на изображении, составляет 1 пиксел. Следовательно, максимальная дальность, с которой мишень может быть обнаружена, определяется из выражения:

$$L = \frac{(R+r)f}{r} = f \left(\frac{R}{r_p px} + 1 \right) = 280 \left(\frac{50}{1 \cdot 0,0043} + 1 \right) \approx 3,2 \text{ км}. \quad (1.13)$$

Таким образом, теоретически, диапазон измерений расстояния до объекта, радиусом 5 см, с помощью современной фотокамеры, составляет 3,2 км, что вполне может конкурировать с диапазоном измерений светодальномера.

Метрологические характеристики ВСКЗ во многом зависят от оптико-электронного устройства, входящего в её состав. Основными параметрами, характеризующими данное устройство, являются тип ПЗС-матрицы, пространственное и временное разрешение фотоприемников на матрицах ПЗС, а также динамический диапазон [96]. Во многих случаях главным требованием, предъявляемым к оптической системе, является ее способность обеспечивать высокое разрешение. Например, кинетика исследуемого процесса требует получения изображений со скоростью видеорежима и с умеренным разрешением. Полнокадровые камеры с медленной разверткой не обеспечивают высокое разрешение в режиме видеосъемки. Для формирования одного кадра, в случае большой матрицы пикселей, требуется около одной секунды, в зависимости от скорости работы и разрядности цифро-аналогового преобразователя [87].

Пространственное разрешение оптоэлектронного устройства для формирования изображений напрямую связано с размерами пикселей. Современные технологии позволили существенно уменьшить пиксели фотоприемников на ПЗС-матрице, не ухудшая другие их рабочие характеристики.

Существуют оптико-электронные устройства научно-исследовательского класса, с построчным переносом и размером пикселей менее 5 мкм, оснащенных объективами с большим увеличением, что делает их пригодными для получения изображений с высоким разрешением. В том случае, когда требуется сохранить пространственное разрешение оптической системы, важным критерием выбора цифровой камеры становится взаимосвязь размеров фотоэлемента и оптического разрешения [87].

Для определения адекватности размера пикселей фотоприемника разрешающей способности оптической системы используется критерий Найквиста. Согласно теореме Найквиста, чтобы сохранить оптическое разрешение и избежать наложения, наименьший радиус дифракционного кружка, который создается оптической системой, должен измеряться, минимум, двумя пикселями матрицы формирования изображения. При такой частоте дискретизации критерий Найквиста удовлетворяется даже с использованием бининга 2x2 пиксела [97].

На основе анализа существующих средств измерений линейных и угловых величин, а также путем обоснования целесообразности реализации технологии компьютерного зрения в координатно-измерительной системе [98], были определены следующие основные требования, предъявляемые к ВСКЗ в целом и к ее функциональным возможностям, в частности:

- разрабатываемая система должна решать координатно-измерительные задачи с точностью измерений, не уступающей геодезическим приборам и при этом обеспечивать высокую скорость измерений и функциональность фото-видеограмметрических систем;
- система должна обладать возможностью автоматического поиска и обнаружения объекта измерения или ВЦ в зоне прямой видимости, отслеживать перемещение в пространстве и определять его координаты в реальном времени;
- технические и метрологические характеристики системы должны определяться характеристиками входящих в ее состав элементов;
- для разработки системы необходимо осуществить подбор или

изготовление таких элементов, которые будут удовлетворять заданным требованиям и при этом обеспечивать слаженное взаимодействие в составе измерительной системы [87].

Обобщенными целевыми показателями разрабатываемой комплексной видеограмметрической системы является достижение следующих допустимых погрешностей измерений геометрических параметров ж/д пути в условиях неуверенного приема спутниковых радионавигационных сигналов: 2 мм для верхнего строения пути, 50 мм для нижнего строения пути. Требования к другим видам обеспечений (информационному, техническому, программному и т.д.) будут сформированы на последующих стадиях разработки ВСКЗ.

1.5 Выводы по первой главе

В ходе анализа существующих технических средств контроля геометрических параметров ж/д пути было установлено, что автоматизированные путеизмерительные вагоны отличаются высокой скоростью измерений и обеспечивают непрерывный контроль на всем протяжении контролируемого участка пути. Однако в случае стихийных бедствий и техногенных аварий, приводящих к повреждению участка пути, применение таких средств контроля становится невозможным. В свою очередь путеизмерительные шаблоны и тележки обладают высокой точностью контроля и представления результатов измерений в абсолютных координатах, достигаемых за счет привязки к реперной или геодезической сети с помощью геодезического оборудования. Тем не менее, данные средства не обладают высокой производительностью контроля [47].

Оперативный контроль поврежденных участков железных дорог возможен только с помощью бесконтактных методов контроля. Единственным высокопроизводительным средством для осуществления бесконтактного контроля на сегодняшний день является ЛА. Применение лазерных сканирующих комплексов, размещенных на ЛА, для контроля геометрических параметров ж/д пути осложнено наличием зон неуверенного приема сигналов ГНСС и недостаточной точностью координатных измерений данных комплексов. Это

обусловлено тем, что в состав любой системы автоматического управления полетом ЛА входит приемник сигналов ГНСС, с помощью которого осуществляется полет по заданной траектории. Низкая точность определения координат полета ЛА вызывает необходимость увеличивать высоту полета, чтобы обеспечить удержание ж/д пути в поле зрения аэрофотокамеры. В результате снижается точность формирования трехмерных моделей ж/д пути и, как следствие, точность измерения его параметров. Отклонение ЛА от заданной траектории полета ЛА также приводит к искажению изображения рельсовой колеи на аэрофотоснимках вследствие проявления аббераций оптической системы аэрофотокамеры, возникающих при больших углах обзора. Следовательно, возникает необходимость повышения точности позиционирования ЛА над рельсовой колеей.

Для строительства высокоскоростных участков железных дорог необходимо контролировать длинные неровности на кривых участках пути. Такой контроль возможен только посредством определения координат рельсовых нитей. Большинство из существующих средств контроля осуществляют только привязку измеренных параметров к одной из систем координат, но не определяют координаты рельсовых нитей, вследствие чего они не позволяют контролировать длинные неровности. В связи с этим ограничивается скорость движения ж/д транспорта и уменьшается пропускная способность участков железных дорог.

Таким образом, погрешность координатных измерений ВСКЗ должна соответствовать геодезическим приборам. При этом ВСКЗ должна отличаться более высокой производительностью и оперативностью применения по сравнению с существующими путеизмерительными комплексами, а также обеспечивать более высокую точность измерения параметров ж/д пути. Соответственно, основной задачей данного исследования является разработка методов и способов реализации технологии компьютерного зрения с помощью ВСКЗ в целях повышения точности и производительности средств контроля геометрических параметров ж/д пути.

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Методы измерений геометрических параметров ж/д пути основаны на различных физических принципах и технических решениях. По принципу взаимодействия с рельсовой колеей методы измерений делятся на контактные и бесконтактные. Контактные методы отличаются от бесконтактных тем, что имеется механическая связь средства измерения с рельсовой колеей. Они получили широкое распространение из-за небольшой стоимости и приемлемой точности контактных средств измерений. К основным недостаткам, с точки зрения надежности, можно отнести подверженность контактных средств измерения, а также соединяющих с ними линий связи механическим и температурным воздействиям, приводящим к частым сбоям и отказам систем контроля [99]. Ограничения по применению контактных средств измерения возникают вследствие невозможности проводить измерения удаленно, трудоемкости передачи измерительной информации в устройство для её обработки, а также сложности автоматизации измерительной процедуры. Данные проблемы могут быть устранены с помощью бесконтактных методов измерения.

Основным достоинством бесконтактных методов является отсутствие механического воздействия на рельсовую колею и малая инерционность средств измерений. Бесконтактные методы исключают износ и поломку механических элементов средства измерения в точках контакта с рельсовой колеей, что повышает надежность их применения и точность измерений [99]. Измерения могут проводиться на достаточно больших расстояниях от объекта контроля., при которых затруднено или невозможно применение путеизмерительных средств контроля и диагностических комплексов, передвигающихся по рельсовым путям. Особенно это важно в условиях чрезвычайных ситуаций, при оценке технического состояния повреждённого участка ж/д пути, в зонах возникновения природных катаклизмов при паводках, пожарах, или техногенных авариях, в случае радиационного или химического загрязнения местности что обеспечивает безопасность операторов и сохранность самих средств контроля [100].

Под измерением понимают способ получения значения физической величины в общепринятой системе единиц, путем сравнения его с эталонным, используя специальные технические средства. Дальнейшее развитие средств измерений на современном этапе предполагает их качественное изменение, которое вызвано стремлением удовлетворить возрастающие потребности к пропускной способности и безопасности железных дорог посредством применения современных методов и технических средств, направленных в первую очередь на:

- повышение быстродействия (ускорение процесса измерения);
- удешевление измерительной процедуры за счет снижения стоимости средств измерений (например, применение универсальных приборов), сокращения расходов на оплату труда операторов (автоматизация измерений) и прочее;
- снижение трудоемкости измерений путем автоматизации выполнения измерительных процедур и обработки полученных данных;
- повышение точности результатов измерений с помощью новых методов и средств измерений (преимущественно цифровых), а также использованием более совершенных вычислительных средств [101].

Выбор средства измерения в значительной степени определяет и выбор метода измерения, который является наиболее подходящим для него. Принцип действия бесконтактных методов основан на зондировании рельсовой колеи звуковыми или электромагнитными волнами [102] [103] [104]. Существуют следующие бесконтактные методы проведения измерений: оптические на основе физических явлений (фотометрия, дифракция, интерференция, проекция), голографические, лазерные, акустические, магнитные и радиоволновые.

2.1 Оптические методы измерений

Для измерения геометрических параметров рельсовой колеи производятся оптико-электронные устройства. При чёткой теневой проекции применяются теневой и дифракционный методы контроля в проходящем свете. При определении расстояния до поверхностей, рассеивающих свет применяются триангуляционные методы контроля, на основе структурного освещения, а также методы

низкокогерентной интерферометрии [105]. Наиболее распространенными являются триангуляционные оптические системы, в основе которых лежит свойство лазерного луча распространяться на большие расстояния практически без рассеяния [106] [107] [108].

Особые свойства луча лазера как «безмассовой» опорной линии или плоскости, а также высокая интенсивность света, направленность и возможность модуляции делают его эффективным прежде всего для провешивания линий и управления, реализуемых в одном направлении или плоскости, которые можно подразделить на четыре класса, где лазерное излучение используется в качестве направляющего луча или опорной плоскости в инженерно-геодезической технологии и контроле, направляющей линии или плоскости для монтажных и юстировочных процессов, направляющего луча или плоскости для управления динамическими процессами, опорной линии или плоскости для обнаружения деформаций. Лазерный луч образует активную оптическую опорную ось или плоскость, которая может быть определена визуально с помощью визируемой марки или фотоэлектрического приемника [35].

Принцип работы лазерных средств измерений заключается в том, что лазер подсвечивает точку, до которой будет измеряться расстояние. Другое детектирующее устройство, расположенное на некотором расстоянии от источника лазерного излучения, регистрирует отраженный от этой точки свет. Такая схема измерения (лазер, поверхность рельса и детектор) образует треугольник (рис. 2.1). Детектор представляет собой фотоприемник, на который фокусируется пришедший отраженный луч, который попадая на светочувствительную поверхность сенсора, поглощается, образуя небольшое световое пятно [109]. По расположению этого светового пятна определяется три параметра: угол между отраженным лучом и линией сенсор-лазер, угол между испущенным лазером лучом и линией сенсор-лазер, а также расстояние от сенсора до лазера. По этим параметрам вычисляются все стороны и углы образованного треугольника.

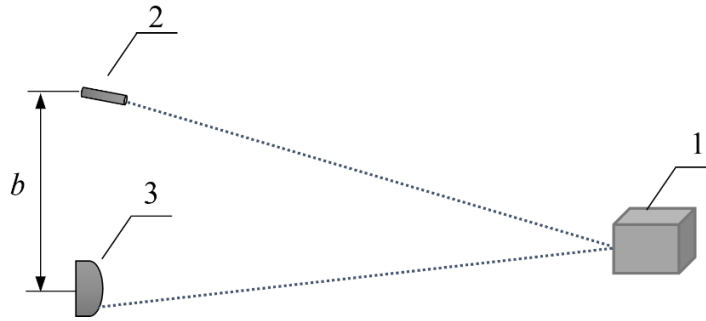


Рисунок 2.1 – Принцип действия триангуляционного лазерного датчика:
 1 – поверхность рельса, 2 – лазерный излучатель, 3 – фотоприемник,
 b – базисное расстояние между лазерным излучателем и фотоприемником

Данный метод отличается высокой скоростью и точностью измерений. Типичные значения точности такой измерительной техники составляют величины порядка десятых долей процента от измеряемого расстояния. Метод имеет ограничения по дальности измерений и может применяться до тех пор, пока световая энергия отраженного рассеянного излучения, падающего на фотоприемную матрицу, превышает значение его уровня шума.

Для определения геометрических размеров рельсовой колеи также применяются теневые проекционные и сканирующие методы [110]. На рисунке 2.2 представлена схема теневой проекционной системы [111]. Измеритель включает в себя оптический и электронный блоки. Электронный блок осуществляет управление работой осветителя, считывание информации с фотоприемника и её последующую аппаратно-цифровую обработку с целью определения коротких неровностей рельсовой колеи. Оптический блок состоит из осветителя, включающего в себя источник излучения (ИС) и коллимирующий объектив O_1 , фотоприёмного модуля, представляющего собой телескопическую проецирующую оптическую систему, состоящую из объектива O_2 и диафрагмы D , а также фотоприемной матрицы (Ф). Фотоприемная матрица выполняет электронное сканирование полученного теневого изображения по строкам [112].

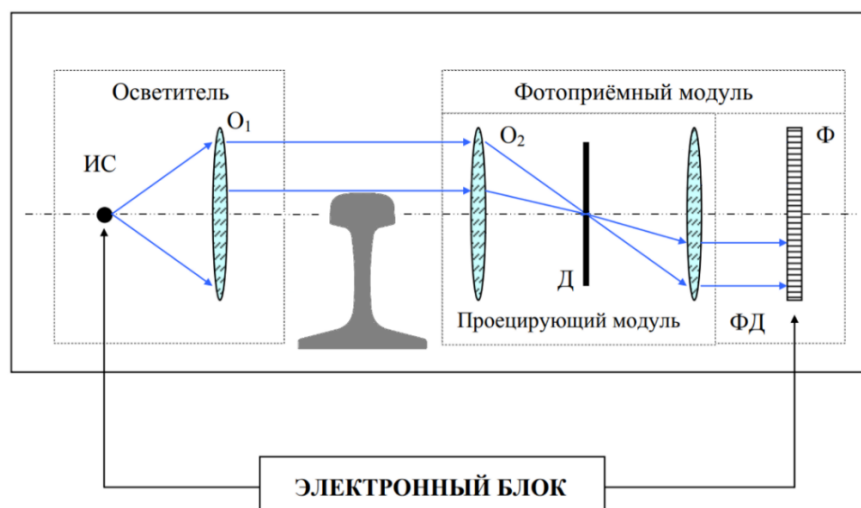


Рисунок 2.2 – Схема теневой проекционной системы при параллельном освещении рельса

Параллельный пучок света, формируемый осветителем, освещает профиль рельса. Проецирующая система формирует в плоскости фотоприемника теневое изображение рельса. Отсчёты скорректированного сигнала используются для определения деформации рельса в каждом сечении. Определение коротких неровностей рельсовой колеи осуществляется путем нахождения координат краёв рельсовых нитей и последующего вычисления по ним требуемых параметров. При этом основной задачей является точное определение координаты края рельса, от решения которой во многом зависят точностные характеристики данного метода.

Источниками погрешностей теневого проекционного метода [113] являются: aberrации оптической системы, точность фокусировки, способ освещения рельсов (отраженный или проходящий свет, степень когерентности светового пучка), отражающие свойства поверхности рельса (коэффициенты отражения и пропускания, контраст, сдвиг фаз), размер и относительное расположение рельсовых нитей и оптических элементов [114]. Использование теневых проекционных схем с параллельным освещающим пучком и специализированным телецентрическим объективом позволяет повысить точность определения геометрических параметров рельсовой колеи. Важным преимуществом таких систем является низкая чувствительность к вибрациям, а также низкие требования к точности позиционирования датчика [112].

Опорные плоскости для задания направляющей линии (например, при контроле продольного и поперечного уклона земляного полотна), а также управления (нивелирование, позиционирование рабочего органа строительных машин) образуются с помощью цилиндрических линз (рис. 2.3). После прохождения луча через такую линзу лазерный луч получается растянутым в фокальной плоскости и преобразуется в световой сектор $D^+ \approx Dz/f_z$. В зависимости от поворота фокальной плоскости цилиндрической линзы относительно направления распространения лазерного излучения сектор лазерного излучения может быть установлен под произвольным углом [35].

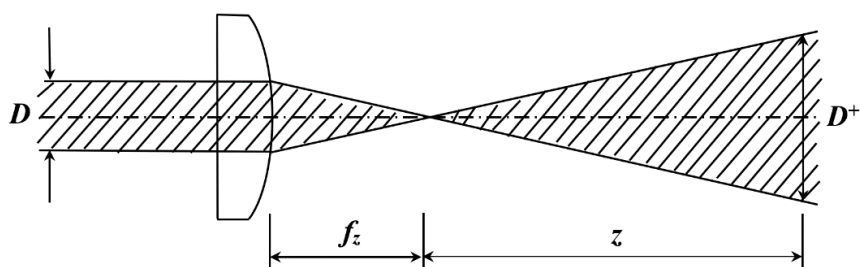


Рисунок 2.3 – Принцип действия цилиндрической линзы

Среди множества известных оптических методов измерений лучше всего освоены импульсный и фазовый методы. Очень малая длительность импульсов, излучаемых многими видами лазеров, в частности твердотельными, в режиме модуляции добротности резонатора и особенно в режиме синхронизации мод, в сочетании с большой энергией таких импульсов открыла дорогу к созданию импульсного метода лазерных измерений, получившего к настоящему времени очень широкое распространение. Данный метод применяется для измерения больших расстояний (до нескольких десятков километров) [37].

Источником излучения обычно служат твердотельные и полупроводниковые лазеры, работающие в ближнем ИК-диапазоне (0,8–1,6 мкм), излучение которых формируется в виде коротких импульсов (длительностью до десятков наносекунд). Медленно меняющиеся расстояния измеряют с помощью одиночных импульсов; при быстро меняющихся расстояниях применяется непрерывно-импульсный режим излучения. Принцип измерения расстояний прибором основан на измерении времени прохождения импульса лазерного излучения до объекта измерения и

обратно [78]. Импульсный лазерный излучатель генерирует множество импульсов в ИК области спектра, которые через формирующую оптику направляются на объект, до которого необходимо измерить расстояние. Эти импульсы отражаются от него и с помощью приемной оптики фокусируются на фоточувствительной площадке приемного фотодиода приборов, где при помощи электроники определяется время прохождения импульсов и вычисляется расстояние до объекта измерения.

Погрешность временной фиксации импульсов излучения в основном связана с приемом отраженного лазерного импульса. Мощность сигнала может изменяться на несколько порядков в зависимости от дальности рельсовой колеи и её коэффициента отражения, состояния слоя среды распространения излучения. Кроме того, на сигнал накладываются шумы и помехи приемного канала и канала распространения излучения. Все это приводит к сильным искажениям формы принятого сигнала и, как следствие, к погрешности фиксации момента прихода данного импульса пороговым устройством.

Ошибка измерения дальности зависит от точности определения времени задержки отраженного импульса. При постоянной скорости распространения электромагнитного излучения в слое среды дальность можно рассчитать с помощью следующего выражения:

$$D = \frac{c\Delta t}{2n}, \quad (2.1)$$

где c – скорость света в вакууме;

Δt – время возвращения отраженного сигнала.

n – показатель преломления среды распространения для используемой длины волны излучения.

Поскольку скорость света составляет около 3×10^8 м/с, то для измерения расстояния с погрешностью до 1 мм необходимо измерять время распространения светового импульса с погрешностью, не превышающей $3,3 \times 10^{-12}$ с. Измерить время с такой точностью на современном уровне техники достаточно сложно. Тем не менее, основное преимущество лазерного дальномера импульсного типа

заключается в возможности применения в нем лазера высокой мощности, излучающего не постоянный луч, а короткие световые импульсы. Это означает, что диапазон измерения данного устройства достаточно большой и теоретически может достигать 100 км [115].

Оценка пространственной зоны измерения дальности может быть осуществлена с использованием локационного уравнения:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пер}} \frac{4S_{\text{отр}}}{\pi\theta_{\text{пер}}^2 D^2} P_{\text{отр}} \frac{4S_{\text{пр}}}{\pi\theta_{\text{отр}}^2 D^2} \tau_{\text{пер}} \tau_{\text{пр}} \tau_{\text{атм}}^2, \quad (2.2)$$

где $P_{\text{пр}}$ – мощность принимаемого излучения;

$P_{\text{пер}}, \theta_{\text{пер}}$ – мощность и расходимость излучения передатчика;

$S_{\text{отр}}, R_{\text{отр}}$ – площадь и коэффициент отражения поверхности рельсовой колеи;

$\theta_{\text{отр}}$ – расходимость отраженного излучения;

$S_{\text{пр}}$ – площадь приемной апертуры дальномера;

$\tau_{\text{пер}}, \tau_{\text{пр}}, \tau_{\text{атм}}$ – пропускания передатчика, приемника и атмосферы.

Зависимость дальности D в большей степени зависит от расходимости излучения передатчика чем от его мощности $P_{\text{пер}}$. При этом имеет место существенное функциональное ограничение параметра $\theta_{\text{пер}}$, обусловленное погрешностью используемой системы наведения: чрезмерное уменьшение величины расходимости может вызывать промах. Последнее обстоятельство особенно важно для измерения дальности рельсовой колеи, когда дальномер размещен на движущемся средстве контроля [116].

Пропускание атмосферы определяется зависимостью относительного показателя рассеяния атмосферы от дальности видимости. В воздухе содержатся различные примеси (земляная пыль, дым, копоть и др.). Для случая, когда размеры частиц примесей в воздухе соизмеримы с длиной волны имеет место наибольшее рассеяние излучения. Таким образом, в случае дымки, когда размеры частиц не превышают 0,5 мкм, использование инфракрасной области спектра может иметь преимущества по сравнению с видимыми лучами. Когда видимость в дымке составляет около 1 км, использование для наблюдения ближней инфракрасной области спектра дает выигрыш по дальности более чем в 2 раза [117].

Фазовый метод измерения времени распространения модулированного лазерного излучения, отличается небольшой погрешностью измерения. По этой причине данный метод широко используется в геодезии, а также в высокоточной дальнометрии. На рисунке 2.4 представлена упрощенная схема фазового светодальномера, поясняющая принцип измерения расстояний фазовым методом.

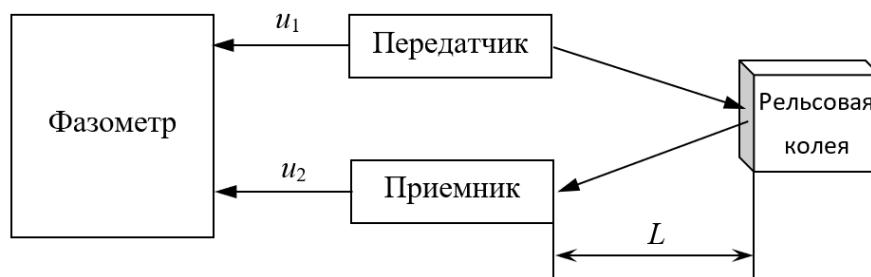


Рисунок 2.4 – Упрощенная принципиальная схема работы фазового светодальномера

Передатчик излучает гармоническое колебание круговой частоты ω с начальной фазой φ_0 :

$$u_1 = u_{m1} \sin(\omega t + \varphi_0). \quad (2.3)$$

На расстоянии L установлен отражатель. Пройдя расстояние до отражателя и обратно, сигнал попадает на приемник, на выходе которого появляется гармоническое колебание с фазой, задержанной на время τ_L распространения излучения вдоль измеряемого расстояния в прямом и обратном направлениях [118]:

$$u_2 = u_{m2} \sin[\omega(t - \tau_L) + \varphi_0]. \quad (2.4)$$

Фазометр измеряет разность фаз напряжений u_1 и u_2 по формуле:

$$\Delta\varphi = 2\pi f \tau_L. \quad (2.5)$$

Время распространения излучения вычисляется из выражения:

$$\tau_L = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}. \quad (2.6)$$

Следовательно, зная скорость распространения колебаний вдоль измеряемого расстояния v , находят искомое расстояние:

$$L = \frac{v\Delta\varphi}{4\pi f}. \quad (2.7)$$

В общем случае сдвиг фаз $\Delta\phi$ представляется в виде:

$$\Delta\phi = 2\pi N + \phi. \quad (2.8)$$

Откуда, получают основное уравнение фазовой дальнометрии:

$$L = v(N + \phi/2\pi)/2f, \quad (2.9)$$

где N – целое число;

ϕ – величина в диапазоне $(0, 2\pi)$.

В фазовых светодальномерах применяются широко известные методы разрешения неоднозначности, позволяющие определить целое число N . Как правило, используется модуляция несущей оптического диапазона масштабными частотами, оптимальные значения которых лежат в диапазоне 10... 500 МГц. В этом случае несущая частота используется лишь как переносчик масштабной частоты. Для выделения сигнала масштабной частоты применяют детектирование.

Импульсно-фазовый метод измерения расстояния, в значительной мере совмещает в себе достоинства фазовых методов в отношении точности измерения и импульсных методов в отношении дальности действия [119]. При этом в качестве зондирующего сигнала светодальномера используется последовательность импульсов излучения, а время прохождения оптическим сигналом удвоенного расстояния до рельсовой колеи измеряется фазовым методом.

Существенным недостатком оптических методов являются высокие требования, предъявляемые к качеству поверхности рельсов и условиям проведения измерений [120]. При измерении расстояния до рассеивающих поверхностей триангуляционным методом угол падения лазерного луча не оказывает значительного влияния на результат [121] [122]. В случае определения расстояния до зеркальных поверхностей рельса влияние этого угла становится существенным. При этом предел измеряемых расстояний значительно увеличивается. Однако, требуется довольно трудоемкая угловая калибровка триангуляционной системы для стабилизации отличного от нуля угла падения лазерного луча [123].

Для голографических методов измерения требования к качеству поверхности

намного ниже. Голографические методы достаточно сложны в реализации и не отличаются высокой скоростью измерений, но обладают высокой разрешающей способностью [120]. Общими недостатками оптических методов измерений являются: сложность, громоздкость и высокая стоимость оборудования; большое энергопотребление; высокие требования к качеству поверхности рельсов и к условиям проведения измерений (влажность, запыленности и т.п.) [99]. Кроме этого, лазерное излучение требует дополнительных мер предосторожности и защиты [124].

2.2 Акустические методы измерений

В группе акустических методов основным источником информации о состоянии рельсовой колеи выступает акустический сигнал [125]. В отличие от оптических методов измерения акустические методы основаны на регистрации параметров упругих колебаний [126], возникающих или возбуждаемых в рельсах. Колебания возбуждаются обычно с помощью пьезометрического или электромагнитного преобразователя в ультразвуковом диапазоне, в котором меньше помех [127]. В соответствии с ПНСТ 310-2018 акустические методы применяют для контроля следующих дефектов: сплошности (выявления включений, раковин, трещин и др.), толщины, структуры, физико-механических свойств (прочности, плотности, модуля упругости, модуля сдвига, коэффициента Пуассона), изучения кинетики разрушения. Для измерений расстояния может применяться как схема, использующая один датчик для излучения и приёма, так и схема, в которой излучение и приём производят двумя датчиками [128].

Ультразвук представляет собой гармоническое колебательное движение частиц упругой среды, распространяющееся в виде волн в газообразной, жидкой или твердой среде с частотой от 20 кГц до 1 ГГц. Он передается от источника к приемнику посредством волны, образованной колебанием частиц упругой среды. Громкость звука определяется амплитудой звуковых колебаний A , которая представляет собой максимальное отклонение переменной величины от нуля. Кроме амплитуды звук характеризуется частотой колебаний ω . Гармоническое

колебание в аналитическом виде записываются уравнением:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \alpha), \quad (2.10)$$

где A – амплитуда колебаний,

ω – частота колебаний,

α – начальная фаза колебаний,

T – период колебаний.

Звуковые колебания, возбужденные в какой-либо точке среды, распространяются с конечной скоростью, зависящей от свойств среды: температуры (рис. 2.5), давления и плотности. Однако понижение плотности и давления воздуха с увеличением высоты компенсируют друг друга, поэтому скорость звука имеет слабую зависимость от давления в воздухе [129].

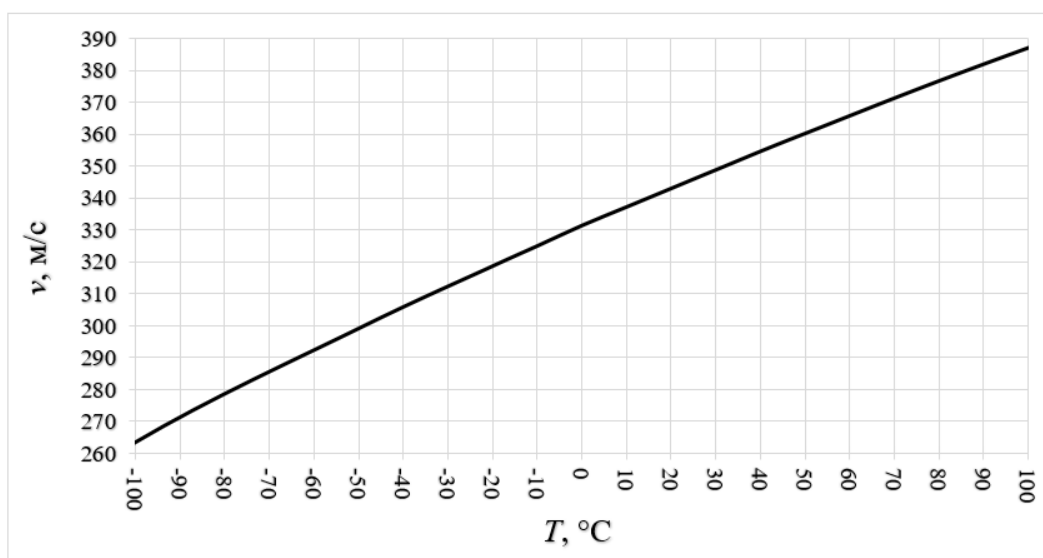


Рисунок 2.5 – График зависимости скорости звука от температуры

Импульсный метод измерения дальности ультразвуком основан на определении времени распространения отраженного от объекта измерения ультразвукового сигнала (рис. 2.6). В момент времени T_0 ультразвуковой передатчик излучает сигнал продолжительностью Δt , который распространяется в окружающей среде со скоростью звука v . Когда сигнал достигает объекта, часть сигнала отражается и попадает в приёмник в момент времени T_1 . По этим значениям определяется расстояние до объекта измерения:

$$D = v\Delta t/2, \quad (2.11)$$

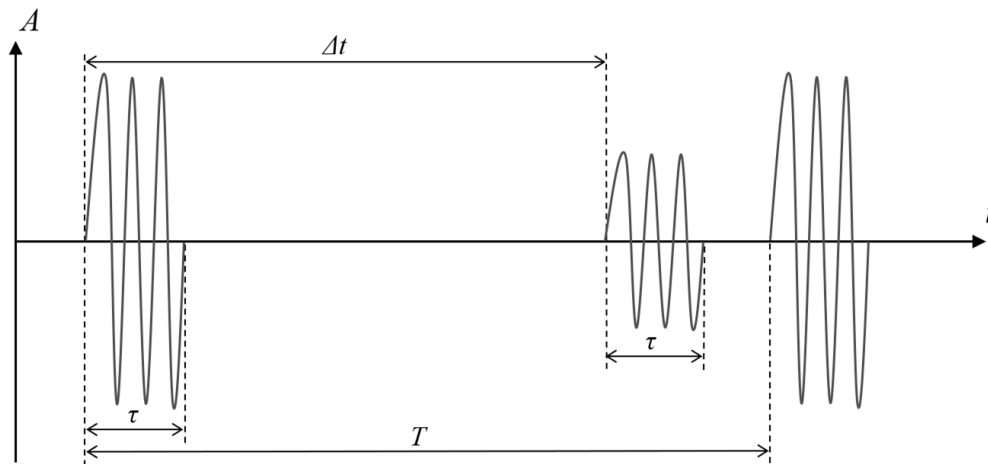


Рисунок 2.6 – Принцип импульсного метода измерения

С помощью акустических методов в рельсах можно обнаружить также поверхностные и внутренние дефекты, представляющие нарушение сплошности, неоднородность структуры, зоны поражения межкристаллитной коррозией, дефекты сварки и т.п. Акустические методы позволяют измерять геометрические параметры, например, толщину при одностороннем доступе к рельсу, а также физико-механические свойства стали. Важным преимуществом акустических методов является возможность их применения для контроля элементов и конструкций ж/д пути в условиях его эксплуатации [126].

Для прозвучивания металла рельсов используются пьезоэлектрические преобразователи, активным элементом которых является пластина, обладающая пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрические преобразователи выполнены однотипно и представляют собой пьезопластину, помещенную в демпфере, который служит для гашения свободных колебаний и для защиты пьезопластины. При подведении к электродам пьезопластины электрического переменного напряжения некоторой частоты она совершает механические колебания с такой же частотой (явление обратного пьезоэффекта) [130]. Если в рельсах имеется дефект, то ультразвуковые волны отразятся от его границы. Если размер дефекта будет больше длины ультразвуковой волны, то вся энергия ультразвуковых волн отразится от него, и приемная пьезоэлектрическая пластинка перестанет колебаться, что будет свидетельствовать о наличии дефекта внутри рельса. Однако, если размер площади дефекта в плоскости, перпендикулярной

направлению распространения ультразвуковых волн, будет меньше длины волны, то в силу явления дифракции ультразвуковые волны обогнут дефект и пройдут к приемной пластинке, вызвав ее колебания [131].

При неразрушающем контроле акустическими методами регистрируют частоту, амплитуду, время, механический импеданс (затухание), спектральный состав колебаний. Применяют продольные, сдвиговые, поперечные, поверхностные и нормальные акустические волны. Режим излучения колебаний может быть непрерывным или импульсным [132]. Различают следующие акустические методы рельсовой дефектоскопии: теневой, резонансный, эхо-импульсный, акустической эмиссии (эмиссионный), велосимметрический, импедансный, свободных колебаний, а также комбинированные методы (рис. 2.7).

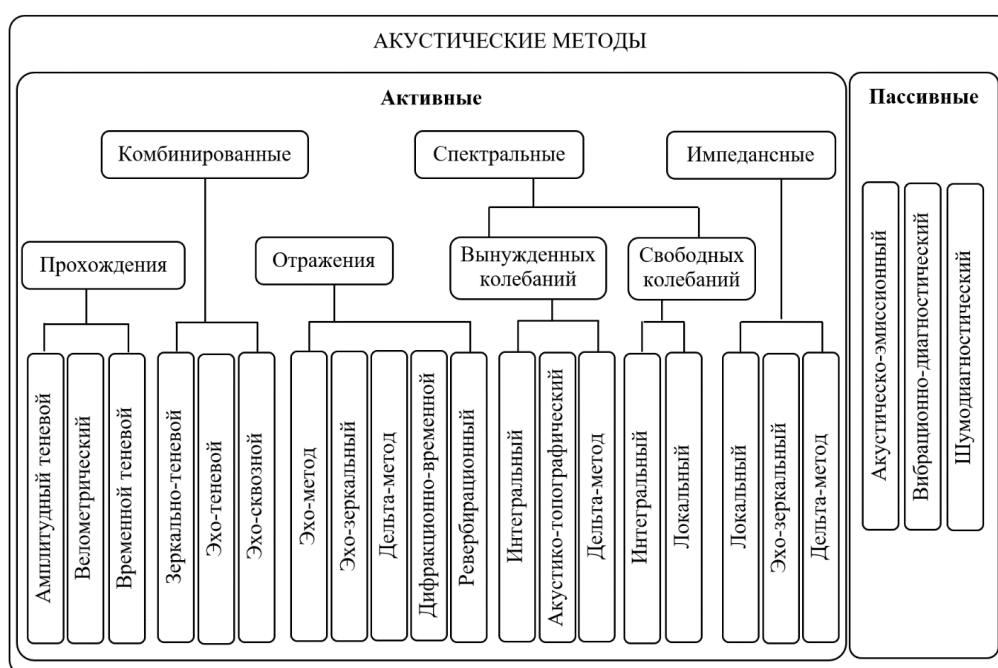


Рисунок 2.7 – Акустические методы измерений

Амплитудный теневой метод (рис. 2.8, а) основан на регистрации уменьшения амплитуды прошедшей волны (так называемого сквозного сигнала) под влиянием дефекта, затрудняющего прохождение сигнала и создающего звуковую тень. При этом признаком обнаружения дефекта служит ослабление амплитуды сигнала, отраженного от противоположной поверхности. Теневой метод обладает высокой помехоустойчивостью, и амплитуда сигнала имеет

небольшую зависимость от угла направления на дефект. Однако, данный метод не отличается высокой точностью оценки координат дефекта и для проведения измерения требуется двусторонний доступ к рельсу. В методе ультразвуковой фазометрии определяется разность фаз между опорным сигналом на ультразвуковой частоте и отраженным от рельса сигнала, который улавливается пьезокерамическим элементом, обладающим пьезоэлектрическими свойствами [133].

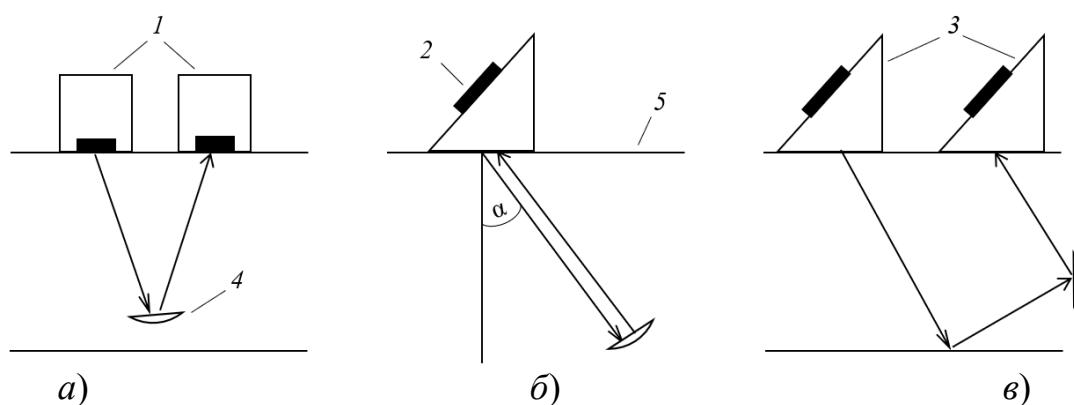


Рисунок 2.8 – Схемы измерения ультразвуковыми методами (а – амплитудный теневой, б – эхо-метод; в – зеркальный): 1 – электрод; 2 – пьезоэлемент; 3 – призма; 4 – дефект; 5 – поверхность рельса

Велосиметрический метод основан на регистрации изменения скорости упругих волн в зоне дефекта. Наличие дефектов влияет на скорость распространения волн и длину пути волн в материале. Это явление фиксируют по сдвигу фазы прошедшей волны или запаздыванию прихода импульса. Импедансные методы основаны на анализе изменения затухания волн в зоне дефекта. В методах свободных колебаний анализируется спектр частот собственных колебаний конструкции после нанесения по ней удара [126]. Эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии (рис. 2.7, б) основан на излучении коротких зондирующих импульсов и регистрации эхо-сигнала, отраженного от дефекта. Зеркальный метод (рис. 2.7, в) применяется для обнаружения вертикальных поперечных трещин. В дельта методе для выявления дефектов используется явление дифракции волн и пока широкого применения в дефектоскопии рельс данный метод не нашел [48].

Группа резонансных методов применяется для дефектоскопии и толщинометрии. Наиболее распространены два метода толщинометрии, применяемые в ручном измерительном инструменте: эхо – импульсный и резонансный. При резонансном методе используется взаимодействие акустических волн, бегущих в среде в различных направлениях, в частности в твердом теле ограниченных размеров, приводит к возникновению стоячих волн на частотах, где возможно возбуждение колебаний. Однако с развитием эхо – импульсного метода резонансный оказался неконкурентоспособен с ним по диапазону прозвучивания, требованиям к шероховатости и геометрии поверхностей и другим параметрам. Принципом измерения толщины ультразвуковым методом является измерение времени между излучением зондирующего импульса и приемом первого отраженного импульса [134].

Акустическо-эмиссионный метод основан на явлении акустической эмиссии. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 22096-2015 акустическая эмиссия может иметь место внутри или на поверхности материалов. Данное явление заключается в спонтанном высвобождении энергии, выражаемом в форме распространения упругих волн. Акустическая эмиссия внутри материала проявляет себя через упругие волны на поверхности материала в широком диапазоне частот (обычно от 20 кГц до 1 МГц). Упругие волны, связанные с процессами акустической эмиссии, обнаруживают с помощью специальных преобразователей движения точек на поверхности материала в электрические сигналы. Эти сигналы затем подлежат соответствующему преобразованию и обработке для получения информации о состоянии рельсовой колеи и раннего обнаружения процессов потери её механической и структурной целостности. Форма электрического сигнала зависит от путей распространения и форм акустических волн, генерируемых внутри и/или на поверхности материала. Поэтому сигналы акустической эмиссии от одних и тех же источников могут быть разными в зависимости от путей прохождения акустических волн.

В процессе обработки стандартных параметров, таких как амплитуда, длительность, время нарастания или время спада импульса акустической эмиссии,

проводится анализ структурных изменений материала рельса. К основным достоинствам акустических методов можно отнести высокую чувствительность, широкую область применения, а также возможность определения не только размеры, но и местоположения дефекта. Недостатком является регистрация большого числа шумовых сигналов, осложняющих процедуру обработки информации [135].

Методом акустоупругости определяются механические напряжения в нагруженном рельсе путем измерения временной задержки распространения ультразвуковой волны. Для этого на поверхность катания головки рельса в области над шейкой устанавливаются измеритель температуры рельса и два пьезоэлектрических преобразователя, один из которых является излучателем, а другой – приемником, оси которых ориентированы навстречу друг другу [136]. Величину механических напряжений определяют по результатам измерения временных задержек прихода ультразвукового сигнала к приемникам от начальных измерений. При этом измерение начального напряжения осуществляют преобразователем, установленным на ненагруженном отрезке рельса. Дополнительно с помощью преобразователей продольной волны измеряют временные задержки прихода ультразвукового сигнала в зависимости от высоты рельса [137]. Механические напряжения рельсов определяют по формуле:

$$\sigma = \frac{(\tau_p^{LT} - \Delta\tau^{LT})}{k(\tau_p^L - \Delta\tau^L)} - \frac{\tau_0^{LT}}{k\tau_0^L}, \quad (2.12)$$

где τ_0^L , τ_p^L – время распространения сигнала продольной волны в ненагруженном отрезке рельса и в рельсовой нити, соответственно;

τ_0^{LT} , τ_p^{LT} – время распространения сигнала от излучателя к приемнику в ненагруженном отрезке рельса и в рельсовой нити, соответственно;

$\Delta\tau^L$ – разность времени распространения сигнала в преобразователях;

$\Delta\tau^{LT}$ – разность времени распространения сигнала от излучателя к приемнику в дополнительных преобразователях;

k – акустоупругий коэффициент.

К достоинствам акустических методов можно отметить дешевизну и компактность аппаратуры, малое время измерения, отсутствие ограничения на нижнюю границу частотного диапазона, высокую точность измерения низкочастотных вибраций [99]. К недостаткам акустических методов относится необходимость разработки специальных методик контроля определяемых параметров рельсовой колеи, необходимость сравнительно высокой чистоты поверхности контролируемых рельсов и наличие мертвых зон, снижающих эффективность такого контроля. Использование ультразвуковых методов ограничиваются невысокой разрешающей способностью, сильным затуханием ультразвука в воздухе [100], зависимостью от состояния атмосферного давления, температуры, что негативно сказывается на точности результатов измерений [138].

2.3 Магнитные методы дефектоскопии рельсов

Магнитный метод служит для обнаружения скрытых дефектов в рельсах посредством их намагничивания с помощью магнитного поля движущего электромагнита. Сталь, из которой изготовлены рельсы, относится к группе ферромагнитных материалов. Вследствие присутствия в атоме стали элементарных частиц магнетизма, которые взаимодействуют между электронами соседних атомов, возникает неоднородность магнитного поля в зоне дефекта, вызванная ферромагнитными свойствами рельсов. Для обнаружения дефектов в рельсах используется межполюсный магнитный поток, который формируется с помощью электромагнита, полюсы которого направлены к рабочей поверхности рельсов. Электромагнитные потоки в рельсах разветвляются на две части – межполюсную и заполюсную, частично рассеиваясь [48].

В основе магнитного метода обнаружения дефектов лежит признак намагниченного поля. Если существует магнитный заряд, то он создает магнитное поле, направленное наружу из центра участка рельса, в котором имеется дефект (рис. 2.9). Локальное магнитное поле рассеяния дефекта возникает в зоне дефекта вследствие поляризации его границ. Суммарное поле

магнитных зарядов направлено в ту сторону, что и внешнее поле H_0 , усиливая его действие. Максимальное значение напряженности сосредоточено непосредственно над дефектом. При этом признаком дефектности рельса служит наличие намагниченного поля H_d над его поверхностью [48].

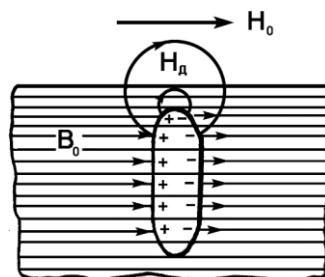


Рисунок 2.9 – Схема поляризации стенок дефекта в рельсе

При магнитном контроле применяют полюсное, циркулярное и комбинированное намагничивания рельсов. В вагонах-дефектоскопах используется продольное намагничивание с помощью электромагнита. Продольное намагничивание осуществляется с помощью постоянного магнита, электромагнита или соленоида. При продольном намагничивании выявляются поперечные дефекты, которые направлены ортогонально направлению магнитного потока [139].

Обнаружение дефектов в рельсах токовихревым методом базируется на законе электромагнитной индукции, по которому переменное магнитное поле возбуждает в них вихревые токи. Вихревые токи, как всякие электрические токи, создают магнитное поле, которое в отличие от катушек является вторичным. По закону Ленца вторичное переменное поле в каждый момент времени противоположно первичному и противодействует ему. Трещина или другой дефект, нарушающие сплошность поверхностного слоя металла, являются препятствием для вихревых токов. Такое препятствие оказывает действие, сходное с действием резкого уменьшения электрической проводимости металла, что соответствующим образом отражается на электрических параметрах намагничивающей катушки. Толщина металла оказывает влияние лишь в тех случаях, когда она меньше глубины проникновения вихревых токов в данном

металле. В зоне трещин применяется токовихревая система, вытянутую вдоль трещин. Токовихревая система такой конструкции применяется в дефектоскопии для контроля крестовин и ж/д стрелочных переводов [48].

2.4 Радиоволновые методы измерений

Радиоволновые методы измерения обладают высокой надежностью и низкой стоимостью применения. Данные методы являются безинерционными и допускают бесконтактные измерения различных перемещений радиоприемника. Контролируемые объекты могут быть как проводниками, так и диэлектриками с потерями или без потерь [99]. Радиоволновые методы могут использоваться в условиях полного отсутствия или недостаточной оптической видимости и высоких температур [101], в частности для объектов сложной формы, каковой является рельсовая колея.

С помощью радиотехнических средств и радиоволновых методов измерения можно осуществлять привязку измеренных параметров рельсовой колеи к реперной или одной из глобальных систем координат (географическая, геоцентрическая, ортодромическая) [140]. Неавтономная радионавигационная система включает в себя радиолинию, состоящую из радиопередатчика, передающей антенны, трассы распространения радиоволн, приемной антенны и радиоприемника. Радиопередатчик устанавливается в радионавигационной точке – пункте с известными координатами. Таких точек обычно несколько, и они могут располагаться на Земле, либо на искусственных спутниках Земли [141]. Радиоприемник находится на путеизмерительном комплексе, местоположение которого требуется определить. Время распространения сигнала до радиоприемника используется для измерения дальности, а частота колебаний, согласно эффекту Доплера, несет информацию о радиальной скорости радиоприемника. На основе принципа направленного излучения и приема радиоволн измеряются угловые координаты радиопередатчика. [142]

Радиоволновые методы основываются на физических свойствах электромагнитных волн, используемых в качестве носителей сигнала.

Электромагнитные волны распространяются в однородной среде прямолинейно и с постоянной скоростью, определяемой по формуле:

$$v = 1/\sqrt{\epsilon_a \mu_a}, \quad (2.13)$$

где ϵ_a , μ_a — абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды распространения радиоволны.

Дальность L и время распространения радиоволны прямо пропорциональны. Если измерено время t прохождения волны между источником и приемником радиоволн, то расстояние между ними определяется по формуле:

$$L = vt. \quad (2.14)$$

Поверхность положения радиоприемника представляет собой геометрическое место точек в пространстве, отвечающих условию постоянства параметра. Пересечение двух поверхностей положения дает линию положения, которая является геометрическим местом точек с постоянными значениями двух параметров. Местоположение радиоприемника в пространстве находится как точка пересечения трех поверхностей положения. Для определения его местоположения применяют позиционные методы [101]. В зависимости от видов используемых линий положения различают следующие позиционные методы: пеленгационный, дальномерный, разностно-дальномерный, дальномерно-пеленгационный. Пеленгационный и разностно-дальномерный метод широко применяют в радионавигации для определения собственного положения радиоприемника относительно радиомаяков [141].

Пеленгационный метод (рис. 2.10) основан на использовании направленных свойств антенн. Этот метод реализуется посредством радиопеленгатора, установленного в точке O , и двух радиомаяков, расположенных в опорных пунктах P_1 и P_2 с базой b . Радиопеленгатор представляет собой радиоприемное устройство с направленной антенной, а радиомаяк – передающее устройство с ненаправленной антенной. Пеленгатор измеряет азимуты α_1 радиомаяка P_1 и α_2 радиомаяка P_2 . Поскольку линии положения имеют постоянные пеленги углов α_1 , α_2 к направлению юг – север, то они пересекаются в искомой точке O [143].

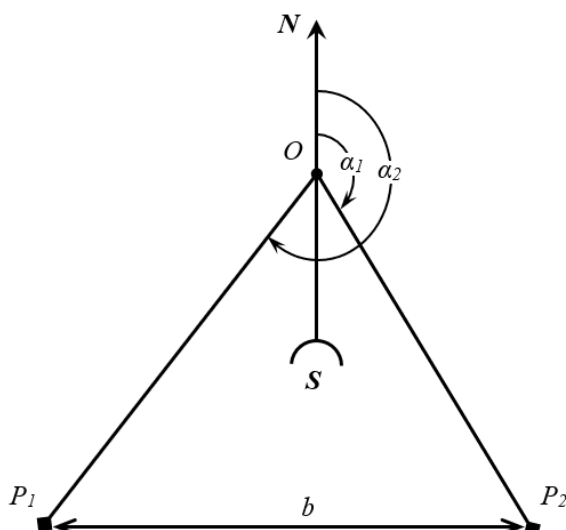


Рисунок 2.10 – Пеленгационный метод определения местоположения радиопеленгатора

Разностно-дальномерный метод (рис. 2.11) требует наличия на плоскости двух пар опорных пунктов P_1, P_2 и P_2, P_3 . Каждая из пар используется для получения линии положения в виде гипербол с фокусами в опорных пунктах. Эти линии строятся как геометрические места точек с постоянной разностью расстояний: $l_1 - l_2 = const$ от P_1 и P_2 ; $l_3 - l_2 = const$ от P_2 и P_3 . Точка пересечения гипербол совпадает с точкой O в которой расположен радиоприемник [143].

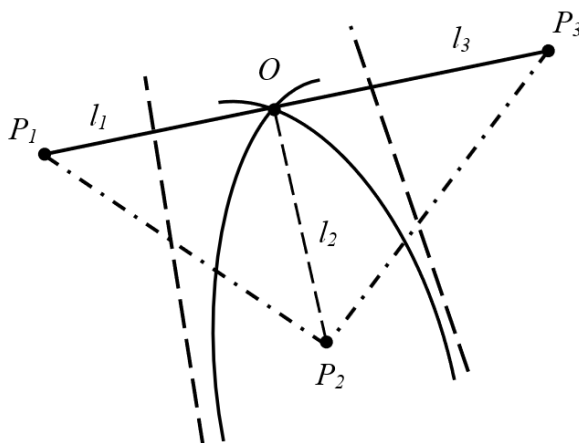


Рисунок 2.11 – Разностно-дальномерный метод определения местоположения радиопеленгатора

Дальномерный метод (рис. 2.12) заключается в определении местоположения радиоприемника, находящегося в точке O , путем измерения расстояния между ним и опорными пунктами P_1, P_2 . Каждая поверхность положения представляет собой сферу с центром в опорном пункте и радиусом, равным дальности. Поскольку

точки O , P_1 , P_2 находятся в одной плоскости, то поверхности положения переходят в окружности радиусами P_1O и P_2O пересекаясь в точке расположения радиоприемника O . Имеется еще одна точка пересечения окружностей, но неоднозначность измерений можно исключить [143].

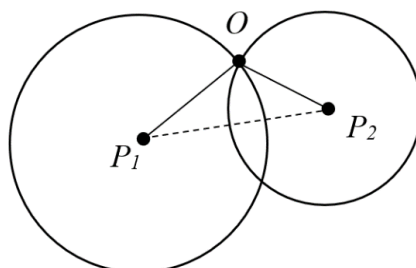


Рисунок 2.12 – Принцип определения местоположения радиоприемника дальномерным методом

Дальномерно-пеленгационный метод определения местоположения радиопеленгатора, находящегося в точке O , сводится к измерению трех координат: наклонной дальности, азимута и угла места. Для однозначного определения направления на радиомаяк, находящегося в точке P , необходимо осуществить пеленгацию в двух пересекающихся плоскостях – горизонтальной и вертикальной (рис. 2.13). При этом азимут радиомаяка определяет угол α между северным направлением географического меридиана и проекцией на горизонтальную плоскость направления на радиомаяк, а угол места β определяет направление между радиомаяком и горизонтальной плоскостью, в которой лежит точка O . Наклонная дальность от радиопеленгатора до радиомаяка определяется расстоянием r [142].

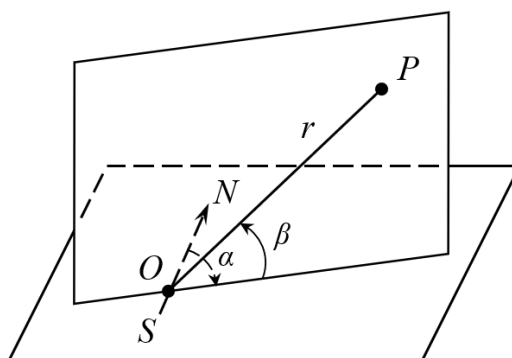


Рисунок 2.13 – Принцип определения местоположения радиопеленгатора дальномерно-пеленгационным методом

Дальномерно-пеленгационный метод наиболее характерен для радиолокации, а остальные методы для радионавигации. Однако, местоположение радиопеленгатора иногда также определяют методами радиолокации из двух и более точек. Например, если радиолокационная станция производит пеленгацию с большими ошибками, то прибегают к дальномерному методу, а если дальномерную часть радиолокационной станции нельзя использовать из-за сильных помех или вследствие применения пассивной радиолокации, то применяют пеленгационный метод [143].

Физической основой радиолокации является рассеяние радиоволн объектами, отличающимися своими электрическими характеристиками (электропроводностью, электрической и диэлектрической проницаемостью) от соответствующих характеристик окружающей среды при их облучении. Интенсивность рассеяния или отражения радиоволн зависит от степени отличия электрических характеристик объекта и среды, от формы объекта, от соотношения его размеров, длины волны и от поляризации радиоволн. Результирующее вторичное электромагнитное поле состоит из поля отражения, распространяющегося в сторону облучающего первичного поля, и теневого поля, распространяющегося за объект (в ту же сторону, что и первичное поле) [144].

Радиолокационный метод дефектоскопии основан на эффекте изменения частоты собственных колебаний рельса в зависимости от наличия и размера дефекта. Любой дефект приводит к смещению частоты собственных колебаний рельса, при этом разные типы дефектов оказывают различное влияние на смещение данных частот, что вызывает образование новых колебательных мод из-за стоячих волн [145]. Диагностика рельсов на наличие дефектов может осуществляться и с помощью параметрического радиолокационного метода путем регистрации частот его собственных механических колебаний [146]. Кроме этого, методы радиолокации также используются для обнаружения посторонних предметов, находящихся на рельсовой колее, которые могут представлять опасность для движения поездов и маневровой работы [147].

2.5 Основные принципы формирования и обработки изображений

С физической точки зрения между световыми и другими электромагнитными волнами, например радиоволнами, не существует отличий, за исключением того, что световые волны имеют значительно более высокую частоту. Оптическое излучение и радиоволны имеют единую электромагнитную природу [148]. Спектр электромагнитных волн (рис. 2.14) простирается от нескольких тысяч километров до космических лучей с длинами волн в триллионную часть метра. Использование того или иного диапазона частот спектра для передачи информации определяется параметрами среды распространения электромагнитных волн, в частности, показателем затухания и стабильностью постоянного распространения [149].

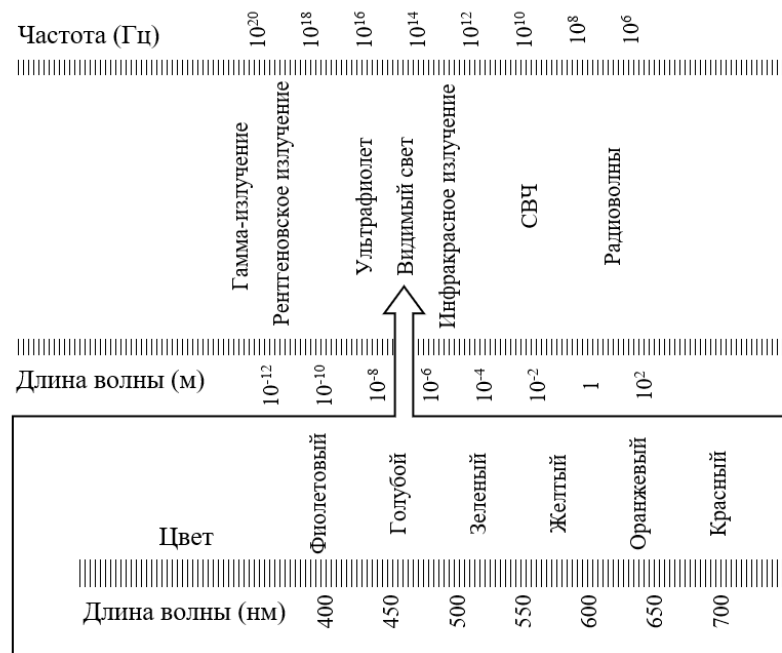


Рисунок 2.14 – Спектр электромагнитных волн

В пределах указанных диапазонов находятся ультрафиолетовое излучение, видимый свет и ИК излучение. Термин «видимый свет» определяется как излучение, которое оказывает влияние на зрительные рецепторы и включает излучение от 390 до 770 нм, т.е. от фиолетового до красного цвета, охватывая тем самым лишь малую часть электромагнитного спектра. Формально свет не имеет цвета, но разные длины волн, возбуждая рецепторы глаза, создают цветовые образы, что позволило использовать это свойство световой волны для реализации способов передачи информации на расстоянии прямой видимости [149].

Свет от солнца или искусственного источника света сначала отражается от объектов, а затем проходит через объектив оптико-электронного устройства и попадает на чувствительный фотоэлемент (датчик изображения), который преобразует свет в электрическое напряжение. Полученная таким образом информация обрабатывается для исключения различных помех и корректировки значений цвета. Объектив имеет сложную конструкцию, состоящую из набора стеклянных линз, преломляющих и фокусирующих свет. С его помощью осуществляется фокусировка на конкретном объекте [95].

Источники света подразделяются на две основные группы:

- первичные источники (солнце, лампа, огонь), которые сами излучают свет;
- вторичные источники – объекты, которые только отражают свет.

Сила света характеризует световую энергию первичного источника, излучающего свет во всех направлениях. Сила света, ограниченная пределами некоторого телесного угла, называется световым потоком. Световой поток, испускаемый источником с силой света внутри единичного телесного угла (1стерадиан), определяется по формуле:

$$F = I\omega, \quad (2.15)$$

где I – сила света, ω – телесный угол.

Освещенность поверхности рельсовой колеи определяется отношением светового потока, приходящегося на площадь её освещаемой поверхности:

$$E = F/S. \quad (2.16)$$

Если поверхность рельса расположена под некоторым углом θ к падающему свету, то формула принимает вид:

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2}, \quad (2.17)$$

где d – расстояние до источника света.

Яркостью характеризуется свечение поверхности первичного или вторичного источника света. Яркость зависит от силы света, отраженного самой поверхностью рельса, и от угла наблюдения, поэтому рассчитывается на единицу перпендикулярной направлению обзора поверхности:

$$L = I/S. \quad (2.18)$$

Если на поверхность рельса световой поток падает под углом θ к нормали, то яркость определяется по формуле:

$$L = \frac{F \cos \theta}{S}. \quad (2.19)$$

Яркость освещаемого рельса зависит от силы источника света и от отражательной способности поверхности этого рельса. Отражательную способность рельса выражает коэффициент отражения:

$$\rho = E/L. \quad (2.20)$$

При одинаковом уровне освещенности, но различных коэффициентах отражения, рельсы будут иметь разную яркость. Величина освещенности фотоприемника зависит от средней яркости рельсов L , собирающей способности объектива, выраженной через F -число и коэффициента пропускания объектива τ :

$$E_{\text{пзс}} = \frac{L\tau\pi}{4F^2}. \quad (2.21)$$

F -число объектива связано отношением:

$$[F\text{-число}] = d/f, \quad (2.22)$$

где d – диаметр раскрытия диафрагмы;

f – фокусное расстояние объектива.

F -число характеризует яркость сформированного изображения. Чем оно больше, тем меньше раскрыта диафрагма объектива и тем меньше света проходит через него. Стандартные значения F -числа задаются последовательностью чисел: $\{1,0; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; 32; 44\}$. Для каждого последующего значения раскрытие диафрагмы будет в два раза меньше, чем у предыдущего и диафрагма будет пропускать в два раза меньше света. Поскольку объектив задерживает часть световой энергии, то для учета уровня пропускания света применяются T -числа:

$$[T\text{-число}] = [F\text{-число}] / \sqrt{\xi}, \quad (2.23)$$

где $\xi < 1$ – коэффициент пропускания света объективом.

При фокусировке на рельсе вся плоскость, проходящая через данный рельс и перпендикулярная оптической оси, будет находиться в фокусе. Часть рельса,

расположенная рядом с фокусируемой областью, также находятся в зоне резкости, которая называется глубиной резкости. Глубина резкости зависит от F -числа. Чем больше физические размеры матрицы, тем больше размер отверстия объектива. Если диафрагма открыта полностью F -число принимает наименьшее значение. Принципиальная схема определения глубины резкости оптической системы изображена на рисунке 2.15.

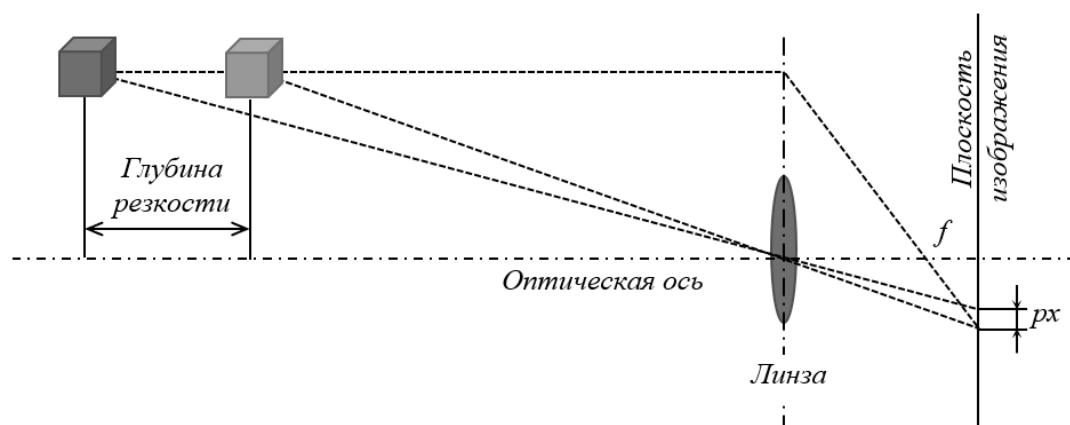


Рисунок 2.15 – Принципиальная схема определения глубины резкости

Допустимое пятно рассеяния – это пятно проекции зоны резкости. Поскольку пиксел ПЗС-матрицы является наименьшим элементом изображения, то допустимый размер пятна рассеяния принимается равным реальному размеру пиксела. При этом все элементы рельсовой колеи, в пределах пятна рассеяния будут выглядеть одинаково резкими. Отсюда следует, что размер допустимого пятна рассеяния косвенно зависит от разрешения ПЗС-матрицы [94].

В объективах оптико-электронных устройств не применяются обычные линзы, поскольку они имеют недостатки, проявляющиеся на изображении объектов в виде оптических искажений (аббераций). Объективы оптико-электронных устройств имеют более сложную конструкцию, позволяющую компенсировать оптические искажения с помощью дополнительных оптических линз. Наиболее часто на изображениях проявляются сферическая и хроматическая абберации. Причиной появления сферической абберации являются монохроматические лучи, которые вследствие больших размеров объекта не имеют единого фокуса и преломляются в линзе под разными углами к оптической оси в

зависимости от дальности до точки съемки. Форма преломляющих поверхностей линзы не обеспечивает одинаковую фокусировку всех лучей светового пучка, падающего на линзу. В результате те части объекта, которые находятся ближе к оптической оси находятся в границах резко изображаемого пространства, а те части объекта, которые расположены на периферии области обзора оптико-электронного устройства оказываются размытыми. Данный эффект может быть устранен путем принудительного сужения поля зрения оптико-электронного устройства и регистрации только тех лучей, которые проецируются в центральную область фотоприемной матрицы. Однако этот способ не устраняет хроматическую aberrацию для световых лучей, имеющих разную длину волны и преломляющихся по-разному, проходя через линзу. Хроматическая aberrация возникает в результате зависимости показателя преломления среды от частоты световой волны, что проявляется в виде дисперсии среды. При этом фокусное расстояние для ультрафиолетового диапазон длин волн будет меньше, чем для инфракрасного излучения [150].

Помимо основных aberrаций в объективах наблюдаются косметическая aberrация, дисторсия и астигматизм. Косметическая aberrация объектива – это внеосевая aberrация, которая возникает вследствие наклона оптических лучей от объекта к оптической оси. В результате изображение сферического объекта будет проецироваться в виде эллипса. Размеры пятна косметической aberrации зависят от дальности объекта и угла вхождения проецирующих лучей к оптической оси объектива, а также размера входного отверстия объектива. При дисторсии отдельные части объекта имеют разный масштаб на изображении в зависимости от угла вхождения оптических лучей. Изображение точечного объекта будет отличаться от изображения источника в идеальной оптической системе. Так, например объект в форме квадрата будет иметь изображение подушки или бочки в случае положительной или отрицательной дисторсии. Если изображение точечного объекта линейно растягивается, фокусируясь на некоторой искривлённой поверхности, то это проявление астигматизма. Оптические лучи, идущие от объекта в разных плоскостях, искажаются на изображении. Величина астигматизма

имеет квадратичную зависимость от угла вхождения оптических лучей в объектив относительно оптической оси [150].

Изображение рельсовой колеи в фотокамере строится на плоскости изображения фотоприемника с помощью объектива (рис. 2.16), представляющего собой сложную оптическую систему собирательных и рассеивающих линз, центры кривизны сферических поверхностей которых расположены на главной оптической оси [79]. Особенности построения изображения рельсовой колеи объективом основаны на следующих законах геометрической оптики: прямолинейном распространении света, независимости световых пучков, отражения света от зеркальной поверхности, преломления света на границе двух прозрачных сред, обратимости распространения световых лучей [151]. Геометрическая оптика позволяет сложную оптическую систему идеального объектива заменить упрощенной моделью.

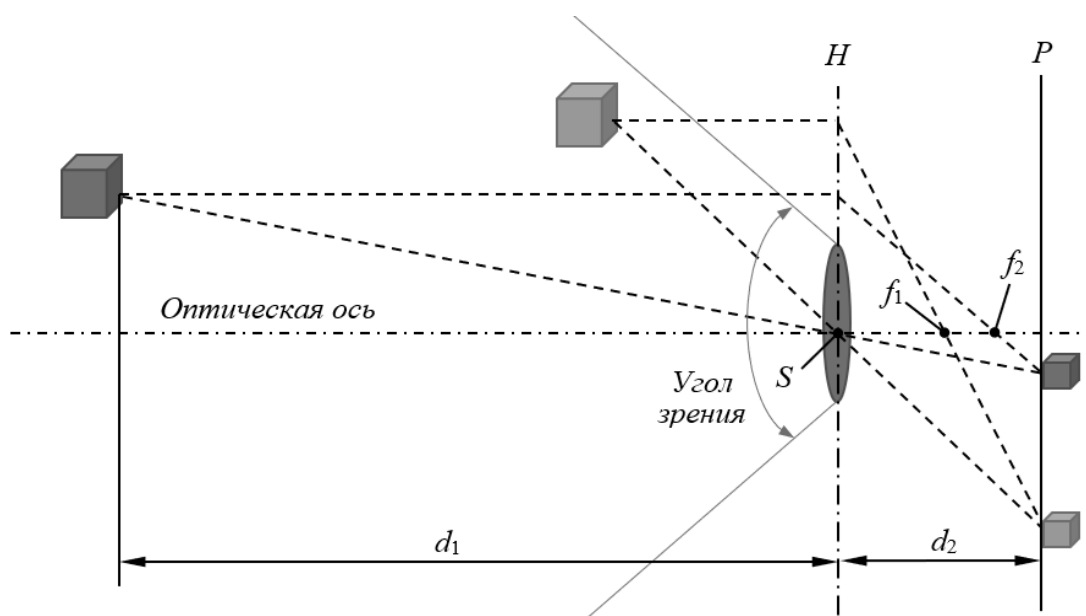


Рисунок 2.16 – Принципиальная схема проектирования рельсов на плоскость изображения

При фотографической съемке, когда расстояние d_1 значительно больше расстояния d_2 , все точки фотографируемой рельсовой колеи достаточно резко изображаются на плоскости изображения P , которая расположена перпендикулярно оптической оси и проходит через задний главный фокус. Плоскость изображения P располагается вблизи главного фокуса объектива f_2 на

фокусном расстоянии d_2 от точки фотографирования S , находящейся на пересечении главной оптической оси с главной плоскостью объектива [85]. Проектирующие лучи от различных участков рельсовой колеи направляются к передней узловой точке объектива и, выходя из задней узловой точки, идут далее к плоскости изображения. Для идеального объектива направление выходящих из задней узловой точки проектирующих лучей постоянно. Поэтому с геометрической точки зрения можно считать переднюю и заднюю узловые точки совпадающими [79]. Таким образом, изображение рельсовой колеи на плоскости изображения представляет собой центральную проекцию рельсовой колеи, которая строится прямолинейными проектирующими лучами, направленными от рельсовой колеи к центру проектирования.

2.6 Обобщенная технология компьютерного зрения

Под компьютерным (техническим) зрением понимается вид деятельности, производимый техническими устройствами (компьютерами). Для извлечения данных из оптических изображений в компьютерном зрении применяются статистические методы и используются модели, построенные с помощью геометрии, физики и теории обучения [152]. Компьютерное зрение основывается на обобщении информации, полученной из множества изображений и распознавании объектов на основе полученной информации [153].

В состав СКЗ входят одно или несколько оптико-электронных устройств, с помощью которых из потока электромагнитного излучения извлекается информация о форме, размерах, положении и тепловой энергии объекта измерения путем его преобразования в электрический сигнал и последующей обработки. Информация об объекте измерения переносится оптическим излучением в оптико-электронное устройство, состоящее из оптоэлектронного преобразователя, осветительной системы и выходного устройства. Оптоэлектронная часть преобразователя может быть представлена в виде оптрона, состоящего из источника электромагнитного излучения (ИЭИ), оптической среды (ОС), и фотоприёмного устройства (ФУ), принимающего излучение [154]. Первичная

обработка информации сопровождается преобразованием энергии оптического излучения в электрическую энергию в следующей последовательности (ИЭИ-ОС-ФУ). Обобщенная структура СКЗ представлена на рисунке 2.17.

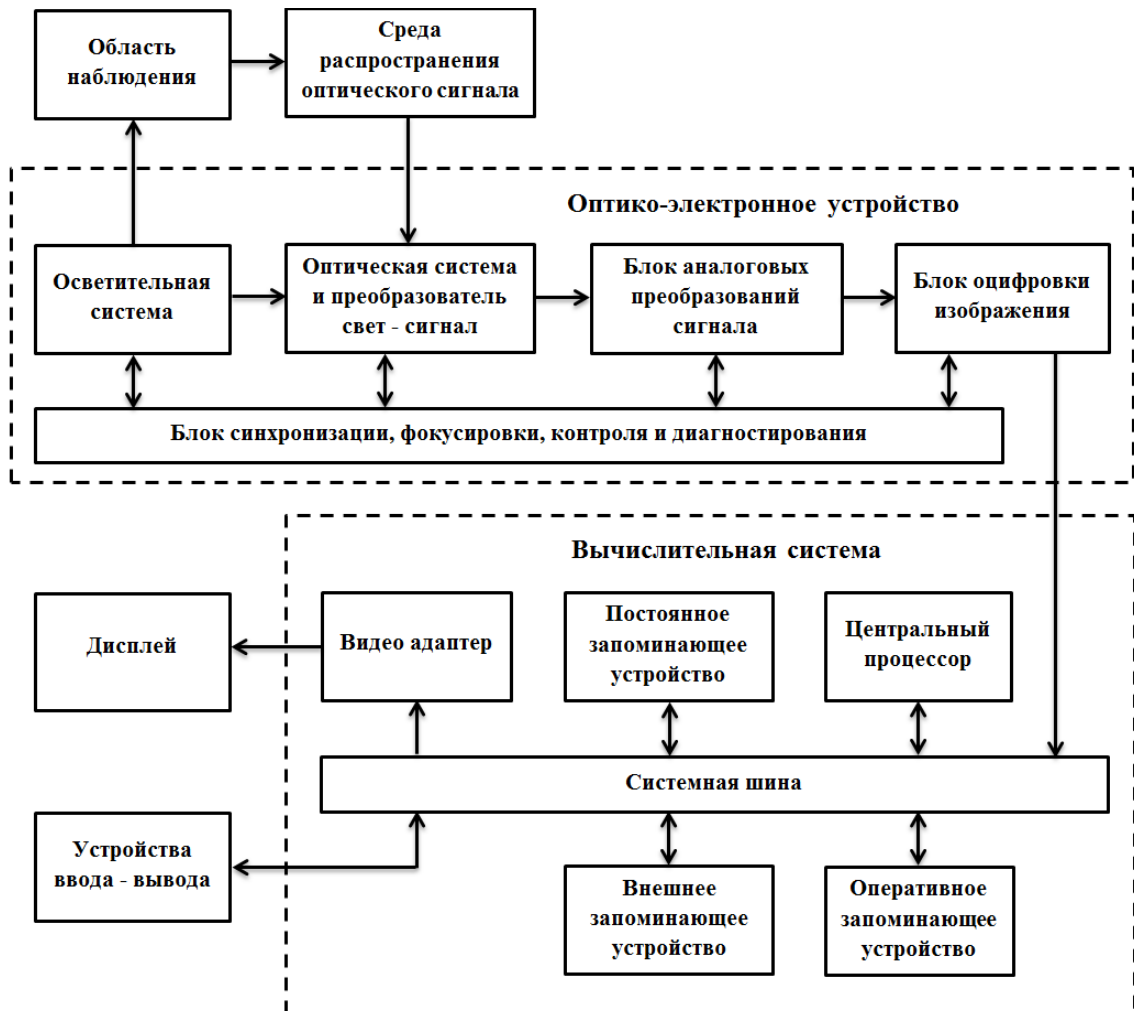


Рисунок 2.17 – Обобщенная структура системы компьютерного зрения

Весь программно-аппаратный состав СКЗ состоит из регистрирующих блоков, например видеокамер, и вычислительно-управляющих блоков (рис. 2.18). В зависимости от задачи, регистрирующие и вычислительно-управляющие блоки объединяются в различных сочетаниях на основе унифицированных интерфейсов [90]. Программное обеспечение формируется на основе унифицированного каркаса для работы СКЗ в реальном времени. Он представляет собой крупномасштабный программный шаблон (Application Framework), который определяет структуру и основные возможности конкретного приложения [155]. Данный шаблон повышает степень повторного использования программных модулей и типовых решений,

сокращая временные затраты на разработку программного обеспечения. С его помощью был решён широкий круг прикладных задач, начиная от тепловизионной системы помощи водителю, до системы оперативного картографирования и автоматизации контроля процессов стыковки космических аппаратов [156].

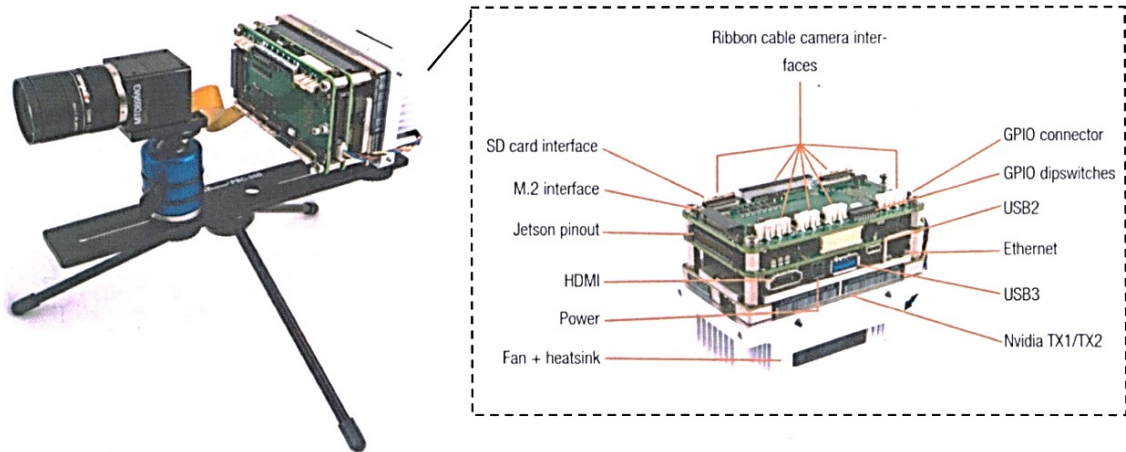


Рисунок 2.18 – Система компьютерного зрения на аппаратной платформе с GPU Nvidia

В некоторых случаях СКЗ также включает устройство для искусственной подсветки объектов измерения, создающих электромагнитное излучение [157] [158]. Существует большое количество явлений, которые необходимо учитывать при формировании изображения объекта измерения и определении его признаков, включая вынужденное излучение (флуоресценцию), отражение, поглощение и рассеяние излучения. Эти явления зависят от оптических свойств материала наблюдаемого объекта и от структуры его поверхности. Оптическая система накапливает излучение, испускаемое объектами, чтобы проявить их на изображении. Первостепенной задачей является установление количественного соотношения между интересующим признаком объекта и испускаемым или отражаемым им излучением. Это необходимо для отображения интересующего признака объекта с помощью других параметров с минимальным возможным искажением его яркости.

На электромагнитное излучение могут влиять дополнительные процессы. Положение объекта может быть смещено в случае преломления излучения, испускаемого в его направлении. Рассеяние и поглощение падающих и

испускаемых лучей приводит к ослаблению потока излучения, вызываемого не самим объектом, а средой распространения оптического сигнала, которая искажает его. Для достижения высокой точности измерений важно минимизировать влияния среды, чтобы отраженное излучение было непосредственно связано с интересующим параметром объекта измерения. Также необходимо подобрать излучение наиболее подходящего вида и диапазона длин волн.

Очевидно, что сложность процедур количественной визуализации сильно зависит от задачи обработки изображения. Если целью является только точность измерения параметров, то достаточно обеспечить равномерное освещение объектов. В этом случае не требуется устанавливать количественные соотношения между интересующими признаками объектов и отраженным ими излучением. Однако, если необходимо измерить определенные параметры объекта, такие, как плотность, температура, ориентация поверхности или концентрация химического вещества, то необходимо знать точное соотношение между выбранным параметром и излучением. Простым примером является распознавание объекта путем определения спектральной зависимости его коэффициента отражения. Для правильной работы системы формирования изображения необходимо установить зависимости интересующих параметров объекта от энергетической яркости и условий освещения объекта измерения, а также энергетической освещенности фотоприемника оптической системы от яркости этого объекта [159].

Фактически, оптоэлектронное устройство, с помощью которого формируется изображение железной дороги, является угловым прибором. Каждая точка железной дороги проецируется в точку действительного изображения, расположенную за фокусом объектива данного устройства, посредством отражаемого света. Объектив состоит из набора линз рассчитанных для взаимной компенсации аберраций и собранных в единую систему внутри оправы [160]. Таким образом, координата точки по каждой оси на изображении является функцией угла между оптической осью и проекцией луча, формирующего эту точку на плоскость, образуемую оптической осью и перпендикуляром к ней, соответствующим рассматриваемой оси изображения.

В СКЗ большое распространение получили методы стереовидения, триангуляции и покадровой обработки видеоизображения. Метод стереовидения основан на применении двух камер, в поле зрения каждой из которых попадает характерная точка железной дороги. При этом данные камеры находятся на известном расстоянии друг от друга и оптические оси их объективов коллинеарны, а линия, соединяющая фокусы объективов перпендикулярна обеим оптическим осям [79]. Тогда параллельные ей линии, проходящие через оптические оси и попадающие в поле зрения обеих камер, совпадают с горизонтальной осью графического изображения [161]. Если характерная точка определена на каждом изображении, ее дальность можно найти путем решения эквивалентного треугольника (рис. 2.19).

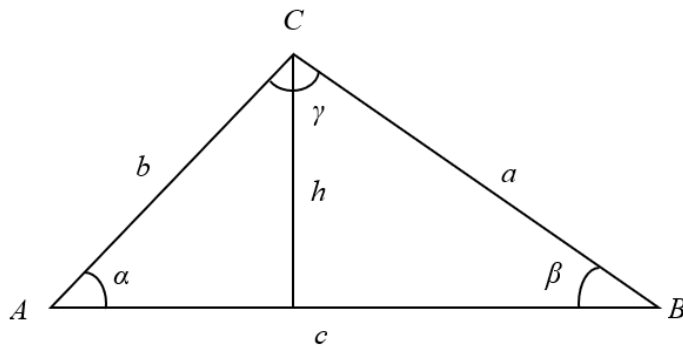


Рисунок 2.19 – Эквивалентный треугольник: A, B – расположение камер, C – проекция точки в пространстве предметов на общую плоскость изображений

Углы (α, β) при основании эквивалентного треугольника определяются по изображению с каждой камеры. При этом расстояние между камерами известно. Высота треугольника соответствует расстоянию от линии, соединяющей центры изображений, до проекции точки в пространстве предметов на плоскость, в которой лежат оптические оси объективов, и определяется по формуле [79]:

$$h = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}. \quad (2.24)$$

Угол γ определяется по вертикальной координате Y на графическом изображении, полученном с любой камеры или по среднему значению. По этому углу вычисляются возвышения точки в пространстве над своей проекцией на плоскость h , в которой лежат оптические оси объективов. Искомое расстояние L до

самой точки в пространстве предметов может быть рассчитано по формуле:

$$L = \frac{h}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (2.25)$$

В стереовидении одним из проблемных мест является определение зависимости между координатами на изображении и угловыми координатами пришедшего от изображаемой точки оптического луча. Еще одной проблемой является само определение общей точки на двух изображениях. Наиболее прямолинейным способом решения данной проблемы является непосредственное распознавание образов по двум изображениям. Однако, данная задача является достаточно сложной, а ее решение непосредственно по изображениям ресурсоемко, также возникает значительная погрешность определения координат. Кроме этого, возникает проблема установления соответствия друг другу детектированных на разных камерах изображений одного объекта [161].

В задаче панорамного фотографирования для совмещения смежных кадров необходимо знать параметры проективных искажений. Широкое применение имеют методы оценки параметров проективных искажений по набору сопряженных точек. В связи с этим возникает задача их поиска. Существует много подходов к решению данной задачи. Большинство алгоритмов поиска сопряженных точек включают в себя три основных шага: обнаружение признаков – на этом шаге выделяются наиболее информативные точки (кандидаты); совмещение признаков – кандидаты образуют пары; окончательное совмещение – остаются наиболее вероятные пары кандидатов [162].

Корреляционный алгоритм поиска сопряженных точек [163] состоит из поиска и отсева сопряженных точек. Перед началом поиска устраняются нелинейные искажения, вносимые объективом для улучшения результата совмещения [164]. В целях повышения точности оценки угла поворота выполняется накопление нормированных корреляционных функций в ограниченной полосе частот, верхняя частота которой зависит от свойств амплитудных спектров совмещаемых изображений, и используется полиномиальная интерполяция дискретной оценки угла поворота в области ее

максимума. В этом случае точность оценки угла поворота возрастает. Применение данного алгоритма улучшает качество совмещения изображений за счет увеличения количества обнаруженных сопряженных точек и уменьшения среднеквадратической ошибки их совмещения [165].

Также распространен метод триангуляции в котором применяется подсветка объекта измерения лазерным лучом или разверткой лазерного луча для детектирования точек, принадлежащих этому объекту на видеоизображении и определения расстояний до них [166] [167] [168]. Линия лазерной развертки на изображении имеет ломанный вид. Участки между разрывами линии на изображении соответствуют отдельным объектам, подсвеченным лазерной разверткой. Это объясняет принцип выделения отдельных объектов на изображении и способ определения их видимого размера. Кроме того, при удалении объекта измерения изображение пересечения объекта с плоскостью лазерной подсветки удаляется от последней, что позволяет определить расстояние до идентифицированного объекта [161].

Расчетная часть триангуляционного метода практически повторяет расчетную часть метода стереовидения. Дополнительным преимуществом такого подхода является то, что нет необходимости в использовании двух камер. Вместо этого развертка организуется так, чтобы в эквивалентном треугольнике она исходила из основания и совпадала с высотой [161]. Тогда высота эквивалентного треугольника определяется из следующего выражения путем измерения угла α и расстояния l от вершины A до высоты h (от фокуса камеры до лазерной развертки):

$$h = l \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.26)$$

Основной сложность заключается в том, чтобы детектировать и определить расстояния только до лучей в плоскости лазерной развертки. Чтобы детектировать обратный луч в линии развертки на изображении необходимо достаточное освещение и высокая отражающая способность поверхности объекта измерения, чтобы. Стереопара изображений позволяет обнаружить линии развертки и убрать ложные отражения, но сильно зависит от априорной информации об объекте измерения [169]. Можно для проверки использовать изображения с обеих камер

[170]. При этом робастность метода обеспечивается посредством проверки полученной дальнометрической информации и независимых преобразований с каждой камеры. Данный метод хорошо подходит для определения дальности объектов, но применяется в основном в дальномерах или профилометрах. В случае применения лазерного лидара, тот выполняет функцию видеодатчика и лазерного устройства, обеспечивая при этом более высокую скорость и точность сканирования [171].

Другим ограничением является то, что в результате вторичных отражений появляются множественные изображения лазерной развертки. В результате все измерения без разбора при вторичных отражениях не учитываются. Устранение неверной информации может быть достигнуто путем взаимодействия независимых сканирующих устройств [172], посредством двух лазерных проекторов и одной камеры. Это позволит дополнительно к робастному измерению дальности получить нормали поверхностей. Недостатком такого метода является то, что определяется расстояние только до точки пересечения полос, таким образом потребуется гораздо больше времени на получение полной карты расстояний [161].

В некоторых других методах, представляющих интерес, предлагается использовать одну камеру с одним проектором [173]. За счет модуляции периодичной интенсивности луча исключаются посторонние шумы. При этом отражения могут распознаваться за счет перемещения камеры и последующего анализа изменений преобразованной дальнометрической информации [174]. Однако, поскольку в этих методах получают дальнометрическую информацию из нескольких изображений, это повышает вероятность появления ошибок. Более того, модуляция интенсивности луча не устраняет вторичные отражения, которые изменяются в унисон с первичным отражением. Для устранения вторичных отражений от металлических поверхностей может быть использован линейно поляризованный свет [161]. Таким образом с каждым новым отражением такой луч меняет свою поляризацию [173]. Также возникает сложность регистрации линии развертки на фотоприемнике для чего требуется несколько измерений через различные поляризационные фильтры [175].

2.7 Методические и технологические основы координатно-временной привязки результатов измерений

Привязка измеренных параметров рельсовой колеи к одной из существующих систем координат возможна путем определения собственных координат ВСКЗ посредством применения одной из существующих технологий позиционирования. Все технологии позиционирования делятся на две категории: глобальная и локальная. Глобальная технология основана на использовании спутниковых данных. В основе данной технологии лежит метод линейной засечки, позволяющий вычислять координаты спутниковых антенн приемника по известным координатам спутников и передаваемым ими дальномерным кодам. В процессе позиционирования один приемник устанавливается стационарно на геодезическом пункте с известными координатами, а другой находится в точке размещения ВСКЗ. При этом положение базовой линии между приемниками может быть определено с высокой точностью (до $3 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм на км}$) [176].

Согласно ГОСТ Р 53607-2009, в котором приведены основные положения для определения координат по измерениям псевдодальностей, в основе всех методов определения координат пунктов наблюдения с использованием ГНСС лежит метод засечки положения мобильного приемника по известным положениям навигационно-космических аппаратов. Геометрия определения координат приемника навигационных сигналов относительно опорного пункта показана на рисунке 2.20. Определение относительных координат по измерениям псевдодальностей выполняется дифференциальным или относительным методами.

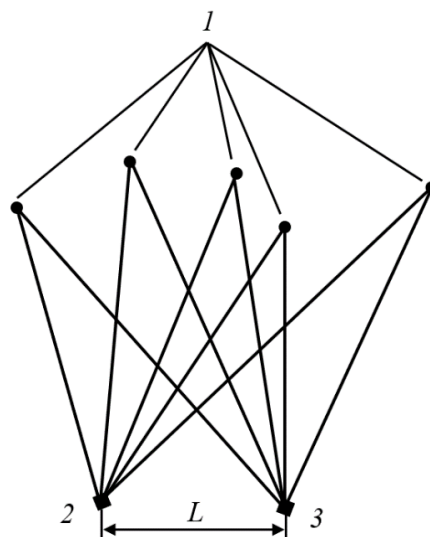


Рисунок 2.20 – Принципиальная схема определения координат пункт наблюдения относительно опорного пункта: 1 – навигационный космический аппарат; 2 – опорный пункт; 3 – пункт наблюдения

В дифференциальном методе по результатам наблюдений на опорном пункте формируются дифференциальные поправки к соответствующим параметрам наблюдений для определяемого пункта. Этот метод обеспечивает определение координат пункта наблюдения в реальном масштабе времени. Координаты пункта наблюдения (X , Y , Z) определяются в общеземной геоцентрической системе координат. В качестве опорного пункта используются пункт локальной, региональной или широкозонной дифференциальной подсистем ГНСС. Выбор подсистемы зависит от удаленности опорного пункта и пункта наблюдения.

При удалении пункта наблюдения от опорного пункта на расстояние до 200 км обслуживание кодовых псевдодалностей выполняет локальная дифференциальная подсистема, в которой работает одна опорная станция. При удалении пункта наблюдения от опорного пункта на расстояниях от 200 до 2000 км обслуживание обработки кодовых псевдодалностей выполняет региональная дифференциальная подсистема. Она строит пространственно-временную модель поправок, то есть учитываются изменения в поправках по мере удаления пункта наблюдения от опорного пункта. В широкозонной дифференциальной подсистеме размер обслуживаемой области может достигать 5000 км. Если дифференциальный метод по наблюдениям фазы несущей обслуживается единственным базовым

пунктом, то расстояния должны быть в пределах 10 км и редко до 30 км. При использовании метода множественных опорных пунктов размер области может достигать нескольких сотен километров.

В относительном методе наблюдения, выполненные одновременно на опорном и определяемом пункте, обрабатываются совместно. При этом определяются приращения координат пункта наблюдения относительно опорного пункта. Определение координат пункта наблюдения может проводиться в статическом режиме, позволяющем выполнять продолжительные сеансы наблюдений.

При выборе метода и технологии определения относительных координат по измерениям псевдодальностей учитываются требования к точности измерений. Дифференциальный метод определения относительных координат по кодовым псевдодальностям в настоящее время обеспечивают точность 0,5 м, по фазовым псевдодальностям от 1 до 500 мм. Относительный метод по фазовым псевдодальностям обеспечивает точность от единиц миллиметров до нескольких сантиметров. Точность определения относительных координат по измерениям псевдодальностей зависят от: метода обработки измеренных псевдодальностей, погрешности шкалы времени аппаратуры спутника и мобильного приемника, погрешности бортовых эфемерид, инструментальной ошибки аппаратуры спутника и мобильного приемника, ионосферной и тропосферной задержки сигнала, удаленности определяемого пункта от опорного, числа наблюдаемых навигационных космических аппаратов ГНСС и геометрии их расположения.

Для математического описания измеренной кодовой псевдодальности $\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{код})}$ с пункта наблюдения до i -го спутника используется уравнение вида:

$$\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{код})} = c\tau_{\text{ПН}}^i = \rho_{\text{ПН}}^{i(\text{геом})} + c(dt_{\text{ПН}} - dt^i) + Trop_{\text{ПН}}^i + Iono_{\text{ПН}}^i + dm_{\text{ПН}}^i + e_{\text{ПН}}^i \quad (2.27)$$

где c – скорость света в вакууме;

$\tau_{\text{ПН}}^i$ – разность между временем приема сигнала в ГНСС аппаратуре и временем передачи этого сигнала со спутника;

$\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{геом})}$ – геометрическая дальность;

$dt_{\text{пн}}$ – поправка к часам приемника пункта наблюдения;

dt^i – поправка к часам спутника;

$Trop_{\text{пн}}^i$ – поправка за влияние тропосферы;

$Iono_{\text{пн}}^i$ – поправка за влияние ионосферы;

$dm_{\text{пн}}^i$ – поправка за влияние многопутности на псевдодальность;

$e_{\text{пн}}^i$ – погрешность измерения кодовой псевдодальности.

Для математического описания измеренной фазовой псевдодальности ρ используется уравнение:

$$\rho_{\text{пн}}^{i(\text{фаз})} = \lambda \Delta \varphi_{\text{пн}}^i = \rho_{\text{пн}}^{i(\text{геом})} + c(dt_{\text{пн}} - dt^i) + Trop_{\text{пн}}^i - Iono_{\text{пн}}^i + \lambda N_{\text{пн}}^i + dm_{\text{пн}}^i + \lambda e_{\text{пн}}^i, \quad (2.28)$$

где λ – длина волны сигнала несущей;

f_0 – частота сигнала несущей;

$\Delta \varphi_{\text{пн}}^i$ – разность фазы сигнала, созданного в приемнике в момент приема сигнала, и фазой сигнала, созданного на спутнике в момент передачи сигнала;

$N_{\text{пн}}^i$ – целочисленная неоднозначность фазы;

$dm_{\text{пн}}^i$ – поправка за влияние многопутности фазы;

$\lambda e_{\text{пн}}^i$ – погрешность измерения фазовой псевдодальности.

В дифференциальном методе приемник опорного пункта (базовая станция), имея точные координаты фазового центра антенны, определяет из наблюдений за спутниками поправки для кодовых псевдодальностей (или фазовых псевдодальностей). С использованием этих дифференциальных поправок, передаваемых на пункт наблюдения, корректируются измерения соответствующих навигационных параметров в мобильном приемнике, в результате чего повышается точность определения его координат. Дифференциальные поправки от базовой станции к мобильному приемнику передаются при постобработке или в реальном времени с использованием средств беспроводной связи. Это дает возможность оперативно получать координаты пункта наблюдения.

При выполнении спутниковых геодезических измерений часто в силу экранирования спутниковых сигналов или ошибок многолучёвости спутниковой

аппаратуры ее вынужденно устанавливают вне центров пунктов. Одним из путей решения задачи приведения спутниковых измерений, представляемых в виде геоцентрических координат пунктов или разностей геоцентрических координат между двумя пунктами, является приведение на основе элементов центрировки, используя методику приведения к центрам пунктов результатов спутниковых измерений, основанную на применении взаимобратных преобразований между геоцентрическими и топоцентрическими координатами [177].

Определение относительных координат по кодовым псевдодальностям выполняется с помощью следующего алгоритма. Вычисляются дифференциальные поправки для измеренных фазовых псевдодальностей. Для этого составляются уравнения наблюдения для опорного пункта:

$$\rho_{\text{оп}}^{i(\text{код})} = \rho_{\text{оп}}^{i(\text{геом})} + c(dt_{\text{оп}} - dt^i) + Trop_{\text{оп}}^i + Iono_{\text{оп}}^i + e_{\text{оп}}^i. \quad (2.29)$$

Геометрическая дальность $\rho_{\text{оп}}^{i(\text{геом})}$ рассчитывается как расстояние между спутником в момент выхода сигнала и приемником в момент приема сигнала с использованием формулы:

$$\rho_{\text{оп}}^{i(\text{геом})} = \sqrt{(X^i - X_{\text{оп}})^2 + (Y^i - Y_{\text{оп}})^2 + (Z^i - Z_{\text{оп}})^2}, \quad (2.30)$$

где X^i, Y^i, Z^i и $X_{\text{оп}}, Y_{\text{оп}}, Z_{\text{оп}}$ – координаты спутников, вычисляемые по данным навигационного сообщения с учетом поворота Земли за время прохождения сигнала, и координаты опорного пункта. При учете ошибки $\Delta\rho_{\text{оп}}^{i(\text{орб})}$ бортовых эфемерид погрешность $\Delta\rho_{\text{оп}}^i$ в псевдодальности на опорном пункте составит:

$$\Delta\rho_{\text{оп}}^i = \rho_{\text{оп}}^{i(\text{геом})} - \rho_{\text{оп}}^{i(\text{код})} = -\Delta\rho_{\text{оп}}^{i(\text{орб})} - c(dt_{\text{оп}} - dt^i) - Trop_{\text{оп}}^i + Iono_{\text{оп}}^i - e_{\text{оп}}^i. \quad (2.31)$$

Погрешность $\Delta\rho_{\text{оп}}^i$ транслируется как дифференциальная поправка. На опорном пункте отыскиваются поправки к измеренным кодовым псевдодальностям для всех наблюдаемых спутников в каждую эпоху наблюдения. Затем значения псевдодальности на пункте наблюдения корректируются:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{пн}}^{i(\text{корр})} = \rho_{\text{пн}}^{i(\text{код})} + \Delta\rho_{\text{оп}}^i \cong \rho_{\text{пн}}^{i(\text{геом})} + (\Delta\rho_{\text{пн}}^{i(\text{орб})} - \Delta\rho_{\text{оп}}^{i(\text{орб})}) + c(dt_{\text{пн}} - dt_{\text{оп}}) + \\ + (Trop_{\text{пн}}^i - Trop_{\text{оп}}^i) + (Iono_{\text{пн}}^i - Iono_{\text{оп}}^i) + e_{\text{пн, оп}}^i. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Система уравнений поправок наблюдения составляется с учетом условий:

$$(\Delta \rho_{\text{ПН}}^{i(\text{орб})} - \Delta \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{орб})}) = (Trop_{\text{ПН}}^i - Trop_{\text{ОП}}^i) = (Iono_{\text{ПН}}^i - Iono_{\text{ОП}}^i) \approx 0, \quad (2.33)$$

$$(\rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})})_0 = \sqrt{(X^i - (X_{\text{ПН}})_0)^2 + (Y^i - (Y_{\text{ПН}})_0)^2 + (Z^i - (Z_{\text{ПН}})_0)^2}. \quad (2.34)$$

Данная система уравнений решается по методу наименьших квадратов с весовой матрицей P :

$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L$ – вектор поправок к координатам ПН и к часам аппаратуры потребителя,

$Q = (A^T D A)^{-1}$ – корреляционная матрица решения,

$\mu^2 = \frac{V^T P V}{n-4}$ – ошибка единицы веса,

$m_j^2 = \mu^2 Q_{jj} \frac{V^T P V}{n-4}$ – средняя квадратическая погрешность j -го параметра

(jj – диагональный элемент матрицы Q),

$\sigma_j^2 = \frac{V^T V}{n-4}$ – дисперсия поправок к измеренным псевдодальностям.

Реализация дифференциального метода по измерениям фазовых псевдодальностей требует разрешения фазовых неоднозначностей, что предполагает использование достаточно длительных рядов наблюдений. Образование разностей между спутниками и приемниками эффективно исключает все смещения из-за ошибок генераторов часов и в то же время значительно уменьшает другие смещения (за исключением неоднозначности фаз).

Определение относительных координат дифференциальным методом по кодовым псевдодальностям выполняется с использованием следующего алгоритма. Вычисляются дифференциальные поправки для измеренных фазовых псевдодальностей. Для этого на опорный пункт из наблюдения первой эпохи вычисляется целое число $N_{\text{ОП}}^i$:

$$K_{\text{ОП}}^i = \left[\frac{\rho_{\text{ОП}}^{i(\text{код})} - \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})}}{\lambda} \right]. \quad (2.35)$$

Далее определяется фазовая псевдодальность, близкая к измеренной кодовой псевдодальности $\rho_{\text{ОП}}^{i(\text{код})}$:

$$\rho_{\text{ОП}}^{-i(\text{фаз})} = \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})} + \lambda K_{\text{ОП}}^i \quad (2.36)$$

и вычисляется среднее значение $\mu_{\text{ОП}}$ невязки дальностей, полученных на опорном пункте до всех спутников в начальную эпоху, и геометрических дальностей:

$$l_{\text{ОП}}^i(1) = \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})} - \rho_{\text{ОП}}^{-i(\text{фаз})} \quad (2.37)$$

Вводится поправка для фазовой псевдодальности в начальную эпоху:

$$\Delta \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})} = \rho_{\text{ОП}}^{-i(\text{фаз})}(1) - \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})} - \mu_{\text{ОП}}(1) \quad (2.38)$$

Изменение невязки от эпохи к эпохе и поправки фазовой псевдодальности вычисляется по формулам:

$$l_{\text{ОП}}^i(t, t-1) = l_{\text{ОП}}^i(t) - l_{\text{ОП}}^i(t-1), \quad (2.39)$$

$$\mu_{\text{ОП}}(t) = \mu_{\text{ОП}}(t-1) + \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s l_{\text{ОП}}^i(t-1), \quad (2.40)$$

$$\Delta \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})}(t) = \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})}(t) - \rho_{\text{ОП}}^{-i(\text{фаз})}(t) - \mu_{\text{ОП}}(t). \quad (2.41)$$

Фазовые поправки передаются на пункт наблюдения. С использованием этих поправок вычисляются скорректированные значения измеренной фазовой псевдодальности на пункт наблюдения:

$$\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{корр})}(t) = \rho_{\text{ПН}}^{i(\text{фаз})}(t) + \Delta \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})}(t). \quad (2.42)$$

Составляется уравнение одинарной разности для опорного пункта и пункта наблюдения:

$$\Delta \rho_{\text{ПН}}^{i(\text{фаз})}(t) = \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})}(t) - (\rho_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})} + \lambda K_{\text{ОП}}^i) - \mu_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})}(t). \quad (2.43)$$

После преобразования формула для $\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{фаз})}$ принимает вид:

$$\begin{aligned} -\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{фаз})}(t) - \Delta \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{фаз})}(t) &= -\rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})}(t) + \lambda [N_{\text{ОП, ПН}}^i(1) + K_{\text{ОП}}^i] - c(dt_{\text{ОП}} - dt_{\text{ПН}}) - \\ &- \mu_{\text{ОП}}(t) + Trop_{\text{ОП, ПН}}^i(t) + Iono_{\text{ОП, ПН, фаз}}^i(t) \end{aligned} \quad (2.44)$$

В левой части формулы содержится исправленная фазовая псевдодальность $-\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{корр})}(t)$ с обратным знаком. Определяются разности между двумя спутниками:

$$\begin{aligned} -\rho_{\text{ПН}}^{k(\text{корр})}(t) - \rho_{\text{ПН}}^{i(\text{корр})}(t) &= -\rho_{\text{ПН}}^{k(\text{геом})}(t) - \rho_{\text{ПН}}^{i(\text{корр})}(t) + \\ &+ \lambda [N_{\text{ОП, ПН}}^{ik}(1) + K_{\text{ОП}}^i - K_{\text{ОП}}^k] + Trop_{\text{ОП, ПН}}^{ik}(t) + Iono_{\text{ОП, ПН, фаз}}^{ik}(t). \end{aligned} \quad (2.45)$$

Вычисляются приращения координат пункта наблюдения относительно опорного пункта по исправленным фазовым псевдодальностям с этого пункта. В

качестве неоднозначности оценивается модифицированная неоднозначность:

$$N_{\text{оп, пн}}^{ik}(1) + K_{\text{оп}}^i - K_{\text{оп}}^k. \quad (2.46)$$

Составление и решение системы уравнений поправок наблюдений с оценкой точности выполняется аналогично по ГОСТР 53607-2009. Дифференциальный метод по кодовым псевдодальностям обеспечивает точность на уровне единиц миллиметров при удалении от опорной станции до 10 км, то есть в области действия локальной дифференциальной подсистемы ГНСС. Для больших дальностей используются другие подсистемы (региональная и широкозонная дифференциальные подсистемы ГНСС).

Основной характеристикой точности спутникового позиционирования является геометрический фактор, обусловленный геометрией линейной засечки [178]. Под влиянием ионосферы и тропосферы радиосигналы, передаваемые космическими аппаратами, подвергаются рефракции. Соответственно, чем больше спутников наблюдается приемником и чем равномернее спутники распределены по небесной сфере, тем выше достигается точность измерений координат. Продолжительность наблюдений за спутниками для достижения приемлемой точности измерения может занимать длительное время.

Современный высокоточный геодезический ГНСС-приемник поддерживает работу с несколькими спутниковыми системами GPS/ГЛОНАСС/BeiDou в диапазонах частот L1/L2 и может устанавливаться на ЛА в целях проведения аэрофотопографической съемки. Это позволяет достигать погрешности измерения координат центров проекций (КЦП) методом Post Processing Kinematic (PPK) до 1,5 см даже при значительной длине базовой линии (рис. 2.21). В отличие от метода Real Time Kinematic (RTK), когда определение КЦП снимков происходит во время самого полета, метод PPK предполагает расчет КЦП снимков относительно базовой станции после проведения аэрофотосъемки. Основным преимуществом PPK над RTK является то, что в процессе полета и выполнения съемки нет необходимости соединения между базовой станцией и БПЛА. Таким образом,

можно совершать полеты на дальние расстояния вне зоны прямой радиовидимости БПЛА [179].

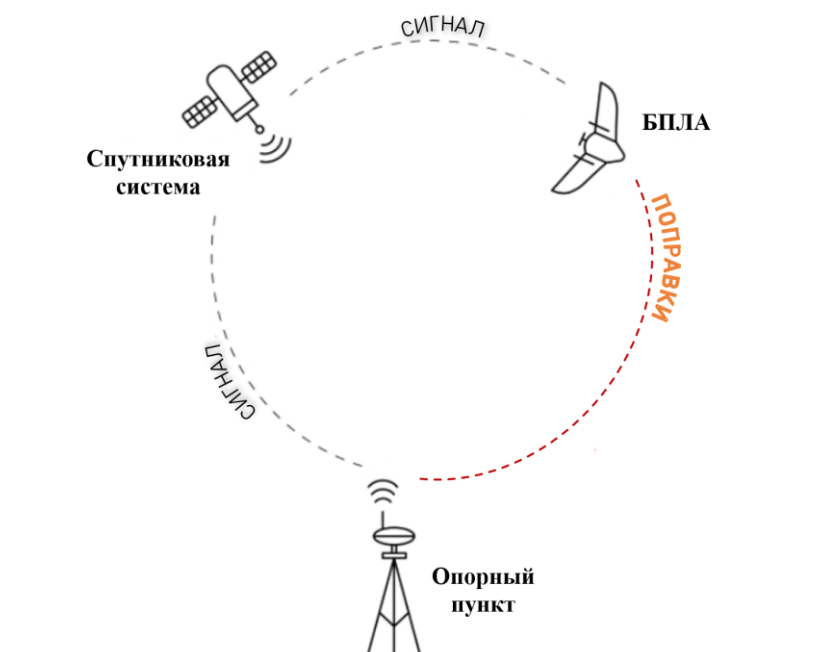


Рисунок 2.21 – Метод обработки спутниковых данных Post Processing Kinematic

Тем не менее, существующие средства измерения координат по сигналам ГНСС в процессе аэрофотосъёмки не всегда могут обеспечить необходимую высокую точность определения геометрических параметров ж/д пути. Это связано с существованием обширных географических областей с неблагоприятными условиями для приёма сигналов ГНСС [180]. На результирующую точность лазерно-локационных измерений также большое влияние оказывает местоположение наземных базовых станций коррекции сигналов ГНСС, используемых для повышения точности определения координат ЛА. По мере удаления ЛА от этих станций возрастают погрешности координатных измерений точек на местности [181]. Увеличение погрешности определения координат ЛА также приводит к снижению точности определения параметров ж/д пути.

Вследствие ограничений технологии глобального позиционирования получили развитие технологии локального позиционирования: ИК, ультразвуковая, сверхширокополосная, радиочастотная, Bluetooth, Wi-Fi, компьютерное зрение. Эти технологии отличаются друг от друга физическими

принципами действия, дальностью, точностью, энергопотреблением и стоимостью. В сводной таблице 2.1 представлены характеристики систем, реализующие технологии локального позиционирования [182].

Таблица 2.1 – Характеристики систем позиционирования

Технология позиционирования	Погрешность измерений, мм	Радиус действия, м
Инфракрасная	570-2300	5
Ультразвуковая	30-1000	10
Wi-Fi	1000-5000	50
Bluetooth	2000-5000	15
Сверхширокополосная UWB	200	100
Активная радиочастотная идентификация RFID	100-1000	100
Компьютерное зрение	0,1-10	10

ИК и ультразвуковая технологии позиционирования имеют довольно ограниченное применение, причем, по мере совершенствования радиочастотных технологий их применение сокращается [183]. Большинство систем позиционирования используют активные радиочастотные метки [184]. Местоположение каждого приемника вычисляется с помощью сигнатуры уровня принятого от радиочастотных меток сигнала [185]. В сверхширокополосной технологии [186] используются передатчики излучающие ультракороткие импульсы радиосигнала целевому узлу приемника. Основными недостатками технологии Wi-Fi является высокое энергопотребление и ослабление сигнала из-за препятствий [187]. Технология компьютерного зрения основана на анализе и цифровой обработке получаемых с видеокамер изображений [188]. Однако применение данной технологии для контроля параметров рельсовой колеи в процессе строительства требует итеративного сбора и анализа потенциально больших объемов видеоданных, что является затруднительным из-за сложности обеспечения безопасной эксплуатации тяжелого строительного оборудования в режиме реального времени [189]. Применение технологии видеограмметрического позиционирования позволяет устранить данную проблему с помощью более совершенных методов сбора и анализа пространственных данных [190].

2.8 Выводы по второй главе

Принцип действия бесконтактных методов измерений основан на зондировании рельсовой колеи звуковыми или электромагнитными волнами. Выбор средства измерения в значительной степени определяет и выбор метода измерения, который является наиболее подходящим для него. 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 обнаружения скрытых дефектов в рельсах и обнаружения препятствий на ж/д путях.

Общими недостатками оптических методов измерений являются: сложность, громоздкость и высокая стоимость оборудования; большое энергопотребление; высокие требования к качеству поверхности рельсов и к условиям проведения измерений (влажность, запыленности и т.п.). Тем не менее, оптические методы обеспечивают наивысшую точность в широком диапазоне измерений, кроме этого, она позволяют одновременно измерять дальность, координаты, габариты, мгновенную скорость и перемещения объекта измерения. Такие оптические методы, как стереовидение и триангуляции, получили большое распространение в СКЗ. Первостепенной задачей этих систем является установление количественного соотношения между интересующим признаком объекта и испускаемым или отражаемым им излучением. Одним из проблемных мест данных методов является определение зависимости между координатами на изображении и угловыми координатами пришедшего от изображаемой точки оптического луча. Еще одной проблемой является само определение общей точки на двух изображениях. Также возникает проблема установления соответствия друг другу детектированных на разных камерах изображений одного объекта.

Представленные в данной главе методы положены в основу принципа действия существующих средств измерений, используемых для определения и

контроля геометрических параметров ж/д пути. Несмотря на достаточно развитый научно-методический аппарат по определению различных параметров, характеризующих состояние ж/д пути, присутствует еще нераскрытый потенциал для уменьшения погрешности измерений этих параметров и более точной их привязки к реперной или геодезической сети за счет применения технологии компьютерного зрения. Кроме этого, постоянное повышение требований к пропускной способности ж/д участков обуславливает необходимость повышения оперативности применения существующих методов измерений, которое может быть достигнуто путем совместного применения современных технологий компьютерного зрения, лазерного сканирования и спутниковой навигации. Проверка на достижимость цели исследования с помощью такого подхода и оценка эффективности применения технологий позиционирования и навигации для контроля геометрических параметров ж/д пути может быть осуществлена только эмпирически, посредством проведения математического и имитационного моделирования, а также постановкой физических экспериментов.

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВИДЕОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Проектирование системы, предназначенной для измерений, контроля и наблюдения за изменением параметров ж/д пути в процессе его эксплуатации относится к задачам приборостроения. Для этого необходимо подобрать комплектующие и объединить их в единую систему. Однако для проектирования сложных систем требуется тщательный расчет и моделирование [191]. Архитектура, составляющие элементы, интерфейс и другие характеристики ВСКЗ определяются в процессе ее проектирования. При проектировании ВСКЗ применялся блочно-иерархический подход, в основу которого положено разделение процесса проектирования на виды выполняемых работ с учетом функционального алгоритмического, конструкторского и технологического аспектов. Для каждого вида работ производилось структурирование модельного и математического описания ВСКЗ путём разделения ее на ряд иерархических уровней по степени детальности отображения свойств и отдельных элементов системы.

С учетом функционального аспекта процесс проектирования ВСКЗ подразделяется на следующие иерархические уровни: функционально-логический, системотехнический, схемотехнический и компонентный [192]. На системотехническом уровне объектами проектирования являются составные части ВСКЗ – средства измерений, программно-аппаратные средства обработки информации, а также система управления. На схемотехническом уровне обеспечивается взаимодействие между составными частями системы [193]. На компонентном уровне объектами проектирования ВСКЗ являются отдельные элементы, входящие в состав оптической системы, электронных блоков обработки информации и устройства наведения.

Наглядность результата в ходе проектирования ВСКЗ имеет принципиально важное значение. Согласно действующим рекомендациям [194] в процессе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ может

создаваться физическая модель, которая служит для воспроизведения или имитации конкретных свойств разрабатываемого изделия и изготавливается для проверки принципа его действия и определения технических характеристик [87]. В целях подтверждения принципа действия ВСКЗ, проверки ее функциональной части на возможность выполнения назначенных функций, а также отработки методик проведения линейных и угловых измерений, первоочередной задачей является создание полнофункциональной физической модели ВУ, являющегося основным элементом ВСКЗ. Данная задача решалась путем подбора подходящих средств измерений (датчиков) на основе размера, веса, стоимости, надежности, точности, долговечности и устойчивости к воздействию окружающей среды. Также были разработаны способы координатных, линейных и угловых измерений для практического применения ВСКЗ при решении различных измерительных задач.

3.1 Конструирование физической модели видеограмметрической системы

Конструирование физической модели видеограмметрической системы является важным этапом в процессе проектирования ВСКЗ, на котором проводится анализ достижимости требований, предъявляемых к функциональному назначению системы, и выполняется поиск путей для удовлетворения этих требований. Информация, полученная на этом этапе, дает возможность определиться с выбором конструкции системы, включаемыми в ее состав элементами, их типом и размещением. При этом особое внимание уделяется выбору программной платформы, разработке программных средств и отладке алгоритмов работы системы [87]. Исходя из сформированных ранее требований [98] конструкция ВУ будет не сильно отличаться от устройства современного геодезического тахеометра. На рисунке 3.1 изображен общий вид трехмерной модели ВУ и его основные элементы.

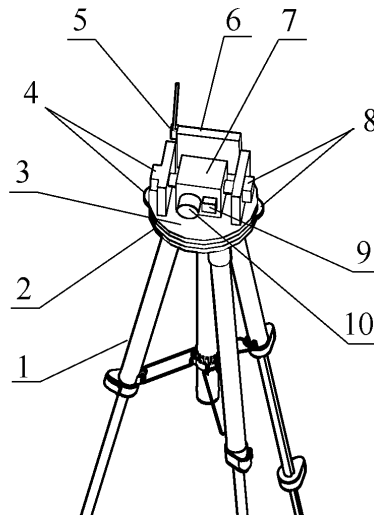


Рисунок 3.1 – Состав модели видеограмметрического устройства: 1 – штатив; 2 – трегер; 3 – двухосевая платформа; 4 – шаговые двигатели; 5 – приемопередающее радиоустройство; 6 – встроенный компьютер; 7 – микроконтроллер; 8 – оптические энкодеры; 9 – лазерный дальномер; 10 – видеокамера

В базовом исполнении модель ВУ размещается на треноге с трегером, который представляет собой приспособление, обеспечивающее горизонтирование закрепляемых на нем устройств. С помощью трегера задается горизонтальное положение двухосевой платформы, на которой, в свою очередь, размещены видеокамера и дальномер. Вследствие этого обеспечивается горизонтальность оси абсцисс на координатной плоскости ПЗС-матрицы видеокамеры, что является важным условием правильной работы системы. Видеокамера установлена на платформе так, что ее главная оптическая ось сонаправлена лазерному лучу дальномера [195]. Энкодеры передают на ЭВМ через микроконтроллер значения позиций валов шаговых двигателей, по которым определяется направление видеосъемки и вычисляются угловые координаты объекта измерения. ЭВМ производит обработку видеосигнала, поступающего с видеокамеры, измеренных значений с лазерного дальномера и энкодеров, передаваемых микроконтроллером. Результатом вычислительных операций ЭВМ служат координаты объектов в собственной сферической системе координат [87]. Функциональная схема физической модели видеограмметрической системы представлена на рисунке 3.2.

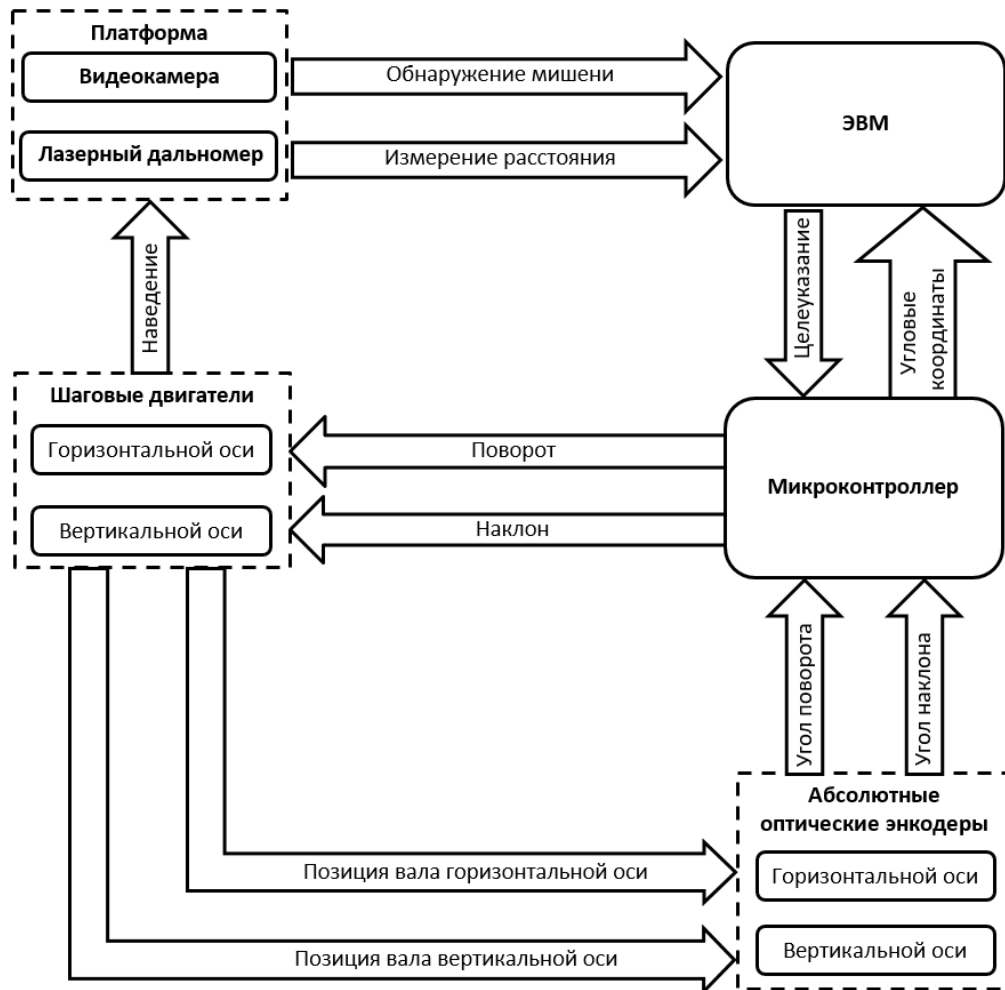


Рисунок 3.2 – Схема физической модели видеограмметрического устройства

С целью определения технических и функциональных возможностей разрабатываемой ВСКЗ была создана полнофункциональная физическая модель ВУ, позволяющая выполнять основные функции, связанные с обнаружением объекта измерений и определением его координат [87]. В состав физической модели ВУ (рис. 3.3) были включены следующие элементы: приемо-передающее радиоустройство, двухосевая платформа, два шаговых двигателя с драйверами управления, энкодеры, микроконтроллер, видеокамера, лазерный дальномер, трегер. В модели использованы два шаговых двигателя, задающие с помощью платформы положение видеокамеры в пространстве по осям поворота и наклона. Шаговые двигатели с энкодерами обеспечивают обратную связь и позволяют определить относительный угол поворота вала. Угловой шаг фиксируемый энкодерами составляет около 1'.

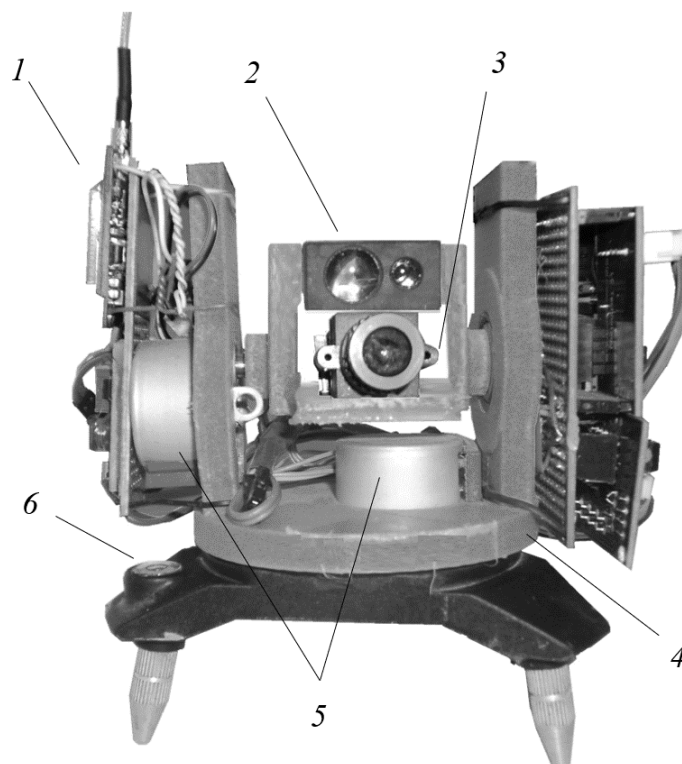


Рисунок 3.3 – Физическая модель видеограмметрической системы:
 1 –приемопередатчик; 2 – дальномер; 3 – видеокамера; 4 – двухосевая платформа;
 5 – шаговые двигатели; 6 – трегер

Двухосевая платформа с двумя степенями свободы, служит каркасом физической модели для крепления всех элементов устройства. Трехмерная модель платформы была спроектирована в программном комплексе SolidWorks – системы автоматизированного проектирования, при этом учитывались особенности и размеры, предварительно подобранных элементов модели. При создании платформы применялась аддитивная технология послойного выращивания с помощью трехмерного принтера, раздаточная головка (экструдер) которого выдавливает слой за слоем на охлаждаемую поверхность разогретый термопластик. В качестве драйвера управления шаговыми двигателями выбран многоканальный контроллер, обеспечивающий универсальное подключение к вычислительному устройству через последовательный порт TTL или порт USB и предоставляющий возможность автономной работы под управлением записанных в память контроллера скриптов. Разрешение драйвера управления шаговыми двигателями обеспечивается на уровне 0,25 мкс, что составляет 0,025° (1,5') для типового привода, с частотой импульсов до 333 Гц [87].

На платформе установлена видеокамера с типом сенсора CMOS, обладающая следующими техническими характеристиками: разрешение 1280×960 , угол обзора 60° , частота смены кадров 30 Гц, фиксированное фокусное расстояние 4,4 мм, беспроводное соединение с ЭВМ обеспечивается через радиоканал связи на частоте 2,8 ГГц. Привязка результатов измерений к координатам реперной или геодезической сети осуществляется путем определения собственных координат и пространственного положения системы с помощью реперов, находящихся в зоне прямой видимости, или посредством приемника сигналов спутниковых систем позиционирования (GPS, ГЛОНАСС).

Разработанное программное обеспечение (программа) для модели видеogramметрической системы (рис. 3.4), устанавливается на ЭВМ и служит для обработки формируемого видеокамерой изображения с целью обнаружения требуемого объекта измерения [196]. ЭВМ позволяет рассчитать углы отклонения центра объекта от главной оптической оси и формирует управляющие команды для платформы, которая с помощью встроенных в нее шаговых двигателей наводит видеокамеру и лазерный дальномер на объект измерения. Направление вектора главной оптической оси видеокамеры определяется абсолютными оптическими энкодерами, также находящимися на осях платформы. Отслеживание объекта измерения и наведение видеокамеры на него производится системой автоматически в режиме реального времени. Также ЭВМ при помощи приемопередатчика позволяет осуществлять удаленное управление вспомогательными устройствами [195].

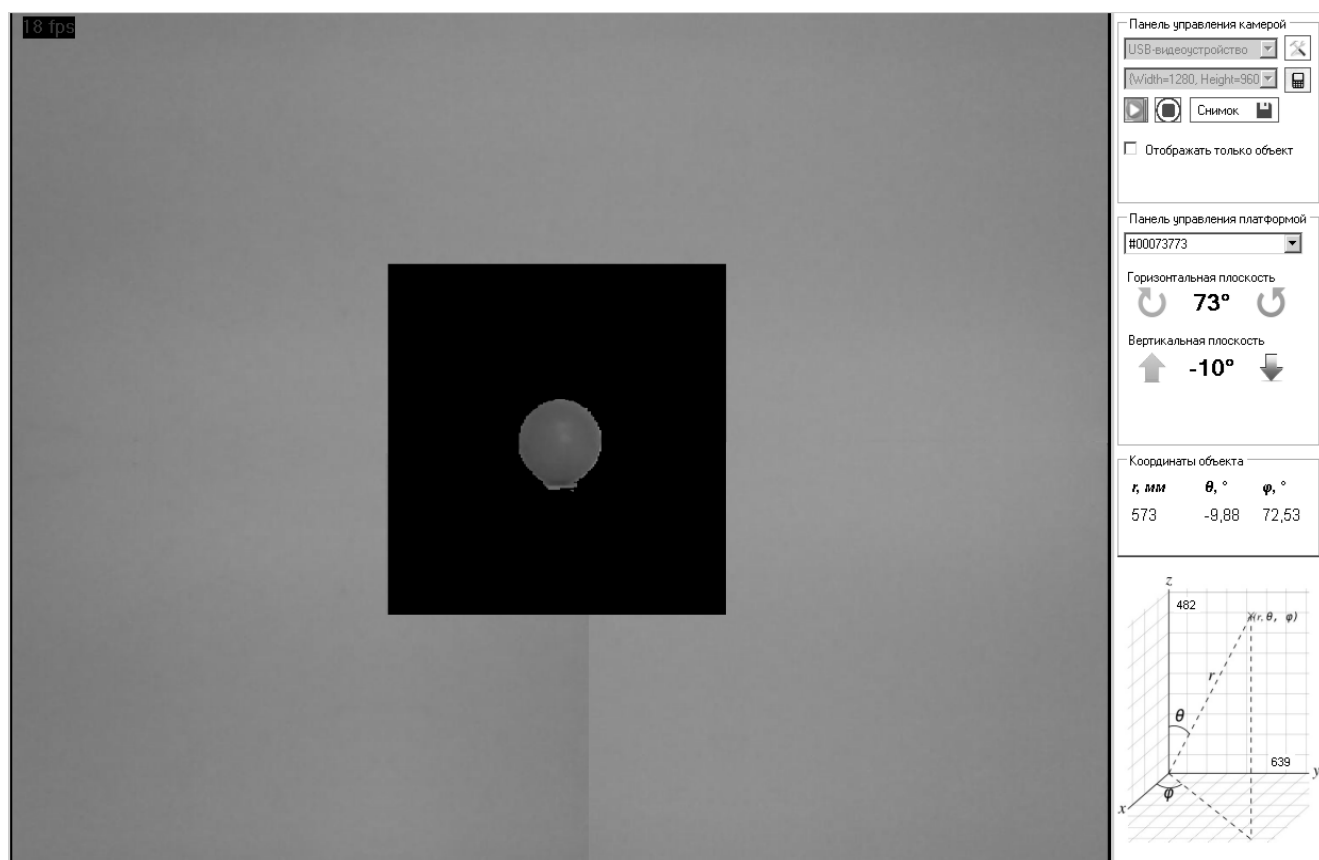


Рисунок 3.4 – Организация графического пользовательского интерфейса

Программа для ЭВМ работает под управлением операционной системы *Windows*. Программный код написан на языке *C#*, который является чрезвычайно мощным языком, содержащим средства создания эффективных программ любого назначения и поддерживающий большинство современных технологий программирования. В программе были реализованы следующие функции:

- управление работой всех элементов видеограмметрической системы;
- поддержка подключения к видеокамерам различного типа, использующих *USB* или сетевой интерфейс подключения к ЭВМ (в том числе беспроводной *WiFi*);
- обеспечение взаимодействия по радиоканалу с микроконтроллерами (*Pololu*, *Atmega*, *STM*), которые в свою очередь обеспечивают одновременную поддержку и управление различными типами электродвигателей [197];
- обработка информации, поступающей от видеокамеры, лазерного дальномера и энкодеров;
- вычисление координат и других параметров объекта измерения.

Пользовательский интерфейс программы реализован с применением визуальных элементов класса *Windows Forms*, предоставляемых платформой *.NET Framework*. В качестве графического интерфейса пользователя использован однооконный интерфейс со стандартным размещением визуальных элементов. Главное окно программы разделено на две области. В первой области выводится видеоизображение, во второй размещены две панели для управления видеокамерой и платформой, а также информационная панель, отображающая результат определения координат объекта измерения. В области видеоизображения отображена рамка фильтра черного цвета, которая выделяет объект измерения на видеоизображении. Панель управления видеоизображением обеспечивает возможность выбора настроек видеокамеры, установленной на платформе, позволяя выбрать поддерживаемое разрешение и задать параметры, определяющие технические характеристики видеокамеры (фокусное расстояние, физический размер пиксела ПЗС-матрицы). На этой же панели в качестве вспомогательного инструмента имеется калькулятор параметров видеокамеры, который позволяет рассчитать ее некоторые неизвестные характеристики. Также имеются кнопки управления выводом видеоизображения и кнопка переключения вида для отображения всей сцены целиком или рамки фильтра для отображения только объекта измерения, находящихся в поле зрения видеокамеры [87].

Панель управления платформой позволяет задавать направление обзора видеокамеры с помощью 2-х шаговых двигателей, установленных на осях поворота платформы. Также рядом с кнопками управления платформой выводятся угловые значения, определяющие позицию вала двигателей. На информационной панели отображается информация о значении расстояния до объекта измерения (в мм) и относительные значения угловых координат, выраженные в градусах [87]. В процессе работы программы объект измерения может перемещаться, находясь в поле зрения видеокамеры, при этом программа автоматически отслеживает его перемещения и наводит на него луч лазерного дальномера и главную оптическую ось видеокамеры.

3.2 Оптические методы обнаружения объекта измерений

Любые задачи, связанные с определением геометрических параметров объекта измерения на изображении, начинаются с предварительного обнаружения его на фоне других объектов, находящихся в поле зрения оптико-электронного устройства. Для этого очень важно, чтобы искомый объект обладал каким-то уникальным набором визуальных признаков, позволяющих однозначно выделить его на изображении. Очевидно, что на фотоснимках запечатлена лишь проекция объектов на плоскость изображения и судить о свойствах и характеристиках этих объектов, можно лишь косвенно, опираясь на имеющиеся знания о них. К тому же качество полученного изображения зависит от множества факторов: характеристик оптико-электронного устройства, ракурса съемки, освещенности сцены, а также скорости перемещения самих объектов на сцене относительно точки съемки. Но, несмотря на все многообразие внешних факторов, влияющих на качество снимка, изображение остается практически единственным визуальным носителем информации, способным содержать совокупное представление о форме объекта измерения, его размере, цвете, а также положении в пространстве относительно других объектов. Повысить достоверность и точность, содержащихся на изображении сведений об объекте, можно используя специальные прецизионные фотокамеры, благодаря чему получают цифровые изображения объектов, по которым с высокой точностью можно определять их геометрические параметры [198].

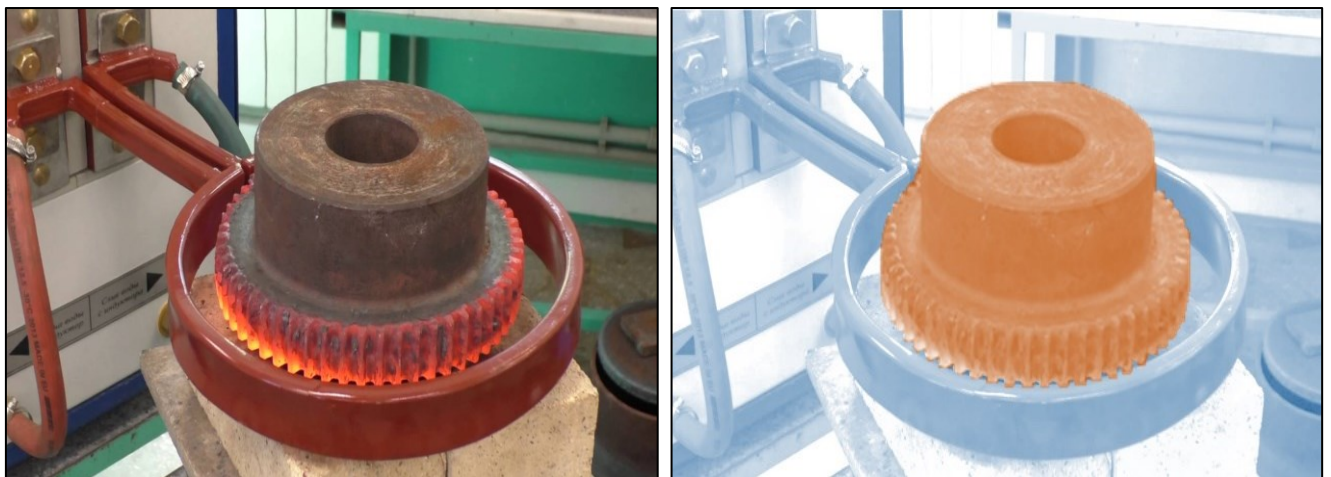
Обнаружение объекта измерений в режиме реального времени на видеоизображении может осуществляться автоматически с помощью, реализованной в видеограмметрической системе технологии компьютерного зрения, за счет которой производится обработка видеоизображения и выполняется поиск объектов, как на отдельных кадрах видеоизображения, так и путем сопоставления нескольких кадров.

Возможности ВСКЗ по выполнению назначенных ей функций определяются методами, отвечающими за цифровую обработку получаемых фото-видеоизображений. Для решения с помощью ВСКЗ измерительных задач

необходимы такие методы, которые позволяют с высокой вероятностью обнаруживать искомые объекты в режиме реального времени и определять их параметры: видимые размеры, координаты, скорость и направление движения. Однако, следует учитывать, что видеограмметрическая система может обнаружить только те объекты, которые обладают какими-либо отличительными свойствами, позволяющими выделить их среди множества других объектов. Например, объекты можно обнаружить по излучаемой ими тепловой энергии, движению, цветовой окраске, геометрической форме, видимым размерам или возвышению над уровнем местности [199]. Ниже описаны методы, применяемые в целях обеспечения ВСКЗ функцией обнаружения объектов по их отличительным признакам.

3.2.1 Метод обнаружения объектов, излучающих тепловую энергию

Тепловая энергия объектов фиксируется видеокамерой, работающей в тепловом ИК диапазоне спектра электромагнитного излучения с длиной волны 10,4-12,5 мкм. ИК камера улавливает тепловую энергию объектов и позволяет визуализировать ее в видимом для человека диапазоне спектра (рис. 3.5, а). Благодаря этому появляется возможность обнаруживать объекты в условиях недостаточной видимости.



а)

б)

Рисунок 3.5 – Обнаружение объектов по тепловой энергии:
а) процесс прокаливания шестерни; б) области повышенной температуры, полученные с помощью ИК-камеры

Метод обработки изображений, формируемых ИК-камерой, можно описать следующим образом. Изображение представляется в виде множества пикселей:

$$I = \{ \mathbf{c}(x, y) | x, y \in \mathbb{N} \}, \quad (3.1)$$

где (x, y) – координаты пикселя на изображении;

$\mathbf{c}(x, y)$ – произвольный вектор в цветовом пространстве RGB , состоящий из трех компонентов цвета C_R, C_G, C_B , которые также могут быть представлены в виде множеств натуральных чисел, заданных 256 градациями цвета:

$$\mathbf{c}(x, y) = \begin{bmatrix} C_R(x, y) \\ C_G(x, y) \\ C_B(x, y) \end{bmatrix} \quad \forall n \in C_R \vee C_G \vee C_B : n < 256 | n \in \mathbb{N}. \quad (3.2)$$

Допустим, что необходимо выделить на изображении множество пикселей, принадлежащих некоторому объекту $\Theta \subset I$, компоненты цвета которого $[C_R, C_G, C_B]$ могут принимать значения в диапазоне от 0 до 255. Поскольку ИК камера формирует изображение в оттенках серого цвета, вводится функция яркости, выраженная через медиану компонентов цвета:

$$f(x, y) = [C_R(x, y) + C_G(x, y) + C_B(x, y)] / 3. \quad (3.3)$$

Установив для функции некоторое пороговое значение k , характеризующее отклонение значений тепловой энергии от среднего, можно отделить объекты измерения от фона, применив следующее условие:

$$\mathbf{c}(x, y) \in \Theta : f(x, y) \leq k | k \in \mathbb{R}. \quad (3.4)$$

Следовательно, выражение для преобразования изображения примет вид:

$$\mathbf{c}(x, y) = \begin{cases} [C_R(x, y), C_G(x, y), C_B(x, y)] & \text{если } f(x, y) > k \\ [0, 0, 0] & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (3.5)$$

Преобразовав с его помощью изображение на рисунке 3.5 (а), проявляются области повышенного теплового излучения, обозначающие местоположение объектов измерения на изображении (рис. 3.5, б).

3.2.2 Метод обнаружения движущихся объектов

Объекты, находящиеся в движении, можно обнаружить, как с помощью стереофотограмметрических методов по двум снимкам, сделанным в один момент времени, так и фотограмметрическим методом по двум снимкам, полученным через малый интервал времени. Сопоставляя изображения на двух последовательно сделанных снимках, можно обнаружить перемещение объектов. На рисунке 3.6 изображена автоматизированная сборочная линия конвейера, использующая методы обнаружения объектов по движению.

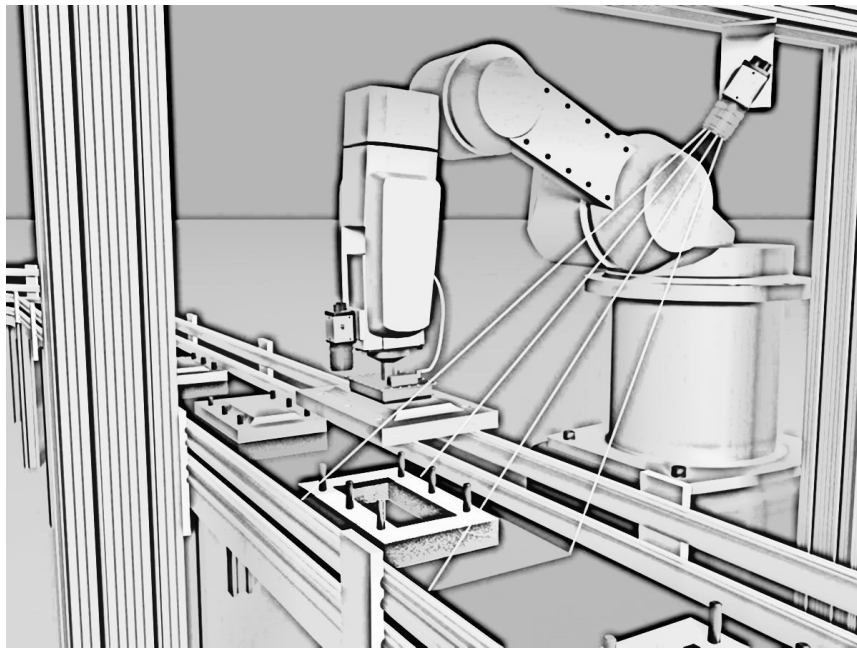


Рисунок 3.6 – Обнаружение движущихся по конвейерной ленте деталей

Результирующее изображение, отображающее перемещение деталей, можно получить путем вычитания изображений на двух снимках при помощи следующего выражения:

$$\Delta c(x, y) = \begin{cases} [c_1(x, y) + c_2(x, y)]/2 & \text{если } |c_1(x, y) - c_2(x, y)| \leq k \\ [0, 0, 0] & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3.6)$$

где $c_1(x, y)$ и $c_2(x, y)$ – изображения на первом и втором снимках, соответственно.

Сегментировав полученное изображение и объединив связанные между собой пиксели с нулевыми значениями компонентов цвета, можно получить множество областей $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$, в которых содержатся движущиеся объекты. Каждый пиксел

в этих областях связан, по крайней мере, с одним из соседних, образующих некоторое подмножество связанных с ним пикселей $\boxed{c}(x, y) \in \Theta_i$. Сопоставив попиксельно идентичные области на двух снимках и задав им некоторое смещение относительно друг друга $(\Delta x, \Delta y)$, определяют суммарные квадратичные расхождения в значениях компонентов цвета пикселей, составляющих эту область:

$$\delta_i(\Delta x, \Delta y) = \sum_{y=\min(y)}^{\max(y)} \sum_{x=\min(x)}^{\max(x)} [\Delta c(x, y)]^2, \quad (3.7)$$

$$\Delta c(x, y) = \begin{cases} c_1(x - \Delta x, y - \Delta y) - c_2(x, y) & \text{если } c_2(x, y) \in \Theta_i, \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3.8)$$

где $\min(x)$, $\min(y)$, $\max(x)$, $\max(y)$ – минимальные и максимальные значения координат пикселей, входящих в данную область изображения.

Путем решения задачи на вычисление минимума целевой функции $\min \delta_i(\Delta x, \Delta y)$ определяется вектор перемещения объекта на плоскости изображения:

$$\mathbf{r} = (\Delta x, \Delta y) \quad (3.9)$$

Зная кадровую частоту обработки видеоизображения, можно также определить скорость объекта на плоскости изображения. Для вычисления мгновенной скорости и направления движения объекта измерений необходимо определить изменение его радиального расстояния за период цифровой обработки видеоизображения этого объекта.

3.2.3 Метод обнаружения объектов по цвету в оптическом диапазоне электромагнитного излучения

Детали, изготовленные из разных металлов (рис. 3.7, а), отличаются по цвету, материалу из которого они были изготовлены. Части объекта также могут иметь один или несколько различных цветовых оттенков. Для обнаружения искомого объекта, его изображение на снимке представляется как совокупность разных объектов или их частей $I = \sum_{i=1}^n \Theta_i$, отличающихся визуально друг от друга по цвету или яркости (рис. 3.7, б).



а)



б)

Рисунок 3.7 – Обнаружение объектов по цвету: а) набор деталей, изготовленных из разных металлов; б) сегментация изображения на изолированные по цвету области

Если части объекта имеют разный цвет, то до тех пор, пока не будет проведен анализ глубины изображения или объект не будет распознан, его части будут восприниматься как самостоятельные объекты [200]. Цвет каждого такого объекта будет ограничен некоторым диапазоном значений компонентов цвета. Допустим,

что необходимо выделить на изображении множество пикселей, принадлежащих произвольному объекту $\Theta \subset I$, компоненты цвета которого $[\Theta_R, \Theta_G, \Theta_B]$ ограничены минимальными и максимальными значениями в занимаемой части цветового пространства RGB:

$$\begin{cases} \min(\Theta_R) \leq \Theta_R \leq \max(\Theta_R) \\ \min(\Theta_G) \leq \Theta_G \leq \max(\Theta_G), \\ \min(\Theta_B) \leq \Theta_B \leq \max(\Theta_B) \end{cases} \quad (3.10)$$

Граничные значения компонентов цвета, определяющие диапазон изменения цвета объекта на изображении, могут варьироваться в широком диапазоне значений в зависимости от конкретных условий проведения съемки: освещенность, ракурс съемки и форма объекта [95].

Изображение на снимке сегментируется на изолированные по цвету области, состоящие из связанных друг с другом пикселей, цвет которых находится в одном диапазоне цвета. Таким образом, если пиксел имеет 8 связей с соседними пикселями – то он расположен внутри области, если меньше – то на ее границе. Тогда первое условие принадлежности пикселя к области объекта на изображении задается выражением:

$$\mathbf{c}(x, y) \in \Theta : \exists \mathbf{s} \in \square[\mathbf{c}(x, y), \left\{ \begin{array}{l} |C_R(x, y) - S_R| \leq k \\ |C_G(x, y) - S_G| \leq k, \\ |C_B(x, y) - S_B| \leq k \end{array} \right. \quad (3.11)$$

где k – установленный пороговый коэффициент.

Алгоритм поиска связанных областей заключается в построчном сканировании изображения и поиске связей между пикселями с использованием заданного порогового коэффициента, определяющего максимально возможное расхождение в значениях их компонентов цвета. Если обнаруживается пиксел, который одновременно может быть связан с несколькими пикселями из разных областей, то эти области объединяются. Поскольку границы между областями иногда размыты, то смежные области могут быть объединены ошибочно. Чтобы не допустить этого, при проверке пикселя на принадлежность к какой-либо области

отклонение значений его компонентов цвета от средних значений компонентов цвета по всей области не должно превышать установленного порогового коэффициента. Соответственно, второе условие принадлежности пиксела к области объекта на изображении задается выражением:

$$\mathbf{c}(x, y) \in \Theta : \begin{cases} |C_R(x, y) - \bar{\Theta}_R| \leq k \\ |C_G(x, y) - \bar{\Theta}_G| \leq k \\ |C_B(x, y) - \bar{\Theta}_B| \leq k \end{cases} \quad (3.12)$$

Таким образом, изображение представляется в виде множества областей, принадлежащих разным объектам. Если известны диапазоны значений компонентов цвета для объектов, которые необходимо обнаружить, то гистограмма позволяет выявить их присутствие на изображении [201]. На рисунке 3.8 изображена гистограмма значений компонентов цвета, полученная для сегментированного изображения на рисунке 3.7 (б).

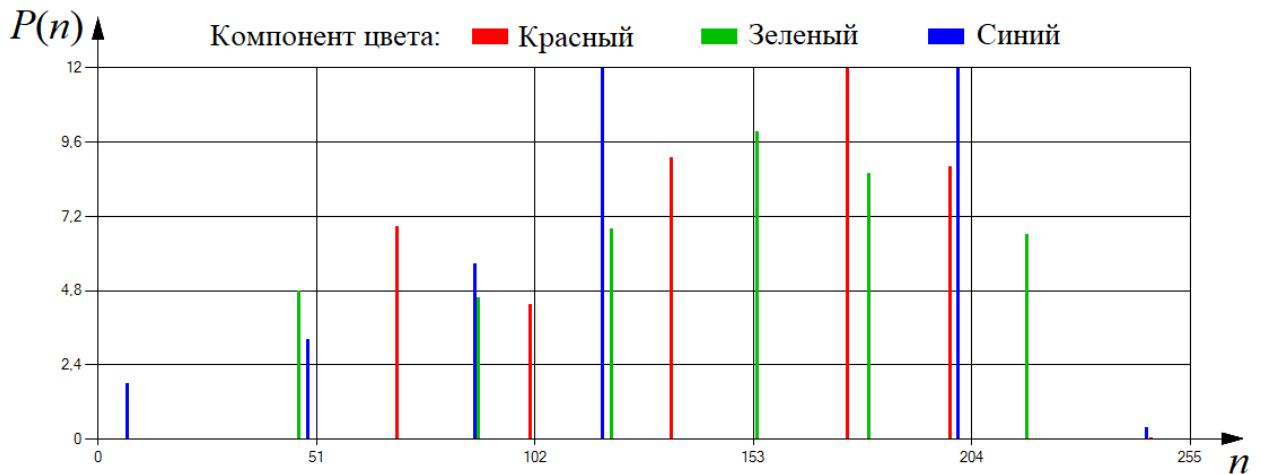


Рисунок 3.8 – Гистограмма значений компонентов цвета

Данная гистограмма позволяет разбить весь набор деталей на шесть основных групп объектов, различающихся по цвету. Если цвет фона на изображении является однородным, а объекты не перекрываются между собой, то с помощью процедуры сегментации изображения можно обнаружить и отделить все объекты друг от друга. При этом вероятность достоверного обнаружения искомого объекта будет зависеть от того, насколько диапазон компонентов цвета этого объекта перекрывает диапазоны компонентов цвета других объектов.

3.2.4 Метод обнаружения объектов по габаритам на изображении

ВСКЗ, построенные на базе стереофотограмметрических систем, обладают способностью в режиме реального времени определять расстояние до объекта по двум кадрам, сделанным одновременно. Стереофотограмметрическая система состоит из двух видеокамер [79], которые располагаются таким образом, что их оптические оси параллельны и отстоят друг от друга на некоторое расстояние. При этом для каждого создаваемого видеокамерой изображения определяются координаты проекции наблюдаемого объекта в координатной плоскости этой видеокамеры, а расстояние до объекта вычисляется согласно выражению:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = b \sqrt{\left(\frac{x_1 + x_2}{2(x_1 - x_2)}\right)^2 + \left(\frac{y_1 + y_2}{2(y_1 - y_2)}\right)^2 + \left(\frac{f}{x_1 - x_2}\right)^2}, \quad (3.13)$$

где L – расстояние до наблюдаемого объекта относительно центра базы стереофотограмметрического устройства;

(X, Y, Z) – координаты наблюдаемого объекта в системе координат с центром в середине прямой, соединяющей центры объективов видеокамер;

(x_1, y_1) – координаты проекции наблюдаемого объекта в картинной плоскости первой видеокамеры;

(x_2, y_2) – координаты проекции наблюдаемого объекта в картинной плоскости второй видеокамеры;

b – расстояние между оптическими осями видеокамер;

f – фокусное расстояние видеокамер.

Соответственно, стереофотограмметрическая система позволяет сформировать карту глубины для всех изображенных объектов, попадающих в область взаимного перекрытия поля зрения видеокамер. Следовательно, задав в качестве критерия поиска возвышение над уровнем местности, дальность или видимые размеры объекта, производится его обнаружение. На рисунке 3.9 показаны результаты обработки изображения набора деталей, на котором обнаружены объекты, геометрические параметры которых соответствуют заданному критерию поиска.



Рисунок 3.9 – Обнаружение объектов по размеру

В комбинированных системах расстояние до объекта определяется непосредственно с помощью лазерного дальномера. В настоящее время всё большее распространение получают лазерные сканеры, которые позволяют получать результаты измерений, отличающиеся высокой точностью даже при неблагоприятных погодных условиях. При этом неоднозначность дальномерных измерений разрешается за счет использования многократных отражений от объектов и способности системы проводить анализ формы сигнала в режиме реального времени. Сканирующий механизм лазерного сканера построен на основе быстро вращающегося многогранного зеркала, что позволяет сформировать линейные, сонаправленные и параллельные траектории сканирующего луча, обеспечивая формирование облака точек постоянной плотности. Эта способность сканера в комбинации с возможностью видеокамеры, позволяют построить карту глубины изображения сцены и обеспечить наибольшую достоверность при обнаружении объекта по заданным критериям поиска.

3.2.5 Метод обнаружения объектов по форме поверхности

Большинство методов обнаружения объектов по форме их поверхности основаны на сравнении с одним или несколькими эталонными изображениями объекта измерений. Сравнение изображения с эталоном осуществляется путем представления изображений в виде двумерных уровней яркости или дискретных двумерных матриц интенсивности и последующим определением меры близости

этих изображений [202]. Например, в случае сравнения двух изображений размером $M \times N$, описываемых функциями яркости пикселей $f(x, y)$ и $g(x, y)$ мера их близости определяется по формуле:

$$L(f, g) = \sqrt{\sum_{y=0}^{y=M} \sum_{x=0}^{x=N} |f(x, y) - g(x, y)|^2} \quad (3.14)$$

Идентификация объектов выполняется методом перебора различных классов эталонных изображений, сопоставляемых с изображением идентифицируемого объекта. При этом решается задача на определения минимального значения меры близости изображения объекта с набором эталонных изображений:

$$\min(L) = \arg \min_{i=0}^{i=n} [L(f, g_i)], \quad (3.15)$$

где $\{g_i\}$ – набор классов эталонных изображений.

Эффективность данного метода значительно снижается при несоответствии масштаба идентифицируемого объекта и эталонных изображений, уровня освещенности, а также выбранного ракурса съемки. Для устранения этих недостатков вводится корреляционная метрика, относительно средних значений уровня яркости эталонных и идентифицируемого изображений объекта, которая задается следующим выражением:

$$k(f, g_i) = \frac{\sum_{y=0}^{y=M} \sum_{x=0}^{x=N} [f(x, y) - \bar{f}(x, y)] [g_i(x, y) - \bar{g}_i(x, y)]}{\sqrt{\sum_{y=0}^{y=M} \sum_{x=0}^{x=N} [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2} \sqrt{\sum_{y=0}^{y=M} \sum_{x=0}^{x=N} [g_i(x, y) - \bar{g}_i(x, y)]^2}} \quad (3.16)$$

Данная корреляционная метрика применяется в методе корреляционной связи, что повышает вероятность правильной идентификации объекта. Этот метод хорошо подходит для идентификации зашумленных изображений объекта, искаженных равномерным шумом, имеющим нормальное распределение уровня яркости на изображении. При этом решается задача на определения максимального значения меры близости изображения идентифицируемого объекта с набором эталонных изображений с учетом корреляционной метрики:

$$\min(L) = \arg \max_{i=0}^{i=n} [k(f, g_i)], \quad (3.17)$$

Более совершенный метод корреляционной обработки изображений был предложен профессором Пытьевым при решении задач морфологического анализа изображений [203]. Данный метод вводит понятие «Норма изображения», которое характеризует меру его близости со множеством изображений гильбертова пространства, которые могут быть получены с разных ракурсов (φ, θ) и с разным уровнем освещенности E . Тогда квадрат нормы изображения задается выражением:

$$\|f\|^2 = \int_{(\varphi, \theta, E)} f^2(x, y) d\varphi d\theta dE. \quad (3.18)$$

Соответственно, набор эталонных изображений также должен быть задан множеством изображений гильбертова пространства Z , полученных с разного ракурса:

$$\|f_{\min}(x, y) - f(x, y)\| = \min_{i=0}^{i=n} \|g_i(x, y) - f(x, y), g \in Z\| \quad (3.19)$$

Найденное таким образом наиболее близкое к эталону изображение является проекцией изображения на множество его вариаций $\text{Pr}_Z(f)$. На основе данной проекции определяется корреляционная метрика:

$$K(g_i, Z) = \|\text{Pr}_Z(g_i)\| / \|g_i\|. \quad (3.20)$$

Тогда параметры, характеризующие ракурс съемки и освещенность, можно определить наложив проекцию изображения идентифицируемого объекта на множество эталонных изображений $\text{Pr}_f(g)$ с помощью следующего выражения:

$$\{\varphi, \theta, E\} = \arg \max_{i=0}^{i=n} [K(g_i, Z)]. \quad (3.21)$$

Также широко применяется метод обобщенного преобразования Хафа, который позволяет быстро и устойчиво обнаруживать графические примитивы, описываемые аналитическими уравнениями: прямые линии, окружности, эллипсы и т. п. [86]. На рисунке 2.14 в общем виде представлена схема обнаружения объектов произвольной формы путем применения метода обобщенного преобразования Хафа, в котором используется информация об ориентации вектора-градиента в контурных точках (рис. 3.10).

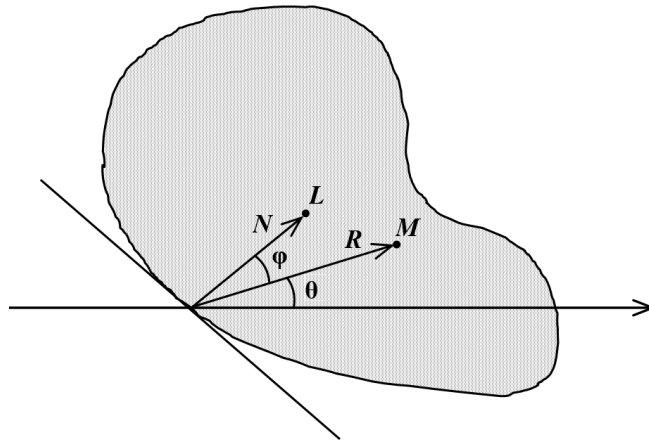


Рисунок 3.10 – Принцип обобщенного преобразования Хафа: L – условная точка локализации объекта; M – произвольная точка объекта; N – расстояние от краевой точки до условной точки локализации объекта; R – расстояние от краевой точки до произвольной точки объекта; φ – угол направления на центр; θ – угол краевой ориентации

В этом случае расстояние R от текущего пиксела границы не является константой, а задается функцией $R(\theta)$ от угла краевой ориентации θ . Угол направления на центр φ от краевого пиксела также задается функцией $\varphi(\theta)$. В дополнение к общему случаю «центр» должен заново интерпретироваться как условная точка локализации L . Выбор точки локализации L не является единственным и может регулировать ошибки. В общем случае следует ожидать, что положение точки локализации рядом с центром тяжести периметра объекта минимизирует ошибки, обусловленные неточностью оценки ориентации края [204].

Для определения простых форм, включая форму круга, функция $R(\theta)$ может быть описана аналитически. Однако для большинства форм это невозможно. Как показано в научных работах [205] [206], такой подход еще может быть применим, поскольку для запоминания информации о форме можно использовать табличные данные, содержащие дискретные значения $R(\theta)$ для различных значений углов. Из данного описания, обобщенное преобразование Хафа следует, что оно инвариантно к вращению [159].

Таким образом, преобразование Хафа, обобщенное преобразование Хафа и другие его модификации обеспечивают инвариантное обнаружение

геометрических примитивов и объектов на изображении с высокой степенью помехозащищенности и значительной точностью определения параметров местоположения и ориентации. Существенным ограничением применимости этой группы методов является то, что описанные алгоритмы обнаруживают не сами полутонные объекты, а их контуры. Поэтому объекты, не имеющие четко выраженного контура, не могут быть подвергнуты детектированию с использованием обобщенного преобразования Хафа [159].

Выделение контура объекта на изображении может осуществляться с помощью градиента. Операция взятия градиента применима к цветным изображениям и производится по методу Ди Зензо [207]. В соответствии с этим методом задаются единичные вектора r , g , b в направлении осей цветового пространства RGB, через которые определяются следующие два вектора:

$$u = \frac{dC_R}{dx} r + \frac{dC_G}{dx} g + \frac{dC_B}{dx} b, \quad (3.22)$$

$$v = \frac{dC_R}{dy} r + \frac{dC_G}{dy} g + \frac{dC_B}{dy} b. \quad (3.23)$$

Далее, задаются величины:

$$\varepsilon_{xx} = u^2 = \left| \frac{dC_R}{dx} \right|^2 + \left| \frac{dC_G}{dx} \right|^2 + \left| \frac{dC_B}{dx} \right|^2, \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_{yy} = v^2 = \left| \frac{dC_R}{dy} \right|^2 + \left| \frac{dC_G}{dy} \right|^2 + \left| \frac{dC_B}{dy} \right|^2, \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_{xy} = uv = \frac{dR}{dx} \frac{dR}{dy} + \frac{dG}{dx} \frac{dG}{dy} + \frac{dB}{dx} \frac{dB}{dy}. \quad (3.26)$$

Вычисляется угол γ в направлении максимального изменения скорости:

$$\gamma = \arctg \left(\frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}} \right). \quad (3.27)$$

Определяется величина скорости изменения в направлении угла γ :

$$F(\gamma) = \sqrt{\frac{(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) \cos \gamma + 2\varepsilon_{xy} \sin \gamma}{2}}. \quad (3.28)$$

Другой альтернативный метод вычисления градиента основан на

покомпонентной обработке цвета каждого пиксела на изображении с использованием модуля оператора Лапласа, выраженного через вектор, который для функции двух переменных $f(x,y)$ определяется из выражения:

$$|\nabla^2 f| = \sqrt{\left(\frac{d^2 f}{dx^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 f}{dy^2}\right)^2}, \quad (3.29)$$

где

$$\frac{d^2 f}{dx^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y), \quad (3.30)$$

$$\frac{d^2 f}{dy^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y). \quad (3.31)$$

В качестве упрощения, значения оператора Лапласа, могут заменяться приближением, реализованным с помощью двух масок, задаваемых оператором Собела, которые можно представить в виде матриц:

$$M^T = \begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.32)$$

Тогда вторые производные, можно найти из следующих выражений:

$$\frac{d^2 f}{dx^2} \approx \frac{1}{8} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 [f(x+1-i, y+1-j) M(i, j)], \quad (3.33)$$

$$\frac{d^2 f}{dy^2} \approx \frac{1}{8} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 [f(x+1-i, y+1-j) M^T(i, j)]. \quad (3.34)$$

В этом случае, значение оператора Лапласа для компонентов цвета также останется максимальным на границе, отделяющей нужный объект от других и при этом границы других объектов, не отвечающих условию, не будут способствовать увеличению значения данного оператора. Таким образом, искомый объект может быть обнаружен путем выделения контура всех объектов на изображении и вычисления отклонений формы контура этих объектов от формы контура искомого объекта. Для искомого объекта величина отклонения его формы не должна превышать заданного порогового значения.

3.2.6 Метод обнаружения объектов по частоте мигания

Объекты, периодически излучающие или отражающие свет через определенный интервал времени, характеризуются частотой мигания. Такими объектами могут являться источники света или ВЦ активного типа, которые устанавливаются на объекте измерения. Для обнаружения таких объектов по частоте мигания разработан метод цифровой обработки видеоизображений [200]. При этом в соответствии с теоремой Котельникова необходимо, чтобы частота формирования кадров видеоизображения оптоэлектронным устройством ВСКЗ превышала частоту мигания источника света в два и более раза.

Выделение мигающего источника света на изображении осуществляется с помощью векторной функции разности по двум последовательно сделанным кадрам видеоизображения:

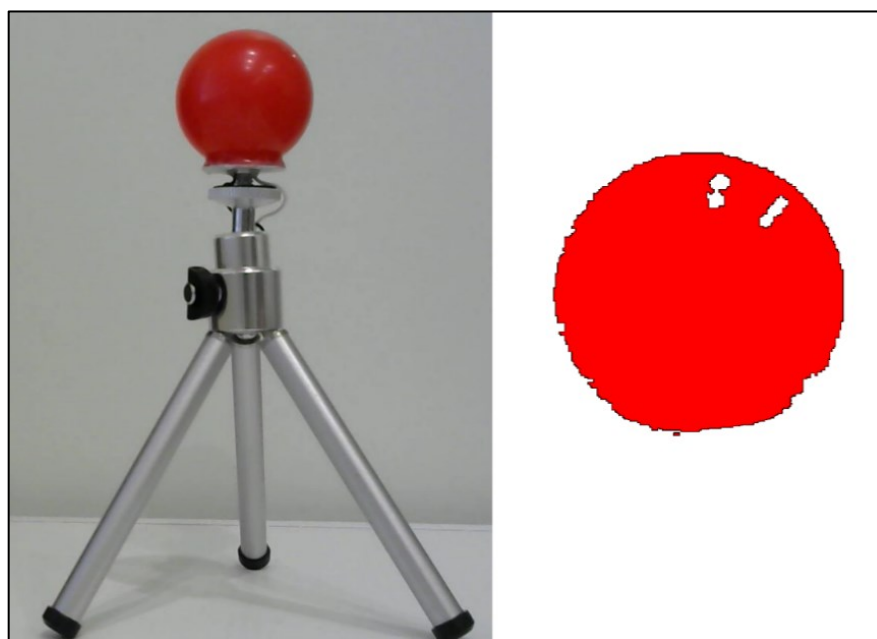
$$v(x, y) = \sum_{i=0}^{fps} \begin{cases} 1 & \text{если } b_{i+1}(x, y) - b_i(x, y) > k \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3.35)$$

где fps – кадровая частота видеоизображения;

k – пороговое значение изменения яркости пиксела на изображении;

$b_i(x, y)$, $b_{i+1}(x, y)$ – яркость пиксела на двух последовательных кадрах видеоизображения.

Значения векторной функции ежесекундно обнуляются $\Delta c(x, y) = 0$. В результате функция накапливает происходящие за секунду изменения на видеоизображении. Изображение сегментируется на связанные области пикселов, по значениям, принимаемой векторной функции $\Delta c(x, y)$. На рисунке 3.11 показаны ВЦ и область инвертированного изображения функции $\Delta c(x, y)$, принимающей значения отличные от нуля.



а)

б)

Рисунок 3.11 – Обнаружение ВЦ по частоте мигания:
а) ВЦ; б) результат цифровой обработки видеоизображения

Данный метод цифровой обработки видеоизображений обеспечивает высокую вероятность обнаружения источника электромагнитного излучения даже в условиях недостаточной видимости и способствует увеличению диапазона измерения дальности.

3.3 Оценка влияния визуальных признаков на вероятность обнаружения визирной цели

Объект измерений должен обладать характерными признаками, которые позволят с высокой вероятностью обнаруживать его в зоне прямой видимости оптико-электронного устройства среди множества других объектов. Вероятность обнаружения нужного объекта снижается если он частично перекрывается другими объектами. При этом возможно обнаружение «ложных» объектов со схожими визуальными признаками. Все это обуславливает актуальность решения задачи, направленной на повышение вероятности обнаружения объектов измерений. Ключевое значение имеют такие визуальные признаки объекта, как форма и цвет [208]. Для определения влияния этих признаков на вероятность обнаружения объекта измерений был проведен ряд лабораторных экспериментов.

В геодезии, транспортном и промышленно-гражданском строительстве используются специальные объекты – ВЦ (марки), которые крепятся к требуемым объектам и упрощают их обнаружение. ВЦ применяют для наведения на них визирного устройства геодезического прибора. Например, современные роботизированные электронные тахеометры способны обнаруживать установленную на вехе или штативе ВЦ (отражатель) и отслеживать ее перемещение, удерживая на ней перекрестие сетки нитей зрительной трубы [209]. Это значительно упрощает работу геодезиста, позволяя ему самостоятельно перемещать ВЦ (вешку с отражателем) с места на место и с помощью пульта дистанционного управления подавать команду тахеометру снять и зарегистрировать в памяти все необходимые отсчеты. Обнаружение оптико-электронным устройством ВЦ в безотражательном режиме также возможно только на основе визуальных признаков [210].

Для оценки влияния различных факторов на точность измерений ВСКЗ применялись ВЦ (рис. 3.12), параметры которых приведены в таблице 3.1. В качестве оптико-электронного устройства использовалась цифровая видеокамера с типом фотоприемника КМОП, разрешением кадра 2048x1536 пикселей, размером пиксела 2,2 мкм, изменяемым фокусным расстоянием [5-50] мм и динамическим диапазоном цвета 100 дБ. Измерения проводились в лаборатории с климатической установкой, поддерживающей заданную температуру в диапазоне [10, 45] °С, а также источником света, регулирующим освещенность в диапазоне [0, 100] лк.

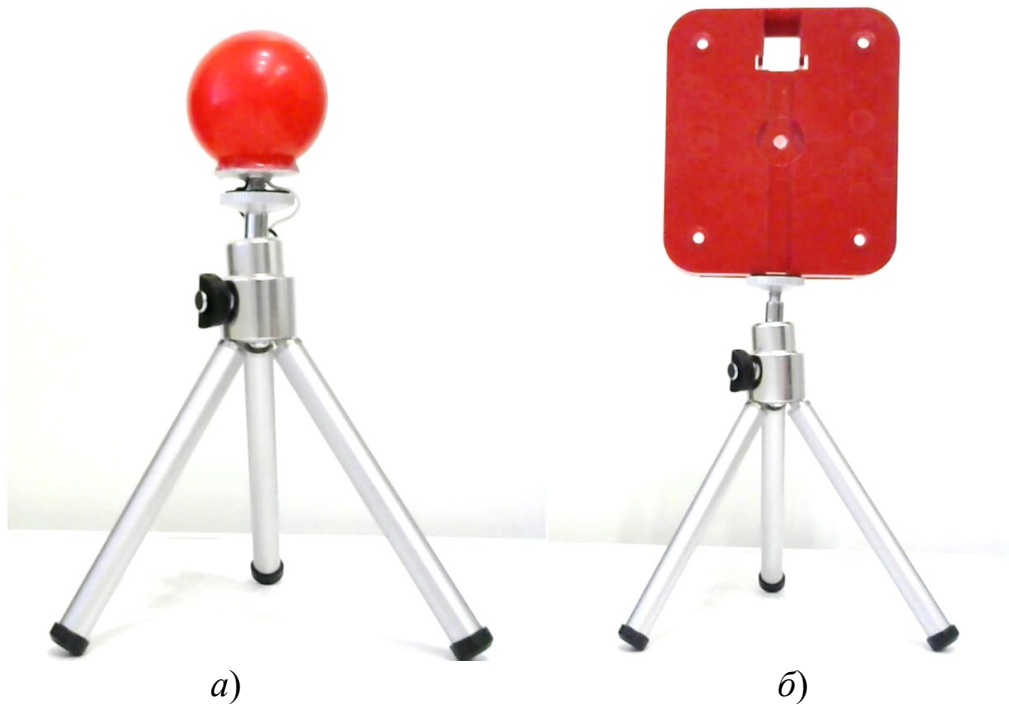


Рисунок 3.12 – ВЦ: а) истинная; б) ложная

Таблица 3.1 – Параметры ВЦ

ВЦ \ Параметры	Форма	Размеры, см	Цвет
Истинная	Сфера	2,25 (радиус)	Красный
Ложная	Параллелепипед	10x11x2 (ШxВxГ)	Красный

3.3.1 Оценка вероятности обнаружения визирной цели по цвету

Для обнаружения ВЦ на изображении, оно сегментировалось на изолированные по цвету области, состоящие из связанных друг с другом пикселей, цвет которых находится в одном цветовом диапазоне. Если известны диапазоны цветопередачи видеокамеры и значения компонентов цвета ВЦ, то появляется возможность обнаружить её на видеоизображении. Цветопередача видеокамеры в зависимости от расстояния до ВЦ и уровня её освещенности была оценена экспериментально. Результаты экспериментов представлены на следующих графиках (рис. 3.13, 3.14).

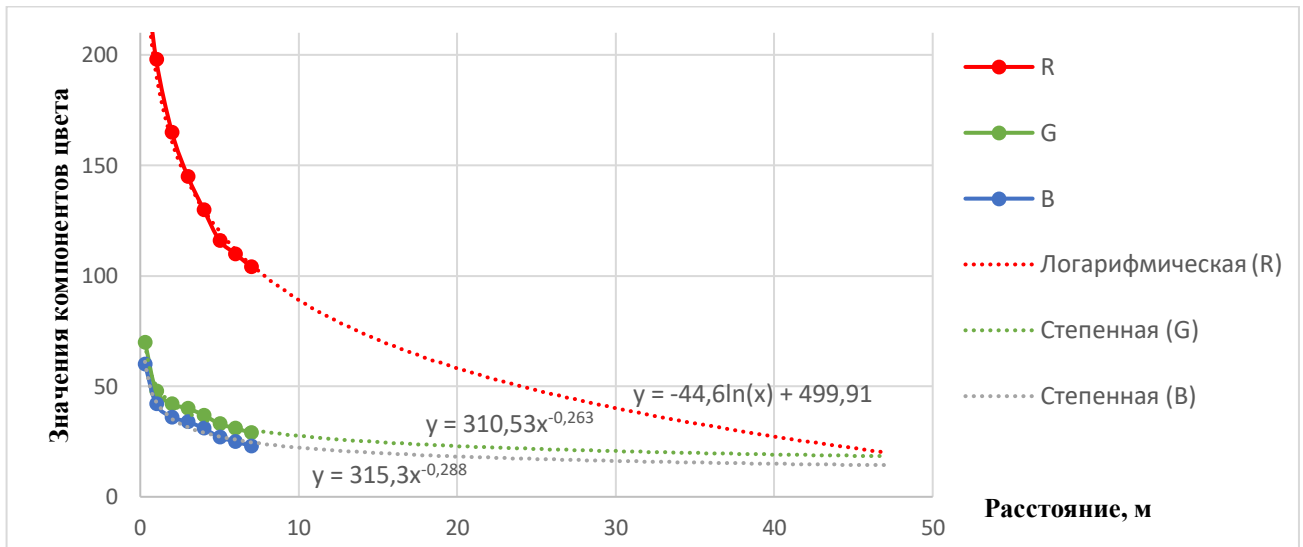


Рисунок 3.13 – Зависимость цветопередачи видеокamеры от расстояния

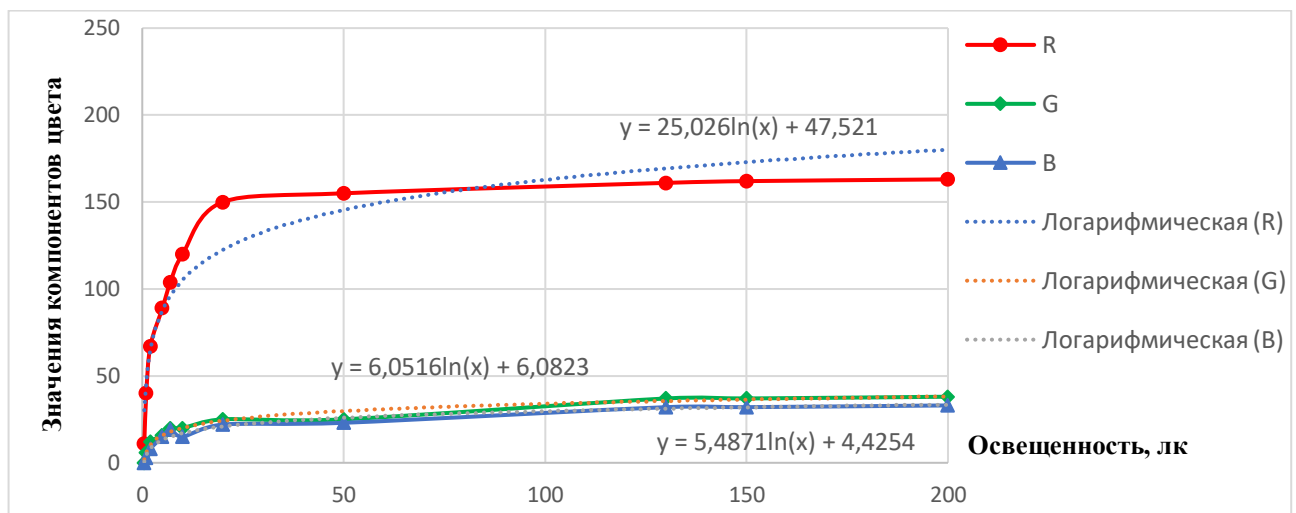


Рисунок 3.14 – Зависимость цветопередачи видеокamеры от освещенности

Было установлено, что цветопередача видеокamеры варьируется, в зависимости от расстояния до ВЦ в диапазонах значений компонентов цвета: $R[50,240]$; $G[20,70]$; $B[15,60]$. При изменении уровня освещенности ВЦ цветопередача видеокamеры изменялась в следующих диапазонах значений компонентов цвета: $R[0,200]$; $G[0,50]$; $B[0,40]$. Следовательно, освещенность ВЦ оказывает большее влияние на цветопередачу видеокamеры чем ее удаленность. Предположив, что цвет всех объектов, которые могут попасть в поле зрения видеокamеры будет равновероятно распределен по трем диапазонам компонентов цвета, тогда вероятности обнаружения ВЦ на каналах передачи видеоизображения (R, G, B) составят:

$$P(R) = 1 - 241/256 = 0,06, \quad (5.1)$$

$$P(G) = 1 - 71/256 = 0,72, \quad (5.2)$$

$$P(B) = 1 - 61/256 = 0,76. \quad (5.3)$$

Вероятность обнаружения ВЦ на цветном видеоизображении вычислялась по теореме умножения вероятностей для независимых событий:

$$P(RGB) = 1 - P(\bar{R})P(\bar{G})P(\bar{B}) = 0,938 \quad (5.4)$$

Для достоверной регистрации ВЦ оптоэлектронным устройством необходимо обеспечить её обнаружение с вероятностью не менее 0,95 [211]. Поскольку в поле зрения видеокамеры одновременно попадает большое количество объектов, то обнаружить среди них ВЦ по цвету будет сложно. При значительной удаленности ВЦ или в условиях недостаточной видимости этот признак становится менее явным, что препятствует ее обнаружению. Соответственно необходимо использовать дополнительный признак, такой как форма ВЦ.

3.3.2 Оценка вероятности обнаружения визирной цели по форме

На изображении ВЦ имеет форму окружности. Диапазон отклонений изображения формы ВЦ от окружности в зависимости от расстояния до нее был получен экспериментально. Для этого на изображениях выделялся контур ВЦ (рис. 3.15) путем нахождения модуля градиента цвета в точке (x,y) :

$$|\nabla \mathbf{c}(x,y)| = \sqrt{\left(\frac{d^2 \mathbf{c}(x,y)}{dx^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 \mathbf{c}(x,y)}{dy^2}\right)^2}, \quad (5.5)$$

при условии,

$$C_R(x,y) = C_G(x,y) = C_B(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\nabla \mathbf{c}(x,y)| > k \\ 255, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (5.6)$$

где k – пороговый коэффициент изменения цвета.

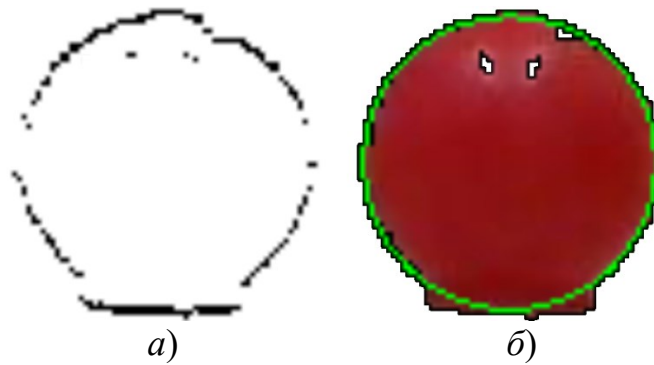


Рисунок 3.15 – Аппроксимация окружностью контура ВЦ на изображении:
а) контур; б) аппроксимирующая окружность

Полученные участки контура аппроксимировались окружностью по методу наименьших квадратов. Оценка формы ВЦ на изображении производилась путем определения стандартного отклонения контура ВЦ от формы аппроксимирующей окружности на основе оценки выборочной дисперсии точек контура по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(R - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \right)^2} \quad (5.7)$$

Для сравнительной оценки использовалась ложная ВЦ, на изображении которой также выделялся и аппроксимировался окружностью контур (рис. 3.16). При этом для более точной оценки изображение ложной ВЦ было получено с разного ракурса.

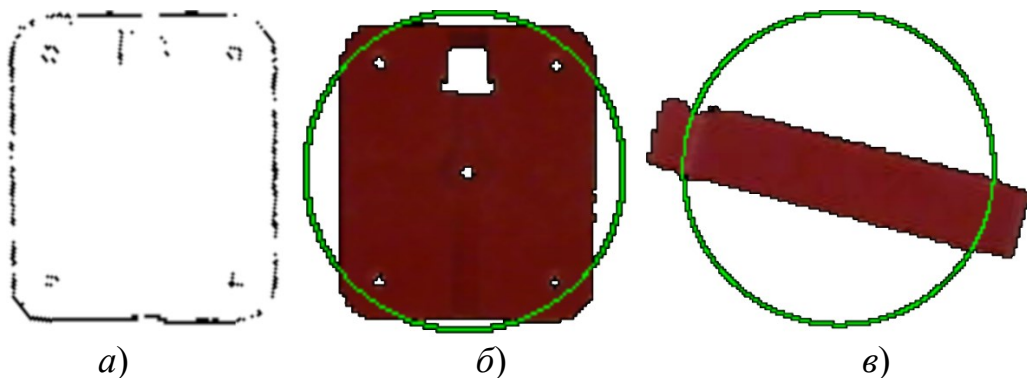


Рисунок 3.16 – Аппроксимация окружностью контура ложной ВЦ на изображении: а) контур ВЦ; б) аппроксимация изображения (центральный ракурс); в) аппроксимация изображения (боковой ракурс)

В ходе эксперимента были получены графики стандартного отклонения точек контура истинной и ложной ВЦ от формы окружности в зависимости от ракурса съемки и расстояния до этих целей (рис. 3.17).

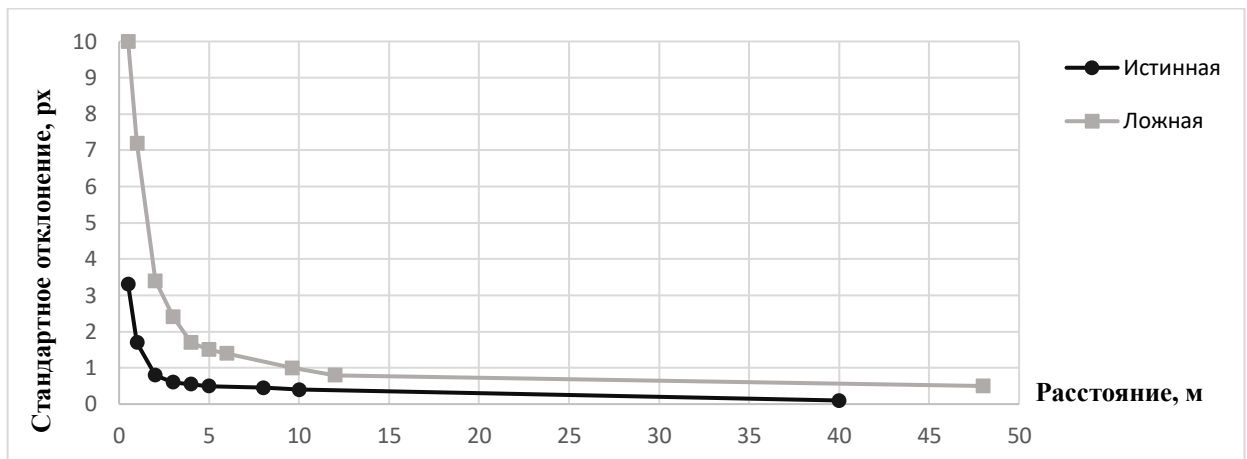


Рисунок 3.17 – Изменение стандартного отклонения точек контура ВЦ от формы окружности в зависимости от величины освещенности ВЦ

Было установлено, что стандартное отклонение формы контура ВЦ варьируется в зависимости от расстояния до видеокамеры, в следующих диапазонах значений: Истинная $[0,3]$; Ложная $[0,10]$. Максимальное стандартное отклонение формы контура ложной ВЦ на изображении от окружности (10 px) было получено с бокового ракурса. Вероятность обнаружения истинной ВЦ по данному признаку составила:

$$P(S) = 1 - 4/11 = 0,64 \quad (5.8)$$

Соответственно, вероятность обнаружения ВЦ на видеоизображении по двум признакам (цвет и форма) составила:

$$P(RGBS) = 1 - P(\bar{R})P(\bar{G})P(\bar{B})P(\bar{S}) = 0,977 \quad (5.9)$$

Сделан вывод, что основной причиной, влияющей на вероятность обнаружения ВЦ, является ее недостаточная освещенность. Данная проблема может быть устранена путем установки в ВЦ источника электромагнитного излучения в видимом диапазоне света. В этом случае в качестве дополнительного признака может выступать частота мигания данного источника.

3.3.3 Оценка вероятности обнаружения визирной цели по частоте мигания

Из теоремы Котельникова следует, что определение частоты мигания источника света возможно если кадровая частота видеоизображения будет превышать частоту мигания в два и более раза. Учитывая, что частота

лабораторной видеокамеры 30 Гц, частота мигания ВЦ не должна превышать 15 Гц. Для обнаружения таких ВЦ использовалась векторная функция разности по двум последовательно сделанным кадрам видеоизображения:

$$\Delta b(x, y) = \begin{cases} \Delta b(x, y) + 1 & \text{если } b_1(x, y) - b_2(x, y) > k \\ \Delta b(x, y) & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (5.10)$$

где k – пороговый коэффициент изменения яркости пиксела на изображении;
 $b_1(x, y)$, $b_2(x, y)$ – яркость пиксела на двух последовательных кадрах.

При этом значения векторной функции ежесекундно обнулялись $\Delta b(x, y) = 0$. В результате функция накапливала происходящие за одну секунду изменения яркости на видеоизображении. Перед обнулением функции фиксировалась частота изменения яркости каждого пиксела на изображении. На рисунке 3.18 показаны инвертированные изображения ВЦ с разными частотами мигания.

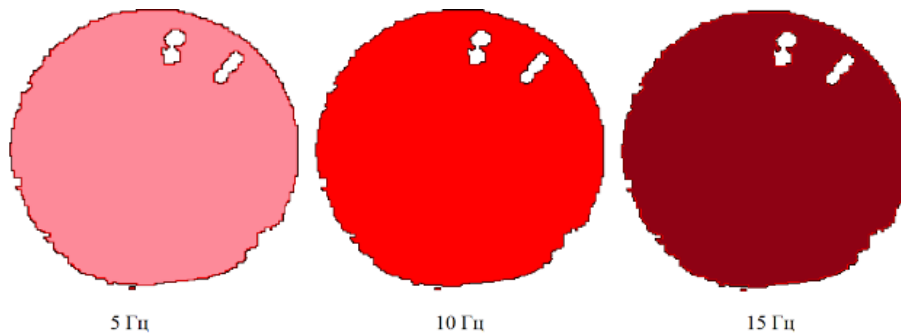


Рисунок 3.18 – Изображения ВЦ с разными частотами мигания

В ходе эксперимента было установлено, что наиболее оптимальным для обнаружения ВЦ является диапазон частот $\nu = [5, 7]$ Гц. При этом исключаются ошибки в определении частоты мигания ВЦ. Предположив, что частота мигания объектов, которые могут попасть в поле зрения видеокамеры будет равновероятно распределена по всему фиксируемому видеокамерой диапазону частот, можно определить вероятность обнаружения ВЦ в частотном диапазоне $[5, 7]$ Гц:

$$P(\nu) = 1 - 3/16 = 0,81 \quad (5.11)$$

Тогда вероятность обнаружения ВЦ на видеоизображении по трем признакам (R, G, B – компоненты цвета, P – форма контура и ν – частота мигания) составит:

$$P(RGBS\nu) = 1 - P(\bar{R})P(\bar{G})P(\bar{B})P(\bar{S})P(\bar{\nu}) = 0,996 \quad (5.12)$$

Таким образом, экспериментальным путем было подтверждено, что количество используемых признаков ВЦ влияет на вероятность ее обнаружения с помощью оптико-электронного устройства (рис. 3.19).

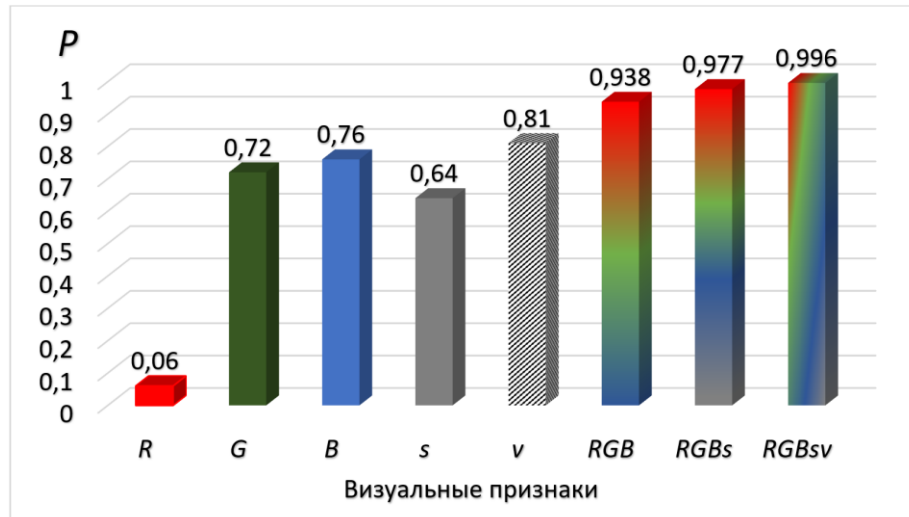


Рисунок 3.19 – Вероятности обнаружения ВЦ по визуальным признакам

Наибольшее влияние на вероятность обнаружения ВЦ оказывает признак цветовой окраски и признак частоты мигания ВЦ. Менее существенное влияние на вероятность обнаружения ВЦ оказывает признак формы. Также в ходе экспериментов было установлено, что использование признака частоты мигания значительно снижает влияние освещенности ВЦ на вероятность её обнаружения. Следовательно, данный признак позволяет с высокой вероятностью обнаруживать ВЦ оптико-электронным устройством даже в условиях недостаточной видимости.

3.4 Разработка фотограмметрических методов определения дальности и пространственного положения объекта измерений

Для решения измерительных задач с помощью ВУ были разработаны различные фото-видеограмметрические методы измерений. Все существующие в настоящее время фотограмметрические устройства и реализуемые ими методы определения дальности и пространственного положения объектов по изображениям, на основе которых может вестись разработка ВСКЗ подразделяются на три типа:

- 1) фотограмметрические устройства с одной камерой, оснащенной объективом с фиксированным или изменяемым фокусным расстоянием;
- 2) стереофотограмметрические устройства, формирующие пары перекрывающихся снимков;
- 3) комбинированные устройства, совмещающие в себе видеокамеру и дальномер (лазерный, ультразвуковой и т.д.), который непосредственно используется в качестве средства измерения расстояния до объектов.

Например, в стереофотограмметрическом устройстве [212], состоящим из двух фотокамер, расположенных на известном расстоянии друг от друга, используется триангуляционный метод измерения дальности объекта. Фотокамеры размещаются на одной общей вертикальной оси, вокруг которой они могут синхронно вращаться. Устройство измеряет видимое смещение центроида изображения объекта от центра фотоснимка. По этим смещениям вычисляется угловое положение объекта относительно главных оптических осей видеокамер. Дальность объекта определяется путем решения тригонометрической задачи нахождения медианы треугольника, соединяющей середину его основание с вершиной треугольника в которой расположен объект измерений. Точность полученных результатов зависит от размера базисного расстояния между двумя фотокамерами [86].

3.4.1 Определение дальности объектов произвольной формы

Разработан фотограмметрический метод определения дальности с помощью которого можно одновременно определять дальность объектов, а также дальность отдельных частей этих объектов, визуально отличающихся по цвету. Согласно способу [213] с помощью фотограмметрического устройства получают первое цифровое изображение объектов измерения. Затем оптическая ось видеокамеры перемещается по горизонтали на известный угол и получают второе цифровое изображение этих объектов. По двум полученным цифровым изображениям, путем корреляционной обработки, измеряется расстояние, на которое один и тот же объект сместился вследствие поворота видеокамеры.

Выбирается такой ракурс съемки объектов измерения, чтобы плоскость изображения фотограмметрического устройства приняла вертикальное положение. В соответствии с законами геометрической оптики, проектируемые лучи от объектов входят в объектив под некоторым углом к его главной оптической оси, расположенной перпендикулярно передней главной плоскости объектива. После чего преломляются на задней главной плоскости объектива и выходят под тем же углом к главной оптической оси оптоэлектронного устройства. В результате, проектируемые лучи образуют две конгруэнтные связки: входящие лучи с вершиной в передней узловой точке S и выходящие лучи в задней узловой точке S' объектива [79]. Таким образом формируется изображение объектов измерения. Рисунок 3.20 поясняет сущность построения изображения в оптической системе фотограмметрического устройства на примере двух произвольных точек A и B на поверхности объектов, проектирующихся на плоскость изображения.

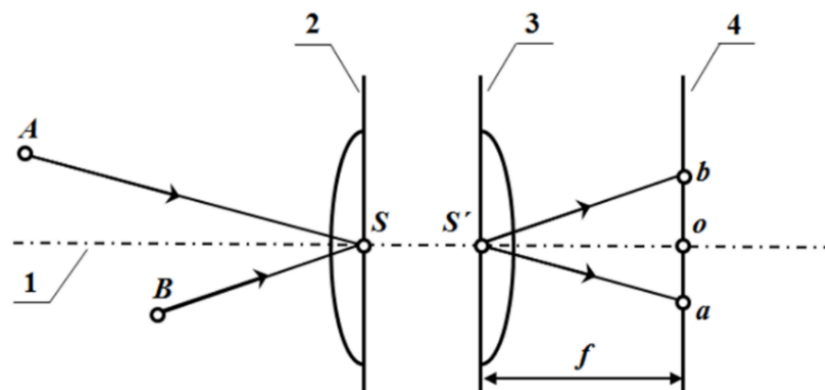


Рисунок 3.20 – Принципиальная схема построения изображения в оптической системе опто-электронного устройства: 1 – главная оптическая ось; 2 – передняя главная плоскость; 3 – задняя главная плоскость; 4 – плоскость изображения

Устройство для панорамной пространственной фотосъемки [214] конструктивно размещается на поворотной платформе таким образом, что ось его вращения проходит через плоскость изображения (рис. 3.21). После поворота на заданный угол вокруг вертикальной оси, проходящей через центр плоскости снимка, делается повторный снимок. Таким образом выполняется панорамная съемка окружающих объектов, дальность которых, дальность которых зависит от разности координат этих объектов на стереопарах полученных изображений.



Рисунок 3.21 – Фотограмметрическое устройства для создания панорамных пространственных изображений

Принцип работы устройства для панорамной пространственной фотосъемки показан на рисунке 3.22, где изображена схема прохождения оптических лучей, проецируемых на плоскость изображения OD . Объект, расположенный в точке A , проецируется на плоскость изображения в точку a_1 . При повороте видеокамеры относительно вертикальной оси на угол $\Delta\omega$ точка A проецируется в точку a_2 .

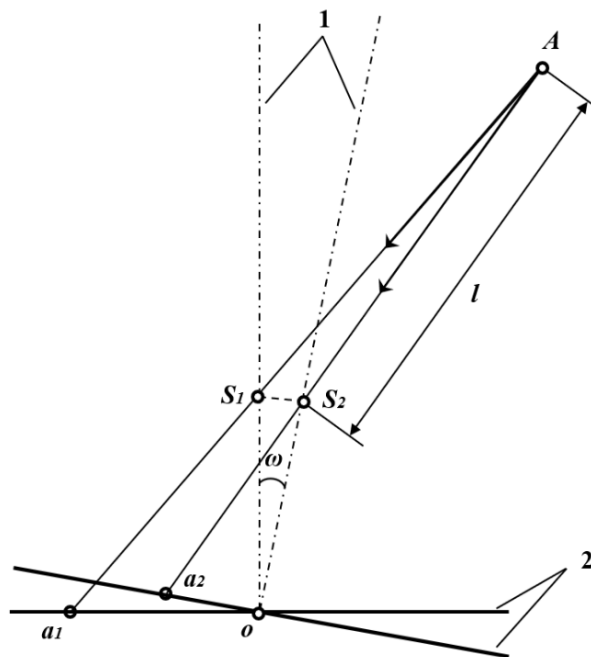


Рисунок 3.22 – Схема прохождения оптических лучей при повороте камеры относительно вертикальной оси вращения

Соотношение сторон подобных треугольников задается равенством:

$$OE/OS_2 = AC/CS_2. \quad (3.36)$$

Используя данное равенство, а также зная расстояние l до точки A , угол поворота видеокамеры $\Delta\omega$, её фокусное расстояние f , размер базиса b и координаты точки A на плоскости изображения, можно вычислить новое положение этой точки на изображении после поворота камеры из выражения:

$$\Delta x_i = \frac{\sin\left(\arctg\left(\frac{b}{l+f}\right) - \Delta\omega\right)}{\cos\left(\arctg\left(\frac{b}{l+f}\right) - \Delta\omega\right) - f/\sqrt{(l+f)^2 + b^2}}. \quad (3.37)$$

Если расстояние до объекта намного превышает фокусное расстояние объектива, то полученное выражение можно привести к следующему виду:

$$\Delta x_i \approx \frac{b - (l+f)\operatorname{tg}\Delta\omega}{l+f+b\operatorname{tg}\Delta\omega}. \quad (3.38)$$

Полученные изображения на двух снимках сегментируются с помощью специально разработанной программы [215], предназначенной для создания панорамных пространственных изображений окружающих объектов по серии их фотографий, полученных из одной точки съемки горизонтированным фотоаппаратом, изменяющим ракурс съемки с известным угловым шагом.

После сегментации производится обнаружение идентичных сегментов на двух снимках. Поскольку снимки объектов сделаны через некоторый интервал времени, то для подвижных объектов характерно изменение ракурса съемки. Соответственно цвет или уровень яркости одного и того же объекта на двух разных снимках может отличаться. Поэтому поиск идентичных сегментов на этих снимках производится путем корреляционной обработки по двум признакам: расстояние геометрических центров и разность средних значений цветовых компонентов сегментов. Для каждого объекта, представленного сегментом на снимках, вычисляется расстояние от этого объекта до передней узловой точки объектива фотоаппарата после его поворота из следующего выражения:

$$AS_2 = S_1S_2 \sin \angle AS_1S_2 / \sin \angle S_1AS_2, \quad (3.39)$$

Дальности объектов определяются по формуле:

$$l = \frac{f \sqrt{2(1 - \cos \omega)} \sin \left(\frac{\pi + \omega}{2} - \arctg \left(\frac{x_1}{f} \right) \right)}{\sin (\arctg (x_1 / f) - \arctg (x_2 / f) - \omega)}, \quad (3.40)$$

где ω – угол поворота фотокамеры;

x_1 – абсцисса центра сегмента в системе координат первого изображения;

x_2 – абсцисса центра сегмента в системе координат второго изображения;

Найденные дальности позволяют составить карту глубины изображения и объединить те смежные области на нем, которые находятся на одинаковом удалении от точки съемки.

3.4.2 Определение дальности объекта с помощью визирной цели

ВЦ применяются в основном для наведения по ним визирного устройства геодезического прибора. Для работы с тахеометром в качестве ВЦ применяются специальные призмы – отражатели лазерного излучения [216]. Отраженное лазерное излучение от таких целей обладает гораздо большей мощностью чем электромагнитное излучение, отражаемое от объектов [217] [218]. В безотражательном (безпризменном) режиме работы тахеометра не используется призма-отражатель, а лазерное излучение отражается от объекта. Дальность измерений до ВЦ в безотражательном режиме напрямую зависит от отражающих свойств ее поверхности. Так, предельная дальность измерений до ВЦ со светлой и гладкой поверхностью в несколько раз превышает дальность измерений до объекта с темной поверхностью [219].

В целях увеличения диапазона измерения дальности фото-видеограмметрического устройства был разработан метод измерения дальности объектов с помощью ВЦ. Как было показано в научном исследовании [93], ВУ способно определять расстояние до объектов шарообразной формы известного радиуса, цвет которых представлен уникальным набором цветовых компонент, позволяющих однозначно выделить их на фоне других объектов. Такой тип объектов может служить в качестве ВЦ. Основное преимущество применения

подобных ВЦ заключается в исключении влияния ракурса съемки на точность измерения расстояния. Измеряя дальность ВЦ, прикрепленной к какому-то объекту и направление оптической оси ВУ можно определить координаты и размеры объекта измерений.

Наиболее известным методом обнаружения контуров является детектор границ Кенни [220], использующий фильтр для вычисления градиента на основе первой производной от гауссианы. Однако, операция вычисления градиента в данном методе применима к скалярной функции, задающей уровень яркости пиксела на черно-белых изображениях. Соответственно, применительно к цветным изображениям, требуется метод, дающий определение градиента для векторной функции цвета.

Метод Ди Зензо [207], специально разработанный для обработки цветных изображениях, задает иное определение градиента, применимое к векторным величинам, что способствует повышению точности обнаружения контура объектов на цветных изображениях. Однако этот метод не идеален для рассмотренного здесь, частного случая, когда необходимо выделить на изображении контур ВЦ, обладающей уникальными характеристиками цвета. В этом случае целесообразно ввести такое определение функции $f(x, y)$, при котором ее максимальное значение характеризует цвет искомого объекта [157]. Тогда для обнаружения контура ВЦ на изображении можно воспользоваться методом выделения контуров с помощью определения максимальных значений градиента цвета [221]. Поскольку цвет пиксела и значение функции $f(x, y)$ может быть выражено через трехкомпонентный вектор цвета $\mathbf{c}[C_R, C_G, C_B]$, а также приняв во внимание, что цвет ВЦ имеет слабо выраженный синий компонент, то функция задается следующим выражением:

$$f(x, y) = C_R(x, y) + C_G(x, y) - 2C_B(x, y) \quad (3.41)$$

В данном случае, значение модуля оператора Лапласа для компонентов цвета будет максимальным на границе, отделяющей нужный объект с отсутствующей цветовой компонентой от фона [198]. Рассмотрим горизонтальное сечение объекта (рис.3.23), показывающее как меняется значение модуля оператора Лапласа.

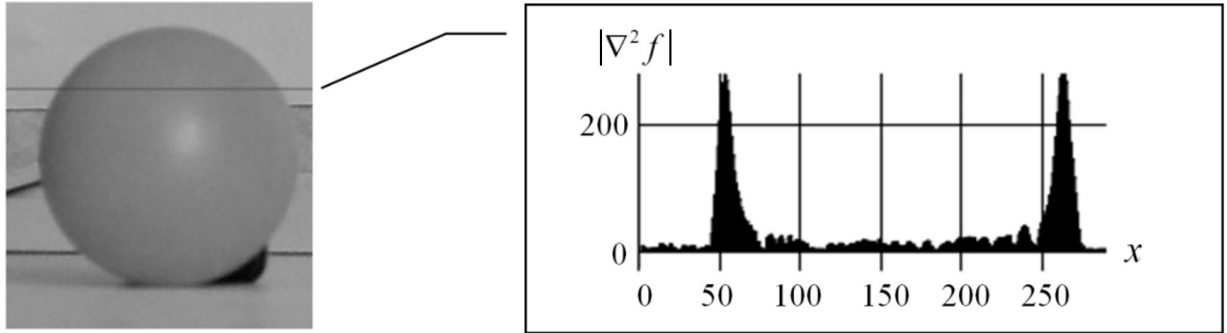


Рисунок 3.23 – Горизонтальное сечение изображения объекта, отображающее изменение значения модуля оператора Лапласа

Максимумы значений оператора соответствуют границе, разделяющей объект и фон изображения. В нашем случае объект полнотелый, поэтому каждому сечению изображения, проходящему через объект, будут соответствовать только два таких экстремума [198]. Представим максимумы значений оператора на сечении в виде упорядоченного множества S , состоящего из элементов, расположенных в порядке уменьшения в соответствии с условием:

$$s_i^x \in S : s_i^x = \nabla^2 f(x) \geq s_{i+1}^x \mid x, i \in \mathbb{N}, \quad (3.42)$$

где i – порядковый номер максимума оператора в формируемом упорядоченном по убыванию множестве, а x – координата, определяющая один из максимумов оператора на выбранном горизонтальном сечении. Таким образом, контур объекта на изображении можно обнаружить, применив условие:

$$C_R(x, y) = C_G(x, y) = C_B(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } \nabla^2 f(x, y) > k \\ 255, & \text{если } \nabla^2 f(x, y) \leq k \end{cases}. \quad (3.43)$$

Для повышения эффективности метода можно также найти максимумы значений оператора Лапласа и в вертикальных сечениях изображения. Результат применения такого преобразования к изображению приведен на рисунке 3.24.

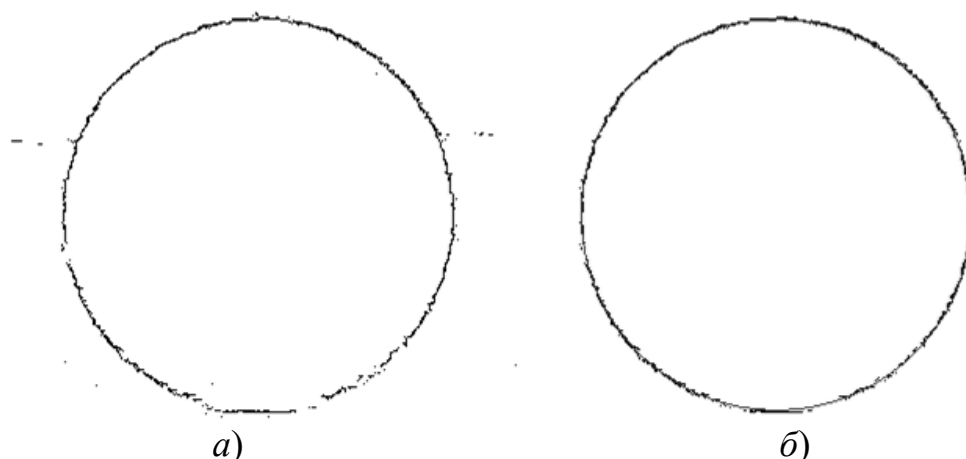


Рисунок 3.24 – *а)* Контур объекта, выделенный методом максимальных значений оператора Лапласа с установленным пороговым коэффициентом $k=50$;
б) Результат аппроксимации контура окружностью

На следующем этапе полученные участки контура необходимо аппроксимировать окружностью, чтобы избавиться от шума и ложных контуров. Лучше всего для этого применим метод наименьших квадратов [222]. Также использовалась несмещенная оценка по выборке результатов измерений, описанная в [223], с помощью которой производилась аппроксимация контура ВЦ окружностью. По измеренному значению радиуса окружности в пикселах, а также зная технические характеристики используемой фотокамеры, определен физический размер окружности и вычислено расстояние до ВЦ.

Для применения данного метода разработан способ [224], согласно которому к объекту крепится специальная ВЦ в форме шара. При этом обнаружение ВЦ осуществляется по цвету с одним слабо выраженным компонентом. Рисунок 3.25 поясняет зависимость между физическим размером ВЦ диаметром D и размером диаметра d на её изображении, которое формируется при помощи оптической системы видеокамеры, состоящей из объектива и прибора с зарядовой связью (ПЗС-матрицы).

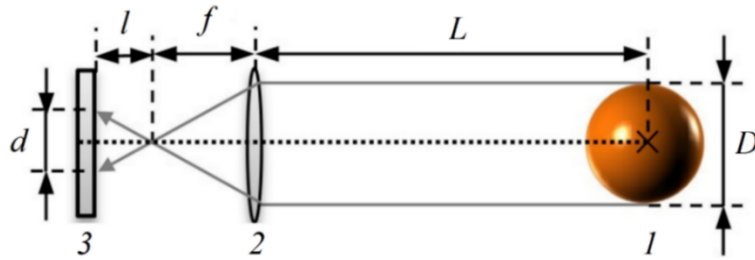


Рисунок 3.25 – Принцип определения дальности ВЦ: 1 – ВЦ; 2 – объектив; 3 – ПЗС матрица

С помощью цифровой видеокамеры на ПЗС-матрице формируется изображение ВЦ, прикрепленной к объекту измерения. Изображение состоит из множества пикселей:

$$I = \{ \mathbf{c}(x, y) \mid x, y \in \mathbb{N} \}. \quad (3.44)$$

Вектор $\mathbf{c}(x, y)$, в свою очередь, состоит из трех цветовых компонентов:

$$\mathbf{c}(x, y) = \begin{pmatrix} C_1(x, y) \\ C_2(x, y) \\ C_3(x, y) \end{pmatrix} \quad (3.45)$$

Каждый компонент цвета также может быть представлен в виде множества натуральных чисел, определяющих 256 градаций цвета:

$$\forall n \in C_1 \vee C_2 \vee C_3 : n < 256 \mid C_1, C_2, C_3 \in \mathbb{N} \quad (3.46)$$

Необходимо выделить множество пикселей, принадлежащих ВЦ на изображении $\Theta \subset I$, цветовые компоненты которой $[\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3]$ ограничены минимальными и максимальными значениями в занимаемой части пространства RGB. Граничные значения цветовых компонентов, определяющих диапазон изменения цвета объекта, могут варьировать в широких пределах в зависимости от конкретных условий проведения съемки: уровень освещенности, ракурс и удаленность объекта. Таким же образом задается множество пикселей составляющих фон на изображении $\Psi = I \setminus \Theta$, цветовые компоненты которого обозначены $[\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3]$, а средние значения цветовых компонентов $[\bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2, \bar{\Psi}_3]$. Поскольку в формировании цвета участвуют три компонента, вводится функция, определяемая их совокупными значениями:

$$f(C_1, C_2, C_3) = C_1 + C_2 + C_3. \quad (3.47)$$

Для обнаружения ВЦ необходимо, чтобы максимальное значение функции характеризовало ВЦ, а минимальное соответствовало фону изображения [198]:

$$f(\bar{\Theta}_1, \bar{\Theta}_2, \bar{\Theta}_3) \rightarrow \max(f), \quad (3.48)$$

$$f(\bar{\Psi}_1, \bar{\Psi}_2, \bar{\Psi}_3) \rightarrow \min(f). \quad (3.49)$$

Это условие представляется в виде системы выражений:

$$\begin{cases} A_1 \bar{\Theta}_1 + A_2 \bar{\Theta}_2 + A_3 \bar{\Theta}_3 \rightarrow \max(f) \\ A_1 \bar{\Psi}_1 + A_2 \bar{\Psi}_2 + A_3 \bar{\Psi}_3 \rightarrow \min(f) \end{cases}, \quad (3.50)$$

где A_1, A_2, A_3 – коэффициенты, удовлетворяющие данному условию.

Исходя из того, что ВЦ имеет минимальное присутствие одного из цветовых компонентов, допустим, что $\bar{\Theta}_1 \approx 0$, соответственно коэффициент A_1 не оказывает существенного влияния на первое выражение и может быть определен из второго выражения. Приняв $\min(f) = 0$, второе выражение примет вид:

$$A_1 \bar{\Psi}_1 + A_2 \bar{\Psi}_2 + A_3 \bar{\Psi}_3 = 0, \quad (3.51)$$

$$A_1 = (-A_2 \bar{\Psi}_2 - A_3 \bar{\Psi}_3) / \bar{\Psi}_1. \quad (3.52)$$

Как правило, средние значения цветовых компонентов фона сильно не отличаются друг от друга [198], поэтому делается еще одно допущение однородности фона $\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_2 = \bar{\Psi}_3$ и уравнение принимает следующий вид:

$$A_1 = -A_2 - A_3. \quad (3.53)$$

Задав коэффициентам нормированное значение $A_2 = A_3 = 1$, тогда система выражений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{\Theta}_2 + \bar{\Theta}_3 - 2\bar{\Theta}_1 \rightarrow \max(f) \\ \bar{\Psi}_2 + \bar{\Psi}_3 - 2\bar{\Psi}_1 \rightarrow \min(f) \end{cases}. \quad (3.54)$$

При этом функция примет вид:

$$f(C_1, C_2, C_3) = C_2 + C_3 - 2C_1 \quad (3.55)$$

Установив для функции некоторое пороговое значение k , характеризующее отклонение значений цветовых компонентов ВЦ от среднего значения, ВЦ отделяется от фона с помощью следующего условия:

$$\bar{c}(x, y) \in \Theta : f(C_1, C_2, C_3) \leq k \mid k \in \mathbb{R}. \quad (3.56)$$

При невыполнении условия пиксел окрашивается в черный цвет. Таким образом, на изображении остается только ВЦ на черном фоне. Затем производится выделение контура ВЦ по максимальным значениям лапласиан. Полученные участки контура аппроксимируются окружностью по методу наименьших квадратов [225]. Радиус окружности вычисляется из выражения:

$$r^2 = x_0^2 + y_0^2 + \frac{1}{n} \left(\sum x^2 + \sum y^2 - 2(x_0 \sum x + y_0 \sum y) \right), \quad (3.57)$$

где x_0, y_0 – координаты центра окружности, определяемые из выражений:

$$x_0 = (w_1 n_{22} - w_2 n_{12}) / \det(n), \quad (3.58)$$

$$y_0 = (w_2 n_{11} - w_1 n_{21}) / \det(n), \quad (3.59)$$

где w_i, n_{ij} – элементы матриц W и N , введенных для упрощения.

Сами матрицы представлены выражениями:

$$W = \begin{bmatrix} \sum x^3 + \sum xy^2 - \frac{1}{n} \sum x^2 \sum x - \frac{1}{n} \sum y^2 \sum x \\ \sum x^2 y + \sum y^3 - \frac{1}{n} \sum x^2 \sum y - \frac{1}{n} \sum y^2 \sum y \end{bmatrix}, \quad (3.60)$$

$$N = \begin{bmatrix} 2 \left(\sum x^2 - \frac{1}{n} \sum x \sum x \right) & 2 \left(\sum xy - \frac{1}{n} \sum x \sum y \right) \\ 2 \left(\sum xy - \frac{1}{n} \sum x \sum y \right) & 2 \left(\sum y^2 - \frac{1}{n} \sum y \sum y \right) \end{bmatrix}. \quad (3.61)$$

Дальность ВЦ в момент времени t определяется из выражения:

$$L(t) = f \left(\frac{D}{2r(t)px} + 1 \right), \quad (3.62)$$

где $r(t)$ – радиус ВЦ на изображении в момент времени t ;

px – физический размер пиксела.

3.4.3 Определение скорости и направления движения объектов

Для определения направления и скорости движения объекта на полученном в момент времени t_{i-1} видеокадре, определяют координаты x_{i-1} и z_{i-1} центра этого

объекта, который за интервал времени между измерениями $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ переместился из точки A в точку B (рис. 3.18).

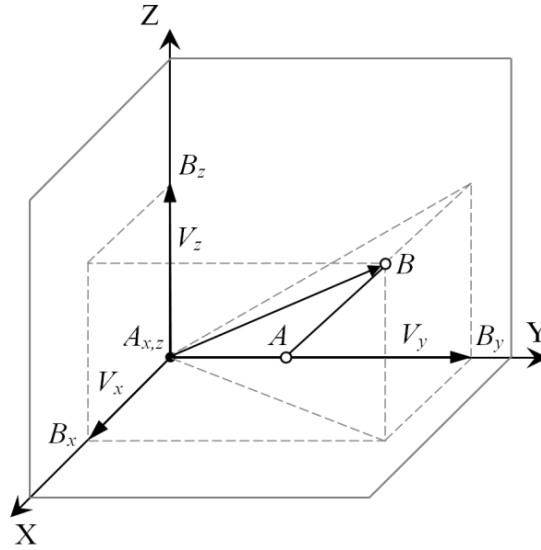


Рисунок 3.26 – Компоненты вектора скорости объекта

В следующий дискретный момент времени t_i производится повторное определение координат x_i и z_i центра объекта. Зная расстояния до объекта L_{i-1} и L_i в моменты времени t_{i-1} и t_i , а также разность координат на изображении $\Delta x = x_i - x_{i-1}$ и $\Delta z = z_i - z_{i-1}$ для этих моментов времени, определяется смещение объекта в пространстве по осям X , Y и Z (рис. 3.26):

$$\Delta X = \Delta x (L_i - f) px / f, \quad (3.63)$$

$$\Delta Z = \Delta z (L_i - f) px / f, \quad (3.64)$$

$$\Delta Y = \sqrt{L_i^2 - \Delta Z^2 - \Delta X^2} - L_{i-1}, \quad (3.65)$$

По составляющим скорости V_x , V_y и V_z вычисляется скорость объекта и направление его движения:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} = \Delta t \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} \quad (3.66)$$

3.4.4 Определение пространственного положения и параметров объекта с помощью метода главных компонент

Для решения задачи пространственной ориентации объекта применяется метод главных компонент. С его помощью объект представляется в собственной

системе координат путем нахождения ортонормированного базиса собственных векторов. При этом любой вектор трехмерного пространства может быть представлен как линейная комбинация базисных векторов

$$\mathbf{x}_i = (x_1 e_1, x_2 e_2, x_3 e_3), \quad (3.67)$$

где \mathbf{e} – ортонормированный базис.

Значения собственных векторов определяются матриц ковариации:

$$C_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^t - \mathbf{m}_x \mathbf{m}_x^t, \quad (3.68)$$

где \mathbf{m}_x – вектор математического ожидания.

Матрица C_x является действительной и симметричной, поэтому для нее всегда существует ортонормированный базис. Собственные значения λ_n , образуют спектр ковариационной матрицы C_x , состоящий из n собственных значений. Они находятся путем решения характеристического уравнения:

$$\det(C_x - \lambda_n I) = 0, \quad (3.69)$$

где I – единичная матрица.

Собственные вектора e_n характеризуют направления максимального изменения данных. Для их вычисления решается система однородных уравнений:

$$(A - \lambda_n I) \mathbf{v}_n = 0, \quad (3.70)$$

где A – матрица, образованная из собственных векторов матрицы C_x , упорядоченных в порядке уменьшения их собственных значений.

Они задают направление главных компонент, которое можно представить в виде векторного параметрического уравнения прямой:

$$\mathbf{r} = \mathbf{v}_n + t \mathbf{a}, \quad t \in (-\infty, +\infty), \quad (3.71)$$

где \mathbf{v}_n – собственный вектор, задающий направление прямой,

\mathbf{a} – ненулевой вектор, коллинеарный этой прямой.

Таким образом, нулевая главная компонента a_0 определяет центроид облака точек ориентируемого шаблона, а следующие главные компоненты (a_1, a_2, a_3) – задают оси собственной системы координат объекта. Представление объекта в

собственной системе координат задается рядом матричных преобразований поворота и сдвига точек объекта относительно вектора математического ожидания:

$$\mathbf{p}' = M \cdot \mathbf{p}, \quad (3.72)$$

где M – матрица поворота вокруг оси в двух или трехмерном пространстве.

Представление объекта в собственной системе координат задается через ортонормированный базис (рис. 3.27).

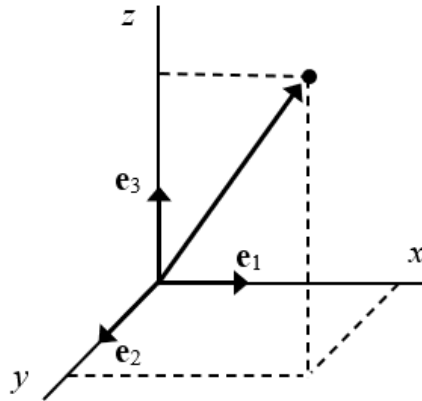


Рисунок 3.27 – Ортонормированный базис системы координат объекта

Радиус-векторы точек объекта определяются выражениями:

$$\mathbf{r} = xe_1 + ye_2 + ze_3, \quad (3.73)$$

$$\mathbf{r}' = x'e'_1 + y'e'_2 + z'e'_3. \quad (3.74)$$

Формулы перехода в собственную систему координат:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + a_{11}x' + a_{21}y' + a_{31}z' \\ y &= y_0 + a_{12}x' + a_{22}y' + a_{32}z' \\ z &= z_0 + a_{13}x' + a_{23}y' + a_{33}z' \end{aligned} \right\}, \quad (3.75)$$

где a_{mn} компоненты матрицы переноса:

$$M = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{vmatrix}. \quad (3.76)$$

Тогда формулы перехода можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + x'e_1 \\ y &= y_0 + y'e_2 \\ z &= z_0 + z'e_3 \end{aligned} \right\}. \quad (3.77)$$

Обратное преобразование в систему координат объекта:

$$\left. \begin{aligned} x' &= a_{11}(x - x_0) + a_{12}(y - y_0) + a_{13}(z - z_0) \\ y' &= a_{21}(x - x_0) + a_{22}(y - y_0) + a_{23}(z - z_0) \\ z' &= a_{31}(x - x_0) + a_{32}(y - y_0) + a_{33}(z - z_0) \end{aligned} \right\} \quad (3.78)$$

Угол поворота объекта в плоскости изображения θ определяется скалярным произведением вектора \mathbf{v}_n и нормированного вектора \mathbf{e}_n , задающего ось вращения:

$$\cos \theta = \frac{(\mathbf{v}_n, \mathbf{e}_n)}{\|\mathbf{v}_n\| \|\mathbf{e}_n\|} \quad (3.79)$$

Матрица поворота определяется следующим выражением:

$$M(\mathbf{v}, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)e_1^2 & (1 - \cos \theta)e_1e_2 - (\sin \theta)e_3 & (1 - \cos \theta)e_3e_1 + (\sin \theta)e_2 \\ (1 - \cos \theta)e_1e_2 + (\sin \theta)e_3 & \cos \theta + (1 - \cos \theta)e_2^2 & (1 - \cos \theta)e_2e_3 - (\sin \theta)e_1 \\ (1 - \cos \theta)e_1e_3 - (\sin \theta)e_2 & (1 - \cos \theta)e_2e_3 + (\sin \theta)e_1 & \cos \theta + (1 - \cos \theta)e_3^2 \end{pmatrix}. \quad (3.80)$$

Радиальная прямая представляется через бесконечную последовательность элементов множества точек:

$$A = \{a_n | a_n \in R\}, \quad (3.81)$$

При этом точка a_0 совпадает с началом координат. Система сегментов на этом множестве задается выражением:

$$\{[a_n, a_{n+1}]\}_{n=1}^{\infty}, \quad (3.82)$$

где каждому натуральному числу n поставлен в соответствие отрезок $[a_n, a_{n+1}]$ длиной $|a_n, a_{n+1}|$.

При этом соблюдается условие:

$$\{[a_n, a_{n+1}] | a_n, a_{n+1} \in R \wedge a < b\}. \quad (3.83)$$

Тогда радиус-вектор \overline{OA} в направлении произвольной точки a_n множества A будет иметь длину отрезка $[a_0, a_n]$:

$$|\overline{OA}| = |a_0, a_n| = nda, \quad (3.84)$$

где da составляет обычно 1 пиксел.

Используя функцию плотности вероятности и длину радиус-вектора, получают выражение для описания формы объекта в виде сигнатуры:

$$P(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_{y=0}^n \frac{|\overline{OA}|}{n} T(\varphi, n), \quad T(\varphi, n) = \begin{cases} 1 & \text{если } T(\varphi, n) \in Z \\ 0 & \text{если } T(\varphi, n) \notin Z \end{cases}, \quad (3.85)$$

где $T(x, y)$ – точка на изображении;

Z – множество точек принадлежащих объекту;

n – число точек, расположенных в направлении радиус-вектора \overline{OA} .

Значения сигнатуры $P(\varphi)$ можно изобразить в виде гистограммы (рис. 3.28), которая представляет собой некий циклически-замкнутый штрих-код, характеризующий форму исследуемого объекта.

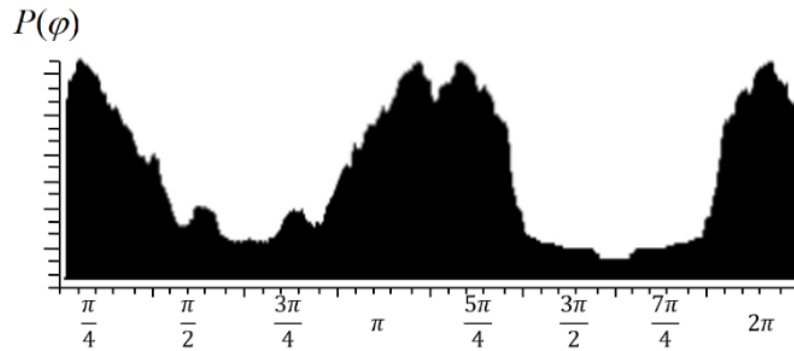


Рисунок 3.28 – Сигнатура изображения объекта

Число значений сигнатуры будет меняться в зависимости от углового шага. Так, например, в полярной системе координат, число дескрипторов при угловом шаге $d\varphi = 1^\circ$ составит 360, а в сферической системе координат при том же угловом шаге зенитного и азимутального углов составит 64440 отсчетов. Это число можно сократить путем введения переменного углового шага. Габаритные размеры объекта также могут являться дескрипторами [226].

Для определения длины объекта на изображении, оно представляется в виде ортонормированного базиса в собственной декартовой системы координат. Тогда любая точка изображения объекта может быть представлена как линейная комбинация базисных векторов. Для этого создается подпространство R^2 , образованное с помощью векторов $E = (e_2, e_3)$ в пространстве R^3 . При этом матрица

базиса E будет иметь размерность (2×3) . Затем определяются проекции \vec{x}_i^{\parallel} точек образа на подпространство R^2 :

$$\vec{x}_i^{\parallel} = M \vec{x}_i, \quad (3.86)$$

где M – проекционная матрица, которая находится по следующей формуле:

$$M = E(E^t E)^{-1} E^t, \quad (3.87)$$

$$\text{если } e_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}, e_3 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}, \text{ то } E = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.88)$$

Откуда $(E^t E)^{-1}$ можно найти по формуле:

$$(E^t E)^{-1} = \frac{1}{\det(E^t E)} \begin{vmatrix} a_{22} & -a_{21} \\ -a_{12} & a_{11} \end{vmatrix}, \quad (3.89)$$

Тогда проекционная матрица примет вид:

$$M = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.90)$$

Теперь, длину объекта можно задать следующим выражением:

$$l_1 = \min_{i=0}^N \left(\begin{vmatrix} \rightarrow \\ x_i \end{vmatrix} \right) + \max_{i=0}^N \left(\begin{vmatrix} \rightarrow \\ x_i \end{vmatrix} \right), \quad (3.91)$$

где $\min_{i=0}^N$ и $\max_{i=0}^N$ – функции, определяющие минимальное и максимальное значения величины;

N – число точек, формирующих образ объекта.

Подобным образом определяются значения ширины l_2 и высоты l_3 объекта на изображении, для чего также создается подпространство R^2 , образованное с помощью векторов $E = (e_1, e_3)$ и $E = (e_2, e_3)$ в пространстве R^3 , соответственно. С помощью значений (l_1, l_2, l_3) можно задать базовый прямоугольный параллелепипед с гранями, параллельными осям, который будет содержать в себе образ объекта.

Для определения объема или площади объекта необходимо вычислить количество точек составляющих множество точек объекта G :

$$V = \sum_z^l \sum_{y=0}^m \sum_{x=0}^n T(x, y, z), \text{ где } T(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x, y, z) \in G \\ 0, & \text{если } (x, y, z) \notin G \end{cases}. \quad (3.92)$$

Для определения периметра необходимо вычислить количество точек составляющих множество точек контура C , толщиной в один пиксел:

$$P = \sum_{y=0}^m \sum_{x=0}^n T(x, y), \text{ где } T(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x, y, z) \in C \\ 0, & \text{если } (x, y, z) \notin C \end{cases}. \quad (3.93)$$

Помимо объема, площади и периметра для описания образа используется его компактность, которая определяется отношением квадрата периметра к площади:

$$K = P^2 / S. \quad (3.94)$$

Компактность является безразмерной величиной, поэтому инвариантна к однородным изменениям масштаба и к пространственной ориентации объекта. Для области круглой формы компактность имеет минимальное значение.

3.4.5 Определение геометрических параметров объекта

Лазерное сканирование объектов позволяет создавать их трехмерные изображения. Данная технология может быть использована для расширения функциональных возможностей ВСКЗ. С ее помощью ускоряется процесс создания трехмерных изображений (рис. 3.29, а), делая более доступным определение геометрических параметров и численных характеристик поверхности объектов (периметр, площадь, объем). Также существенно упрощается оценка отклонений поверхностей объектов от номинальной (проектной) формы. Чтобы плотность точек была равномерной подсистема развертки сканера должна формировать лазерные лучи с постоянным угловым шагом $d\varphi$. Этим требованиям отвечает сканер, подсистема развертки которого построена на основе непрерывно вращающейся вокруг своей оси симметрии зеркальной призмы (рис. 3.21, б).

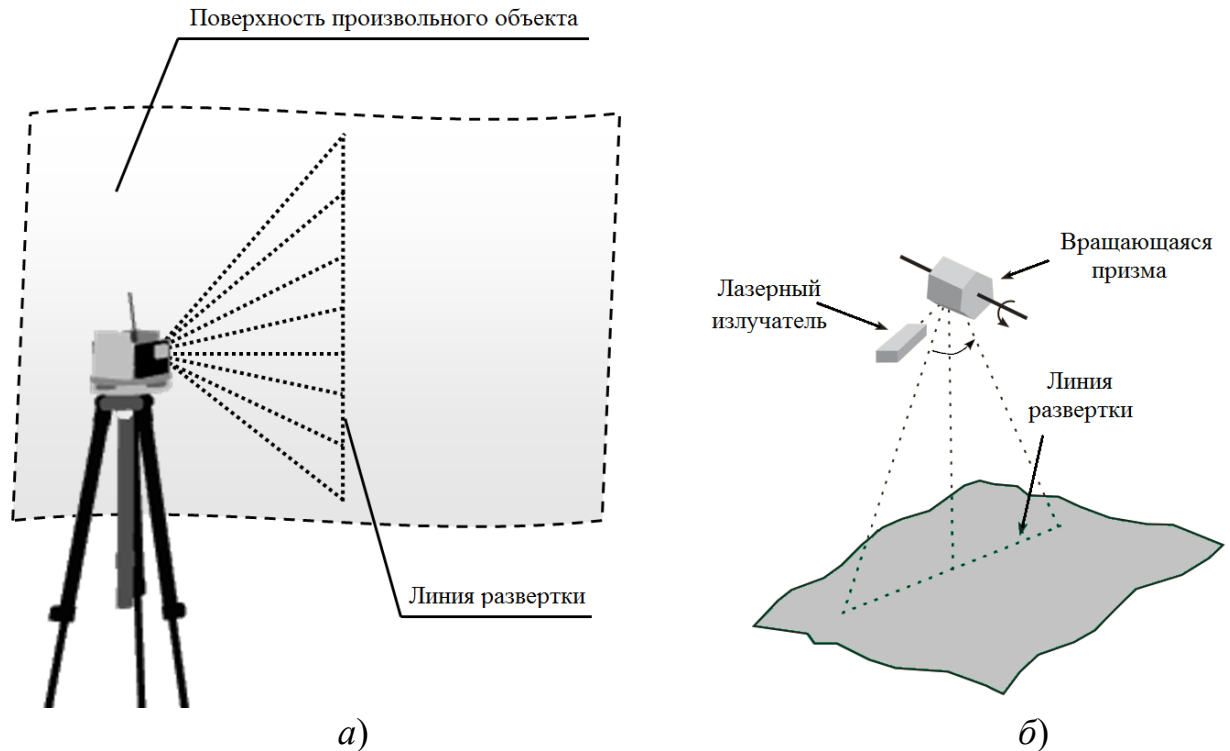


Рисунок 3.29 – Принципиальная схема работы лазерного сканера:
 а) линия развертки сканера; б) подсистема развертки сканера

Построение трехмерного изображения возможно только в поле зрения видеокамеры, задаваемой её вертикальным углом обзора φ . Линия развертки лазерного сканера образуется множеством лучей, но только n -е количество из них попадает в поле зрения видеокамеры. Следовательно, полезный угол развертки сканера не превышает вертикального угла обзора видеокамеры и позволяет зафиксировать множество точек в угловом диапазоне относительно главной оптической оси видеокамеры. Угол наклона i -го лазерного луча, фиксирующего некоторую точку a_i на объекте, можно найти из выражения:

$$\Delta\psi_i = \frac{n-2i+1}{2} d\varphi \quad (3.95)$$

При помощи шаговых двигателей, встроенных в двухосевую платформу ВУ, осуществляется вращение видеокамеры и сканера относительно вертикальной оси платформы с угловым шагом $d\omega$. Этим обеспечивается возможность кругового сканирования пространства в радиусе действия сканера. Принципиальная схема определения угловых координат точек, получаемых путем лазерного сканирования изображена на рисунке 3.30.

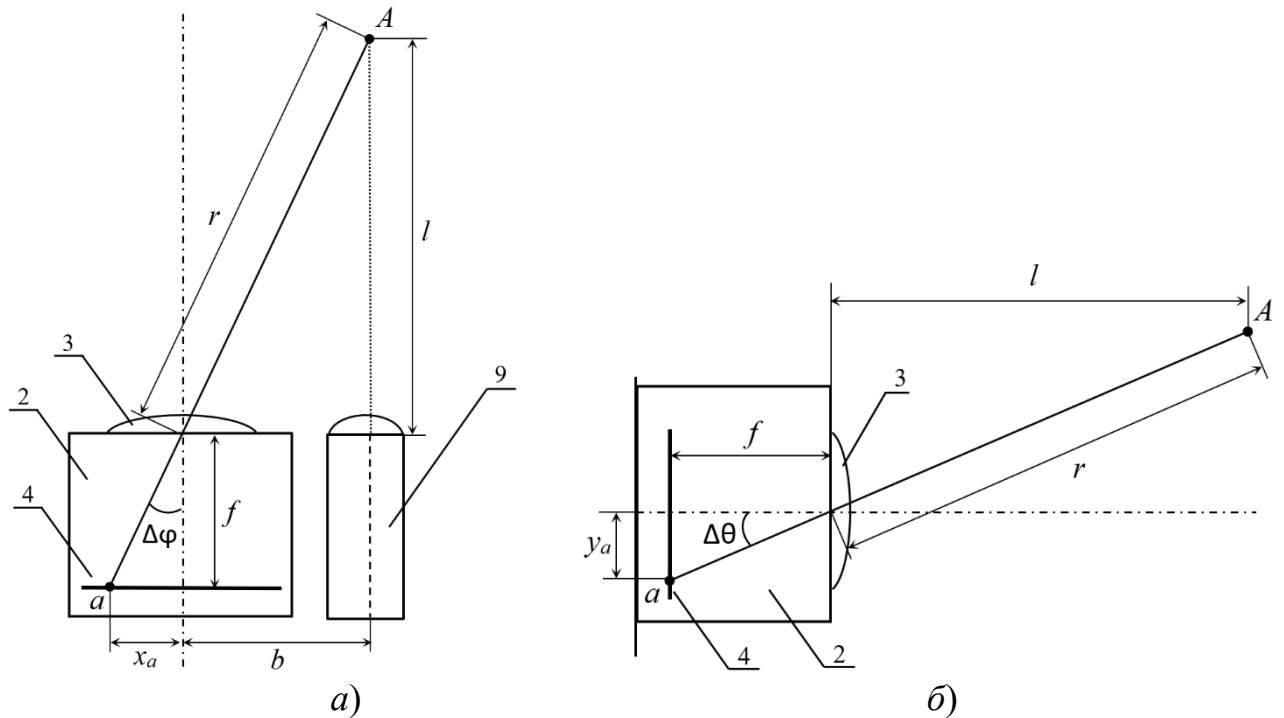


Рисунок 3.30 – Вычисление углового положения в системе координат ВСКЗ произвольной точки по осям координат видеокамеры: а) абсцисс; б) ординат

Угловое положение сканируемых точек вычисляется относительно главной оптической оси видеокамеры, в то время как само направление оси относительно точки съемки определяется энкодерами [195]. Принимая в расчет расстояние l_i до некоторой точки A , а также размер базиса b между вычисляются координаты этой точки в сферической системе координат ВСКЗ:

$$\Delta\omega_i = \pi/2 - \arctg(l_i/b), \quad (3.96)$$

$$\Delta\psi_i = \frac{n-2i+1}{2} d\varphi, \quad (3.97)$$

$$r = \sqrt{l^2 + b^2}. \quad (3.98)$$

Перевод координат точек из сферической в прямоугольную систему координат осуществляется с помощью следующих преобразований:

$$\begin{cases} x = r \cos(\psi + \Delta\psi) \cos(\omega + \Delta\omega) \\ y = r \cos(\psi + \Delta\psi) \sin(\omega + \Delta\omega) \\ z = r \sin(\psi + \Delta\psi) \end{cases} \quad (3.99)$$

Каждой зафиксированной точке пространства должен быть задан цвет соответствующего ей пиксела на кадре видеоизображения, координаты которого определяются из выражения:

$$x_i = x_0 + \operatorname{tg}(\Delta\omega_i) f, \quad (3.100)$$

$$y_i = y_0 + \operatorname{tg}(\Delta\psi_i) f, \quad (3.101)$$

где (x_0, y_0) – координаты центра изображения.

Угловой шаг развертки сканера $\Delta\varphi$ может оказаться меньше углового шага обзора видеокамеры, определяемого её фокусным расстоянием и разрешением. В этом случае повысить разрешение формируемого трехмерного изображения можно путем интерполяции между полученными узловыми точками модели. Однако, сложность заключается в том, чтобы на очередном кадре изображения определить координаты пикселей всех точек, полученных на предыдущем шаге сканирования.

В случае, когда разрешение лазерного сканера уступает разрешению видеокамеры, можно применить интерполяцию по сканированной области с целью повышения качества трехмерных изображений. Самый простой способ – это представить точечную трехмерную модель пространства (рис. 3.31, а), проецируемую на плоскость изображения видеокамеры, в виде сетки (рис. 3.32, б), образованную путем соединения смежных точек отрезками прямой. Интерполяция облака точек поверхностью позволяет предотвратить потерю качества трехмерного изображения, вызванного низким разрешением лазерного сканера.

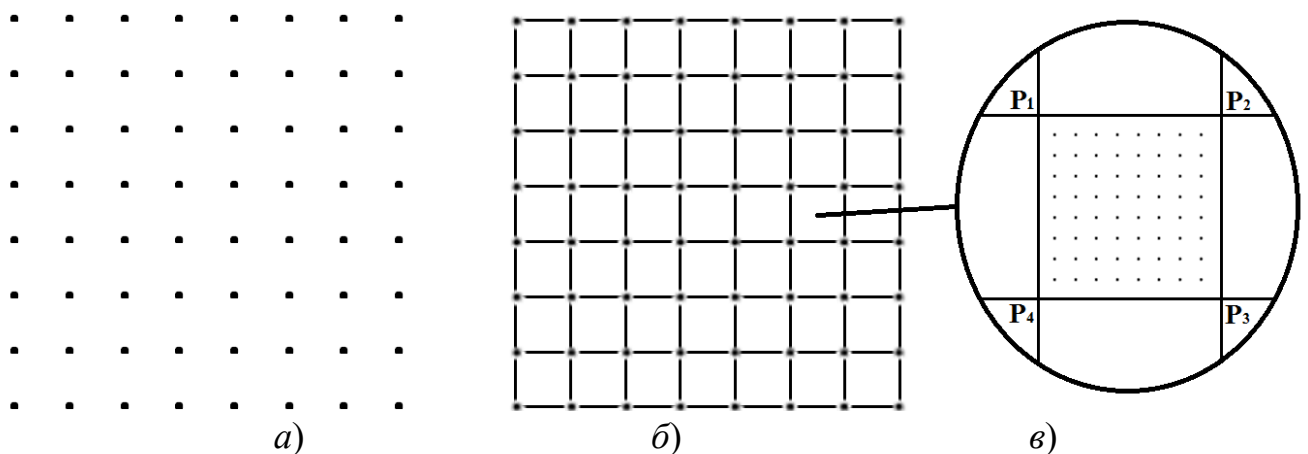


Рисунок 3.31 – Повышение разрешения трехмерного изображения: а) точечная трехмерная модель пространства; б) интерполяция точек сеткой; в) интерполяция по области ячеек сетки

Каждая ячейка полученной сетки интерполируется точками по области следующим образом. Множество интерполированных точек (рис. 3.33, в)

представляется в виде двухмерной прямоугольной матрицы M размером $r \times c$, где $m_{ij}(i=1, \dots, r; j=1, \dots, c)$ – элемент на пересечении строки i и столбца j матрицы. При этом размеры матрицы определяются отношением разрешений сканера и видеокамеры. Чтобы разрешение трехмерного изображения было сопоставимо с разрешением видеокамеры, размеры матрицы должны задаваться исходя из следующих условий:

$$r > \text{Целое} \left[\frac{d\varphi}{\text{arctg}(px/f)} \right], \quad (3.102)$$

$$c > \text{Целое} \left[\frac{d\omega}{\text{arctg}(px/f)} \right], \quad (3.103)$$

где $\text{Целое}[\]$ – функция, округляющая аргумент до целого значения;

px – физический размер пиксела ПЗС-матрицы видеокамеры.

Обозначим два направляющих вектора $\overrightarrow{P_1 P_4}(x_{P_1 P_4}, y_{P_1 P_4}, z_{P_1 P_4})$ и $\overrightarrow{P_2 P_3}(x_{P_2 P_3}, y_{P_2 P_3}, z_{P_2 P_3})$, образованных узловыми точками ячейки P_1, P_4 и P_2, P_3 , соответственно. Вычисляются координаты этих векторов из систем уравнений:

$$\begin{cases} x_{P_1 P_4} = x_{P_4} - x_{P_1} \\ y_{P_1 P_4} = y_{P_4} - y_{P_1} \\ z_{P_1 P_4} = z_{P_4} - z_{P_1} \end{cases}, \quad (3.104)$$

$$\begin{cases} x_{P_2 P_3} = x_{P_3} - x_{P_2} \\ y_{P_2 P_3} = y_{P_3} - y_{P_2} \\ z_{P_2 P_3} = z_{P_3} - z_{P_2} \end{cases}. \quad (3.105)$$

Следовательно, с помощью параметрических уравнений прямых $P_1 P_4$ и $P_2 P_3$, можно найти координаты элементов первого и последнего столбца матрицы:

$$m_{1j}(x_{P_1} + x_{P_1 P_4} j/c, y_{P_1} + y_{P_1 P_4} j/c, z_{P_1} + z_{P_1 P_4} j/c), \quad (3.106)$$

$$m_{rj}(x_{P_1} + x_{P_1 P_4}, y_{P_1} + y_{P_1 P_4}, z_{P_1} + z_{P_1 P_4}). \quad (3.107)$$

Каждая полученная пара этих элементов в строке i используется, в свою очередь, для вычисления направляющего вектора $\overrightarrow{m_{1j} m_{rj}}(x_{m_{1j} m_{rj}}, y_{m_{1j} m_{rj}}, z_{m_{1j} m_{rj}})$, по

которому определяются остальные элементы матрицы в этой строке:

$$m_{ij} \left(x_{m_{ij}} + x_{m_{ij}, m_{ij}} i / r, y_{m_{ij}} + y_{m_{ij}, m_{ij}} i / r, z_{m_{ij}} + z_{m_{ij}, m_{ij}} i / r \right). \quad (3.108)$$

В целях оценки погрешности ВУ при определении геометрических параметров объектов, было разработано программное обеспечение для проведения трехмерной съемки [227]. С его помощью был проведен эксперимент, для которого выбран объект в форме прямоугольного параллелепипеда размером 750×380×280 мм и нанесенными на его поверхность надписями (рис. 3.34). Объект располагался произвольным образом на удалении от ВСКЗ равном 1 м. В ручном режиме на дисплеи компьютера, задавалась область сканирования. Угловой шаг сканирования объекта установлен 10'. Задача эксперимента состояла в оценке погрешности ВСКЗ при выполнении назначенной ей функции по созданию трехмерных изображений. Показателями корректного функционирования системы являлись допустимая точность измерений геометрических параметров тестового объекта и читаемость надписи на сформированном трехмерном изображении объекта.

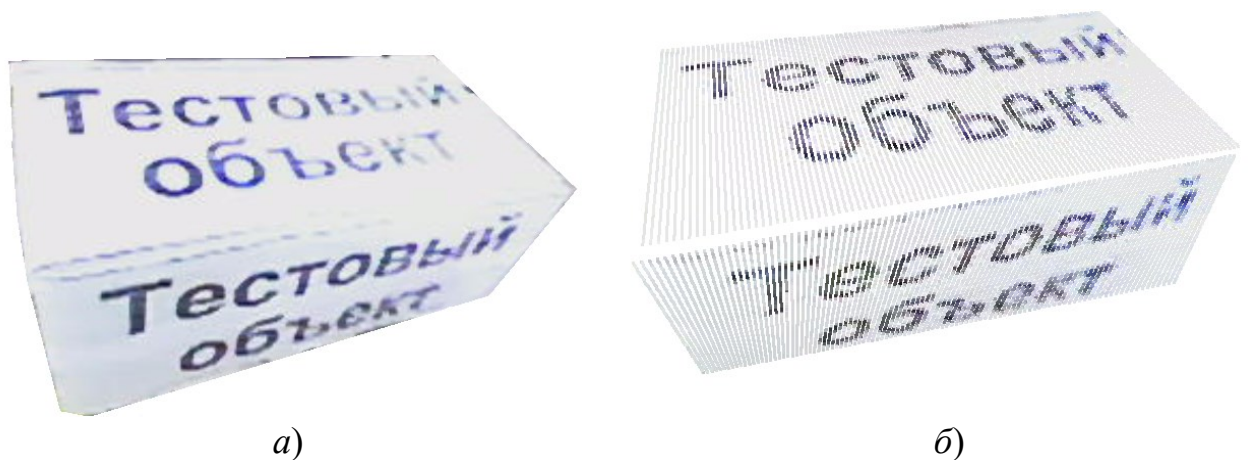


Рисунок 3.32 – Тестовый объект: а) двухмерное изображение; б) трехмерное изображение

В процессе сканирования было получено трехмерное изображение тестового объекта, по которому определялись его геометрические параметры. С помощью метода главных компонент определялись собственные вектора трехмерного изображения объекта, которое представлялось в виде ортонормированного базиса в собственной декартовой системе координат. Абсолютная погрешность измерения геометрических размеров объекта на дальности 1 м не превысила 5 мм.

Данное значение в большей степени характеризуется инструментальной составляющей погрешности и обусловлено несовершенством изготовления модели видеограмметрической системы, проявляющееся в смещенном расположении главной оптической оси видеокамеры относительно точки пересечения осей вращения платформы. На результат измерений также оказала влияние погрешность используемого лазерного сканирующего дальномера, составляющая 1 мм.

Полученные результаты подтверждают правильность предложенного способа для ВСКЗ по созданию трехмерных изображений. Использование лазерного сканирующего дальномера обеспечивает высокую скорость создания трехмерных изображений объектов и приемлемую точность координатных измерений. Таким образом, применение технологии лазерного сканирования в ВСКЗ позволяет расширить её функциональные возможности и существенно ускоряет процесс создания трехмерных изображений. Эта функция является крайне важной при решении измерительных задач в режиме близком к реальному времени. С появлением данной функции открываются возможности по созданию на базе ВСКЗ системы дополненной реальности.

3.4.6 Определение геометрических параметров визирной цели

Для реализации обширного круга измерительных задач в области научной и промышленной техники все чаще используются оптико-электронные системы, основанные на матричных приемниках оптического излучения. Системы определения пространственных координат объектов, их перемещения и деформации могут быть крайне эффективны при реализации в них наиболее оптимальных алгоритмов обработки изображения, снимаемого с фоточувствительных элементов матрицы [228]. Одним из важным факторов повышения точности таких систем при регистрации как ВЦ, так и, например, естественных источников излучения, является получение значений координат изображений источников с субпиксельной точностью [229].

Из проведенных ранее исследований [230] [231] следует, что наиболее полное описание геометрических свойств контура сферических объектов можно

получить, если в качестве базы выбрана средняя окружность [232]. Наиболее часто для определения параметров базовой средней окружности (координаты ее центра и радиуса) используется метод Спрэгга. Данный метод обладает высокой точностью при условии равномерной дискретизации сигнала и относительно малых эксцентриситетах. Соответственно, параметры базовой средней окружности (x_0 , y_0 и r_0), аппроксимирующей контур ВЦ на изображении можно определить по формулам Спрэгга [233] [234] [235]:

$$x_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.109)$$

$$y_0 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.110)$$

$$r_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i, \quad (3.111)$$

где x_i , y_i – декартовы координаты точек M_i на контуре L , взятые с равным угловым шагом;

r_i – длины радиус-векторов точек M_i ;

x_0 , y_0 – декартовы координаты;

r_0 – радиус средней окружности.

Профилограмма развернутого контура ВЦ на изображении относительно ее среднего радиуса изображена на рисунке 3.35 в виде периодической функции $\Delta r(\varphi)$.

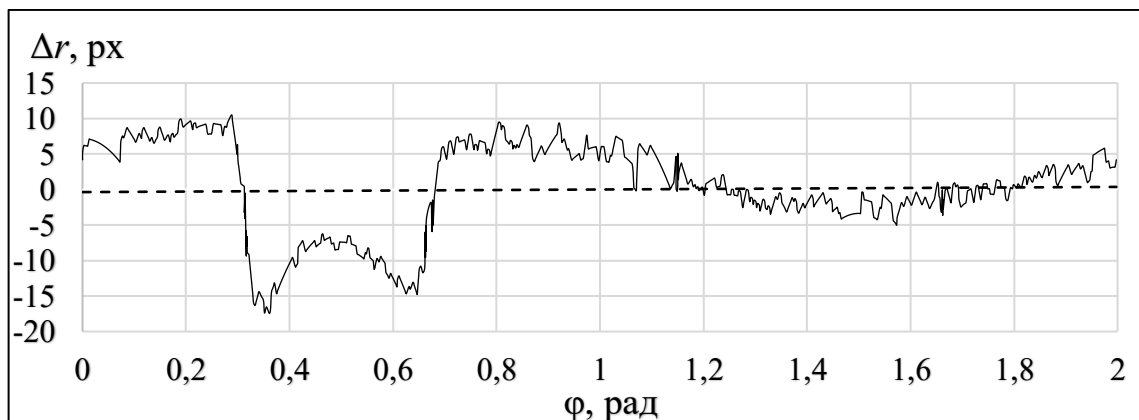


Рисунок 3.33 – Развернутая профилограмма контура визирной цели относительно базовой окружности

Для определения контура ВЦ используется спектральный метод [236], основанный на разложении функции её контура в полярных координатах в ряд Фурье:

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\varphi + \varphi_k), \quad (3.112)$$

где φ – полярный угол;

k – гармоническая составляющая периодических колебаний;

r_0 – радиус средней окружности;

A_k и φ_k – амплитуда и фаза гармоники k .

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (3.113)$$

$$\varphi_k = \arctg(b_k / a_k), \quad (3.114)$$

где параметры уравнений a_k и b_k определяются из выражений:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \cos(k\varphi) d\varphi, \quad (3.115)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \sin(k\varphi) d\varphi. \quad (3.116)$$

При реализации спектрального метода сравнительно просто решается задача определения радиуса средней окружности и координат центра ВЦ, поскольку амплитуда и фаза первой гармоники определяет смещение центра относительно базы измерения. Представление профилограммы в виде суммы гармонических составляющих по теореме Котельникова упрощает решение вопроса о выборе шага дискретизации. Кроме того, может быть решена задача фильтрации гармонических составляющих [237].

Фурье-образ развернутой профилограммы контура ВЦ получают путем применения дискретного фурье-преобразования:

$$f(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x) e^{-i2\pi(ux/M)}, \quad (3.117)$$

где M – количество пикселей в строке изображения.

Элементы фурье-образа в общем случае являются комплексными величинами. Однако, поскольку функция $f(x)$ вещественная, то её фурье-

преобразование обладает симметрией по отношению к операции комплексного сопряжения:

$$f(u) = f^*(-u). \quad (3.118)$$

Спектр фурье-преобразования (рис. 3.36) определяется из выражения:

$$|f(u)| = \sqrt{\text{Re}^2(u) + \text{Im}^2(u)}, \quad (3.119)$$

где $\text{Re}(u)$, $\text{Im}(u)$ – действительная и мнимая части фурье-образа.

Фазовый спектр фурье-преобразования получают из выражения:

$$|\varphi(u)| = \arctg \left[\frac{\text{Im}(u)}{\text{Re}(u)} \right]. \quad (3.120)$$

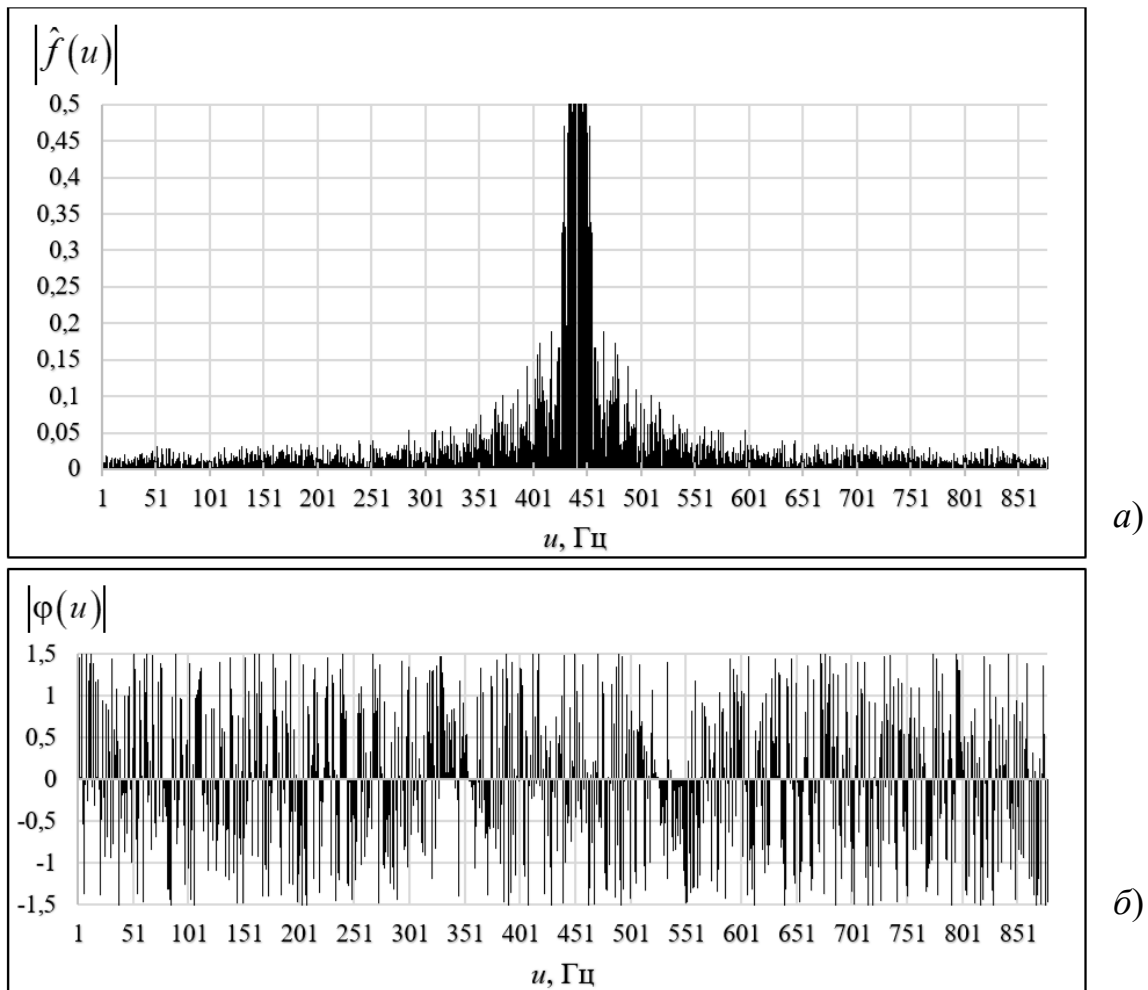


Рисунок 3.34 – Спектр фурье-преобразования развернутой профилограммы контура ВЦ (а) и его фазовый спектр (б)

При численном интегрировании результатов измерений радиуса ВЦ методом прямоугольников операции интегрирования заменяются суммированием:

$$r_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \Delta \varphi, \quad (3.121)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \cos k\varphi \Delta \varphi, \quad (3.122)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \sin k\varphi \Delta \varphi. \quad (3.123)$$

Высшая гармоническая составляющая k ограничивается номером гармоники p , с которой начинается отсчет микрогеометрии. Это распределение является гауссовым с центром рассеивания $m_r = m_R$ и дисперсией:

$$\sigma_R^2 = \sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \frac{m_{A_k}^2 + \sigma_k^2}{2}. \quad (3.124)$$

С помощью фильтра низких частот из профилограммы исключаются значения радиусов, превышающих центр рассеивания m_R на величину σ_k . Для фильтрации может применяться идеальный фильтр низких частот, в радиусе действия гармоники p , задаваемый выражением:

$$h(u) = \begin{cases} 0 & \text{при } f(u) \leq \sigma_k \\ 1 & \text{при } f(u) > \sigma_k \end{cases}. \quad (3.125)$$

Фильтрованную профилограмму контура ВЦ получают путем вычисления обратного преобразования Фурье:

$$g(\varphi) = \mathfrak{F}^{-1} [h(u) f(u)]. \quad (3.126)$$

Для определения параметров контура ВЦ с помощью формул Спрэгга решается оптимизационная задача на вычисление минимума гладкой целевой функции:

$$\min_{x,y,R} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r_0 \right)^2. \quad (3.127)$$

Разработанный метод обработки изображения ВЦ в частотной области [237] применим для различных типов оптико-электронных систем и направлен в первую очередь на повышение точности определения размера и координат ВЦ на изображении. В основе метода положено дискретное преобразования Фурье и его особенности, связанные с обработкой контура ВЦ на изображении. Данное

преобразование стало возможным благодаря представлению контура ВЦ в виде профилограммы относительно средней окружности, аппроксимирующей точки контура. Такой подход позволяет представить изображение в комплексной плоскости и описать его с помощью совокупности составляющих частот. Полученные характеристики рассеивания случайной составляющей погрешности измерения способствуют повышению точности определения параметров ВЦ на изображении.

3.5 Определение координат объекта измерений

Положение объекта измерений определяется в собственной сферической системе координат ВСКЗ (рис. 3.37) по измеренным с помощью энкодеров значениям углов наклона θ и поворота φ , а также дальности объекта r , измеряемой дальномером [87]. За начало координат принимается текущее местоположение видеотриггерной системы.

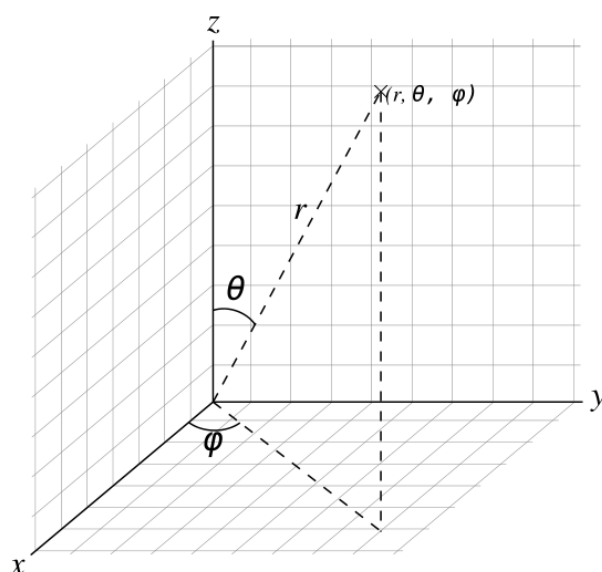


Рисунок 3.35 – Сферическая система координат для определения координат объекта измерений

Для перевода координат из собственной системы в геоцентрическую систему координат необходимо определить координаты положения видеотриггерной системы и дирекционный угол направления на объект [87]. Это преобразование можно осуществить с помощью приемника сигналов ГНСС и

цифрового компаса, а также путем привязки к реперной сети с помощью геодезических методов угловых засечек.

3.5.1 Определение положения объекта в локальной системе координат

Определение координат объекта измерений по сигналам ГНСС не всегда может обеспечить необходимую высокую точность измерений. Альтернативный способ определения координат объектов осуществляется путем привязки к реперной геодезической сети с применением геодезических приборов. Например, электронный тахеометр, предназначенный для измерения расстояний, горизонтальных и вертикальных углов, может быть использован для определения собственных координат методом обратной однократной угловой засечки, путем измерения углов между направлениями на три опорных пункта с известными координатами [209].

Однако, недостатками данного прибора являются отсутствие у него способности автоматически обнаруживать и отличать эти реперы друг от друга, а также длительное время определения собственных координат, обусловленное неспособностью тахеометра одновременно измерять углы между несколькими направлениями на реперы. Кроме этого, для обнаружения отражательных призм, которыми обозначают опорные пункты, в тахеометре используется источник лазерного излучения не безопасный для органов зрения человека. С целью устранения имеющихся недостатков современных геодезических приборов было разработано техническое решение [238] для определения собственных координат видеogramметрической системы путем привязки к реперной геодезической сети с помощью геодезических методов обратной однократной и многократной угловых засечек по реперам, в качестве которых используются ВЦ.

Технический результат был достигнут путем включения в состав видеogramметрической системы трех цифровых видеокамер, последовательно соединенных с блоком поворота видеокамер, блоком анализа видеоизображений, вычислительным блоком, контроллером и блоком обмена данными, объединенных в единую систему (рис. 3.38). Блок поворота видеокамер обеспечивает их

независимое вращение вокруг вертикальной оси. Направление вектора оптической оси видеокамер определяется с помощью оптических энкодеров, установленных на осях платформы.

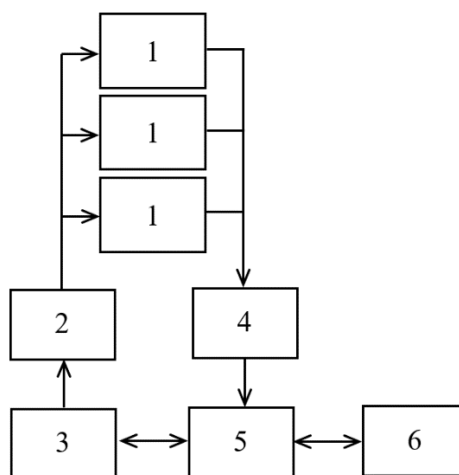


Рисунок 3.36 – Схема видеограмметрической системы для определения собственных координат: 1 – видеокамера, 2 – блок поворота видеокамер, 3 – контроллер, 4 – блок обработки видеоизображений, 5 – вычислительный блок, 6 – блок обмена данными

Такая конструкция видеограмметрической системы (рис. 3.39) дала возможность автоматически отслеживать одновременно до трех ВЦ, измерять углы между направлениями на них и определять собственные координаты в реальном времени. Также была разработана программа [239] позволяющая обнаруживать источники света, идентифицировать их по частоте мигания, измерять углы между направлениями на них и определять координаты видеограмметрической системы в зоне прямой видимости трех источников света, равноудаленных друг от друга на горизонтальной плоскости и мигающих с известными частотами.

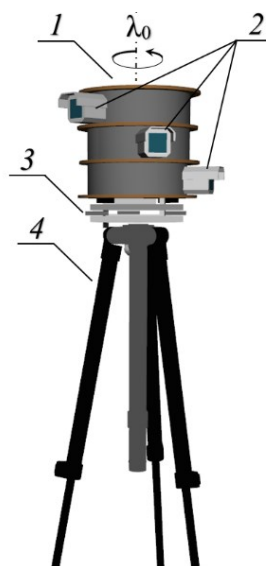


Рисунок 3.37 – Внешний вид видеограмметрической системы для измерения собственных координат в режиме реального времени:

1 – трехдисковая одноосевая платформа; 2 – видеокамеры; 3 – трегер; 4 – штатив

Ориентирование видеограмметрической системы выполняется с помощью метода обратной пространственной фотограмметрической засечки [79]. Для этого используется система элементов внешнего ориентирования (рис. 3.40), задаваемая координатами точки видеосъемки X_P, Y_P, Z_P ; зенитным θ и азимутальным φ углами, определяющими положение главного луча PO ; углом ζ , задающего поворот снимка в плоскости.

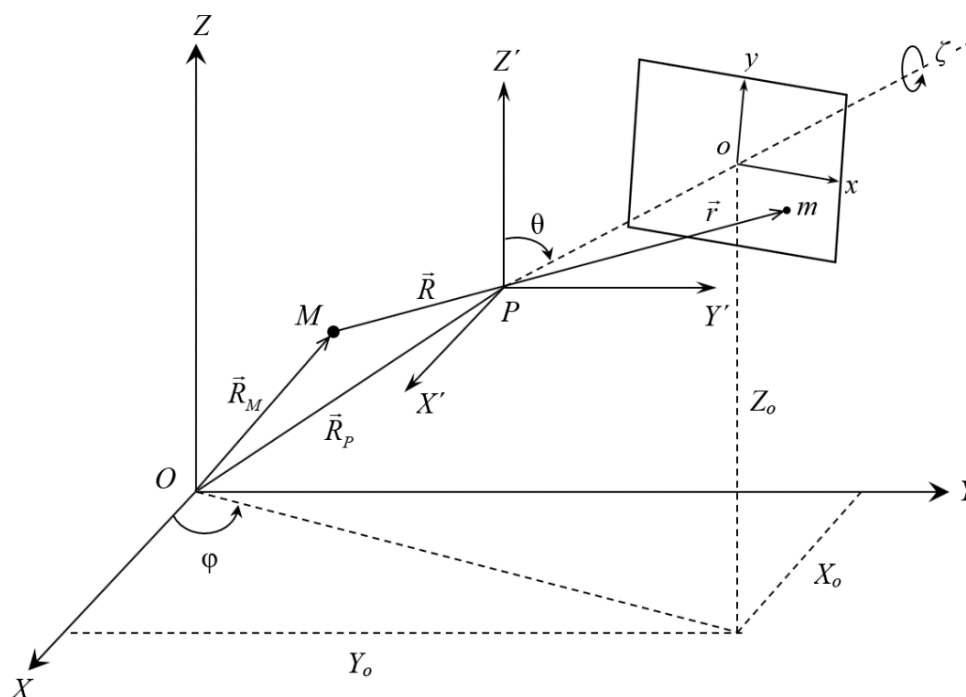


Рисунок 3.38 – Схема связи координат ВЦ в пространстве и на изображении

Центр ВЦ в точке M и ее проекция m на плоскость изображения находятся на одной прямой, проходящей через переднюю узловую точку P объектива. Положение точек P и M в системе координат ВЦ $OXYZ$ определяется векторами \vec{R}_P и \vec{R}_M , соответственно, а положение точек m и M в системе координат $PX'Y'Z'$ – коллинеарными векторами \vec{r} и \vec{R} . Для преобразования координат ВЦ на изображении (x, y, z) в систему координат ВСКЗ применяется матрица A :

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (3.128)$$

Если известны углы поворота видеокамер (φ, ζ, θ) вокруг осей (Z', X', Y') , то можно вычислить координаты ВЦ в системе координат $PX'Y'Z'$. Соответственно, пространственное положение плоскости изображения определяется значениями углов поворота в элементах матрицы A :

$$\begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi - \sin \theta \sin \zeta \sin \varphi & -\cos \theta \sin \varphi - \sin \theta \sin \zeta \cos \varphi & -\sin \theta \cos \zeta \\ \cos \zeta \sin \varphi & \cos \zeta \cos \varphi & -\sin \zeta \\ \sin \theta \cos \varphi + \cos \theta \sin \zeta \sin \varphi & -\sin \theta \sin \varphi + \cos \theta \sin \zeta \cos \varphi & \cos \theta \cos \zeta \end{bmatrix}. \quad (3.129)$$

Для вычисления координат ВСКЗ матричное уравнение подставляется в систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} X' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z \\ Y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z, \\ Z' = a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z \end{cases} \quad (3.130)$$

где a_{ij} – элементы матрицы A .

Углы поворота ВСКЗ (φ, ζ, θ) вокруг осей (Z', X', Y') можно определить путем преобразования сферических координат ВЦ $(\lambda_i, \theta_i, r_i)$ в декартовые:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{r} \cos \theta_i \cos \lambda_i \\ \hat{r} \cos \theta_i \sin \lambda_i \\ \hat{r} \sin \theta_i \end{bmatrix}. \quad (3.131)$$

где \hat{r} – орт в ортонормированном базисе системы координат ВСКЗ.

Горизонтальные λ_i и зенитные θ_i углы направлений на ВЦ определяются по формулам:

$$\lambda_i = \lambda_0 + \operatorname{arctg}(x_i/f), \quad (3.132)$$

$$\theta_i = \operatorname{arctg}(y_i/f), \quad (3.133)$$

где (x_i, y_i) – координаты ВЦ i на изображении.

Уравнение плоскости, образованной ВЦ в системе координат изображения:

$$\begin{bmatrix} x-x_1 & x_2-x_1 & x_3-x_1 \\ y-y_1 & y_2-y_1 & y_3-y_1 \\ z-z_1 & z_2-z_1 & z_3-z_1 \end{bmatrix} = 0. \quad (3.134)$$

Из этого выражения получают следующее уравнение плоскости:

$$xn_1 + yn_2 + zn_3 = 0, \quad (3.135)$$

где (n_1, n_2, n_3) – координаты вектора нормали.

Вычисляют длину вектора нормали данной плоскости:

$$|\vec{n}| = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}. \quad (3.136)$$

Затем находят углы, образованные плоскостью с осями координат:

$$\xi = \arcsin(n_1/|\vec{n}|), \quad (3.137)$$

$$\tau = \arcsin(n_2/|\vec{n}|), \quad (3.138)$$

$$\psi = \arcsin(n_3/|\vec{n}|). \quad (3.139)$$

Вектор нормали указывает положение оси вращения плоскости изображения видеокамеры в системе координат $PXY'Z'$. Следовательно, углы поворота этой плоскости вокруг осей координат составляют:

$$\varphi = \psi - \pi/2, \quad (3.140)$$

$$\theta = -\tau, \quad (3.141)$$

$$\varsigma = -\xi. \quad (3.142)$$

В случае размещения видеограмметрической системы на гиросtabilизированной платформе, углами, образованными плоскостью с осями координат, можно пренебречь ($\xi \approx \tau \approx \varphi \approx 0$). Подставив полученные углы поворота

в элементы матрицы A определяют значения координат ВЦ (X'_i, Y'_i, Z'_i) в декартовой системе координат. По этим координатам вычисляют углы направлений на ВЦ:

$$\lambda'_i = \lambda_0 + \text{arctg}(X'_i/Y'_i), \quad (3.143)$$

$$\theta'_i = \text{arccctg}\left(Z'_i / \sqrt{X'^2_i + Y'^2_i}\right). \quad (3.144)$$

Методом обратной однократной угловой засечки [240] рассчитывается плановое положение видеограмметрической системы (X_p, Y_p) по известным дирекционным углам ω_i и координатам ВЦ (X_i, Y_i) :

$$\begin{cases} X_p = X_{i+2} + [(X_{i+1} - X_i) \text{tg}\omega_i - (Y_i - Y_{i+1})] / (\text{tg}\lambda'_i - \text{tg}\omega_{i+2}) \\ Y_p = Y_{i+2} + (X_p - X_{i+2}) \text{tg}\omega_{i+2} \end{cases}. \quad (3.145)$$

Для вычисления координат ВЦ, предварительно, их необходимо идентифицировать. Каждой ВЦ соответствует отличительная частота мигания (ν_1, ν_2, ν_3) в видимом диапазоне длин электромагнитных волн. Идентификация ВЦ осуществляется по частоте изменения яркости пикселей на видеоизображении [241]. За период времени идентификации обрабатывается N кадров с изображением ВЦ, яркость пикселей которого выражается через функцию $c_j(x, y)$. Частота W изменения яркости пикселя на видеоизображении определяется количеством значимых изменений яркости за этот период:

$$W(x, y) = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^N m_j : \begin{cases} m_j = 1 & \text{при } |c_j(x, y) - c_{j-1}(x, y)| > k \\ m_j = 0 & \text{при } |c_j(x, y) - c_{j-1}(x, y)| \leq k \end{cases}. \quad (3.146)$$

На видеоизображении фиксируются только те координаты пикселей (x, y) , при которых значения частоты $W(x, y)$ совпадают со значениями из заданного набора частот мигания ВЦ (ν_1, ν_2, ν_3) . В процессе цифровой обработки изображения выделяется множество Θ , состоящее из n связанных друг с другом пикселей, цвет и частота изменения яркости которых находятся в заданных диапазонах значений. Координаты ВЦ на изображении (x_Θ, y_Θ) определяются как среднее арифметическое значение координат (x_i, y_i) составлявших его пикселей:

$$\left. \begin{aligned} x_{\Theta} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \\ y_{\Theta} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i \end{aligned} \right\} \forall (x_i, y_i) \in \Theta. \quad (3.147)$$

После идентификации всех ВЦ они представляются в виде циклической последовательности $[\dots, V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, \dots]$ в порядке их обнаружения и вычисляются модули разности между горизонтальными углами для каждой пары ВЦ в этой последовательности:

$$\Delta\lambda'_i = |\lambda'_i - \lambda'_{i-1}|. \quad (3.148)$$

Затем данная последовательность упорядочивается путём нахождения индекса первого элемента, имеющего наибольшее значение модуля разности горизонтальных углов с помощью следующего условия:

$$i = 1, \text{ если } \Delta\lambda_{i-1} < \Delta\lambda_i > \Delta\lambda_{i+1}. \quad (3.149)$$

В результате получают упорядоченный кортеж ВЦ $\langle V_i, V_{i+1}, V_{i+2} \rangle$, для которого $\Delta\lambda_i$ и $\Delta\lambda_{i+1}$ будут обозначать горизонтальные углы $\angle(V_i V_{i+1})$ и $\angle(V_{i+1} V_{i+2})$ между направлениями на эти ВЦ, соответственно. Дирекционный угол ВЦ V_i в полученном кортеже вычисляется из выражения:

$$\omega_i = \frac{11}{6} \pi - \Delta\lambda'_i + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{3} \operatorname{ctg} \Delta\lambda'_{i+1} + 1}{2 \operatorname{ctg} \Delta\lambda'_i + \operatorname{ctg} \Delta\lambda'_{i+1} + \sqrt{3}} \right). \quad (3.150)$$

Зенитный угол видеограмметрической системы определяется из выражения:

$$\theta_p = \operatorname{arcc} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{3\sqrt{X_p^2 + Y_p^2}} \sum_{i=1}^3 \sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_p - Y_i)^2} \operatorname{ctg} \theta_i \right), \quad (3.151)$$

где X_i, Y_i – координаты ВЦ.

Высотное положение видеограмметрической системы находят по формуле:

$$Z_p = |\vec{R}_p| / \operatorname{ctg} \theta_p. \quad (3.152)$$

Определение координат и пространственного положения ВУ в реперной геодезической сети реализовано на основе методов цифровой обработки видеоизображений. При этом вероятность обнаружения и идентификации ВЦ активного типа по визуальным признакам достигает 99,6 % [200].

3.5.2 Определение положения объекта в глобальной системе координат

Такие ГНСС, как ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, являются координатно-временными системами позиционирования объектов. Для определения координат объекта используются многочастотные радиоприемные устройства (приемники) ГНСС. Все спутники ГНСС передают данные на приемник посредством радиосигнала, транслируемого на нескольких диапазонах частот. В системе GPS предусмотрено применение двух различающихся кодированных сигналов: P (precision – точный) и C/A (clear acquisition – легко обнаруживаемый). Оба сигнала передаются на общей частоте $f_1 = 1575.42$ МГц (длина волны $\lambda_1 = 19$ см), но двумя несущими сигнала, сдвинутыми на $\lambda/2$ для удобства их разделения [242].

На каждом спутнике установлены точные атомные часы, обеспечивающие функционирование ГНСС. Однако, эти часы также обладают погрешностью при воспроизведении единицы времени [243]. Из-за этого снижается точность координатных измерений с помощью ГНСС. В системе ГЛОНАСС также предусмотрено применение двух типов сигналов: сигнал высокой точности и сигнал стандартной точности, передаваемых на различных частотах. Наряду с частотой f_1 предусмотрена частота $f_2 = 1227,6$ МГц ($\lambda_2 = 24,4$ см), которая так же модулируется точным измерительным кодом P. В отличие от системы GPS, реализующей кодовое разделение сигналов, в системе ГЛОНАСС используется частотное разделение сигналов. Если в системе GPS используются две частоты передачи сигналов, то в системе ГЛОНАСС используются два диапазона частот: диапазон частот сигнала стандартной точности L_1 и диапазон частот высокой точности L_2 [242].

Еще более высокой точности измерения координат можно достигнуть путем анализа и обработки получаемых со спутников данных. С этой целью был разработан следующий способ обработки сигналов ГНСС, в основу которого положен относительный метод координатных измерений. ГНСС-приемники осуществляют сбор измерений и поддерживают как кодовые, так и фазовые измерения. Благодаря широкому диапазону частот и усовершенствованной обработке сигналов даже кодовые измерения обеспечивают наносекундную

точность. Приемник имеет в своем составе измеритель интервалов времени, предназначенный для измерения интервалов времени между сигналами 1 Гц системной шкалы времени спутников ГНСС и шкалы времени опорного генератора сигналов времени и частоты. На рисунке 3.41 представлена структурная схема обработки спутниковых сигналов получаемых с приемников сигналов ГНСС, установленных на опорном пункте, координаты которого известны, и на пункте наблюдения, координаты которого необходимо определить.

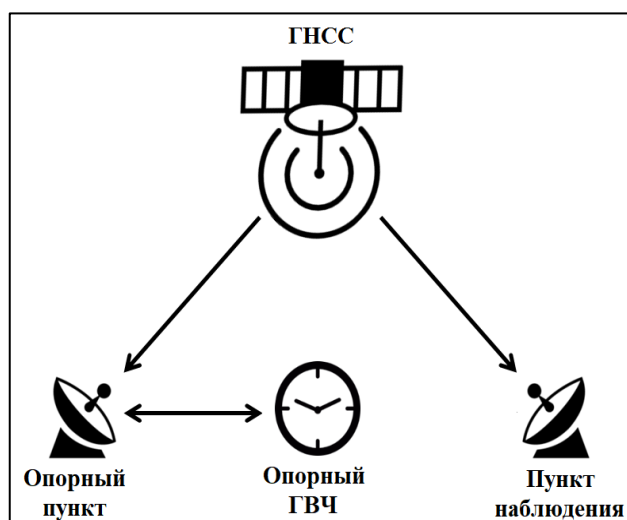


Рисунок 3.39 – Структурная схема обработки спутниковых сигналов ГНСС

Из собранных приемником данных создаются выходные файлы в стандартном формате CGGTTS. Запись, накапливаемой в процессе измерений информации, осуществляется в запоминающее устройство, из которого, позже, ее можно загрузить в персональный компьютер для последующей обработки. Данные состоят из серий измерений, с задаваемым периодом выборки. Обычно период выборки составляет 30 секунд, но его можно уменьшить (до 1 секунды). Время, необходимое для получения одиночных измерений при использовании C/A-кода, составляет 1-2 мс. Современные приемники можно подключать к локальной сети и сети интернет по протоколу TCP/IP, а также использовать беспроводные каналы связи для удаленного управления приемниками и получения с них данных.

В целях повышения точности определения собственных координат ВСКЗ по сигналам ГНСС был разработан программно-математический комплекс (ПМК),

позволяющий выполнять обработку результатов измерений с приемников сигналов космических навигационных систем. В данном ПМК применен усовершенствованный алгоритм сравнений системной шкалы времени спутника со шкалой опорного генератора сигналов времени и частоты [243]. Для математического обеспечения ПМК была разработана методика отбраковки некорректных результатов измерений, с помощью которой выполнялась обработка данных с приемников сигналов ГНСС.

Пользовательский интерфейс ПМК разрабатывался с применением визуальных элементов класса Windows Forms, предоставляемых платформой .NET Framework. В качестве графического интерфейса пользователя выбран многооконный интерфейс со стандартным размещением визуальных компонентов, что делает управление программой интуитивно понятным и дает возможность оператору одновременно выполнять несколько задач в едином окне (рис. 3.42).

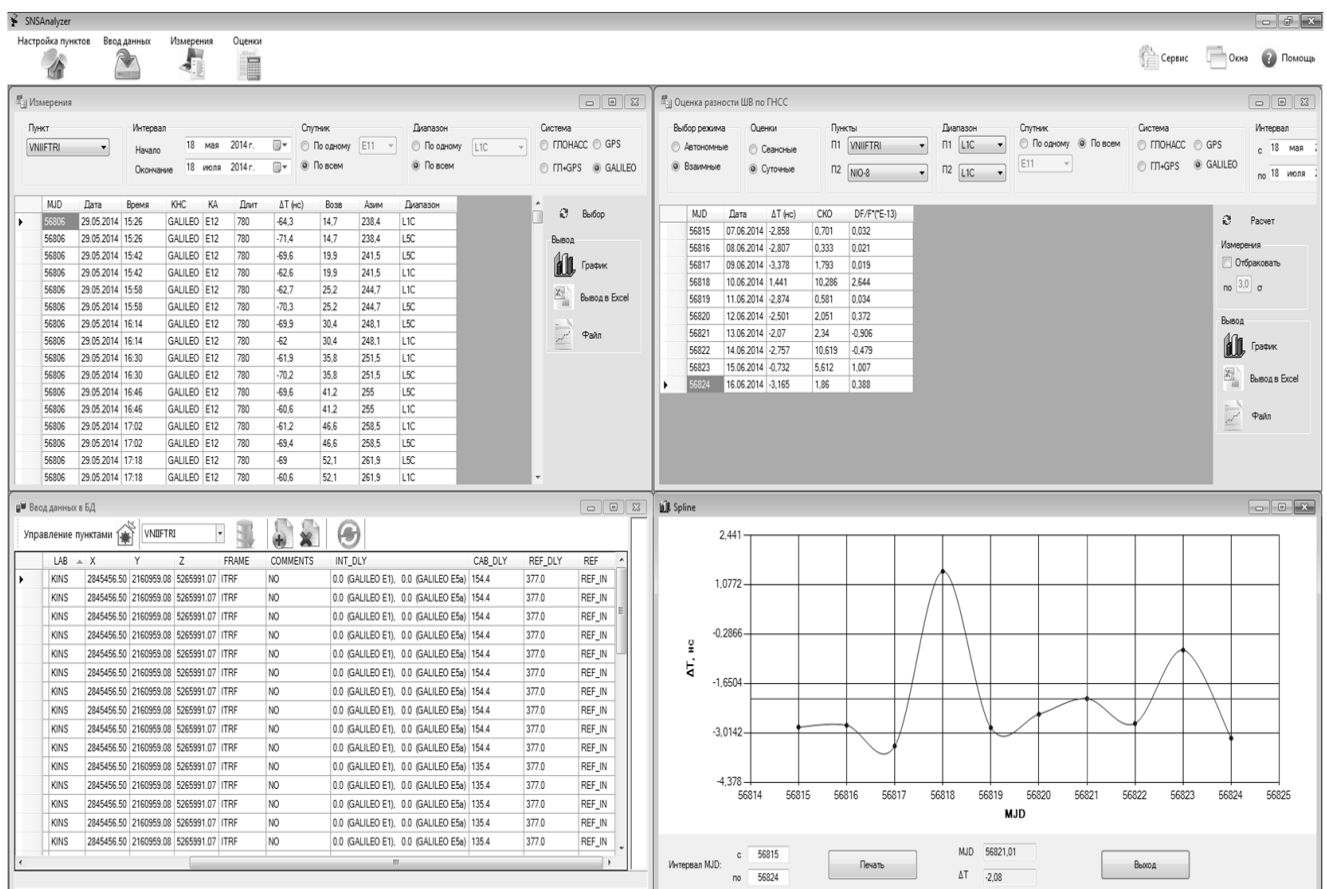


Рисунок 3.40 – Графический интерфейс управления программой

Основные функции ПМК: автоматическая загрузка, обработка и сохранение результатов сравнений системной шкалы времени спутника и опорного генератора времени и частоты; просмотр результатов сравнений шкал времени; расчет разности шкал времени по результатам их сравнений со шкалой времени ГНСС и их усредненная оценка на интервале времени наблюдения. ПМК позволяет выполнять взаимную оценку шкал времени опорного генератора и спутников. Оценка разности шкал времени осуществляется по методу наименьших квадратов с усреднением на сеансном или суточном интервалах времени наблюдений. На рисунке 3.43 представлен структурный состав ПМК.



Рисунок 3.41 – Структурный состав ПМК

Для производителей приемников сигналов ГНСС, позволяющих передавать время с точностью более 1 нс, результаты измерений представляются в файлах формата CGGTTS (рис. 3.44), рекомендованном Консультативным комитетом по времени и частоте (CCTF). Данный формат применим для всех существующих ГНСС и содержит измерительную информацию о сравнении шкалы времени

опорного генератора сигналов времени и частоты со шкалой времени спутника, входящего в состав ГНСС, а также информацию о поправках на трассе следования.

PRN	CL	MJD	STTIME	TRKL	ELV	AZTH	REFSV	SRSV	REFGPS	SRGPS	DSG	IOE	MDTR	SMDT	MDIO	SMDI	MSIO	SMSI	ISG	CK
			hhmmss	s	.1dg	.1dg	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	.1ps/s	.1ns	
26	19	51835	120200	780	704	572	-5631108	-61	+2	-55	93	16	87	+4	89	+14	9999	9999	999	67
15	34	51835	130600	780	253	3162	-51708	-51	+49	-9	117	82	190	-47	197	+7	9999	9999	999	90
25	34	51835	170600	780	483	2445	-89579	-91	+189	-88	93	114	109	-11	316	-23	9999	9999	999	DD
29	18	51835	172200	780	652	591	-1654376	-261	+54	+56	73	95	90	+3	269	+11	9999	9999	999	AE

Рисунок 3.42 – Формат данных CGGTTS

Из описания формата файлов [244] следует, что значения REFSYS представляют собой расхождения шкал времени на середину сеанса измерений. Приемники сигналов ГНСС позволяют выдавать эти значения с учетом всех вычисленных поправок. Специально разработанная программа [245] производит загрузку файлов формата CGGTTS с FTP-сервера приемников на локальный ресурс, осуществляя их дальнейшую обработку и сохранение результатов измерений в базе данных. Результаты измерений расхождения шкал времени служат исходными данными для определения усредненных оценок на интервале времени наблюдений и для вычисления взаимного расхождения шкал времени. Алгоритм работы ПМК представлен на рисунке 3.45.

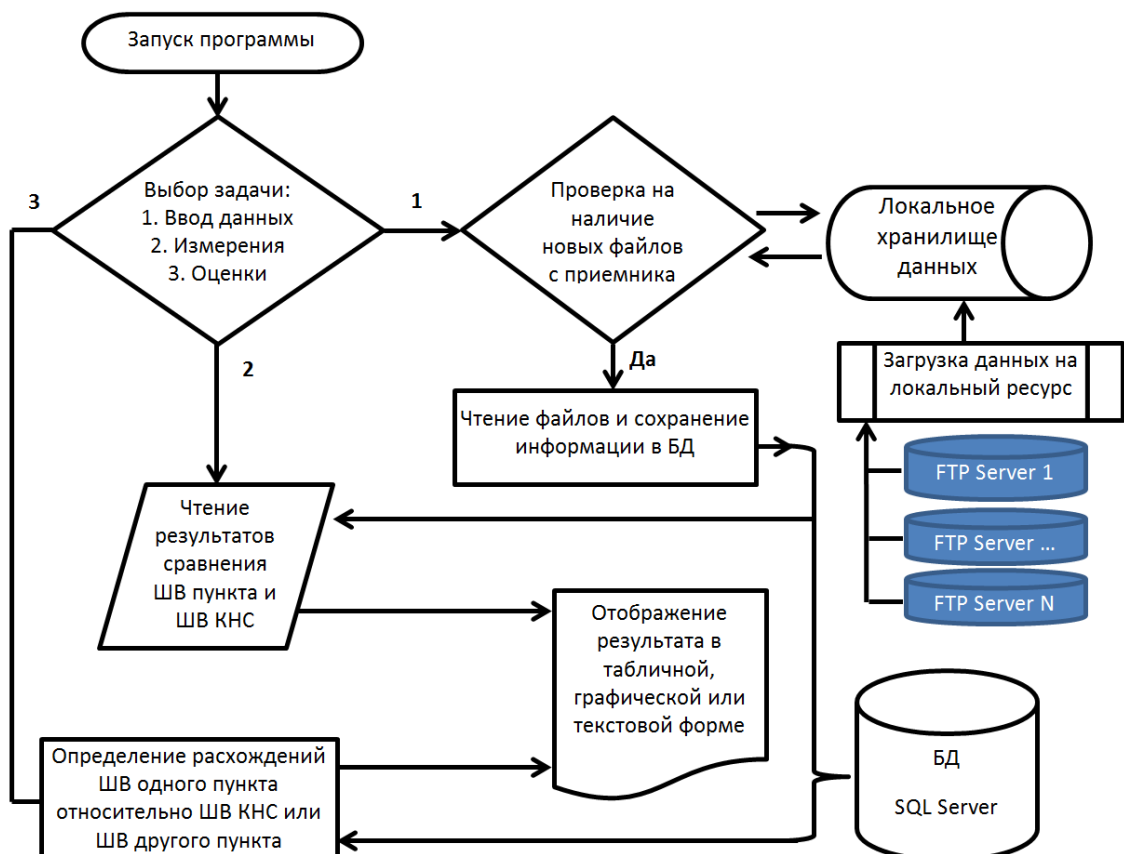


Рисунок 3.43 – Блок-схема программы

За реализацию функций FTP-клиента отвечает, разработанный для этой цели программный модуль [245], который производит установку соединения с FTP сервером и выполняет загрузку данных с него в автономном режиме в соответствии с заданным расписанием. Большая часть пользовательского интерфейса программного модуля реализовано в оконной форме (рис. 3.46), представляющей собой набор визуальных компонентов, которые позволяют пользователю производить настройку основных функций подпрограммы, таких как «Автозапуск» при загрузке компьютера или «Автообновление» по расписанию. Основное окно подпрограммы отображает информацию о расписании обновлений и предоставляет возможность пользователю задавать или изменять интервалы его проведения. Помимо этого, на форме размещена вкладка обозревателя FTP-серверов, обеспечивающая навигацию и отображение их содержимого.

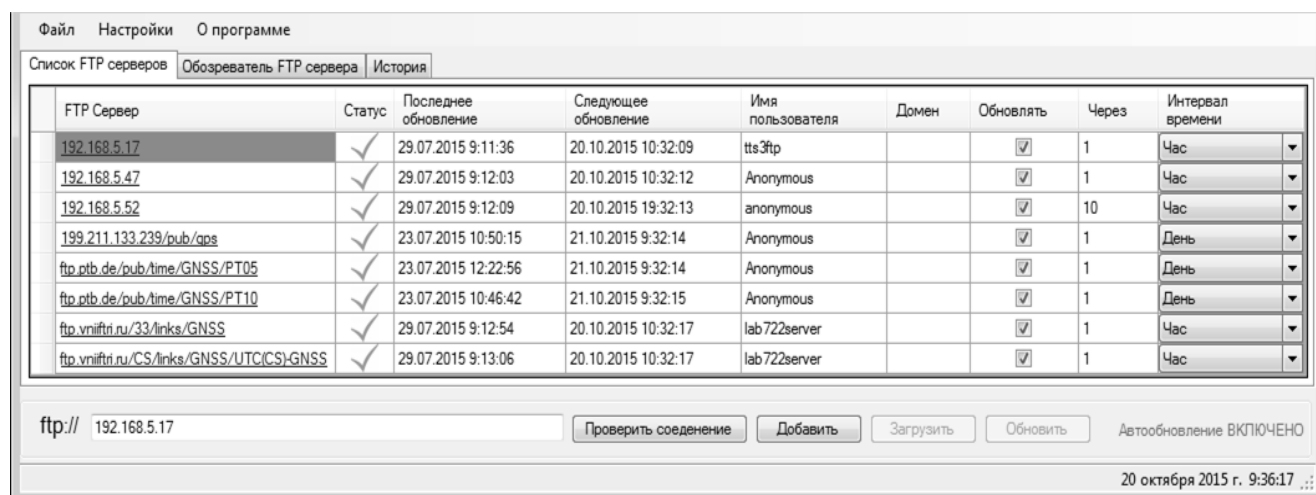


Рисунок 3.44 – Организация графического пользовательского интерфейса программного модуля для загрузки данных с FTP-серверов

После запуска программы происходит периодическая проверка расписания на предмет обновления локальных ресурсов путем сопоставления времени по расписанию с текущим временем системы. При положительном результате возникает событие таймера, запускающее процесс, который задействует FTP-клиент для получения списка параметров файлов и директорий. Этот список становится основой для создания образа ресурса FTP-сервера. Далее производится

проверка на идентичность содержимого локального хранилища данных с созданным ранее образом. Если были обнаружены расхождения в параметрах файлов или директорий, то пути к ним заносятся в формируемый массив данных для последующего обновления. Критерием поиска различий является размер и дата создания файла или директории. Сформированный массив данных, содержащий список файлов и директорий, направляется FTP-клиенту для их последующей загрузки с FTP-сервера на локальное хранилище данных. При этом файлы или директории, созданные однажды, на локальном хранилище данных не удаляются впоследствии с него в случае обнаружения их отсутствия на FTP-сервере, а лишь замещаются более новыми версиями. Таким образом, локальные копии данных будут доступны, даже если они были удалены с FTP-сервера, что позволяет избежать потерю данных. На рисунке 3.47 представлена блок-схема программного модуля для загрузки данных с FTP-серверов.

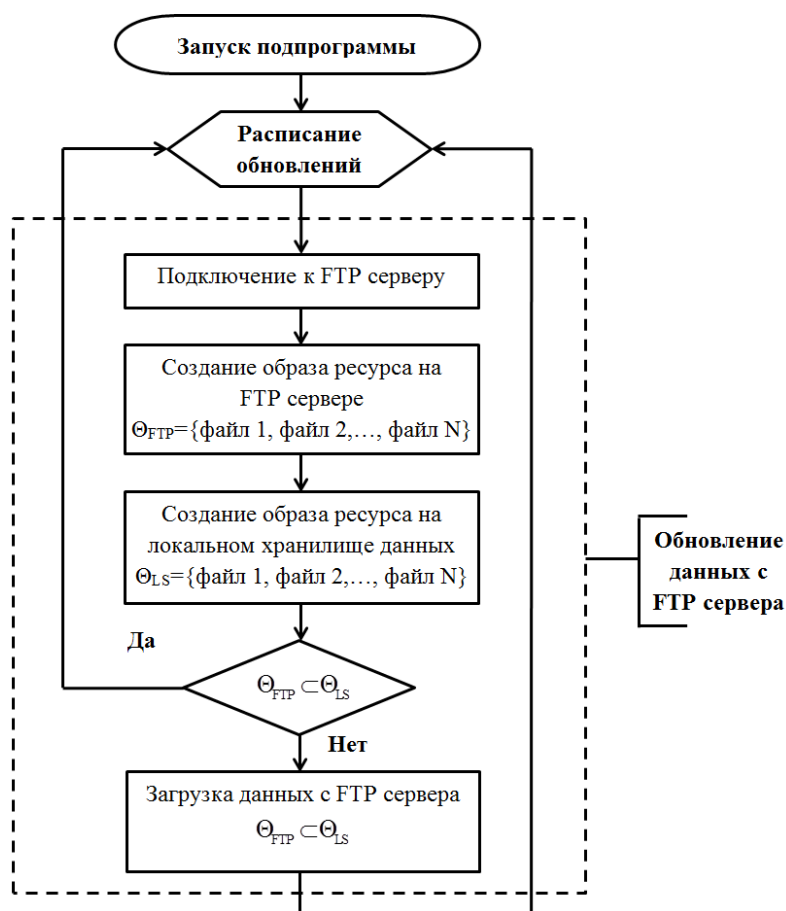


Рисунок 3.45 – Блок-схема программного модуля загрузки данных с FTP-серверов

В соответствии с ГОСТ Р 53607-2009 относительный метод определения

координат по сигналам ГНСС позволяет исключить погрешности орбиты и часов, установленных на спутниках, поскольку наблюдения за спутниками выполняются одновременно на опорном и определяемом пунктах. После чего результаты наблюдений обрабатываются совместно. Из обработки синхронных наблюдений за одними и теми же навигационными космическими аппаратами (НКА), полученными на опорном пункте (ОП) и пункте наблюдения (ПН), определяются разности координат этих пунктов, представляющие собой проекции базовой линии на оси координат. Определение относительных координат пункта наблюдения выполняется, которые представляет собой измеренное расстояние между спутником и приемником с погрешностями, обусловленными расхождением шкалы времени опорного генератора времени и частоты относительно шкалы системного времени спутника ГНСС, а также задержками прохождения радионавигационного сигнала по трассе спутник-приемник и инструментальными погрешностями. Измерение псевдодальности сводится к измерению моментов прихода сигналов, передаваемых со спутников, и определяется по формуле:

$$\rho_{\text{ОП}}^i = c(t_{\text{ОП}} - t_i + \sum dt_{\text{ОП}}), \quad (3.153)$$

где c – скорость света в вакууме;

$t_{\text{ОП}}$ – время часов приемника в момент приема им сигнала;

t_i – время часов спутника в момент излучения им навигационного сигнала;

$\sum dt_{\text{ОП}}$ – совокупность поправок на трассе следования сигнала, включая задержки сигнала в кабеле и антенне, ионосферную и тропосферную задержку, а также релятивистскую поправку, учитывающую вращение Земли.

На первом шаге алгоритма для каждого синхронного измерения псевдодальностей спутника вычисляются дифференциальные поправки для измеренных кодовых псевдодальностей:

$$\rho_{\text{ПН}}^i = \rho_{\text{ПН}}^{i(\text{геом})} + c(dt_{\text{ПН}} - dt^i) + Trop_{\text{ПН}}^i + Iono_{\text{ПН}}^i + dm_{\text{ПН}}^i + e_{\text{ПН}}^i, \quad (3.154)$$

$$\rho_{\text{ОП}}^i = \rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})} + c(dt_{\text{ОП}} - dt^i) + Trop_{\text{ОП}}^i + Iono_{\text{ОП}}^i + dm_{\text{ОП}}^i + e_{\text{ОП}}^i, \quad (3.155)$$

где $\rho_{\text{ПН}}^{i(\text{геом})}$, $\rho_{\text{ОП}}^{i(\text{геом})}$ – геометрическая дальность ПН и ОП;

$dt_{\text{ПН}}, dt_{\text{ОП}}$ – поправка к часам приемника ПН и ОП;

dt^i – поправка к часам спутника;

$Trop_{\text{ПН}}^i, Trop_{\text{ОП}}^i$ – поправка за влияние тропосферы ПН и ОП;

$Iono_{\text{ПН}}^i$, $Iono_{\text{ОП}}^i$ – поправка за влияние ионосферы ПН и ОП;

$dm_{\text{ПН}}^i, dm_{\text{ОП}}^i$ – поправка за влияние многопутности ПН и ОП;

$e_{\text{ПН}}^i, e_{\text{ОП}}^i$ – погрешность измерения кодовой псевдодальности ПН и ОП.

Затем формируются разности псевдодальностей:

$$\begin{aligned} \rho_{\Pi\Pi}^i - \rho_{\text{O}\Pi}^i &= \rho_{\Pi\Pi}^{i(\text{zeoM})} - \rho_{\text{O}\Pi}^{i(\text{zeoM})} + c(dt_{\Pi\Pi} - dt^i) - c(dt_{\text{O}\Pi} - dt^i) + \\ &+ Trop_{\Pi\Pi}^i - Trop_{\text{O}\Pi}^i + Iono_{\Pi\Pi}^i - Iono_{\text{O}\Pi}^i + e_{\Pi\Pi, \text{O}\Pi}^i \end{aligned} \quad (3.156)$$

По этим разностям составляется система уравнений поправок для всех синхронных наблюдений:

$$AX-L=V, \quad (3.157)$$

$$A = \left[\begin{array}{ccc|c} \frac{X^1 - (X_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(1\text{геом})})_0} & \frac{Y^1 - (Y_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(1\text{геом})})_0} & \frac{Z^1 - (Z_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(1\text{геом})})_0} & 1 \\ \frac{X^2 - (X_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(2\text{геом})})_0} & \frac{Y^2 - (Y_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(2\text{геом})})_0} & \frac{Z^2 - (Z_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(2\text{геом})})_0} & 1 \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \frac{X^n - (X_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(n\text{геом})})_0} & \frac{Y^n - (Y_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(n\text{геом})})_0} & \frac{Z^n - (Z_{\text{оп}})_0}{(\rho_{\text{пн}}^{(n\text{геом})})_0} & 1 \end{array} \right], \quad (3.158)$$

$$L = \begin{bmatrix} \rho_{\text{ПН}}^{1(\text{кopp})} - \left(\rho_{\text{ПН}}^{1(\text{гeом})} \right)_0 \\ \rho_{\text{ПН}}^{2(\text{кopp})} - \left(\rho_{\text{ПН}}^{2(\text{гeом})} \right)_0 \\ \dots\dots\dots \\ \rho_{\text{ПН}}^{m(\text{кopp})} - \left(\rho_{\text{ПН}}^{m(\text{гeом})} \right)_0 \end{bmatrix}, \quad (3.159)$$

$$X = [\Delta X_{\text{III}} \quad \Delta Y_{\text{III}} \quad \Delta Z_{\text{III}} \quad cdt_{\text{III}}]^T, \quad (3.160)$$

$$V = [V_1 \quad V_2 \quad \dots \quad V_n]^T, \quad (3.161)$$

Где $dt_{\text{оп}}$, $dt_{\text{пн}}$ – поправки к часам приемника пунктов;

V_i – скорость навигационного космического аппарата.

Однако, результаты измерений приемника могут содержать грубые ошибки, которые, в свою очередь, искажают значение усредненной оценки на заданном

интервале наблюдений. Выявление и исключение ошибок усложняется тем, что они выражены значениями разного порядка. В качестве примера, на графиках (рис. 3.48) представлены результаты измерений разности шкал времени на выбранном интервале времени наблюдений (MJD – модифицированная юлианская дата), однако на первом графике содержатся ошибки результатов измерений более высокого порядка, чем на втором.

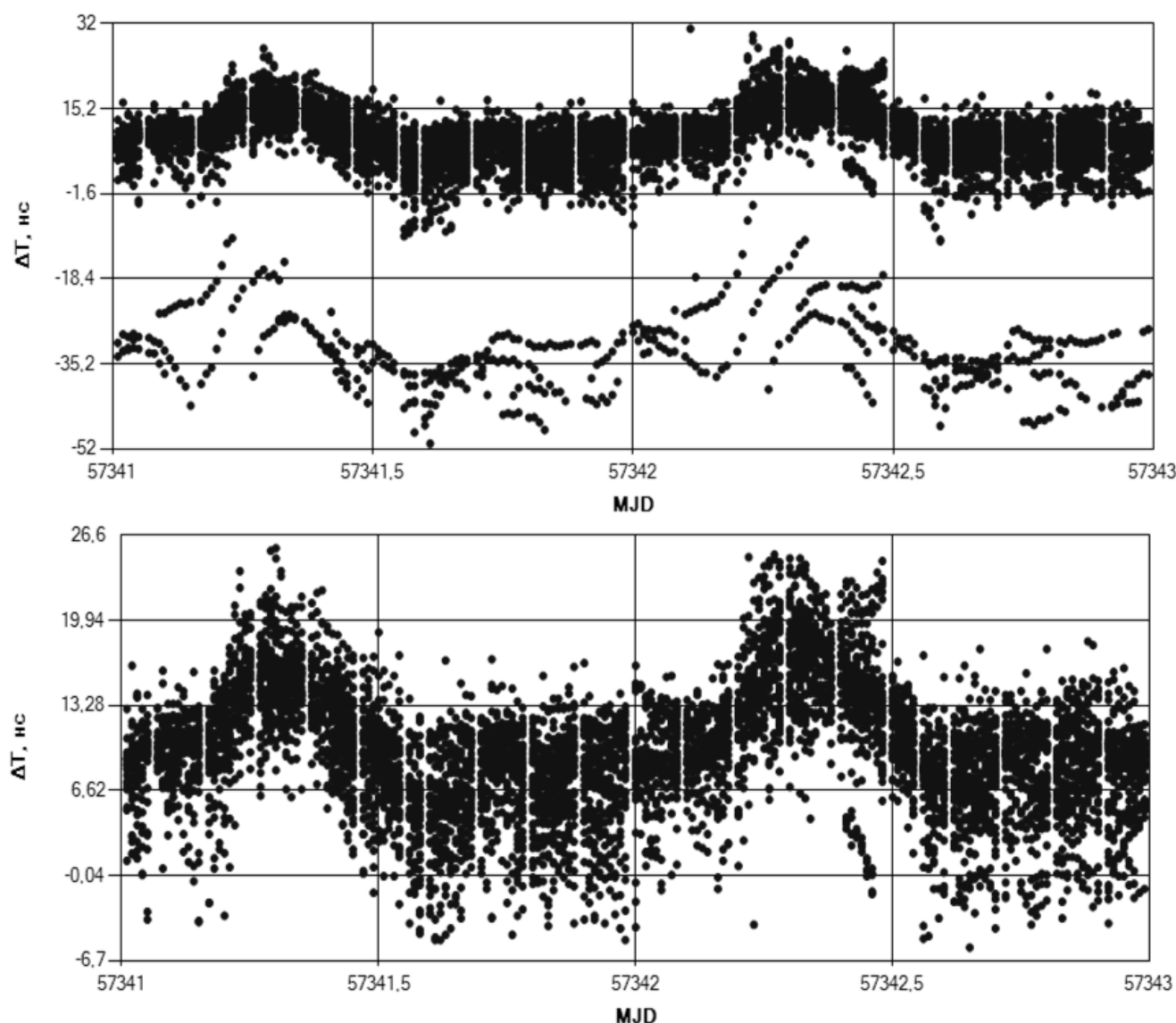


Рисунок 3.46 – Графики сравнения шкалы времени ЭВЧ со шкалой времени ГНСС GPS, отображают погрешности разного порядка

Несмещенная оценка расхождения шкал времени позволяет найти такое усредненное значение $\Delta\bar{T}(t_i)$, в заданный момент времени t_i на интервале времени наблюдений, точечная оценка, которого соответствовала бы математическому

ожиданию $M(\Delta T)$ выборки результатов измерений [246]. На основании квантильных оценок значений погрешности с заданной доверительной вероятностью из результатов наблюдений отбрасываются интервалы, ограниченные наибольшими по модулю, а следовательно, самыми неустойчивыми, близкими к промахам наблюдениями [247]. В первом приближении, производится оценка математического ожидания выборки в виде линейной функции, аппроксимирующей облако точек результатов измерений по МНК:

$$\Delta \bar{T}(t_i) = kt_i + b, \quad (3.162)$$

где k, b – коэффициенты уравнения прямой.

Очевидно, что первичная оценка математического ожидания является смещенной из-за наличия ошибок в выборке. Для выявления этих ошибок рассчитывается среднеквадратическое отклонение случайной величины от этой функции и задается доверительный интервал:

$$P = \{\Delta T_i \mid (\Delta \bar{T}(t_i) - U(p, n) \leq \Delta T_i \leq \Delta \bar{T}(t_i) + U(p, n)), p \in (0, 1)\}, \quad (3.163)$$

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

Аргументами функции $U(p, n)$ являются: p – задает уровень доверия и характеризует вероятность нахождения результата измерений в заданном доверительном интервале; n – объем выборки. Значение границы доверительного интервала для распределения Стьюдента рассчитывается по формуле:

$$U(p, n) = s\tau_{p, n-1}, \quad (3.164)$$

где s^2 – исправленная выборочная дисперсия;

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

Так, например, при $p=0,9973$ доверительный интервал составит $[\Delta \bar{T}(t_i) - 3s, \Delta \bar{T}(t_i) + 3s]$, что соответствует вероятности нахождения значения нормально распределенной случайной величины в заданном доверительном интервале (правило трех сигм). Исправленная выборочная дисперсия результатов расхождения шкал времени определяется по формуле:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \Delta \bar{T}(t_i))^2, \quad (3.165)$$

где ΔT_i – значения разности ШВ ГНСС и ЭВЧ в момент времени t_i ;

$\Delta \bar{T}(t_i)$ – среднее арифметическое значение в выборке из n измерений.

Если задать отклонение в точке ΔT_i от среднего арифметического значения

$$L_i \in \mathbb{Q} : L_i = |\Delta T_i - \Delta \bar{T}(t_i)| = \left| (kt_i - \Delta T_i + b) / \sqrt{k^2 + 1} \right| \quad (3.166)$$

и представить облако точек результатов измерений $\{\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n\}$ в виде упорядоченного множества

$$S = \{\Delta T_i \mid L_{i-1} \leq L_i \leq L_{i+1}, i \in \mathbb{N} : 0 \leq i \leq n\}, \quad (3.167)$$

то необходимо найти такое подмножество $S' \subset S$, элементы которого, соответствовали бы условию:

$$S' = \{\Delta T_i \mid (i \leq n \cdot p), i \in \mathbb{N} : 0 \leq i \leq n\}. \quad (3.168)$$

Соответственно, необходимо исключить множество элементов:

$$E = S / S'. \quad (3.169)$$

Уровень доверия p определялся в программе с погрешностью $\leq 10^{-4}$, исходя из заданного значения квантили $\tau_{p,n-1}$, путем аппроксимации [248] по формулам:

$$p = 1 - \left[\sum_{i=1}^6 c_i \left| \tau_{p,n-1}^{i-1} \right| \right]^{-8}, \quad (3.170)$$

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^5 a(i, j) n^{-j+1}}{1 + \sum_{j=1}^2 b(i, j) n^{-j}}, \quad (3.171)$$

где $a(i, j)$ – элементы матрицы A на пересечении строки i и столбца j ;

$b(i, j)$ – элементы матрицы B на пересечении строки i и столбца j .

Сами матрицы A и B задаются следующими выражениями:

$$A = \begin{pmatrix} 0,09879441 & -0,58121 & 1,390993 & -1,222452 & 2,151185 \\ 0,04431742 & -0,2206018 & 0,03317253 & 5,679969 & -12,96519 \\ 0,009694901 & -0,1408854 & 1,88993 & -12,75532 & 25,77532 \\ -0,0000918228 & 0,03789901 & -1,280346 & 9,249528 & -19,08115 \\ 0,000579602 & -0,02763334 & 0,4517029 & -2,657967 & 5,127212 \end{pmatrix}, \quad (3.172)$$

$$B = \begin{pmatrix} -5,537409 & 11,42343 \\ -5,166733 & 13,49862 \\ -4,233736 & 14,3963 \\ -2,777816 & 16,461132 \\ -0,5657187 & 21,83269 \end{pmatrix}. \quad (3.173)$$

Результаты измерений, выходящие за доверительный интервал, исключаются, после чего процедура оценки математического ожидания повторяется: определяется дисперсия и рассчитываются новые значения отклонений L_i по оставшимся точкам выборки, формируется новое упорядоченное множество S из элементов множества S' . Эта операция повторяется до тех пор, пока в конечной выборке не останется ошибок за пределами доверительного интервала:

$$S' = S = \{\Delta T_i \mid U(p, n) \geq L_i, i \in \mathbb{N}: 0 \leq i \leq n\}, \text{ т.е. } E = S / S' = \emptyset \quad (3.174)$$

Таким образом, распределение случайной величины в конечной выборке можно будет считать нормальным, а оценку выборки результатов измерений несмещенной [243]. С помощью данного метода получают несмещенную оценку времени прохождения радионавигационного сигнала по выборке результатов сравнений шкал времени. Применение этого метода позволяет снизить погрешность усредненной оценки результатов этих измерений на интервале времени наблюдений, за счет чего снижается погрешность определения псевдодальности спутников. В результате этого повышается точность определения собственных координат ВСКЗ по спутниковым сигналам ГНСС.

3.6 Выводы по третьей главе

Создание физической модели видеограмметрической системы позволило объединить все элементы в единую измерительную систему, проверить правильность реализации алгоритмов и произвести отладку разработанного программного обеспечения при взаимодействии с элементами системы, отработать измерительные операции, выполнить калибровку физической модели видеограмметрической системы как средства измерения. Также по результатам проведенных экспериментов была дана оценка техническим и метрологическим характеристикам модели.

Экспериментальным путем было подтверждено, что количество используемых признаков ВЦ влияет на вероятность ее обнаружения с помощью оптико-электронного устройства. Наибольшее влияние на вероятность обнаружения ВЦ оказывает признак цветовой окраски и признак частоты мигания ВЦ. Менее существенное влияние на вероятность обнаружения ВЦ оказывает признак формы. Также в ходе экспериментов было установлено, что использование признака частоты мигания значительно снижает влияние освещенности ВЦ на вероятность её обнаружения. Следовательно, данный признак позволяет с большей вероятностью обнаруживать ВЦ оптико-электронным устройством даже в условиях недостаточной видимости.

Функционирование ВСКЗ стало возможным благодаря выведенным выражениям для вычисления дальности, мгновенной скорости и вектора перемещения визирной цели, по результатам измерений координат и радиуса этой визирной цели на видеоизображении, а также значениям элементов внутреннего и внешнего ориентирования оптоэлектронного устройства, формирующего данное видеоизображение. С помощью полученных выражений становится возможным применять визирные цели для определения координат точек рельсовых нитей контролируемого участка ж/д пути.

Также были выведены выражения для вычисления дальности и координат оптоэлектронного устройства в локальной системе координат, образованной тремя визирными целями активного типа, по результатам измерений их координат и частоты мигания этих визирных целей на видеоизображении, а также значениям элементов внутреннего и внешнего ориентирования оптоэлектронного устройства, с помощью которого было получено данное видеоизображение. Благодаря данным выражениям может осуществляться ориентирование ВУ по визирным целям в процессе контроля параметров ж/д пути.

Применение технологии «Лидар» позволяет расширить функциональные возможности ВСКЗ и существенно ускорить процесс создания трехмерных изображений. Эта функция является крайне важной при решении измерительных задач в режиме близком к реальному времени. С появлением данной функции

открываются возможности по созданию на базе ВСКЗ системы дополненной реальности.

Разработанные методы цифровой обработки изображений применимы для различных типов оптоэлектронных устройств фото-видеофиксации с целью обнаружения и идентификации объектов измерения на основе их отличительных признаков, к которым относятся: излучаемая тепловая энергия, движение, цветовая окраска, видимые размеры, возвышение над уровнем местности. Данные методы в первую очередь направлены на расширение функциональных возможностей ВСКЗ в области бесконтактных измерений таких параметров исследуемого объекта, как координаты его местоположения, видимые размеры, скорость и вектор перемещения.

Внедрение разработанных методов цифровой обработки изображений в ВСКЗ направлено на повышение точности получаемых результатов измерений и быстродействие, что будет способствовать разрешению основной проблемы практического применения технологии компьютерного зрения, заключающейся в необходимости обрабатывать большие объемы оптической информации за короткие сроки или в реальном времени. Разработанные методы цифровой обработки изображений также направлены на повышение вероятности обнаружения объекта измерения и снижение субъективности в процессе восприятия и оценки получаемой о нем информации.

Таким образом, на основе технологий компьютерного зрения, лазерного сканирования и координатных измерений по радионавигационным сигналам были разработаны основы методологии проектирования видеограмметрических систем с улучшенными техническими и метрологическими характеристиками, способствующей повышению точности и оперативности контроля разных геометрических параметров ж/д пути.

4 ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Высокая точность и оперативность проведения контроля геометрических параметров ж/д пути могут быть достигнуты путем поступательного развития ИИУС и совершенствования способов их прикладного применения. Учитывая современные тенденции, направленные на создание интеллектуальных и высокоточных средств измерений, дальнейшее развитие ИИУС возможно на основе технологии компьютерного зрения, потенциал которой еще полностью не раскрыт, что обуславливает выбор направления данного исследования.

Кроме этого, в последнее время значительно возросла потребность в разработке интеллектуальных САУ, способных ориентироваться в пространстве и определять собственное положение относительно других объектов в режиме реального времени. Такие системы очень востребованы в целях решения задач навигации и управления транспортом, строительной и специальной техникой. Решение подобных задач может быть достигнуто с помощью разработанной ВСКЗ, представляющей собой комплекс взаимосвязанных измерительных и технических средств управления [237]. В ходе исследования были определены следующие прикладные задачи, возникающие в процессе строительства, ремонта и эксплуатации ж/д пути:

- 1) аэрофотопографическая съемка местности в целях проектирования участка ж/д пути [249],
- 2) оперативный контроль состояния участка ж/д пути с применением средств воздушной технической разведки [199],
- 3) планово-высотное обоснование и вынос проекта ж/д пути в натуру [250],
- 4) контроль параметров земляного полотна ж/д пути в процессе его строительства или восстановления [251],
- 5) контроль параметров ГРК после укладки или ремонта [252],
- 6) обнаружение препятствий на пути следования ж/д транспорта в целях повышения безопасности грузопассажирских перевозок [253].

Область применения разработанной ВСКЗ охватывает следующие основные направления для ее возможного применения: обнаружение длинных неровностей рельсовой колеи и дефектов земляного полотна, проектирование железных дорог, планово-высотное обоснование и вынос проекта железных дорог в натуру, контроль положения рабочего органа дорожно-строительных машин, операционный контроль геометрических параметров земляного полотна в процессе строительства (восстановления), контроль параметров погрузки строительной техники, обнаружение препятствий на пути следования поезда и т.д. (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Область применения комплексной ВСКЗ

На основании результатов, полученных в ходе проведенного исследования [254], было разработано четыре основных технических решения по применению ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути. Соответственно, для реализации этих технических решений в состав комплексной ВСКЗ было включено четыре сегмента (рис. 4.2). Первый сегмент, предназначен для мониторинга железных дорог, выявления дефектов земляного полотна и формирования 3-D моделей поврежденных участков ж/д пути. В случае поступления в ВСКЗ

информации о повреждении участка железной дороги от путеизмерительных комплексов, работников путевого хозяйства, а также различных автоматизированных систем диагностики и контроля ж/д пути, осуществляется обследование данного участка пути комплексами с БПЛА. Применение БПЛА в качестве средства контроля способствует повышению оперативности получения первичной информации о техническом состоянии поврежденного участка железной дороги, а также причинах и степени его повреждения. Полученная модель участка железной дороги загружается в САПР, с помощью которой формируется проект ремонта (восстановления) поврежденного участка пути.

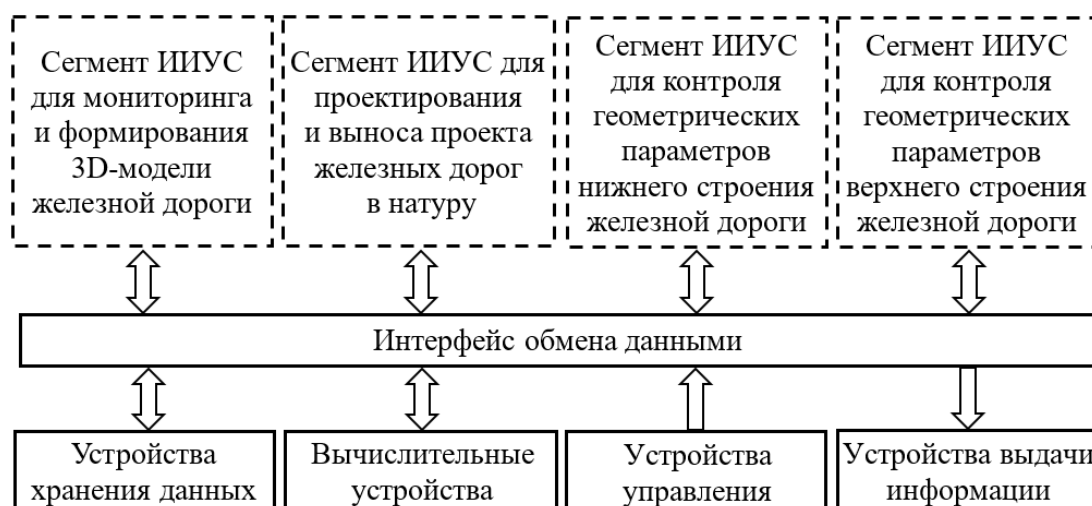


Рисунок 4.2 – Схема взаимодействия сегментов ВСКЗ для получения информации о техническом состоянии железных дорог

Второй сегмент ВСКЗ обеспечивает выполнение работ по планово-высотному обоснованию и выносу проекта строительства (восстановления) железной дороги в натуру. В процессе производства земляных работ с помощью третьего сегмента ВСКЗ осуществляется операционный контроль геометрических параметров земляного полотна железной дороги. Четвертый сегмент ВСКЗ обеспечивает контроль геометрических параметров рельсовой колеи. Информационное взаимодействие представленных сегментов ВСКЗ (рис. 4.3) обеспечивает получение актуальной и достоверной информации о техническом состоянии участка железной дороги на всех этапах проведения строительно-восстановительных работ.

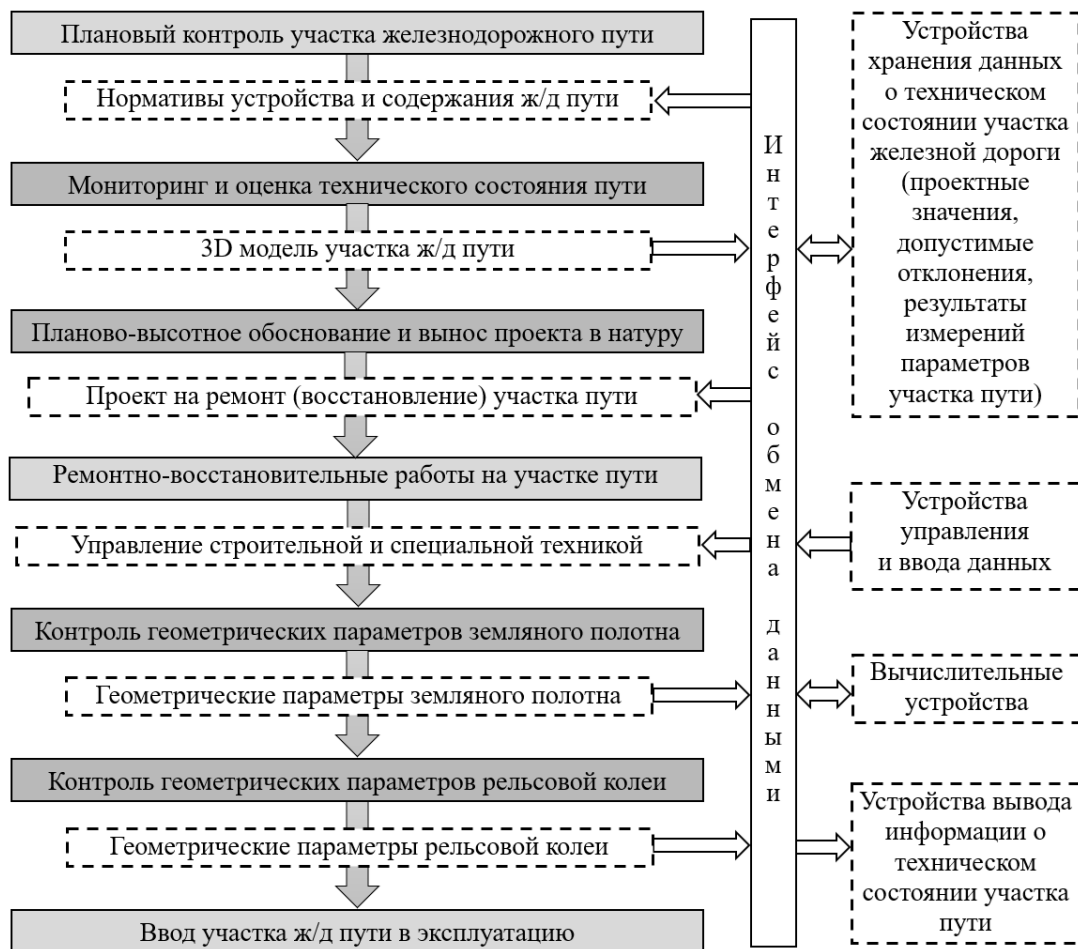


Рисунок 4.3 – Схема обмена данными с видеограмметрической системой

Перспективная ВСКЗ также может применяться для получения следующих данных, необходимых в целях сокращения времени ремонта (восстановления) поврежденного участка ж/д пути [255]:

- характер и объемы повреждений земляного полотна, верхнего строения пути, искусственных сооружений, устройств связи и СЦБ, электрификации, локомотивного хозяйства и водоснабжения, служебно-технических зданий;
- определение условий сооружения обходов поврежденных ж/д объектов;
- определение объемов и характера завалов от подвижного состава и служебно-технических зданий на узлах (станциях) и перегонах;
- определение количества и состояния подвижного состава на ж/д участке;
- выявление на участках и объектах ж/д пути строительных и восстановительных материалов, оборудования и техники, которые могут быть использованы при восстановительных работах;

- наличие и состояние автомобильных дорог для подъезда к восстанавливаемым ж/д участкам и объектам;
- получение других необходимых сведений.

4.1 Оперативный контроль состояния железной дороги

Качество и безопасность грузовых и пассажирских перевозок, осуществляемых ж/д транспортом, в первую очередь определяется состоянием железных дорог. В настоящее время основными средствами контроля состояния ж/д путей являются путевые диагностические комплексы пространственного сканирования, построенные на базе путеизмерительных вагонов или путевых тележек [31] [33] [36]. Такие комплексы позволяют выявлять опасные деформации балластной призмы и земляного полотна, а также нарушения габаритов приближения строений ж/д инфраструктуры в соответствии с допусками, установленными в ГОСТ 9238-2013. Однако в случае возникновения стихийных бедствий и техногенных аварий, влекущих повреждение участка ж/д пути, применение средств контроля, передвигающихся по рельсовым путям, становится невозможным. При этом возникает проблема, связанная с оперативной оценкой состояния повреждённого участка ж/д пути и скорейшим восстановлением путевого сообщения [256].

Внедрение технологий лазерного сканирования и координатных измерений по сигналам ГНСС способствовало появлению новых технических решений [63] [64] для проведения аэрофотосъемочных работ, связанных с мониторингом и диагностикой сетей газопроводов, трасс пролегания магистральных нефтепроводов и их инфраструктуры посредством комплексов с БПЛА. Также было разработано техническое решение [257] по применению комплексов с БПЛА для получения цифровых моделей ж/д пути и прилегающих к нему объектов инфраструктуры ж/д сети, на основе которых формируются данные о техническом состоянии участка ж/д пути.

Существует несколько методов построения трехмерных моделей местности. До недавнего времени наиболее распространенным являлся

стереотопографический метод, который основан на использовании двух одинаковых фотокамер, размещенных на некотором базисе стереосъемки [79]. Однако, из-за достаточно больших размеров базиса фотографирования данный метод плохо подходит для применения с БПЛА. Наиболее подходящим для БПЛА является использование ВЛС, который позволяет осуществлять высокоскоростную лазерную съёмку местности и формирует облако точек постоянной плотности. С помощью узкого лазерного луча в коротковолновом диапазоне спектра достигается высокое разрешение производимых сканером угловых измерений [258].

Таким образом, построение трехмерных моделей местности может быть осуществлено комплексом с БПЛА путем включения в его состав следующих устройств: АФК, ВЛС, геодезический ГНСС приемник. В этом случае управление БПЛА осуществляется с помощью ВСКЗ дистанционно по беспроводному каналу связи. За эту функцию отвечает приемо-передающее устройство ВСКЗ, которое обеспечивает выдачу в канал связи телеметрической информации (показания датчиков) для слежения за полетом БПЛА.

Основным направлением повышения эффективности мониторинга и оценки состояния ж/д путей с помощью БПЛА является повышение точности координатных измерений. Информацию о рельефе местности можно получить путем сканирования с БПЛА, однако для формирования трехмерных моделей также необходимо знать его координаты. Наиболее точными устройствами для измерения координат являются ГНСС приемники. При наличии базовой станции или сети референцных ГНСС станций, транслирующих поправки, достигается сантиметровая точность координатных измерений. С появлением легких и малогабаритных геодезических приемников сигналов ГНСС, ВЛС и АФК стала возможной их установка на БПЛА с небольшим весом полезной нагрузки, что делает аэрофотосъемку более доступной и ускоряет процесс создания трехмерных моделей местности.

В процессе аэрофотосъёмки используется навигационная аппаратура, с помощью которой определяются элементы внешнего ориентирования всех снимков (или только координаты центров проекций). В этом случае ошибки

измерений координат точек и углов ракурса съемки могут иметь место, как в отдельных точках, накапливаясь затем в пределах маршрута полета, так и сразу во всех точках фотографирования. Возникает необходимость использовать еще и другой тип опорных данных. Это, как правило, точки полевой подготовки в количестве, позволяющем осуществить контроль качества информации ГНСС, но не их полную замену [259]. Опорные данные могут также содержать недопустимые ошибки. Выявление и устранение этих ошибок в простейших случаях осуществляется путем использования избыточного количества однотипных опорных данных, что достаточно эффективно, но экономически навсегда целесообразно [260].

В целях повышения точности мониторинга и достоверности оценки технического состояния участка железной дороги требуется модель ж/д пути высокого разрешения, что обуславливает необходимость проведения аэрофотосъемки на малой высоте или использование АФК с длиннофокусными объективами. При этом требуемые значения перекрытия АФС уменьшаются настолько, что навигационное оборудование БПЛА уже не в состоянии обеспечивать заданный маршрут полета в пределах допустимых отклонений. В результате на ортофотоплане могут появиться разрывы. Соответственно, возникает необходимость в разработке более совершенных систем навигации и курсовой устойчивости, которые позволили бы уменьшить отклонения БПЛА от установленного маршрута полета.

Наиболее применительно к решению описанных проблем видится применение технологии компьютерного зрения, которая позволит повысить точность определения отклонений от маршрута полета БПЛА и обеспечит автоматическое формирование ортофотоплана в режиме реального времени, что даст возможность проводить аэрофотосъемочные работы на низких высотах и создавать ортофотоплан в крупных масштабах с соблюдением требуемых перекрытий снимков. Учитывая достаточно высокий уровень развития авиастроения и радиоэлектроники, появляется возможность создания

малогабаритных и высокопроизводительных комплексов с БПЛА для размещения на их борту необходимых компонентов ВСКЗ (рис. 4.4).

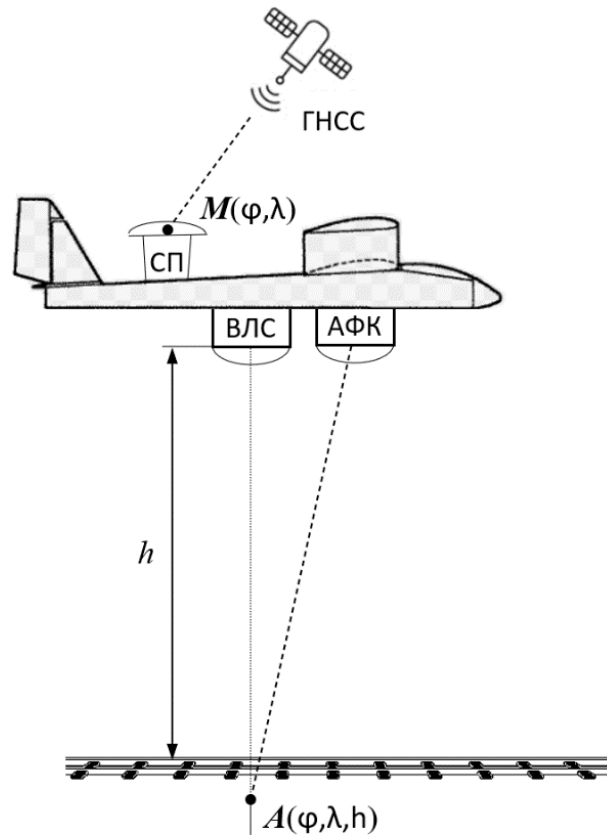


Рисунок 4.4 – Схема размещения компонентов ВСКЗ на комплексе с БПЛА для формирования 3D-модели железной дороги: ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система; СП – спутниковый приемник; ВЛС – воздушный лазерный сканер; АФК – аэрофотокамера

Включение компонентов ВСКЗ в состав комплекса с БПЛА позволяет автоматизировать процесс получения, обработки и представления объективных пространственных данных на объекте производимой аэрофотосъемки. Появляется возможность в режиме реального времени строить ортофотоплан местности путем монтажа, на общую основу обрезаемых по перекрывающимся контурам и стыкуемых смежных снимков с учетом зафиксированных в полете элементов внешнего ориентирования. Данный сегмент ВСКЗ также может частично выполнять функции автопилота, выбирая оптимальный маршрут полета для охвата всей площади рабочей зоны [261]. Обобщенная структурная схема сегмента ВСКЗ на БПЛА изображена на рисунке 4.5.

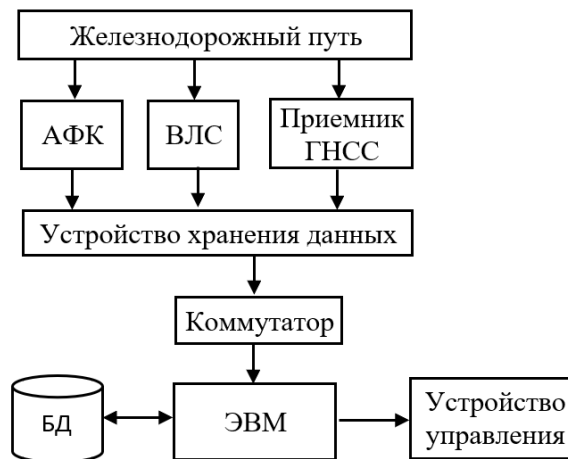


Рисунок 4.5 – Обобщенная структурная схема сегмента ВСКЗ для построения 3D-модели железной дороги: АФК – аэрофотокамера; ВЛС – воздушный лазерный сканер; БД – база данных

В таком исполнении сегмент ВСКЗ интегрируется в бортовое оборудование БпЛА и обеспечивает взаимодействие с системой автоматического управления (САУ) полетом (рис. 4.6). В составе САУ выделяются подсистемы траекторного управления и стабилизации параметров полета БпЛА (автопилот). Первая подсистема предназначена для реализации программного управления БпЛА с помощью исполнительных механизмов двигателя и планера. Назначением второй подсистемы стабилизации, является выработка управляющих воздействий на эти механизмы, нивелирующие отклонения БпЛА от программной траектории и его угловые вращения, недопустимые с точки зрения устойчивости и управляемости [260]. Даже при отсутствии сигналов спутниковой навигационной системы ВСКЗ позволяет самостоятельно ориентироваться на местности. Сегмент ВСКЗ может быть также запрограммирован на управление бортовой аппаратурой БпЛА, благодаря чему обеспечивается: автоматический взлет и заход на посадку (выпуск парашюта), автоматический полет по заданному маршруту, поддержание заданной высоты и скорости полета, стабилизация углов ориентации [262] и другие функции.



Рисунок 4.6 – Схема взаимодействия сегмента ВСКЗ с системой автоматического управления полетом БпЛА

Для создания трехмерной модели местности с требуемым разрешением вдоль рельсовой колеи проводится плановая аэрофотосъемка на определенной высоте, учитывая технические характеристики используемой АФК [257]. По этим характеристикам рассчитывается необходимая высота и скорость полета ЛА. При проведении плановой аэрофотосъемки главная оптическая ось объектива расположена вертикально. В этом случае поле зрения объектива имеет форму правильной четырехугольной пирамиды с высотой h . Соответственно зона обзора, попадающая в поле зрения объектива, примет форму прямоугольника. Изображение в АФК формируется путем проецирования участка местности, попадающего в поле ее зрения на условную плоскость изображения АФК [261]. На рисунке 4.7 представлена схема определения координат точек на сканируемой поверхности местности вдоль участка ж/д пути.

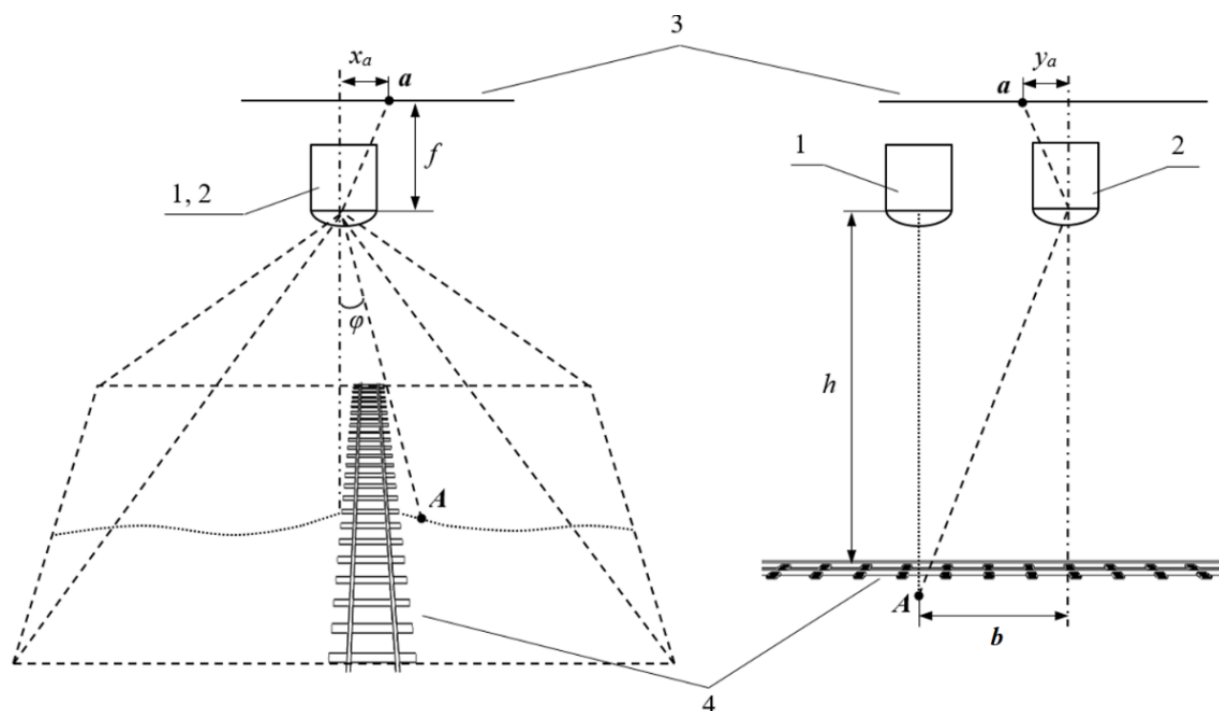


Рисунок 4.7 – Схема создания цифровой модели ж/д пути:
 1 – аэрофотокамера; 2 – лазерный сканер; 3 – плоскость изображения;
 4 – рельсовая колея

АФК и ВЛС крепятся к гиростабилизирующей установке на заданном расстоянии b , вдоль линии, определяющей направление полета ЛА. Для проведения плановой аэрофотосъемки АФК устанавливается на ЛА таким образом, чтобы ее главная оптическая ось приняла вертикальное положение [257]. С помощью навигационной аппаратуры определяются превышения, высоты и координаты точек фотографирования. Эти сведения используются для создания топографических карт и для решения инженерных задач, что значительно сокращает объем полевых геодезических работ [79]. Навигационное оборудование может состоять из различных технических средств (приемник сигналов ГНСС, система инерциальных датчиков, статоскоп, лазерный высотомер и др. устройства).

Приемник спутниковых сигналов используется для определения плановых геодезических координат центров проекций АФС вдоль всего маршрута полета. На сегодняшний день уровень разрешения наиболее распространенной навигационной системы GPS составляет около 3,6 м, а системы ГЛОНАСС – приблизительно 7 м [263]. Заявленная в технических характеристиках ГНСС-приемников высокая точность измерений в режиме «Кинематика в реальном

времени» является относительной и достигается только при условии получения дифференциальных поправок к спутниковым сигналам с референцной станции, координаты которой известны. Однако абсолютные координаты референцной станции уже содержат значительную погрешность.

Система инерциальных датчиков определяет углы ориентации БПЛА в пространстве во время полета. Погрешность определения углов ориентации при отсутствии намеренных маневров (прямолинейный полет) по курсу, крену и тангажу составляет $0,4^\circ$. Для устранения влияния существенных внешних возмущений (порыв ветра, восходящий поток воздуха или воздушная яма) на аэрофотокамеру (АФК), а также при маневрировании и разворотах БПЛА, применяется гиросtabilизирующая установка. Она производит автоматическое ориентирование АФК и обеспечивает получение фотоснимков с углом наклона менее $1'$ [261].

Для определения превышений точек фотографирования может использоваться статоскоп, представляющий собой дифференциальный жидкостной барометр, фиксирующий изменение давления воздуха, возникающее в связи с изменением высоты полета. Средние квадратические погрешности определения превышений статоскопом варьируют в пределах от 0,6 до 1,5 м [79].

Лазерный высотомер обладает узкой направленностью излучения и мощными импульсами. Существуют приборы, позволяющие определять высоту фотографирования с погрешностью менее 1 м на высоте полета до 3 км [79]. Также все большее распространение находят воздушные лазерные сканеры (ВЛС), которые отличаются высокой точностью (на высоте полета до 100 м) даже при неблагоприятных погодных условиях. При этом неоднозначность дальномерных измерений разрешается за счет использования многократных отражений от объектов и способности устройства проводить анализ формы сигнала в режиме реального времени. Сканирующий механизм лазерного сканера построен на быстро вращающемся многогранном зеркале, что позволяет формировать линейные, сонаправленные и параллельные траектории сканирующего луча, обеспечивая формирование облака точек постоянной плотности [264].

Для корректного прокладывания маршрута в соответствии с полетным заданием принимаются в расчет следующие параметры: требуемый масштаб ортофотоплана, технические характеристики АФК (разрешение матрицы, фокусное расстояние и угол зрения объектива), величина перекрытия АФС. По этим параметрам рассчитывается необходимая высота полета, скорость БПЛА и кадровая частота АФК. В память автопилота заносятся поворотные пункты маршрута полета. Каждая точка характеризуется координатами и скоростью полета. В полете ВСКЗ также обеспечивает выдачу в канал передачи телеметрической информации для слежения за полетом БПЛА с пункта управления. Маршруты аэрофотосъемки (рис. 4.8) прокладывают таким образом, чтобы снимки без разрывов покрывали всю картографируемую территорию. Это достигается путем обеспечения продольных и поперечных перекрытий фотоснимков, которые необходимы для воспроизведения по ним модели сфотографированной местности и решения с ее помощью различных фотограмметрических задач (определение координат точек местности, видимых размеров объектов и др.) [79].

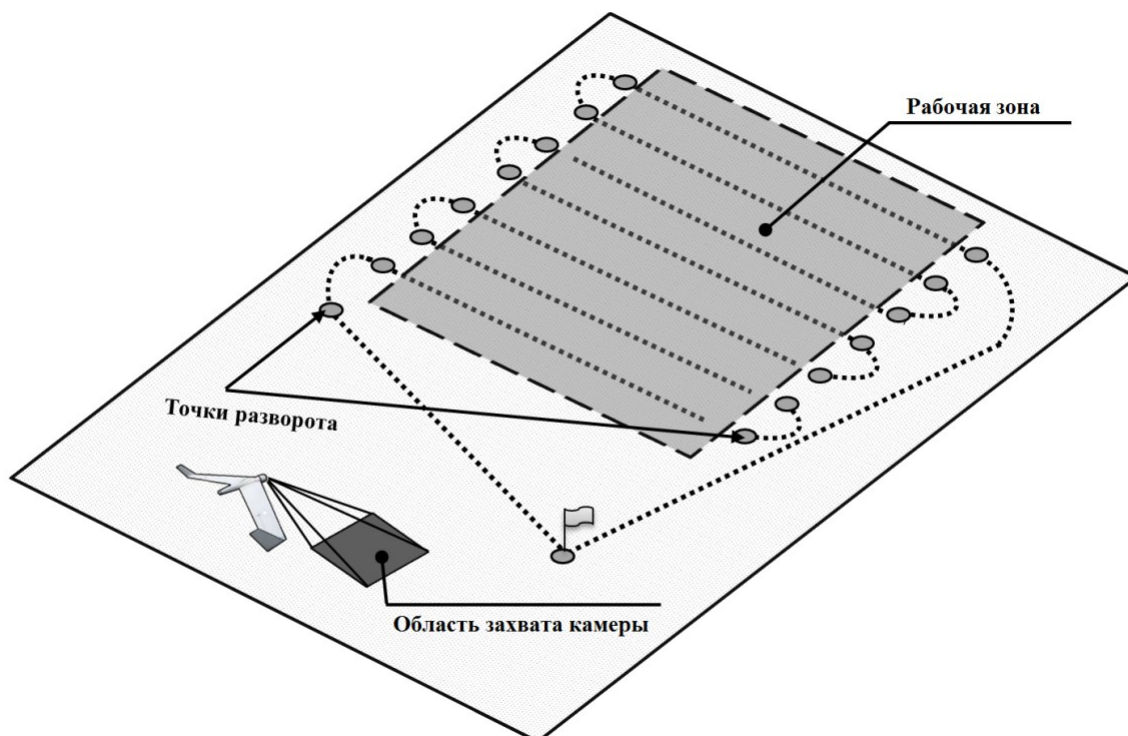


Рисунок 4.8 – Траектория движения ЛА при проведении площадной аэросъемки

Для создания ортофотоплана в требуемом масштабе аэрофотосъемку необходимо производить на определенной высоте учитывая технические

характеристики используемой АФК. В зависимости от своего назначения, аэрофотосъемка может быть маршрутной (например, вдоль проектируемого участка ж/д пути) или площадной. При проведении площадной съемки, для охвата всей площади рабочей зоны, маршрут полета над ней разбивается на параллельные прямолинейные участки, ограниченные точками разворота БПЛА. Расстояние между этими участками подбирается таким образом, чтобы АФС каждого последующего участка имели общую часть фотоизображения местности с АФС предыдущего участка маршрута.

В процессе проведения аэрофотосъемки соблюдают требуемое взаимное перекрытие снимков. Оно позволяет компенсировать возможное воздействие порывов ветра на ЛА и особенности рельефа местности, а также решить фотограмметрические задачи, связанные с выполнением взаимного ориентирования АФС и определением элементов их внешнего ориентирования [257]. Перекрытия снимков необходимы для формирования ортофотоплана местности без разрывов (рис. 4.9), что позволяет компенсировать не только воздействие порывов ветра и особенности рельефа местности, но также решать измерительные задачи с применением стереофотограмметрических методов. Несоблюдение значений перекрытий может привести к разрывам в формируемой трехмерной модели местности. [79]. Требования по перекрытию снимков составляют более 50% в продольном и 20-40% в поперечном направлениях. Продольное перекрытие обеспечивается подбором соответствующей скорости полета на заданной высоте и частоты фотографирования, а поперечное – расстоянием между прямолинейными участками маршрута в рабочей зоне [261].

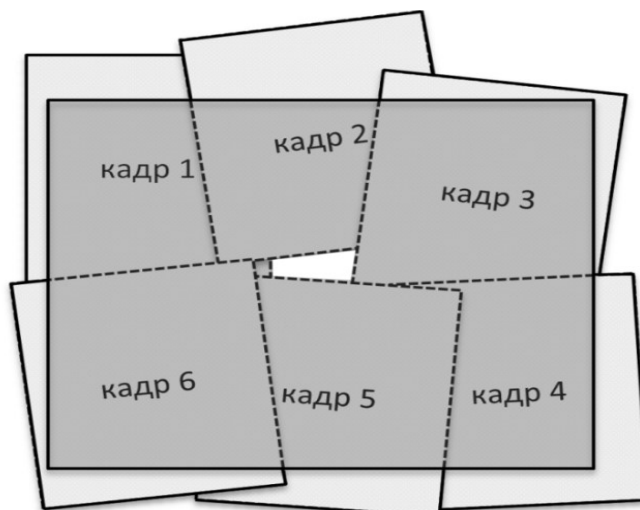


Рисунок 4.9 – Образование разрывов на ортофотоплане при отклонении ЛА от маршрута полета

Изображение в АФК формируется путем проецирования объектов, попадающих в поле ее зрения, на ПЗС-матрицу прямоугольной формы. Область захвата представляет собой касательную плоскость в точке пересечения оптической оси с поверхностью земли, которая ограничена полем зрения АФК. При проведении плановой аэрофотосъемки оптическая ось АФК расположена вертикально. В этом случае область обзора АФК имеет форму правильной четырехугольной пирамиды с высотой h . При этом область захвата, расположенная в основании пирамиды, будет иметь форму прямоугольника. Очевидно, что более целесообразно устанавливать АФК на ЛА таким образом, чтобы вектор его перемещения был параллелен короткой стороне области захвата. Это позволит захватить больше площади земной поверхности во время полета и уменьшит необходимое количество пролетов над рабочей зоной при проведении площадной съемки. На рисунке 4.10 показаны принципиальные схемы формирования изображения и стереопары при проведении аэрофотосъемки [261].

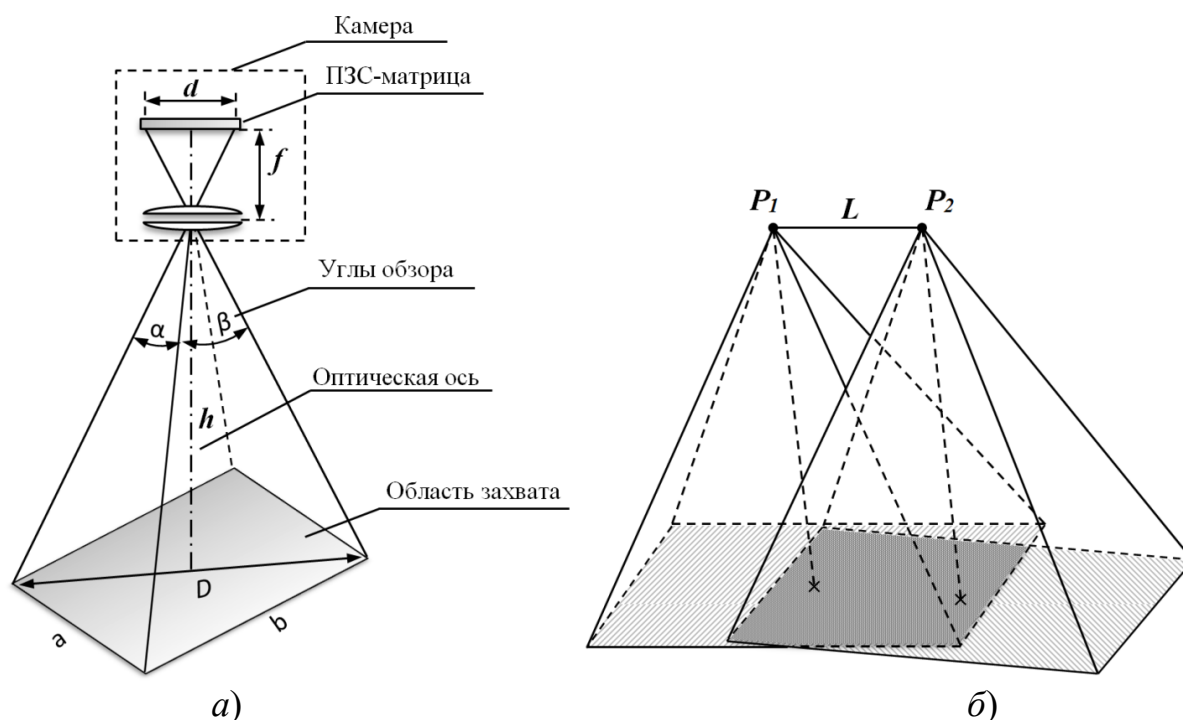


Рисунок 4.10 – Принципиальные схемы формирования: а) АФС; б) стереопара с соблюдением требуемого перекрытия АФС

Из рисунка 4.4 (а) видно, что чем выше находится АФК, тем больше площадь земной поверхности, которая попадает в область захвата АФК. Для определения абсолютных значений перекрытия стереопары (рис. 4.4, б), требуемого для построения ортофотоплана, необходимо предварительно рассчитать размеры области захвата, которая зависит от направления обзора АФК и углов ее поля зрения (α , β), а также высоты h , с которой производится съемка [261]. Если известны углы поля зрения объектива АФК, то площадь области захвата при проведении плановой аэрофотосъемки вычисляется из выражения:

$$S = 4h^2 \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\beta}{2}}, \quad (4.1)$$

Площадь области захвата также можно вычислить, зная технические характеристики используемой АФК (фокусное расстояние объектива f , разрешение и физический размер диагонали ПЗС-матрицы d):

$$S = \frac{h^2 d^2 k}{f^2 (k^2 + 1)}, \quad (4.2)$$

где k – коэффициент, определяемый отношением количества пикселей в строке к количеству пикселей в столбце ПЗС-матрицы.

Размеры области захвата (ширина a и длина b) определяются из выражений:

$$a = \sqrt{\frac{S}{k}} = \frac{hd}{f\sqrt{k^2+1}}, \quad (4.3)$$

$$b = ak = \frac{hdk}{f\sqrt{k^2+1}}. \quad (4.4)$$

Иногда в технических характеристиках АФК приводится физический размер пиксела ПЗС-матрицы px , что позволяет упростить формулы для расчета размеров области захвата:

$$a = hN_x px / f, \quad (4.5)$$

$$b = hN_y px / f, \quad (4.6)$$

где N_x , N_y – длина и ширина изображения в пикселах, соответственно.

Абсолютные размеры продольного Q_a и поперечного Q_b перекрытий должны ограничиваться следующими диапазонами значений:

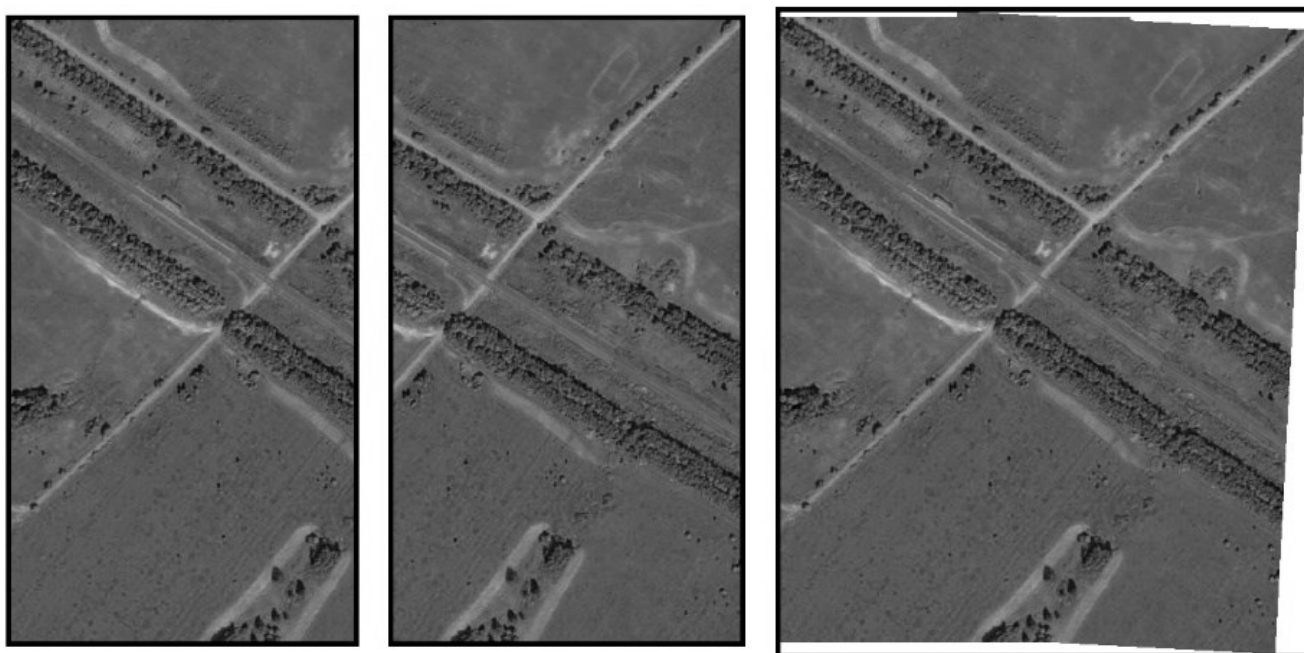
$$a > Q_a > 0,5a, \quad (4.7)$$

$$0,4b > Q_b > 0,2b. \quad (4.8)$$

Соответственно, расстояние между предыдущим и последующим прямолинейными участками маршрута (рис. 4, б) должно составлять $L = 0,7b$ при допустимом отклонении от маршрута на величину не более $0,05b$. Тогда допустимое отклонение от маршрута можно записать в следующем виде:

$$\Delta L \leq \frac{hN_y px}{20f}. \quad (4.9)$$

Сегмент ВСКЗ в составе бортового оборудования БПЛА позволяет в процессе проведения аэрофотосъемки объединять получаемые АФС и тем самым автоматически формировать ортофотоплан местности. Результат объединения двух АФС с применением ВСКЗ показан на рисунке 4.11.



а)

б)

в)

Рисунок 4.11 – Формирование ортофотоплана местности путем объединения АФС: а) предыдущий АФС; б) последующий АФС; в) объединение АФС

Из рисунка видно, что предыдущий и последующий АФС получены с продольным перекрытием менее 50 % и при этом наблюдается некоторое линейное и угловое отклонение БПЛА от маршрута полета. Хотя ВСКЗ способна объединять АФС даже при очень незначительных перекрытиях, тем не менее, несоблюдение требуемых значений перекрытий приведет к тому, что некоторые участки ортофотоплана будут недоступны для проведения по ним измерений с применением стереофотограмметрических методов [262].

Под воздействием внешних возмущений (порыв ветра, восходящий поток или воздушная яма) БПЛА может отклоняться от заданной траектории полета, изменяя свою высоту и положение в пространстве относительно осей вращения. САУ определяет значения этих отклонений, и стремится компенсировать их путем воздействия на рули планера или на тягу его двигателей. Гиростабилизирующая установка, к которой крепятся АФК и ВЛС, частично устраняет крен и тангаж, но не рыскание ЛА. При этом частота фотографирования АФК меньше частоты формирования линий развертки [257]. Соответственно за время получения двух снимков формируется некоторое множество линий развертки M (рис. 4.12).

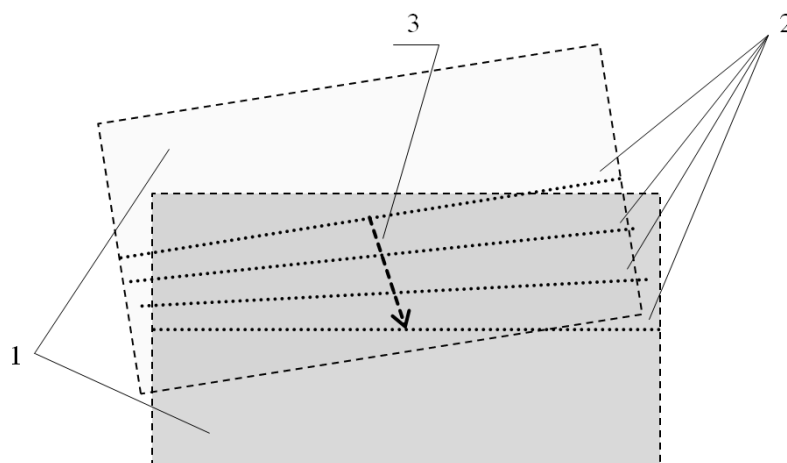


Рисунок 4.12 – Принципиальная схема сканирования местности:
1 – зона обзора; 2 – линия развертки ВЛС; 3 – вектор перемещения ЛА

Более точное определение координат точек в этих промежуточных линиях развертки может быть достигнуто применением метода наложения цифровых маркеров. [261]. Для этого на каждые два последовательно сделанных АФС накладывается специальная комбинация цифровых маркеров. Каждый маркер представляет собой небольшую область, размером 3 x 3 пиксела или более. С их помощью определяются вектор относительного перемещения ЛА $\vec{P}(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ и отклонение его от курса $\Delta\omega$ за время получения этих снимков. На рисунке 4.6 изображены две комбинации расположения таких маркеров: в форме окружности и прямоугольной матрицы. Первая комбинация, в форме окружности, состоит из маркеров, равноудаленных от центра изображения (x_0, y_0) на расстояние R и отстоящих друг от друга с заданным угловым шагом. На рисунке 4.13 (а) маркеры располагаются с угловым шагом в 10° [262].

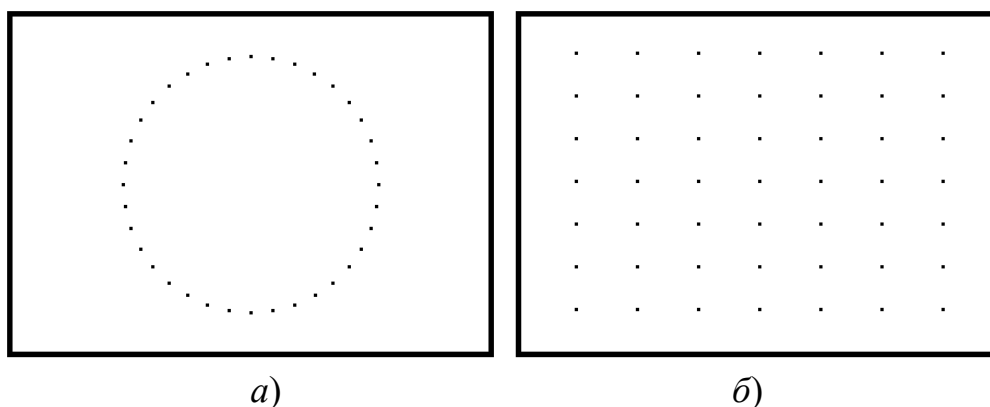


Рисунок 4.13 – Наложение на АФС комбинации маркеров: равноудаленные от центра АФС (а); равномерно распределенные по АФС (б)

Во второй комбинации маркеры равномерно распределены по изображению в форме прямоугольной матрицы, через одинаковые расстояния между элементами в строках и столбцах. Эту комбинацию предпочтительней использовать для объединения АФС с небольшим поперечным перекрытием (менее 50 %), поскольку в область перекрытия попадает больше маркеров, чем при их комбинации в форме окружности. На рисунке 4.6 (б) маркеры расположены в строках и столбцах с шагом $1/8$ от длины и ширины изображения, соответственно. Такого количества маркеров вполне достаточно для объединения снимков. В целях повышения достоверности результата, шаг размещения маркеров можно уменьшить, но это приведет к неизбежному повышению нагрузки на вычислительный процессор [262].

Объединение АФС осуществляется путем определения величины смещения и угла поворота последующего АФС относительно предыдущего. Для каждой области изображения, на которую попадает маркер, рассчитывается векторная функция, определяющая суммарные значения компонентов цвета по области. Следовательно, эти значения функции для множества пикселей, обозначенных на первом снимке через комбинацию маркеров, равноудаленных от центра снимка, можно задать выражением:

$$s_1(\alpha) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \vec{c} \left(\text{Целое}(|x_0 + i - R \cos \alpha|), \text{Целое}(|y_0 + j - R \sin \alpha|) \right), \quad (4.10)$$

где $\forall n \in \alpha \subset \mathbb{N}, \quad n < 360$;

Целое – функция, округляющая заключенное в ней выражение до целого значения.

На втором снимке маркерам задают некоторое смещение ($\Delta x, \Delta y$) и угол поворота $\Delta \alpha$ относительно центра изображения:

$$s_2(\alpha, \Delta x, \Delta y, \Delta \alpha) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 c(X, Y), \quad (4.11)$$

где

$$X = \text{Целое}(|x_0 + \Delta x + i - R \cos(\alpha + \Delta \alpha)|), \quad (4.12)$$

$$Y = \text{Целое}(|y_0 + \Delta y + j - R \sin(\alpha + \Delta \alpha)|). \quad (4.13)$$

Затем значения векторных функций представляются через строго упорядоченные множества S_1, S_2 в порядке возрастания аргумента функции α :

$$\forall \mathbf{s}_1(\alpha_i) \in S_1 : \alpha_i < \alpha_{i+1} | i \in \mathbb{N}, \quad (4.14)$$

$$\forall \mathbf{s}_2(\alpha_i, \Delta x, \Delta y, \Delta \alpha) \in S_2 : \alpha_i < \alpha_{i+1} | i \in \mathbb{N}. \quad (4.15)$$

В зависимости от величины смещения маркеров и угла поворота изображения, определяются значения функции, выраженные через сумму квадратов расхождений в значениях элементов строго упорядоченных множеств S_1 и S_2 :

$$\delta(\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha) = \sum_{i=0}^{359} [\mathbf{s}_1(\alpha_i) - \mathbf{s}_2(\alpha_i, \Delta x, \Delta y, \Delta \alpha)]^2. \quad (4.16)$$

Величина смещения и угол поворота изображений относительно друг друга определяются значениями аргументов функции, при которых она принимает минимальное значение $\min(\delta)$ и в том случае если это значение будет меньше установленного порогового коэффициента.

Для комбинации маркеров, равномерно распределенных по снимку в форме прямоугольной матрицы, задаются шаги кратные длине и ширине изображения:

$$dx = \frac{N_x}{k}, \quad (4.17)$$

$$dy = \frac{N_y}{k}, \quad (4.18)$$

где $k \in \mathbb{N}$ – кратность размеру снимка.

Таким образом, в каждой строке и столбце прямоугольной матрицы будет содержаться $k-1$ маркеров. Тогда векторную функцию суммарных значений компонентов цвета по области для множества пикселей, обозначенных маркерами на первом АФС, можно задать выражением:

$$\mathbf{s}_1(k_x, k_y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \mathbf{c}(k_x dx + i, k_y dy + j), \quad (4.19)$$

где $k_x, k_y \subset k$ – позиция маркера в строке и столбце прямоугольной матрицы, соответственно.

На втором АФС также задают смещение $(\Delta x, \Delta y)$ и с учетом их определяют расстояния по осям X и Y от каждого из маркеров до центра снимка:

$$L(k_x) = k_x dx - x_0 + \Delta x, \quad (4.20)$$

$$L(k_y) = k_y dy - y_0 + \Delta y. \quad (4.21)$$

Задав угол поворота $\Delta\alpha$ относительно центра, на втором АФС определяют суммарные значения множества пикселей, также обозначенных маркерами:

$$s_2(k_x, k_y, \Delta x, \Delta y, \Delta\alpha) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 c(X, Y), \quad (4.22)$$

где

$$X = \text{Целое} \left(x_0 + \sqrt{L^2(k_x) + L^2(k_y)} \cos \left(\arctg \left(\frac{L(k_y)}{L(k_x)} \right) + \Delta\alpha \right) \right), \quad (4.23)$$

$$Y = \text{Целое} \left(y_0 + \sqrt{L^2(k_x) + L^2(k_y)} \sin \left(\arctg \left(\frac{L(k_y)}{L(k_x)} \right) + \Delta\alpha \right) \right). \quad (4.24)$$

Значения векторных функций на двух АФС представляются через строго упорядоченные множества S_1, S_2 в порядке возрастания аргумента функции α . После чего по ним определяются значения функции, выраженные суммой квадратов расхождений в значениях элементов строго упорядоченных множеств S_1 и S_2 . Соответственно минимальное значение этой функции будет определять сдвиг и поворот одного АФС относительно другого [261]. Благодаря этому повышается точность определения отклонений от маршрута полета БПЛА и обеспечивается автоматическое формирование фотосхемы в режиме реального времени, что дает возможность проводить аэрофотосъемочные работы на низких высотах и создавать фотосхемы в крупных масштабах с соблюдением требуемых перекрытий снимков [262].

В процессе проведения аэрофотосъемки БПЛА отклоняется от заданной траектории полета. На рисунке 4.14 (а) изображены три последовательно

сформированных линий развертки ВЛС. Чтобы в формируемой трехмерной модели местности не возникало разрывов необходимо выполнить интерполяцию по области сканирования.

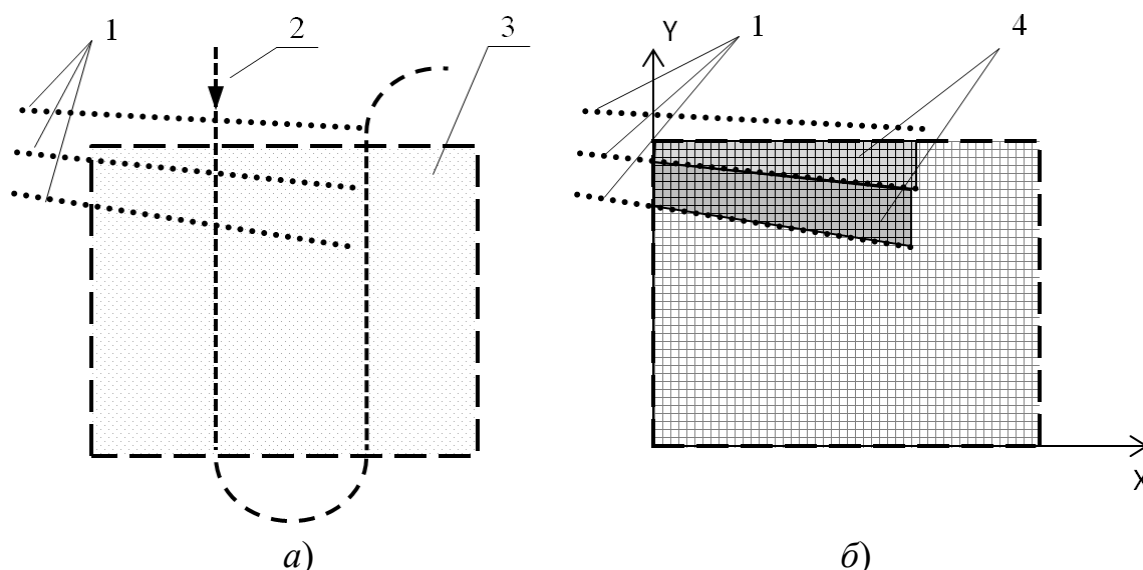


Рисунок 4.14 – Траектория лазерного сканирования местности при площадной аэрофотосъемке (*а* – вид сверху; *б* – на координатной сетке):

1 – линия развертки ВЛС; 2 – заданная траектория полета БПЛА; 3 – съемочный участок; 4 – область интерполяции

Линии развертки ВЛС помещаются в прямоугольную систему координат съемочного участка. После этого на них накладывается координатная сетка (рис. 4.14, *б*). Размер ячеек сетки задается исходя из требуемого разрешения формируемой модели. В результате пересечения линий развертки ВЛС с вертикальными прямыми, проходящими через крайние точки в этих линиях, образуются замкнутые области, ограниченные съемочным участком. Полученные области выделены на рисунке темным цветом. Выполняя интерпелляцию по этим областям, образуется облако точек, представляющее собой карту высот для формируемой модели [257]. На облако точек, накладываются снимки, полученные в процессе проведения аэрофотосъемки. Таким образом формируется трехмерная модель местности (рис. 4.15).

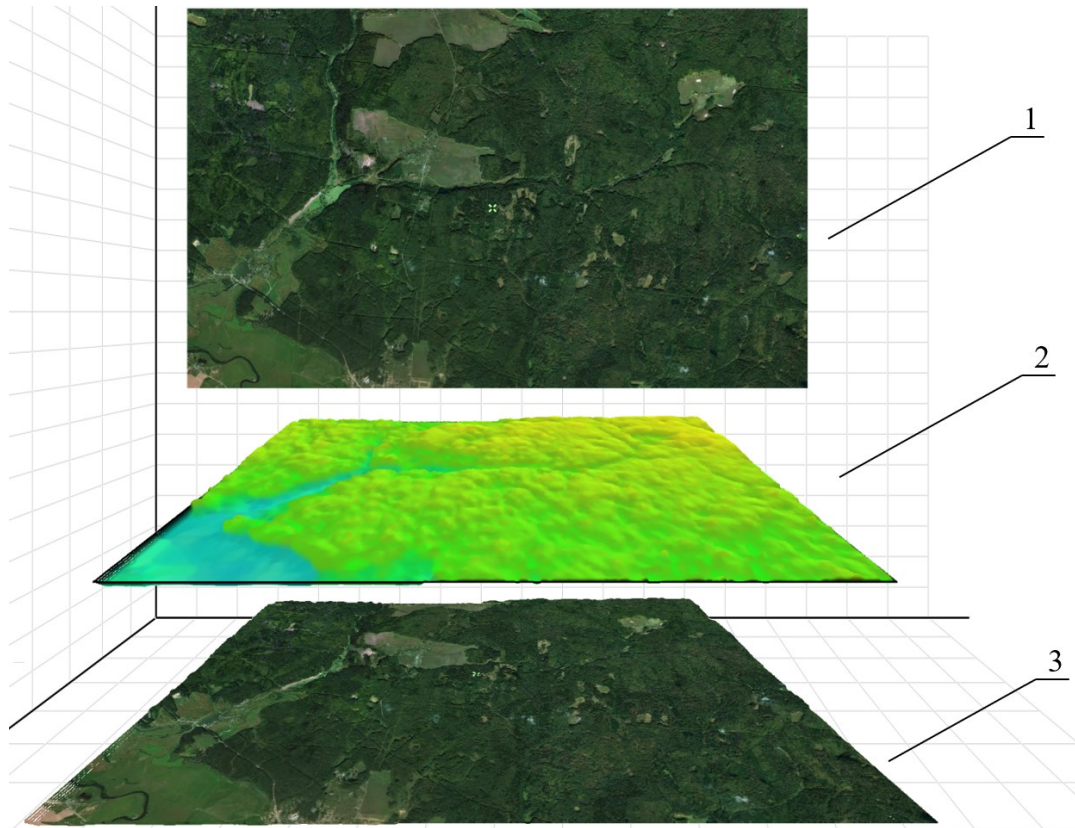


Рисунок 4.15 – Формирование трехмерной модели местности:
1 – аэрофотоснимок; 2 – облако точек рельефа местности; 3 – 3D- модель

Цвет каждой точки модели будет определяться цветом соответствующего ей пиксела на АФС. Однако вследствие рельефа фотографируемой местности на АФС возникают линейные смещения. С учетом этих смещений, положение пиксела на снимке для некоторой произвольной точки A модели определяется следующими выражениями:

$$x_A = X_A f / Z_A, \quad (4.25)$$

$$y_A = Y_A f / Z_A. \quad (4.26)$$

Для повышения курсовой устойчивости БПЛА в условиях неуверенного приема радионавигационных сигналов в качестве внешнего ориентира используется рельсовая колея. На изображении АФС выделяется множество пикселов, принадлежащих рельсовым нитям, цветовые компоненты $[H_R, H_G, H_B]$, которых ограничены минимальными и максимальными значениями в занимаемой части пространства RGB [199]. Учитывая однородность цвета рельсовых нитей, в качестве средних значений компонентов цвета принимаются медианы в

варьируемом диапазоне значений. Поскольку в формировании цвета участвуют три компонента цвета (C_R, C_G, C_B) , вводится функция, определяющая дисперсию компонентов цвета пикселей на изображении относительно средних значений компонентов цвета рельсовых нитей:

$$f(x, y) = \sqrt{\frac{(\bar{H}_R - C_R(x, y))^2 + (\bar{H}_G - C_G(x, y))^2 + (\bar{H}_B - C_B(x, y))^2}{3}}, \quad (4.27)$$

Установив для функции некоторое пороговое значение k , характеризующее допустимое отклонение значений компонентов цвета рельсовых нитей от среднего, можно обнаружить их на изображении, применив следующее условие:

$$c(x, y) \in H : f(x, y) \leq k \mid k \in \mathbb{R}. \quad (4.28)$$

Минимальные значения, которые принимает функция $f(x, y)$ в каждой строке на изображении, указывают на наличие рельсовых нитей. Аппроксимируя множество пикселей H , определяется расстояние q между рельсовыми нитями на изображении [265]. Тогда пересечение оси абсцисс в системе координат изображения с рельсовыми нитями произойдет в некоторых точках x_1, x_2 на этой оси, где $x_1 < x_2$. Затем вычисляется коэффициент масштабирования изображений местности на АФС для приведения их к единому масштабу.

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. Угловое положение ВЛС задается так, чтобы его центральный лазерный луч был направлен параллельно главной оптической оси АФК, а линия развертки ВЛС была перпендикулярна направлению полета ЛА [257]. Тогда угол наклона i -го лазерного луча, фиксирующего некоторую точку на местности, можно найти из выражения:

$$\varphi_i = \left| \frac{n - 2i + 1}{2} \right| d\varphi. \quad (4.29)$$

Откуда, можно определить индексы i_1, i_2 для лазерных лучей фиксирующих точки на двух рельсовых нитях из выражений:

$$i_1 = \left[\frac{n+1}{2} - \frac{\arctg(x_1 / \varphi)}{d\varphi} \right], \quad (4.30)$$

$$i_2 = \left[\frac{n+1}{2} - \frac{\arctg(x_2 / \varphi)}{d\varphi} \right]. \quad (4.31)$$

После этого вычисляется высота ЛА над рельсовой колеей и коэффициент масштабирования изображений местности на АФС из выражения:

$$m = \frac{h_u}{h} = \frac{\sum_{i=i_1}^{i_2} (l_i \cos \varphi_i)}{h(i_2 - i_1 + 1)}, \quad (4.32)$$

где h_u – измеренная высота аэрофотосъемки над рельсовой колеей;

h – требуемая высота аэрофотосъемки;

l_i – расстояние до рельсовой колеи, измеренное ВЛС.

Далее изображения на АФС масштабируется по методу билинейной интерполяции. Все АФС разбиваются на стереопары, которые затем взаимно ориентируются [227]. После чего на изображения накладывается комбинация маркеров, равномерно распределенных по снимку в форме прямоугольной матрицы с шагом k , кратным длине и ширине изображения. Задается векторная функция суммарных значений компонентов цвета по области, ограничивающей множество пикселей, обозначенных маркерами на первом изображении:

$$s_1(k_x, k_y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 c(k_x dx + i, k_y dy + j), \quad (4.33)$$

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

Для каждой области изображения, на которую попадает маркер, рассчитываются суммарные значения компонентов цвета по области. На втором изображении задается смещение $(\Delta x, \Delta y)$ и определяется расстояние по осям X и Y от каждого из маркеров до центра изображения:

$$L(k_x, \Delta x) = k_x dx - x_0 + \Delta x, \quad (4.34)$$

$$L(k_y, \Delta y) = k_y dy - y_0 + \Delta y. \quad (4.35)$$

Задав угол поворота $\Delta\psi$ первого изображения относительно второго, на втором изображении определяются суммарные значения множества пикселей по областям, обозначенных маркерами:

$$s_2(k_x, k_y, \Delta x, \Delta y, \Delta\psi) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 c(X, Y), \quad (4.36)$$

где X, Y вычисляются из выражений:

$$X = \text{Целое} \left(x_0 + \sqrt{L^2(k_x, \Delta x) + L^2(k_y, \Delta y)} \cos \left(\arctg \left(\frac{L(k_y, \Delta y)}{L(k_x, \Delta x)} \right) + \Delta\psi \right) \right), \quad (4.37)$$

$$Y = \text{Целое} \left(y_0 + \sqrt{L^2(k_x, \Delta x) + L^2(k_y, \Delta y)} \sin \left(\arctg \left(\frac{L(k_y, \Delta y)}{L(k_x, \Delta x)} \right) + \Delta\psi \right) \right). \quad (4.38)$$

В зависимости от величины смещения маркеров и угла поворота одного изображения относительно другого, определяются значения целевой функции, выраженные через сумму квадратов расхождений в значениях векторных функций:

$$\delta(\Delta x, \Delta y, \Delta\psi) = \sum_{k_y=1}^{k-1} \sum_{k_x=1}^{k-1} [s_1(k_x, k_y) - s_2(k_x, k_y, \Delta x, \Delta y, \Delta\psi)]^2 \rightarrow \min. \quad (4.39)$$

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

$$\Delta X = h \Delta x / f, \quad (4.40)$$

$$\Delta Y = h \Delta y / f, \quad (4.41)$$

$$\Delta Z = \frac{fQ(q_2 - q_1)}{q_1 q_2 p_x}. \quad (4.42)$$

где h – требуемая высота аэрофотосъемки;

Q – нормированное расстояние между рельсовыми нитями;

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

По сумме этих перемещений определяют координаты точки съемки в трехмерной декартовой системе координат модели местности. За начало координат принимаются координаты первой точки съемки на заданной высоте h . Координаты последующих точек съемки $(Px_\varepsilon, Py_\varepsilon, Pz_\varepsilon)$, полученных в последовательности $\{1, \dots, \varepsilon, \dots\}$, вычисляются из выражений:

$$Px_\varepsilon = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta Y_i, \quad (4.43)$$

$$Py_\varepsilon = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta Y_i, \quad (4.44)$$

$$Pz_\varepsilon = \frac{Qf}{q_\varepsilon px}. \quad (4.45)$$

Угол поворота j -го АФС в системе координат модели местности определяется из выражения:

$$\Psi_\varepsilon = \sum_{i=1}^{\varepsilon} \Delta \Psi_i. \quad (4.46)$$

Затем определяются координаты точек на местности в прямоугольной трехмерной системе координат, создаваемой модели. Так, положение некоторой точки A на местности в системе координат АФК определяются выражениями:

$$X_A = l_A m \sin \varphi_i, \quad (4.47)$$

$$Y_A = b, \quad (4.48)$$

$$Z_A = l_A m \cos \varphi_i. \quad (4.49)$$

где l_a – расстояние до точки A , измеренное ВЛС.

Для преобразования координат точки A , зафиксированной из точки съемки $(Px_\varepsilon, Py_\varepsilon)$, в систему координат трехмерной модели местности используются следующие выражения:

$$X'_A = Px_\varepsilon + X_A \cos \psi_\varepsilon - Y_A \sin \psi_\varepsilon, \quad (4.50)$$

$$Y'_A = Py_\varepsilon + Y_A \cos \psi_\varepsilon + X_A \sin \psi_\varepsilon, \quad (4.51)$$

$$Z'_A = h - Z_A. \quad (4.52)$$

При построении модели местности необходимо учитывать, что в процессе проведения аэрофотосъемки БПЛА отклоняется от заданной траектории полета. Также необходимо учитывать, что ВЛС выполняет сканирование местности с некоторой задержкой, характеризующейся частотой формирования линий развертки. Если частота фотографирования АФК меньше частоты формирования линий развертки, то за время получения двух снимков формируется некоторое множество линий развертки. Чтобы в формируемой трехмерной модели местности не возникало разрывов выполняется интерполяция по области сканирования [266].

Для этого кадровая частота АФК подбирается так, чтобы отношение частоты сканирования ν_c к частоте фотографирования ν_ϕ выражалось натуральным числом. При этом момент фотографирования должен быть синхронизирован по времени с формированием линии развертки [257]. Коэффициент для расчета положения БПЛА в момент формирования линии развертки $j \in \{1, \dots, j, \dots\}$ относительно его положения в момент времени фотографирования t_ε определяется выражением:

$$k_j = j\nu_\phi / \nu_c. \quad (4.53)$$

Тогда выражения для определения координат точек в промежуточных линиях развертки, сформированных ВЛС за интервал времени между моментами фотографирования $(t_\varepsilon, t_{\varepsilon+1})$, примут следующий вид:

$$X'_i = Px_\varepsilon + k_j \Delta X + X_i \cos(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi) - Y_i \sin(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi), \quad (4.54)$$

$$Y'_i = Py_\varepsilon + k_j \Delta Y + Y_i \cos(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi) + X_i \sin(\psi_\varepsilon + k_j \Delta \psi), \quad (4.55)$$

$$Z'_i = h + k_j \Delta Z - Z_i. \quad (4.56)$$

Линии развертки ВЛС помещаются в декартовую систему координат съемочного участка. После этого на них накладывается координатная сетка. Размер ячеек сетки задается исходя из требуемого разрешения формируемой модели. Выполняя интерпелляцию по области ячеек сетки, образуется облако точек [257]. На него накладываются АФС, полученные в процессе проведения аэрофотосъемки и тем самым формируется трехмерная модель ж/д пути (рис. 4.16).

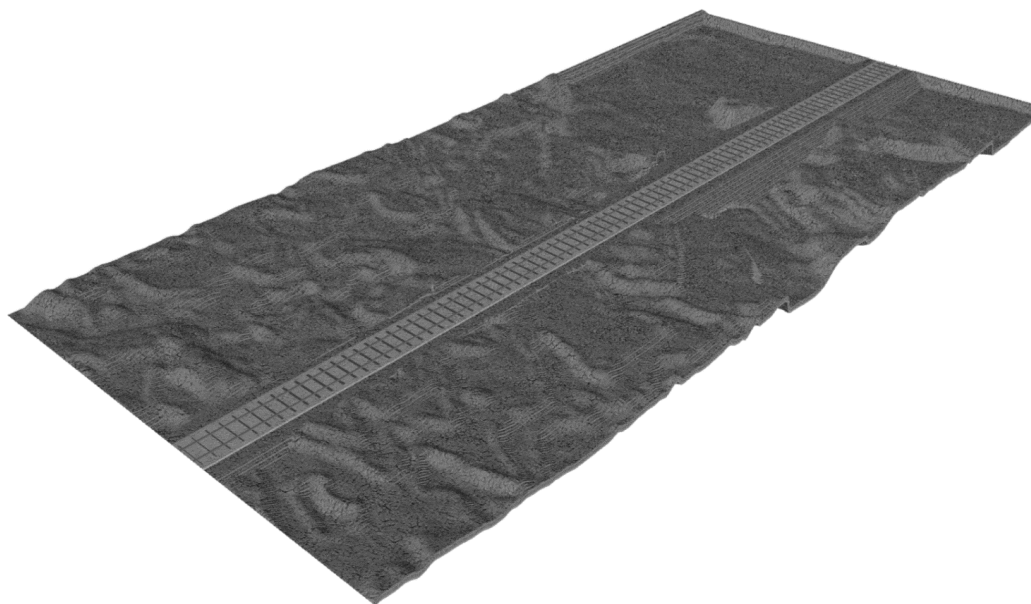


Рисунок 4.16 – Трехмерная модель участка ж/д пути

Таким образом, применение сегмента ВСКЗ в процессе формирования трехмерных моделей местности способствует повышению точности координатных измерений точек на сканируемой поверхности. Кроме этого, ВСКЗ позволяет более точно объединять последовательно сделанные снимки за счет приведения их к единому масштабу и формировать по ним трехмерную модель участка ж/д пути без значительных искажений.

4.2 Проектирование железнодорожных путей

Основным направлением повышения эффективности автоматизированного проектирования (в частности, проектирования ж/д путей) является разработка научной методологии для внедрения новых технологий в проектирование. Одним из таких направлений является расширение возможностей САПР с помощью трехмерных моделей местности, необходимых для оценки объемов грунта для сооружения или ремонта земляного полотна участка ж/д пути [251].

Строительство и реконструкция участков железных дорог предусматривает проведение инженерно-геодезических изысканий, обеспечивающих получение топографо-геодезических материалов и данных о ситуации и рельефе местности, существующих зданиях и сооружениях, других элементах планировки (в цифровой, графической, фотографической и иных формах), необходимых для

комплексной оценки природных и техногенных условий территории (акватории) строительства. В свою очередь топографо-геодезические материалы получают путем проведения топографической съемки, которая выполняется с целью создания топографических карт (планов, схем) при помощи различного сочетания наземных и высотных методов (аэрофототопографический, стереофотограмметрический и др.) [79]. Аэрофототопографическая съемка (аэрофотосъемка) производится путем фотографирования земной поверхности с пилотируемого ЛА или БпЛА [267].

Процесс автоматизации проектирования ж/д путей с применением разработанной ВСКЗ направлен на описание структуры путевого развития с учетом топографических, климатических, экологических условий местности, в которых планируется осуществлять строительство, а также экономических факторов, обуславливающих минимизацию расходов на проведение строительных работ. Качество выполнения проектных работ во многом обуславливает эффективность строительства или восстановления поврежденного участка ж/д пути в целом. Применение ВСКЗ позволяет модернизировать процесс проектирования и производить многовариантные расчеты, реализуя диалоговую схему взаимодействия программного обеспечения и опыта пользователя, что обеспечивает значительное повышение эффективности работ при осуществлении проектных решений [251].

До недавнего времени в качестве исходной информацией о рельефе местности использовались планы местности с нанесенными на них горизонталями. По ним составлялась вертикальная планировка земляного полотна. С появлением технологий построения трехмерных моделей местности стало возможным применение трехмерных систем автоматизированного проектирования (САПР) для проектирования земляных работ. Эти системы позволяют не только упростить понимание проекта всеми заинтересованными сторонами, но также существенно снижают риск допущения ошибок на этапе проектирования. Исходными данными для них служат трехмерные модели местности, которые получают в процессе

аэрофотосъемки с применением технологии лазерного сканирования местности [251].

Земляное полотно является основанием для верхнего строения ж/д путей. При строительстве новых путей около 90% всего объема земляных работ приходится непосредственно на земляное полотно, а его стоимость в зависимости от конкретных условий может составить более 20% общей стоимости строительства [268]. Экономическая эффективность производства земляных работ в ж/д строительстве, как известно, во многом определяется проектным решением по распределению земляных масс вдоль трассы строящегося участка, а также средствами механизации и технологией производства работ. Комплекс работ по сооружению ж/д земляного полотна включает: строительство насыпей и выемок на перегонах, станциях и разъездах; строительство водоотводных устройств, защитных и укрепительных сооружений; возведение специальных насыпей под переезды и земляные площадки крупных ж/д станций и узлов [251].

В проекте любого строительного процесса должны учитываться все особенности объекта строительства и условия его возведения, поэтому проектирование земляных работ невозможно без исходной информации о рельефе местности. В качестве таковой может использоваться картографическая информация, координаты точек местности, полученные с помощью геодезических приборов, а также трехмерные модели местности, получаемые в процессе проведения аэрофотосъемки с применением технологии лазерного сканирования местности [261] [266].

Наиболее широкие возможности по визуализации и анализу трехмерных цифровых моделей поверхности местности представлены в программе Autodesk Land Desktop. В ее состав входит программное обеспечение Autodesk Map, позволяющее создавать площадные объекты (участки землепользователей) и трехмерные модели рельефа местности [269]. САПР, учитывающей специфику задач в области проектирования железных дорог и их инфраструктуры, является MXRoad с программным модулем MXRail. Данная САПР позволяет производить подсчет объемов земляных работ при проектировании земляного полотна железной

дороги. Еще одна система проектирования железных дорог IndorCAD (подобно семейству программ MX) является ядром для целой линейки САПР объектов транспортного, промышленного и гражданского строительства. Она также имеет в своем составе программный модуль Rail («Железные дороги») для проектирования земляного полотна железных дорог. В основу идеологии этой САПР положены в первую очередь расчетные схемы для реконструкции дорог [270]. Новое строительство здесь понимается как частный случай реконструкции, т.е. в отсутствии фактора учета элементов существующей дороги [251].

Несмотря на наличие достаточно большого числа САПР в области проектирования железных дорог, применяемые в них методы расчета объемов земляных работ, не учитывают особенности изменения параметров железной дороги, особенно на кривых в плане и профиле. Существенным недостатком известных методов оценки объемов земляных работ является то, что они не принимают в расчет влияние сложных геометрических форм конструкции земляного полотна железных дорог [271]. Когда объекты имеют сложную или неправильную геометрическую форму, то их моделирование эффективнее выполнять с использованием трехмерных полилиний и чертежей профилей. Это позволяет с высокой точностью передать форму моделируемого объекта и значительно сократить время на обработку результатов измерений [272]. Поскольку методы расчета объемов земляных работ по трехмерным моделям местности достаточно трудоемки, то для их реализации требуется разработка соответствующего математического и программного обеспечения [251].

В связи с этим был разработан метод высокоточной оценки объемов грунта для производства земляных работ на участке строительства (восстановления) ж/д пути [251]. Объемы грунта вычисляются посредством обработки данных лазерного сканирования железных дорог. Полученное облако точек сканируемой поверхности ж/д пути и прилегающей территории аппроксимируется по трем смежным точкам полиномом второй степени с образованием сетки (рис. 4.17). Данная сетка образует полигональную модель поверхности ж/д пути, которая проецируется на проектную поверхность земляного полотна, задаваемую

функцией высот $B(x, y)$ в двумерной системе координат XY . Определяются координаты точек пересечений линий сетки с проектными линиями. Затем методом интерполяции определяются промежуточные значения высот по области ячеек сетки в проектных точках модели. Интерполяция точек позволяет предотвратить потерю качества трехмерного изображения, вызванного низким разрешением лазерного сканера. После этого определяются разности высот между проектными значениями и интерполированными значениями полигональной модели поверхности ж/д пути.

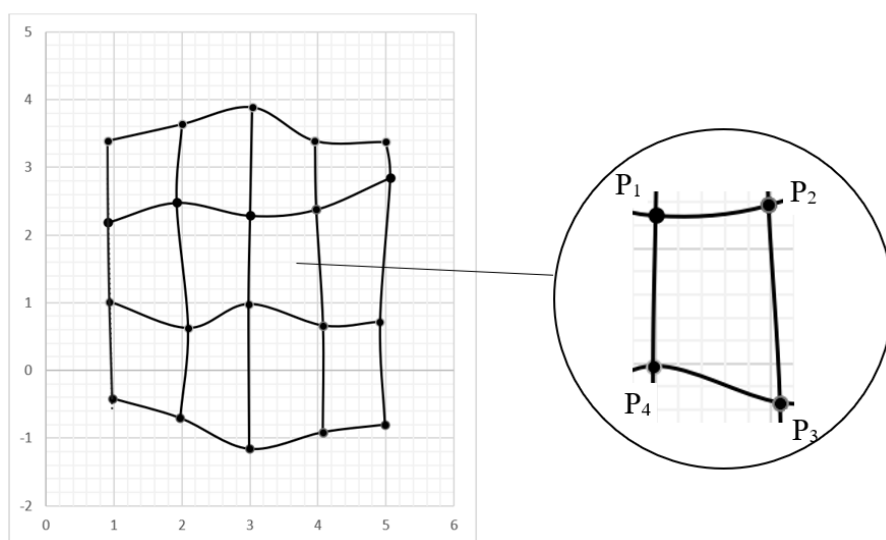


Рисунок 4.17 – Образование полигональной модели ж/д пути из облака точек с помощью полинома второй степени

Площадь столбцов определяется по методу Симпсона, посредством интерполяции многочленом Лагранжа второй степени и вычисления интегралов от интерполирующих функций:

$$s = \int_{-h}^h f(x) dx \quad (4.57)$$

где $h = (x_n - x_0)/n$.

Численное интегрирование функции выполняется путем определения суммы площадей трапеций в сечении модели j :

$$s_j = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + f_2 + f_2 + 4f_3 + f_4 + \dots + f_{n-5} + 4f_{n-4} + f_{n-3} + f_{n-3} + 4f_{n-2} + f_{n-1}) \quad (4.58)$$

Составная квадратурная формула Симпсона записывается в виде:

$$\int_{-h}^h f(x)dx \approx \frac{h}{3} \left(f_0 + f_{2n} + 4 \sum_{i=1}^n f_{2i-1} + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f_{2i} \right), \quad (4.59)$$

где $f_j = f(x_j)$, $x_j = a + jh$, $j = 0, 1, \dots, 2n$

Значение интеграла приближенно заменяется величиной площади криволинейной трапеции (рис. 4.18), ограниченной функцией $f(x)$, проходящей через точки $(-h, f_{i-1})$, $(0, f_0)$, (h, f_{i+1}) :

$$s = \int_{-h}^h (ax^2 + bx + c)dx = \frac{8a}{3}h^3 + 2bh^2 + 2ch \quad (4.60)$$

Коэффициенты a , b и c находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} c = f_{i-1} \\ ah^2 + 2bh + c = f_i \\ 4ah^2 + 2bh + c = f_{i+1} \end{cases} \quad (4.61)$$

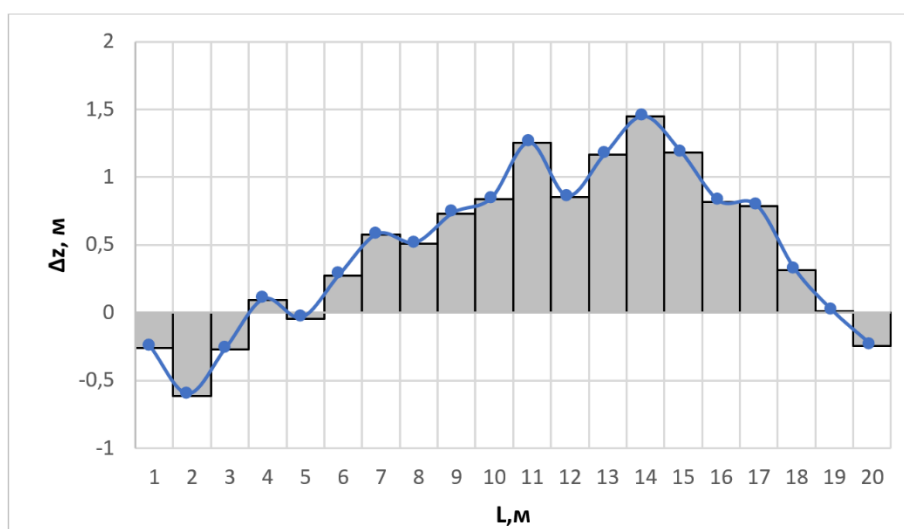


Рисунок 4.18 – Интерполяция результатов измерений многочленом Лагранжа второй степени по методу Симпсона

Анализ формы рельефа местности на основе 3D-моделей производится для последующего расчета объема выемок и насыпей, необходимых для сооружения в процессе строительства (восстановления) земляного полотна дороги. Объем грунта вычисляется по двум ограничивающим поверхностям, образованным рельефом местности и проектируемой поверхностью земляного полотна. Эти поверхности формируют планировочную пару. Задав границы проектируемого участка ж/д пути, по планировочной паре рассчитывается объем земляных работ и сроки их производства. При этом учитывается влияние климатических факторов, категория

и состава разрабатываемого грунта, а также особенности рельефа местности. Планировка земляного полотна ж/д пути может выполняться с нулевым балансом земляных масс под заданным уклоном с привязкой к существующему рельефу местности, а также по заданному уровню [251].

3-D модель земляного полотна (рис. 4.19) описывается функцией $f(x, y)$, проектная поверхность ж/д пути задается функцией $g(x, y)$, тогда объем грунта, который необходимо извлечь (засыпать) для приведения формы земляного полотна к проектным значениям можно выразить через объем вертикального призматического тела с вершинами в точках $\{A_{1-9}, B_{1-9}\}$, построенного на основании проекции произвольной ячейки D_k , обозначенной точками $\{C_{1-9}\}$. Объем грунта при производстве земляных работ на участке ж/д пути вычисляется из следующего выражения:

$$V = \sum_{k=0}^n \left| \iint_{D_k} f(x, y) d\sigma - \iint_{D_k} g(x, y) d\sigma \right|, \quad (4.62)$$

где $d\sigma$ – элемент площади в прямоугольных координатах.

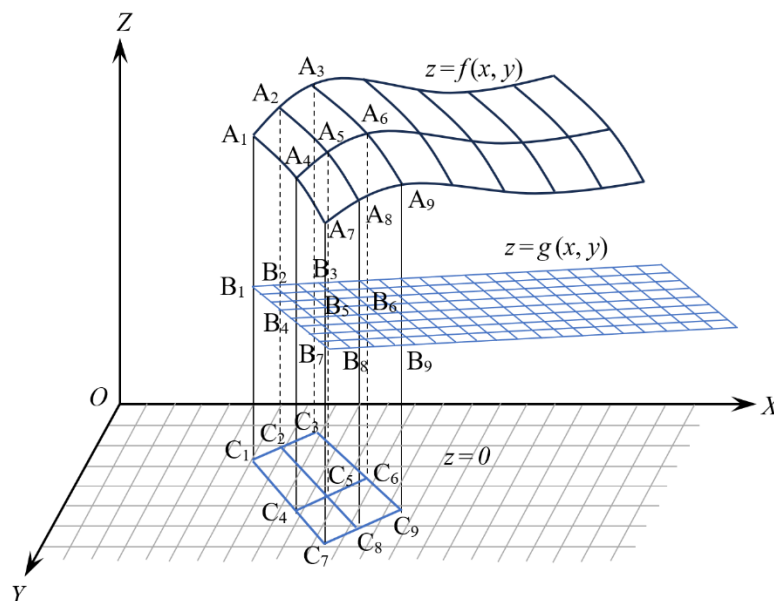


Рисунок 4.19 – Функции рельефа поверхности $f(x, y)$ и проектной формы земляного полотна $g(x, y)$

В целях реализации описанного метода была разработана специальная программа [273] для проектирования железных дорог, позволяющая вычислять объем грунта в процессе производства земляных работ с помощью трехмерных

моделей местности (рис. 4.20). Программа предоставляет три метода расчета объемов: расчет по прямоугольной сетке, расчет по сечениям и композиционный метод. Результаты расчетов могут быть представлены в виде ведомостей, планов земляных масс с рабочими отметками в узлах сетки и линией нулевых работ, а также набора поперечных сечений [251].

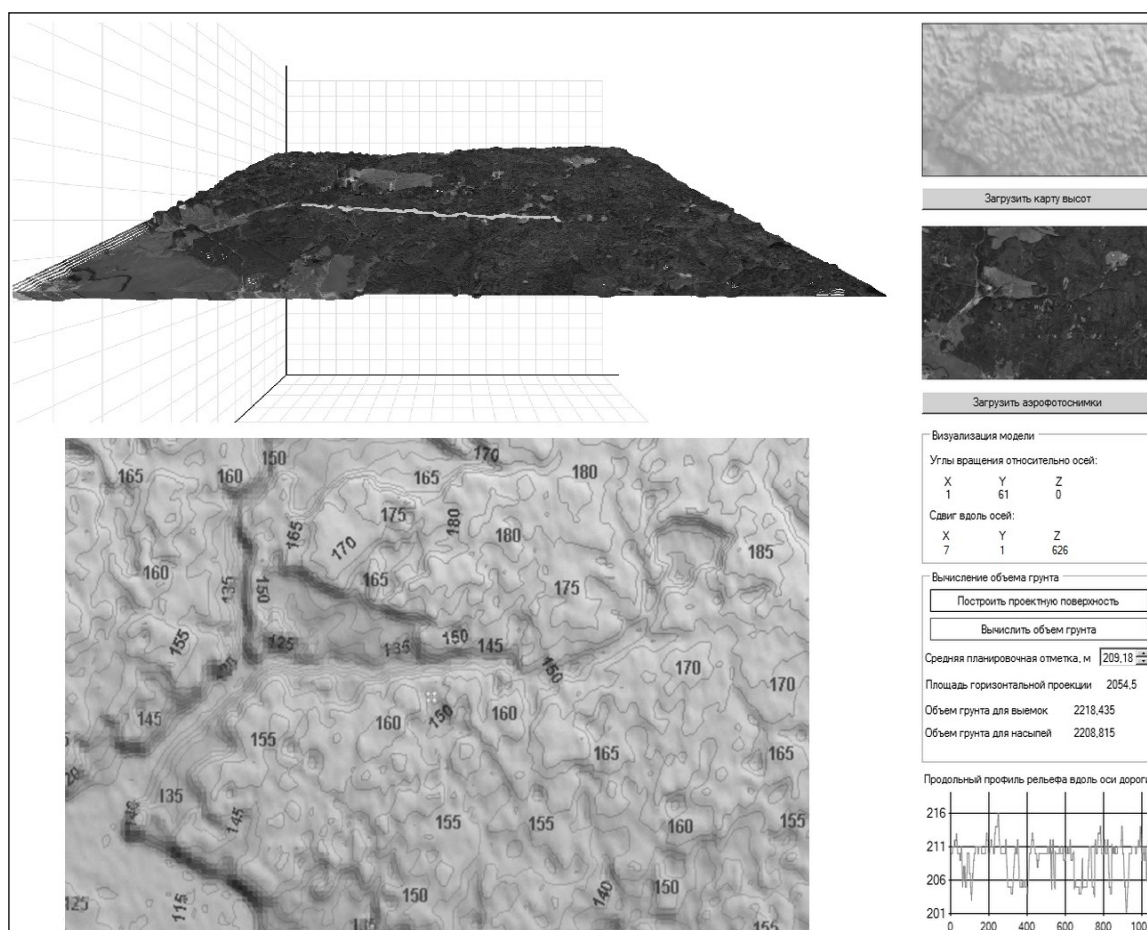


Рисунок 4.20 – Пользовательский интерфейс программы

В программе были реализованы следующие функции: загрузка с внешнего носителя данных в виде облака точек, полученных в результате лазерного сканирования местности; загрузка с внешнего носителя данных в виде АФС местности высокого разрешения; построение трехмерной модели местности из загруженных АФС и облака точек; визуализация трехмерной модели местности и ее отображение под необходимым ракурсом; формирование плана местности с указанием высотных отметок; формирование проектной поверхности земляного полотна железной дороги на модели местности; вычисление площади проектной

поверхности земляного полотна, спроецированной на горизонтальную плоскость; расчет объемов грунта, необходимого для возведения выемок и насыпей земляного полотна железной дороги [251].

Программный код написан на языке высокого уровня C# с применением библиотеки OpenGL для построения и визуализации сложных трехмерных моделей. При этом для визуализации трехмерной модели местности (рис. 4.21) может использоваться тетрагональная регулярная сеть, для которой применимы операции трансляции, ротации, масштабирования и компрессии [274]. Одним из важных элементов этой модели является цифровая модель рельефа местности (карта высот) [251].

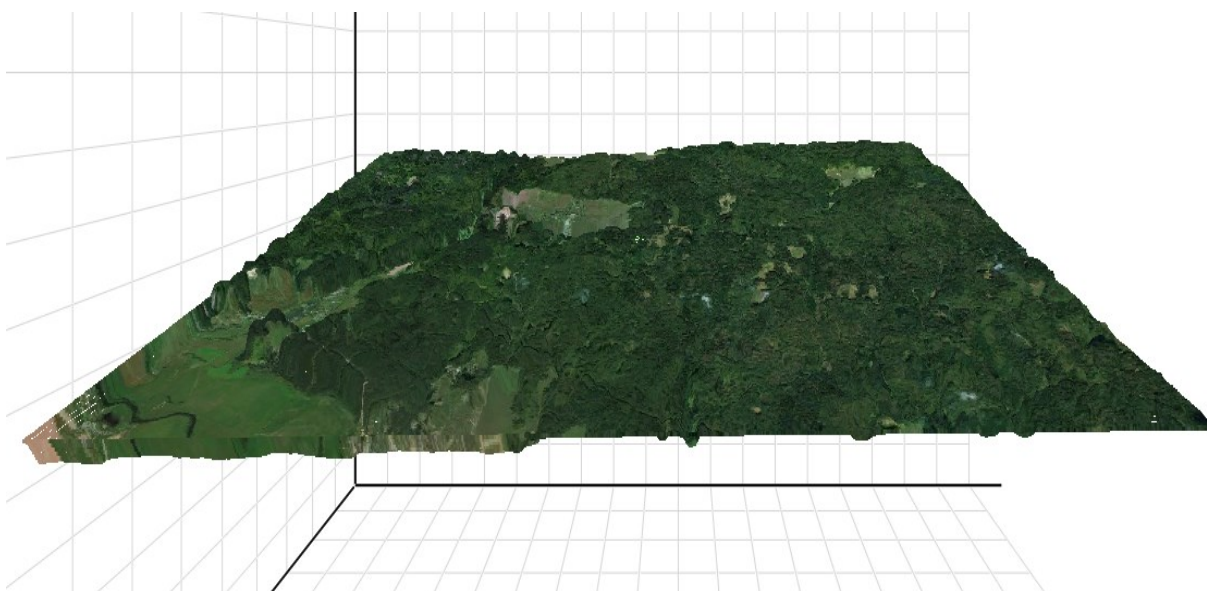


Рисунок 4.21 – Трехмерная модель местности

Разработанная программа позволяет реализовать все возможности 3D-моделирования за счет использования последних достижений объектно-ориентированной технологии динамического 3D-трассирования, в основе которой лежит создание каркаса модели с помощью «стринг» (струн). Такой каркас модели служит средством цифрового представления трехмерных пространственных объектов в виде трехмерных данных, образующих множество высотных отметок и иных значений аппликат (координат по оси Z) в узлах регулярной или нерегулярной сети либо совокупность записей горизонталей или иных изолиний [275]. Под струной подразумевается трехмерная ломаная линия, представляющая

собой каркас модели проектируемого участка ж/д пути с заданным набором определенных характеристик (рис. 4.22).

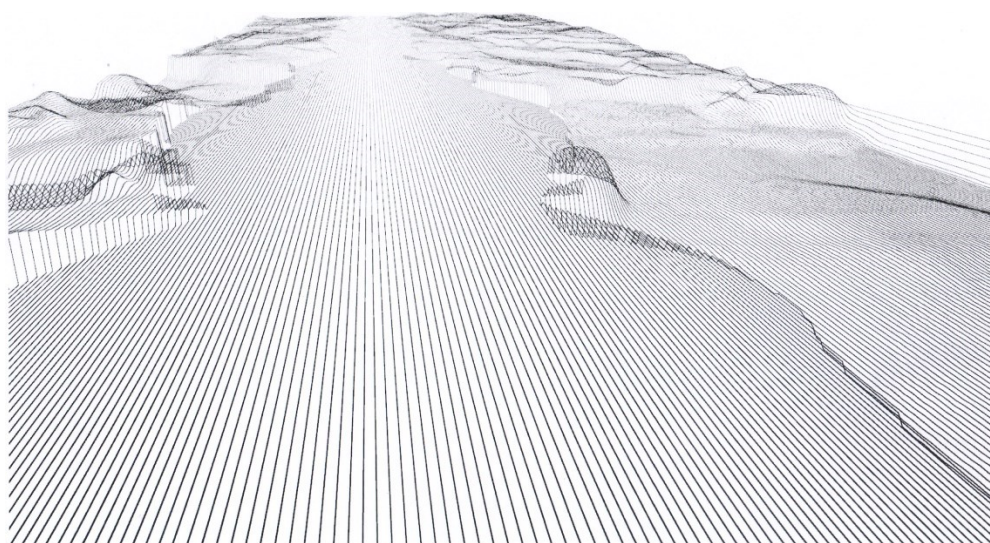


Рисунок 4.22 – Моделирование стрингами проектной поверхности земляного полотна железной дороги

Участок ж/д пути не обладает какой-либо специфической внутренней структурой, оказывающей существенное влияние на взаимодействие составляющих его элементов (звеньев рельсошпальной решетки). К основным параметрам относятся такие характеристики железной дороги, как тип рельса, радиусы вертикальной и горизонтальной кривой и продольный уклон. По этим значениям определяют геометрию начертания участка ж/д пути. При проектировании стремятся к тому, чтобы уклоны участков пути и объем земляных работ были по возможности минимальными, а кривые приближались к прямой. Это достигается вписыванием прямой проектной линии в рельеф местности при помощи вертикальных и горизонтальных кривых с соблюдением требований технических условий [276] [277] [278] и экономической целесообразности, а также требований, предъявляемых СНиП к земляному полотну железной дороги [279].

Проект может выполняться как с нулевым балансом земляных масс (если объемы насыпей и выемок равны между собой и отвечают условиям минимальности), так и под заданную отметку, с привязкой к существующему рельефу или заданной отметке [280]. Проектная линия оси рельсовой колеи задается положением отметок верхнего строения земляного полотна.

Соответственно, на первом этапе проектирования необходимо определить ее проектное положение на трехмерной модели (рис. 4.23, *а*). Аппроксимация точек профиля местности вдоль проектной линии оси рельсовой колеи (рис. 4.13, *б*) позволяет вычислить среднюю отметку поверхности естественного рельефа местности h_0 на проектируемом участке пути. Исходя из допустимых значений проектного уклона для данного участка, вычисляется средняя планировочная отметка по формуле:

$$\bar{h} = h_0 + \Delta, \quad (4.63)$$

где Δ – величина повышения (понижения) средней планировочной отметки.

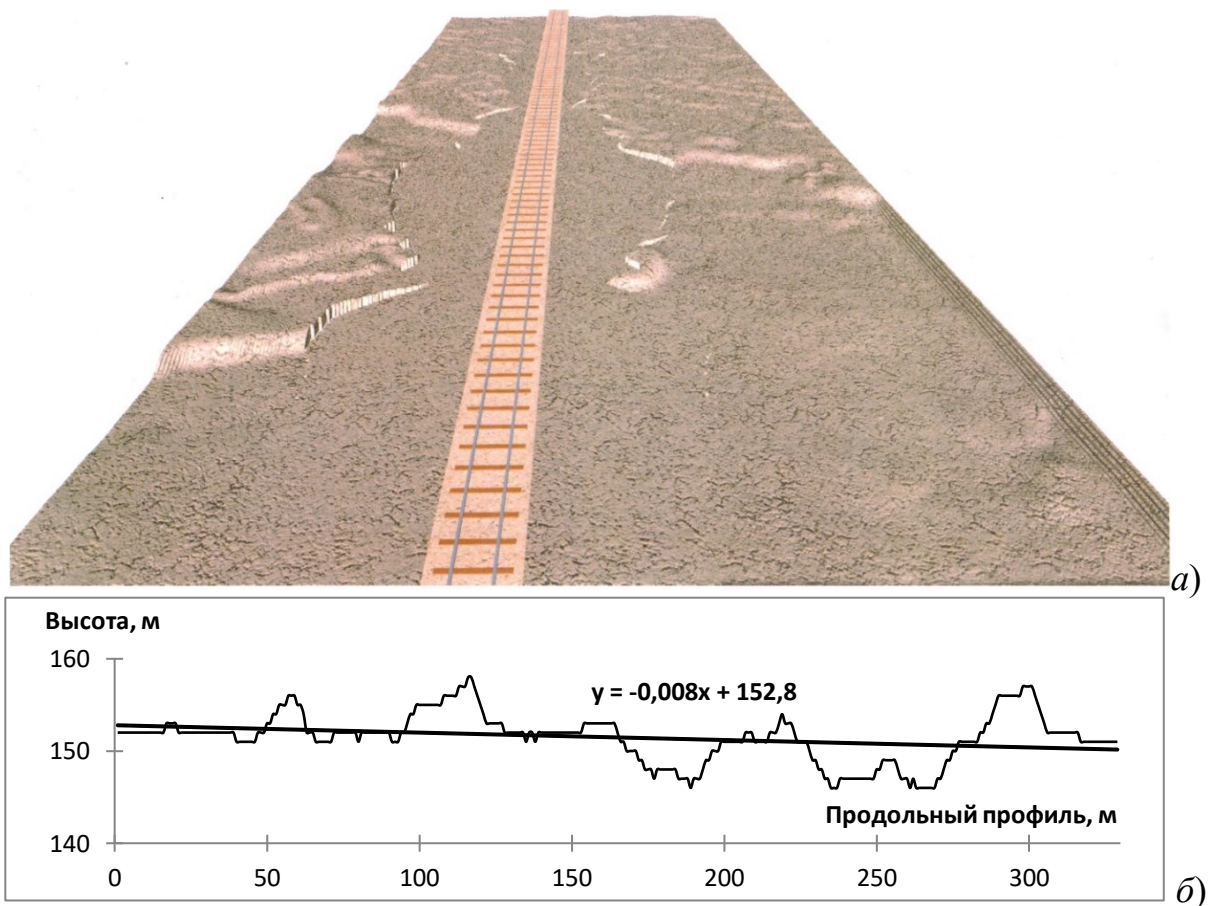


Рисунок 4.23 – Определение средней планировочной отметки: *а*) трехмерная модель участка пути; *б*) продольный профиль рельефа местности вдоль оси проектируемого участка железной дороги

По средней планировочной отметке строится проектная поверхность земляного полотна и определяются положения нулевых отметок, обозначающие места перехода выемки в насыпь. Форма проектной поверхности земляного

полотна образуется формами поперечного профиля поверхности выемки и насыпи (рис. 4.24). По ней производится распределения земляных масс на всем протяжении проектируемого участка пути. Таким образом, задача по оценке объемов земляных работ сводится к определению объемов грунта выше и ниже средней планировочной отметки – для формирования выемок и насыпей, соответственно [251].

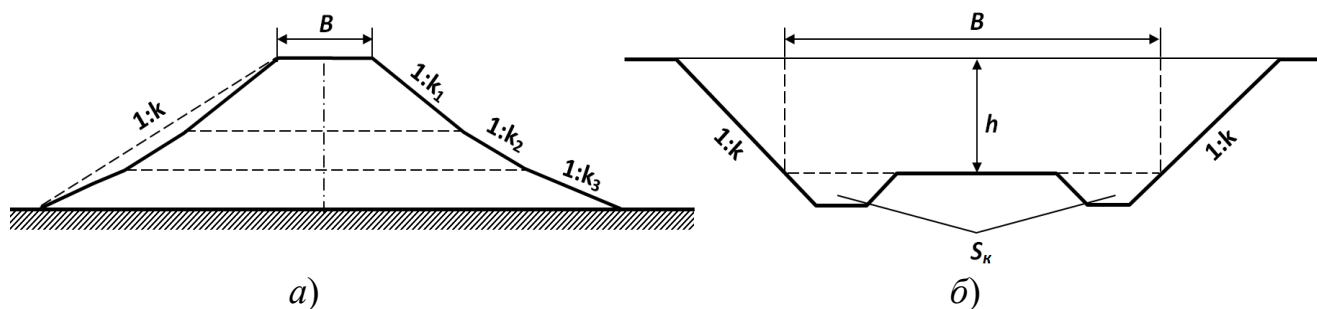


Рисунок 4.24 – Проектный поперечный профиль земляного полотна:
а) насыпь; б) выемка

Площадь среднего проектного поперечного сечения насыпи и выемки определяется следующими выражениями:

$$\bar{S}_{насыпь} = \bar{h} (B + k\bar{h}), \quad (4.64)$$

$$\bar{S}_{выемка} = 2S_k + \bar{h} (B + k\bar{h}), \quad (4.65)$$

где B – ширина насыпи (выемки) на поверхности земляного полотна;

S_k – площадь кювета;

\bar{h} – средняя рабочая отметка между смежными сечениями продольного профиля;

k – средний коэффициент заложения откосов.

После формирования проектной поверхности земляного полотна производится вычисление объемов грунта, который потребуется распределить в процессе строительства участка пути, а также прогнозируется время производства земляных работ. Для этого на трехмерной модели фиксируются отклонения формы земляного полотна железной дороги от проектных значений. Затем определяются местоположения и объемы повреждений земляного полотна (рис. 4.25). По этим данным формируется проект восстановления поврежденного участка с

распределением сил и технических средств, имеющихся в наличии. С учетом сменной производительности техники и времени подвоза строительно-восстановительных материалов производится оценка времени восстановления поврежденного участка пути [251].

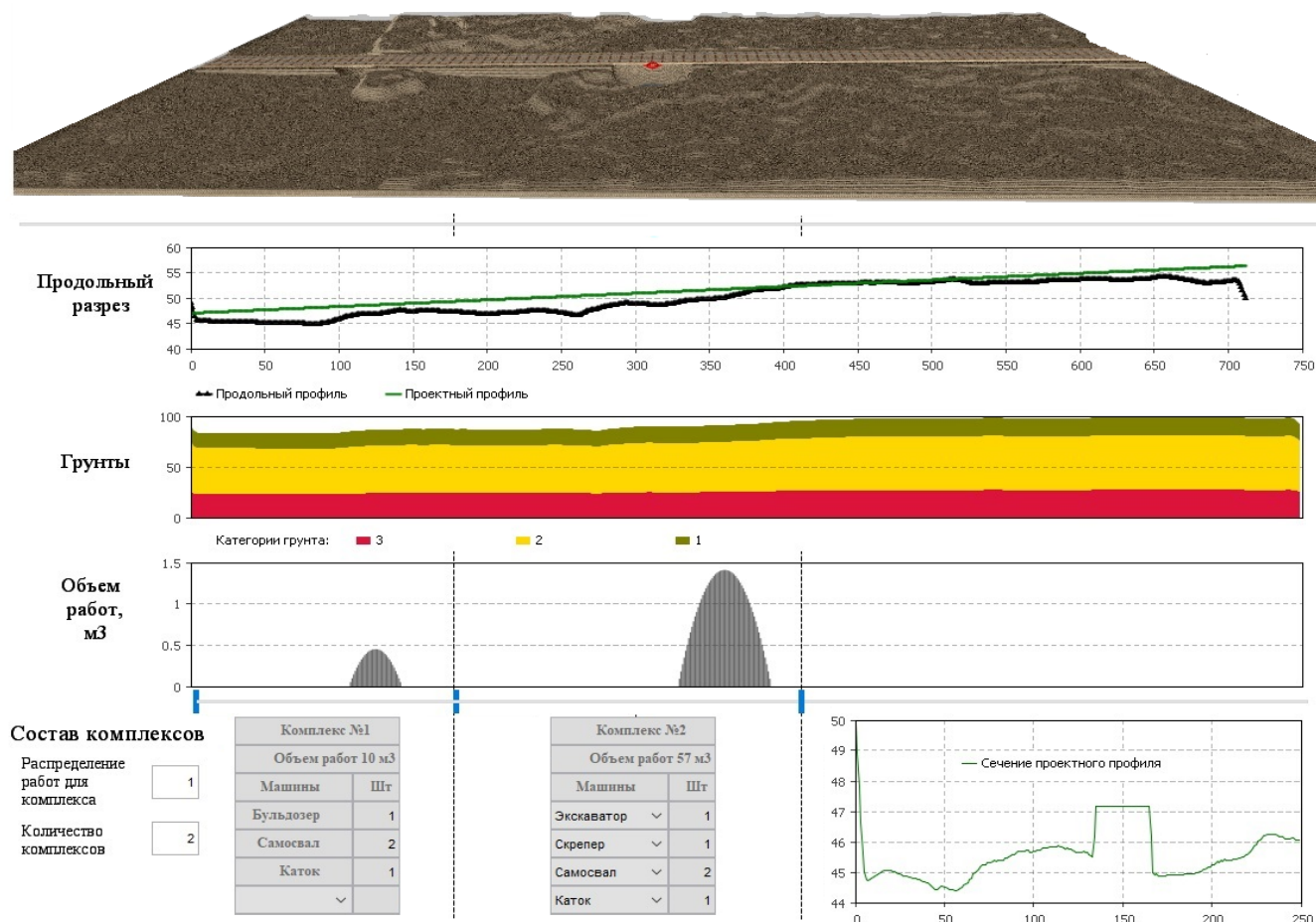


Рисунок 4.25 – Программный модуль для формирования проекта восстановления поврежденного участка железной дороги

Проводилась сравнительная оценка результатов вычисления объемов грунта, полученных с использованием геодезических планов и трехмерной модели местности. С помощью разработанной программы [273] на трехмерной модели местности была сформирована проектная поверхность земляного полотна для некоторого участка ж/д пути (рис. 4.26). Масштаб геодезического плана местности составлял 1:1000, при этом трехмерная модель имела разрешение 10 точек/м. Погрешность измерений координат точек, по которым формировалась трехмерная модель, составляла 10 мм. Объем грунта, определяемый при помощи

геодезического плана местности, рассчитывался по каждой ячейке, размером 100×1000 мм. В расчет принималась площадь участка местности, ограниченная проектной поверхностью земляного полотна.

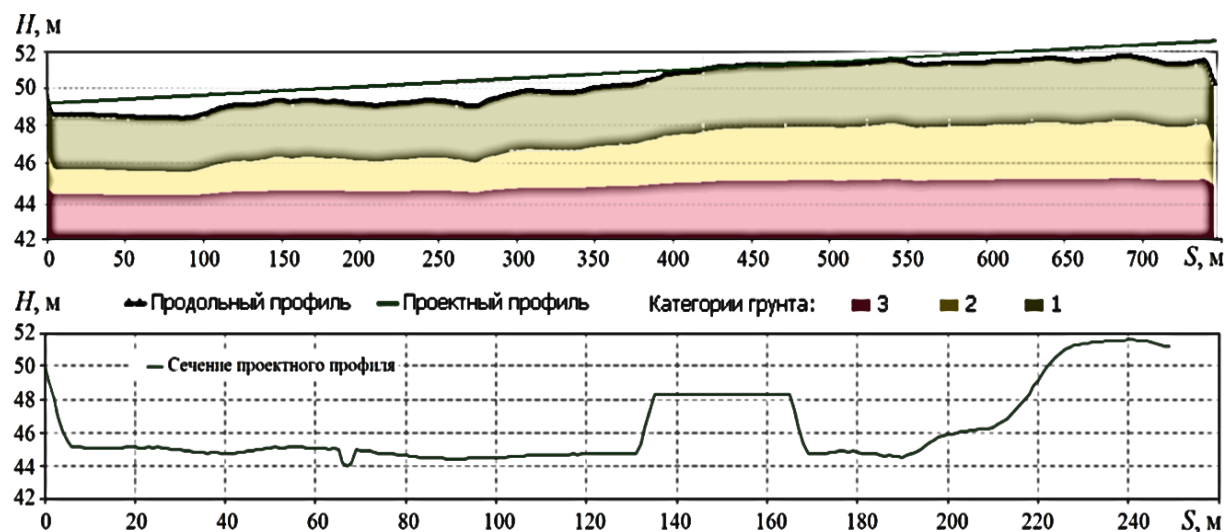


Рисунок 4.26 – Проект задания на производство земляных работ

Координаты вершин ячеек сетки определялись методом интерполяции многочленом Лагранжа второй степени по линиям высотных отметок на плане. Затем вычислялся объем грунта ниже или выше средней планировочной отметки путем сложения объемов каждой, отдельно взятой, ячейки сетки. Результаты проведенной сравнительной оценки двух методов представлены в виде гистограммы распределения расхождений по значениям объемов грунта, полученным для каждой ячейки с помощью этих методов (рис. 4. 27). На гистограмме видно, что расхождение результатов на величину более $0,2$ м³ составляет менее 20 % общего числа расхождений [251]. Квадратурная формула Симпсона, применяемая в разработанной программе для вычисления объема грунта, имеет второй порядок точности. Для многочленов третьей степени погрешность формулы Симпсона равна нулю. Погрешность приближенного значения интеграла определяется величиной $(s_{h/2} - s_h)/15$, что при разрешении модели участка ж/д пути составляет ≈ 33 мм².

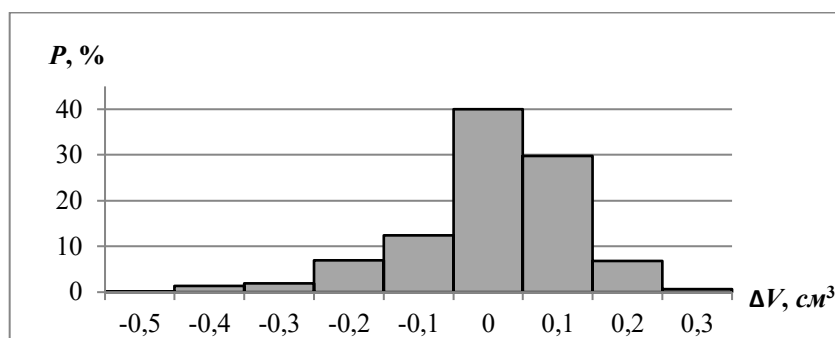


Рисунок 4.27 – Сравнительная оценка результатов расчета объемов грунта

В ходе моделирования геодезических и фотограмметрических данных, полученных с помощью БПЛА в исследовании [281] также оценивалась точность определения объемов складов сыпучих материалов. Для моделирования результатов измерений использовались величины погрешностей, присущие каждому методу. После моделирования результатов измерений производился расчет объемов на основе построения TIN-поверхности. Затем полученные результаты сравнивались с проектной формой и вычислялась относительная погрешность измерений. Было установлено, что геодезический метод определения объемов складов сыпучих материалов является более точным для небольших объемов до $3 \times 10^5 \text{ м}^3$, при больших размерах складов целесообразнее использовать фотограмметрический метод, который практически сравним с геодезическим по точности, но при этом менее трудоемкий, при объеме склада более 10^6 м^3 точность фотограмметрического метода становится выше геодезического.

В целях повышения оперативности проведения планово-высотной съемки участка местности, отведенного под строительство (восстановления) участка железной дороги, был разработан сегмент ВСКЗ для выноса проекта железных дорог в натуру и закреплении на местности проектных отметок [250]. С его помощью обеспечивается соответствие точности геометрических параметров железных дорог требованиям нормативно-технической и проектной документации. При этом оперативность и достоверность определения координат точек на местности (рис. 4.28) повышается благодаря возможности проводить все измерения из одной точки $O(\varphi, \lambda)$ в радиусе действия ВУ, находящегося вне зоны прямой оптической видимости объекта измерения.

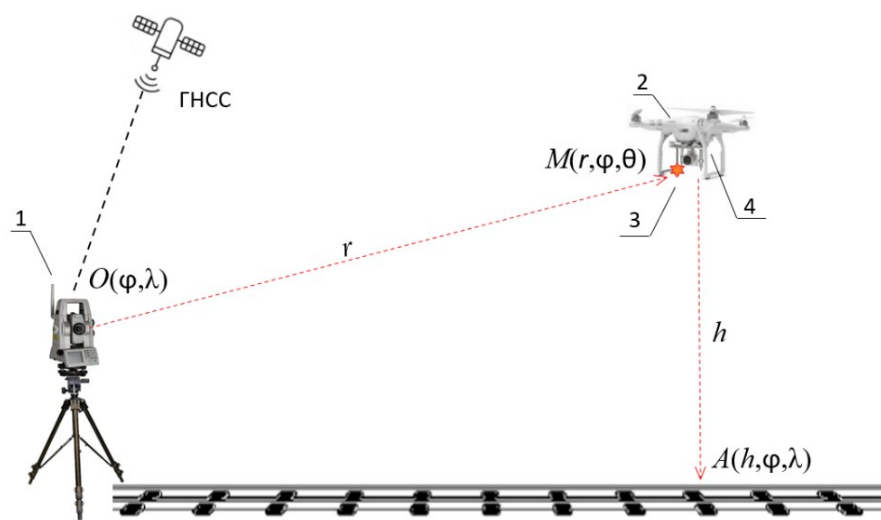


Рисунок 4.28 – Схема выноса проекта железных дорог в натуру:
1 – видеограмметрическое устройство; 2 – БПЛА; 3 – визирная цель;
4 – лазерный дальномер; $M(r, \varphi, \theta)$ – координаты БПЛА

Координаты требуемой точки $A(h, \varphi, \lambda)$ на ж/д путях определяются с помощью ВУ и БПЛА, на гиросtabilизированной платформе которого закреплены ВЦ, приёмопередатчик, видеокамера, лазерный дальномер, таким образом, чтобы оптическая ось видеокамеры и луч лазерного дальномера были направлены вертикально вниз. Структурная схема сегмента ВСКЗ для выноса проекта железных дорог в натуру изображена на рисунке 4.29.

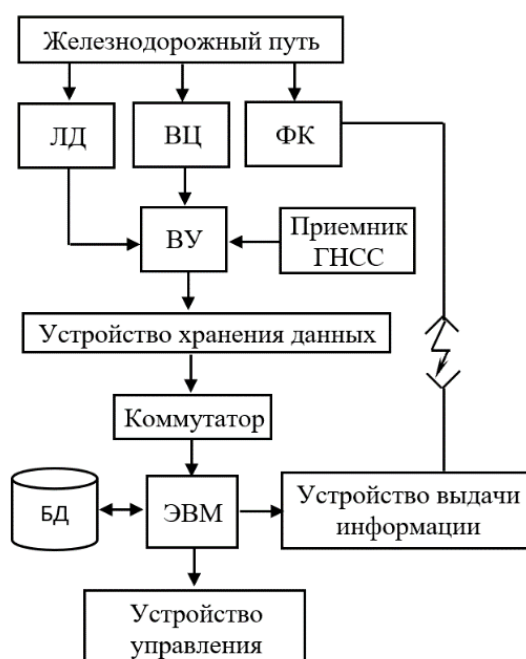


Рисунок 4.29 – Обобщенная структурная схема сегмента ВСКЗ для выноса проекта железных дорог в натуру: ЛД– лазерный дальномер; ВЦ – визирная цель; ФК – фотокамера; ВУ – видеограмметрическое устройство

Оператор БПЛА с помощью пульта дистанционного управления и радиоприемного устройства, воспроизводящего видеосигнал с установленной на БПЛА видеокамеры, осуществляет управление, обеспечивая зависание БПЛА над точкой с требуемыми координатами, которая подсвечивается лучом лазерного дальномера. При этом отслеживание и наведение на ВЦ, прикрепленную к БПЛА, производится ВУ автоматически в режиме реального времени по визуальным признакам ВЦ. Схема взаимодействия сегмента ВСКЗ для выноса проекта железных дорог в натуру с БПЛА изображена на рисунке 4.30.



Рисунок 4.30 – Схема взаимодействия сегмента ВСКЗ для выноса проекта железных дорог в натуру с БПЛА

Возвышение БПЛА над поверхностью земли определяется с помощью лазерного дальномера. По измеренным с помощью ВУ дальности, зенитному и азимутальному углам ВЦ, а также измеренному с помощью лазерного дальномера возвышению БПЛА над некоторой точкой на поверхности земли, вычисляются ее координаты (рис. 4.31) из системы уравнений:

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_0 \\ \theta = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \left(\frac{h}{r_0 \sin \theta_0} - \operatorname{ctg} \theta_0 \right) \\ r = \sqrt{h^2 + r_0^2 - 2hr_0 \cos \theta_0} \end{cases} \quad (4.66)$$

где r_0 – дальность ВЦ;

φ_0, θ_0 – азимутальный и зенитный углы ВЦ;

h – возвышение БПЛА над наземным объектом.

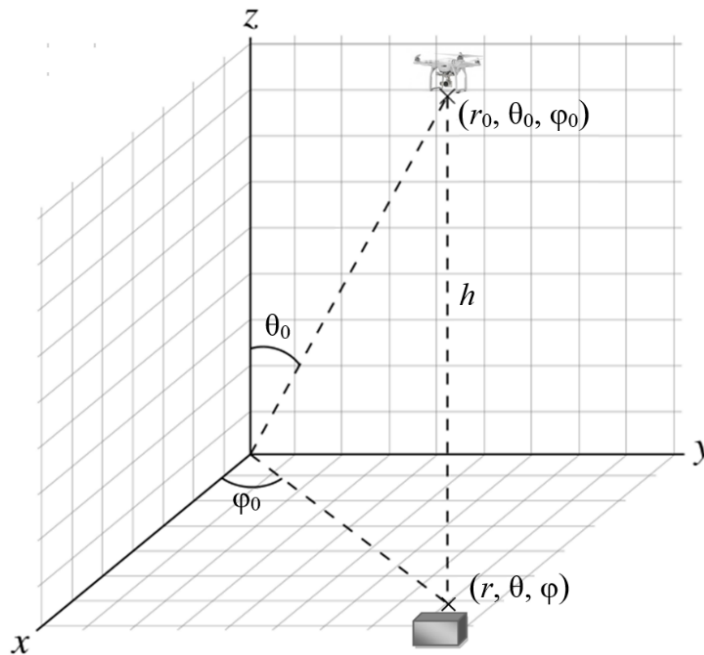


Рисунок 4.31 – Схема определения с помощью БПЛА координат точки на поверхности земли

Таким образом, разработанный сегмент ВСКЗ позволяет более оперативно выполнять планово-высотное обоснование проекта решения на строительство (восстановление) участка железной дороги и вынос проекта железных дорог в натуру. При этом комплекс программ, разработанный для применения трехмерных моделей в САПР железных дорог, позволяет получать более точные результаты при расчете объемов земляных работ по сравнению с результатами, полученными с помощью геодезических планов местности [251].

4.3 Контроль геометрических параметров земляного полотна железнодорожного пути

Строительство железных дорог, как правило, связано с производством значительных объемов земляных работ и в первую очередь – это разработка, перемещение и укладка грунтов. Специфика строительства объектов ж/д инфраструктуры определяет особые требования к срокам их выполнения, в том числе к земляным работам, которые должны выполняться в максимально короткие сроки с использованием машин и механизмов, работающих в составе механизированных комплексов. Эти требования могут быть удовлетворены путем внедрения средств автоматизации и комплексной механизацией работ.

Передовым техническим решением, направленным на развитие технологий позиционирования в области автоматизации процессов строительства, является внедрение САУ для строительных машин, именуемых также системами нивелирования. Такие системы позволяют в автоматическом (или автоматизированном) режиме контролировать положение рабочего органа строительной машины (отвала бульдозера или грейдера, ковша экскаватора и т.д.). Как отмечается в инструкции по разбивочным работам при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог и искусственных сооружений [282] технико-экономические показатели и качество дорожных строительных работ в значительной степени связаны с производством разбивочных работ и с обслуживанием строительства. Применение САУ дорожно-строительными машинами позволяет достигнуть более высокой точности и соответствия проектной поверхности формирования земляного полотна, увеличивает скорость строительных работ, сокращаются вынужденные простои техники, которые возникали из-за необходимости проведения периодических замеров высотных отметок геодезистами (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Характеристики дорожно-строительных машин, снабженных системой позиционирования рабочего органа

Показатели	Бульдозер		Автогрейдер			Скрепер		Асфальто-укладчик	
	Системы геодезического управления								
	Автоплан		Профиль			Стабилоплан		Стабилослой	
	I	II	I	II	III	I	II	I	II
Точность планировки по высоте, мм	50	—	—	30	15	4	3	—	—
Точность планировки по уклону, % продольному поперечному	0,25 0,25	—	—	—	—	—	—	—	—
Сокращение числа проходов при окончательной отделке (по сравнению с ручным управлением), %	2 раза	50	60	60	75	2 раза	2 раза	0,42	0,16
Повышение производительности труда, %	1,5-2 раза	30	30	67	67	—	—	—	—

Ведущими производителями подобных систем сегодня являются такие всемирно известные компании, как корпорация Trimble (США), компания Leica-geosystems (Швейцария) и совместная корпорация Topcon (Япония-США). Каждая из этих компаний производит несколько видов САУ для строительной техники, начиная от простых, работающих по струне и лазеру, до высокопроизводительных трехмерных систем GPS [283] [284]. Например, САУ, устанавливаемые на бульдозеры, применяются для точного и производительного профилирования слоев дорожной одежды, распределения материалов, профилирования дорог в карьерах при строительстве земляных сооружений, дамб, сельскохозяйственных и других объектов. САУ подключаются непосредственно к органам управления дорожно-строительной техники. Специальные датчики считывают информацию о текущем положении рабочего органа и передают ее вычислительному устройству, которое сравнивает текущие параметры с заданными целевыми значениями и корректирует положение рабочего органа [285].

Например, качество профилирования бульдозера с САУ позволяет достигать результатов работы автогрейдера (гладкость, отработка «клевков» машины), что

позволяет сократить парк используемых машин. Системы автоматики облегчают управление машиной, индицируют или автоматически поддерживают заданный поперечный уклон, высотную отметку и отображают на бортовом дисплее положение отвала относительно проектной поверхности. Кроме того, использование САУ снижает требования к квалификации операторов техники, позволяя выполнять земляные работы значительно быстрее, достигая высокой точности профилирования. Задача оператора в этом случае сводится к контролю соответствия выполняемых работ с проектными данными [286].

Экономически целесообразная интеграция современных САУ в строительную технику возможна только в том случае если её органы управления не имеют механических связей с исполнительными агрегатами и механизмами, т.е. конструкция машин оснащаемых САУ должна предусматривать управление по проводам. При этом механические действия, выполняемые оператором при воздействии на органы управления (джойстики, панели управления, тумблеры и т.п.) преобразуются в электрические сигналы заданного формата для последующей их передачи на управляемые агрегаты. Соответственно, устраняется необходимость в разработке и монтаже дополнительных механизмов, преобразующих управляющие сигналы, поступающие от САУ в механические воздействия на органы управления машины [285].

Первым шагом к автоматизации технологических процессов производства земляных работ стало появление гидростатической трансмиссии с электрогидравлическим регулирующим клапаном [287], что сильно облегчило установку САУ на строительную технику. Подобные образцы строительной техники с гидростатической трансмиссией могут оснащаться САУ одного из двух типов – индикаторными или автоматическими. Индикаторные системы отличаются менее высокой эффективностью, которая обусловлена ручным управлением машиной. В основу работы индикаторной системы нивелирования положена передача визуальной информации оператору с помощью специальных светоиндикаторов. Исходя из получаемой информации, оператор самостоятельно управляет положением рабочего органа строительной техники [286].

С момента появления микропроцессоров началась разработка электронных систем, направленных на повышение точности и производительности строительной техникой, что создало предпосылки к появлению беспилотных машин [288]. В начале 1990-х годов разработаны первые автоматизированные системы, позволяющие реализовывать и внедрять любые программы по управлению строительной техникой органом [189] [289]. Применение технологии электрогидравлического пропорционального управления также в значительной мере повлияло на развитие автоматизированных систем, обеспечив высокую мобильность и простоту управления машинами с гидростатической трансмиссией [290]. Благодаря данной технологии стало возможным управлять движением и навесным оборудованием строительной техники с помощью джойстика [291]. Кроме того, удалось автоматизировать ряд технологических операций, выполняемых машиной без участия машиниста, что способствовало повышению производительности и качества выполнения работ [292].

В настоящее время существует ряд технических решений, которые позволяют на практике реализовать с помощью САУ позиционирование рабочего органа строительной техники. В зависимости от используемой технологии позиционирования рабочего органа строительной техники, САУ условно подразделяются на 2D и 3D системы. Технология ГНСС позволяет определять положение рабочего органа дорожно-строительной техники в режиме реального времени. В основном данная технология, применяется на начальных этапах проекта производства земляных работ, когда надо проводить работы с большими объемами перемещаемых грунтов [293]. Стоит отметить, что кроме (одной) базовой ГНСС-станции, обеспечивающей ГНСС-оборудование на строительной площадке координатными поправками (в радиусе до 5-8 км), необходимо иметь минимальный набор инструментов для проверки обработанной поверхности на соответствие проектным отметкам.

Технология LPS служит для локального позиционирования строительной техники и дает возможность проводить работы в закрытом пространстве и в местах, где отсутствует спутниковый сигнал. Например, данная технология положена в

основу работы электронного роботизированного тахеометра, который устанавливается в контрольной точке согласно проекту. Тахеометр с помощью ВЦ отслеживает текущее положение рабочего органа машины и передает информацию в САУ строительной техникой, которая сравнивает информацию с проектной формой и при необходимости корректирует положение рабочего органа.

Бульдозер под управлением 2D САУ может формировать горизонтальные, наклонные, плоские и кривые поверхности земляного полотна дороги [294]. В состав 2D САУ для бульдозера, как правило, входят: мачта с установленным на ней лазерным приемником, угловые датчики, блоки управления гидравликой и стабилизации напряжения, шланги и соединители, а также блок управления системой. Лазерный построитель плоскости (нивелир) выставляется с заданным углом наклона на открытом участке в зоне проведения строительных работ (рис. 4.32). Во вращающейся головке нивелира находится лазер, который создает плоскость лазерного излучения. Бульдозер оборудуется одним или двумя лазерными приемниками, расположенными на электрических телескопических мачтах, с помощью которых, обеспечивается поднятие или опускание приемников на уровень лазерной плоскости. Такой тип САУ лучше всего подходит для строительства линейных и площадных объектов, в том числе железных дорог и объектов ж/д инфраструктуры.

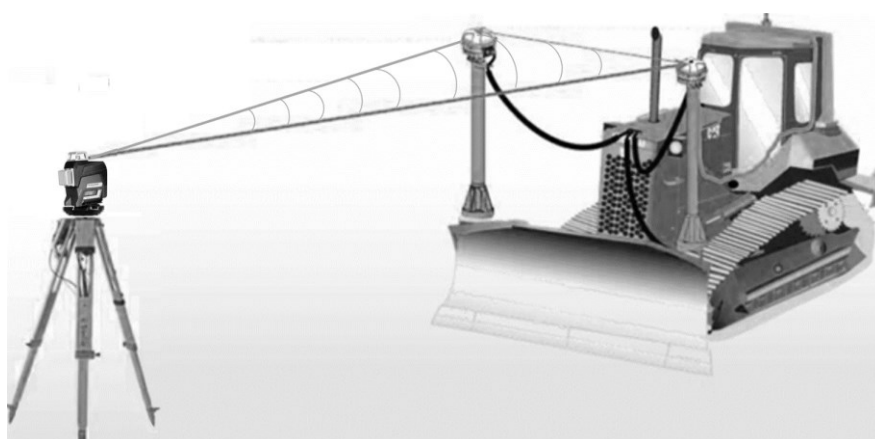


Рисунок 4.32 – Индикаторная лазерная система для контроля положения рабочего органа

Получая информацию о положении лазерного луча, блок управления САУ бульдозера формирует команды на гидроцилиндры отвала для управления

пропорциональным электрогидроклапаном и позиционирует положение отвала параллельно лазерной плоскости. САУ определяет точную позицию каждого конца отвала, сравнивает эти позиции с проектной высотой и вычисляет, насколько надо поднять или опустить отвал. Полученная информация отображается на бортовом дисплее в виде положения машины на плане местности, поперечного профиля, текстовой информации, а также на специальных индикаторах, указывающих оператору направление перемещения отвала и направление его смещения от какой-либо заданной линии. В автоматическом режиме, подъем и опускание отвала происходит при помощи электрогидроклапана. Таким образом, бульдозер или автогрейдер, оснащенный САУ, профилирует заданную плоскую поверхность в автоматическом режиме. При этом САУ берет на себя управление отвалом машины и с высокой точностью позиционирует его на заданной плоскости.

Наиболее революционные изменения в области проведения земляных работ были достигнуты с появлением 3D САУ. В этих системах используется цифровая модель проекта, которая загружается в бортовой компьютер, позволяя оператору машины: формировать вертикальные и горизонтальные кривые, виражи и все другие элементы проекта. Трехмерная система определяет координаты отвала бульдозера или ковша экскаватора и сравнивает эти данные с предварительно загруженной цифровой моделью. Вычисляется проектная высота и поперечный уклон для текущей позиции, и система автоматически перемещает отвал на нужную высоту и уклон.

С целью обеспечения контроля параметров нижнего строения ж/д пути в процессе производства земляных работ был разработан сегмент ВСКЗ, с помощью которого осуществляется позиционирование рабочего органа дорожно-строительных машин [285]. Также на базе технологии компьютерного зрения был разработан способ [295] для определения координат и пространственного положения рабочего органа строительной техники в процессе производства земляных работ с помощью ВЦ, установленных на строительном участке (рис. 4.33).

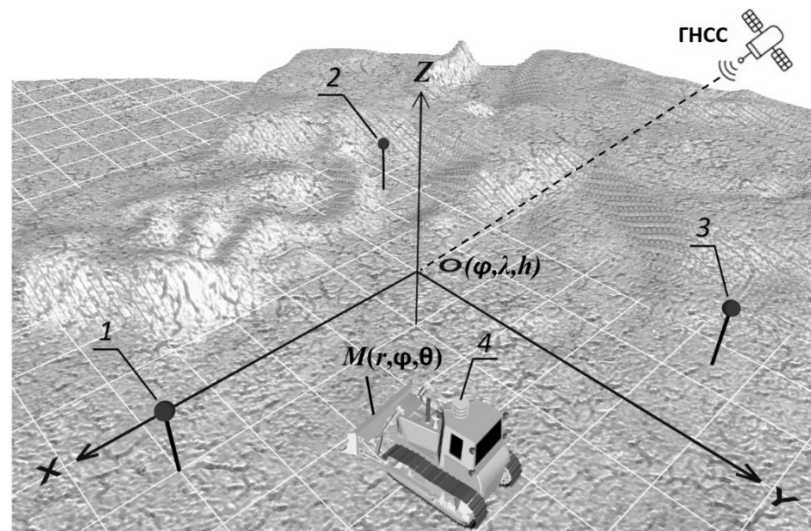


Рисунок 4.33 – Локальная система координат, образованная визирными целями

В основу данного способа положен метод обратной однократной угловой засечки по трем равноудаленным друг от друга ВЦ активного типа, устанавливаемым на строительном участке [296]. Для этого ВЦ размещаются на строительном участке в горизонтальной плоскости на известном базисном расстоянии друг от друга (рис. 4.34). Они образуют локальную систему координат с началом координат в геометрическом центре этих ВЦ, в которой определяются координаты рабочего органа строительных машин и его пространственное положение.

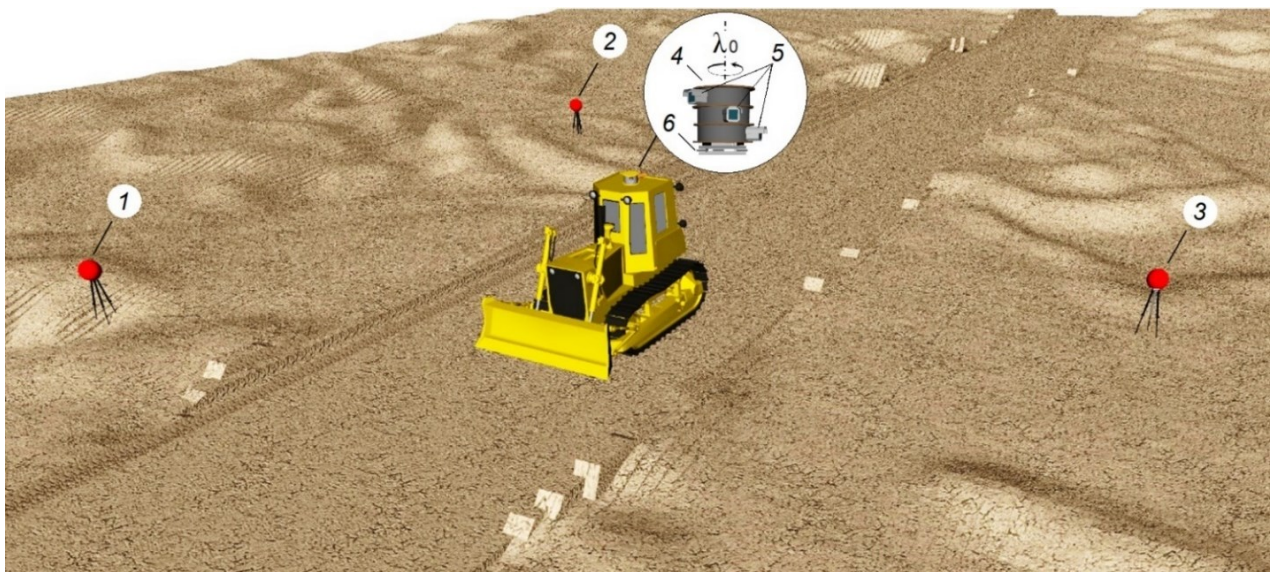


Рисунок 4.34 – Принципиальная схема размещения ВЦ на строительном участке: 1, 2, 3 – ВЦ; 4 – видеограмметрическое устройство; 5 – видеокамера; 6 – треггер

Каждая ВЦ имеет отличительную частоту мигания ν_i (где i - индекс ВЦ), являясь источником видимого или ИК электромагнитного излучения. ВУ устанавливается на кабине строительной техники. Оно имеет три видеокамеры, обеспечивающие одновременное и непрерывное отслеживание каждой из ВЦ. Поиск ВЦ осуществляется путем изменения направления обзора видеокамер с угловым шагом, не превышающим их углы обзора [285]. Структурная схема сегмента ВСКЗ для контроля параметров геометрии нижнего строения пути, посредством определения положения рабочего органа строительной техники изображена на рисунке 4.35.

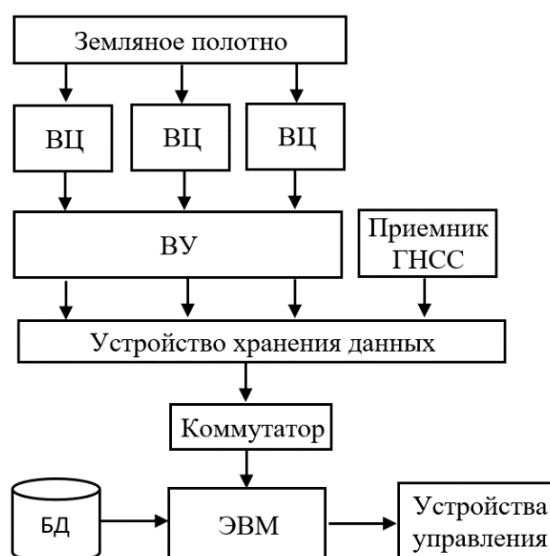


Рисунок 4.35 – Обобщенная структурная схема сегмента ВСКЗ для контроля параметров геометрии нижнего строения пути

В процессе обработки полученных видеоизображений, с помощью разработанного специального программного обеспечения [297], производится идентификация ВЦ по таким визуальным признакам, как форма ВЦ, цвет излучаемого ей видимого света и частота мигания. ВУ обеспечивается одновременное отслеживание до трех ВЦ в режиме реального времени. Схема взаимодействия сегмента ВСКЗ с САУ дорожно-строительной машины показана на рисунке 4.36. Автоматический контроль параметров нижнего строения ж/д пути осуществляется по показаниям датчиков, расположенных на строительной технике и в зоне проведения строительных работ. Благодаря этому не требуется

присутствие геодезиста на месте производства земляных работ, что позволяет повысить темп работ и качество их производства.

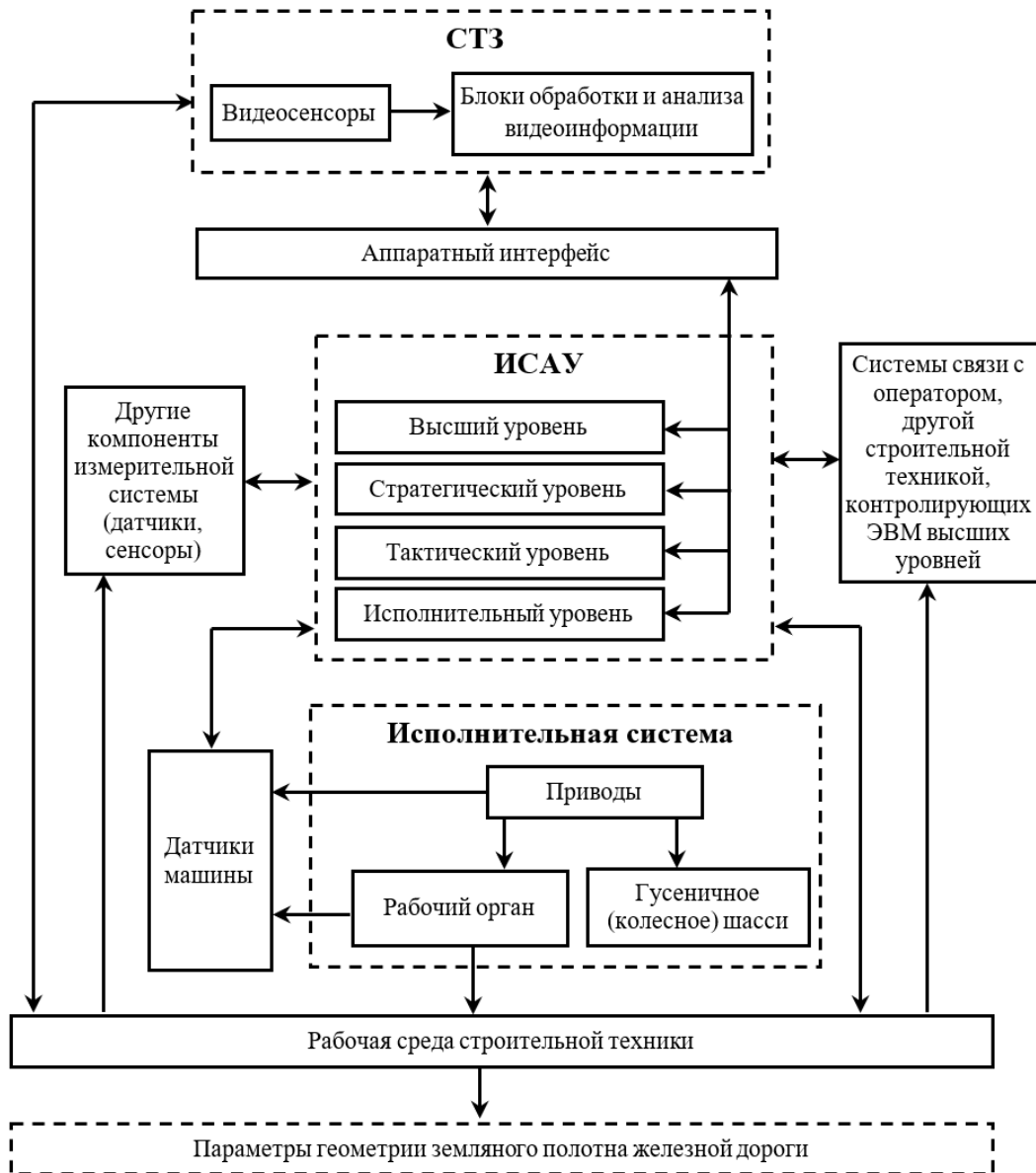


Рисунок 4.36 – Схема информационного взаимодействия сегмента ВСКЗ с САУ дорожно-строительной машины

После обнаружения и идентификации всех ВЦ применяется метод обратной пространственной фотограмметрической засечки [79], позволяющий вычислить угловое положение ВЦ, которое задается вертикальным углом θ_i и горизонтальным углом ψ_i . Для этого вычисляются горизонтальные углы ВЦ:

$$\psi_i = \psi_0 + \arctg(x_i/f), \quad (4.67)$$

где x_i – абсцисса ВЦ i на изображении.

Далее рассчитываются модули разности между этими углами:

$$\lambda_i = |\psi_i - \psi_{i-1}|. \quad (4.68)$$

Затем определяется дирекционный угол первой ВЦ:

$$\omega_1 = \frac{11}{6} \pi - \Delta\lambda_1 + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{3} \operatorname{ctg} \Delta\lambda_2 + 1}{2 \operatorname{ctg} \Delta\lambda_1 + \operatorname{ctg} \Delta\lambda_2 + \sqrt{3}} \right). \quad (4.69)$$

После этого методом обратной однократной угловой засечки [240] определяется плановое положение ВУ:

$$\begin{cases} x_{\text{ВУ}} = \frac{b}{\operatorname{tg}(\omega_1 + \lambda_1 + \lambda_2) - \operatorname{tg} \omega_1} - \frac{b}{2\sqrt{3}} \\ y_{\text{ВУ}} = \frac{b}{2} - \left(X_p + \frac{b}{2\sqrt{3}} \right) \operatorname{tg}(\omega_1 + \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2) \end{cases}. \quad (4.70)$$

Далее определяется зенитный угол ВУ:

$$\theta_{\text{ВУ}} = \pi - \operatorname{arccctg} \left(\frac{1}{3\sqrt{x_{\text{ВУ}}^2 + y_{\text{ВУ}}^2}} \sum_{i=1}^3 \sqrt{(x_{\text{ВУ}} - x_i)^2 + (y_{\text{ВУ}} - y_i)^2} \operatorname{tg} \theta_i \right), \quad (4.71)$$

где θ_i – вертикальный угол направления на ВЦ V_i .

Координаты ВЦ (x_i, y_i) вычисляются по размеру базисного расстояния:

$$V_1(b/\sqrt{3}, 0), \quad (4.72)$$

$$V_2(-b/2\sqrt{3}, -b/2), \quad (4.73)$$

$$V_3(-b/2\sqrt{3}, b/2). \quad (4.74)$$

Высотное положение ВУ вычисляется из выражения:

$$z_{\text{ВУ}} = \sqrt{x_{\text{ВУ}}^2 + y_{\text{ВУ}}^2} \operatorname{ctg} \theta_{\text{ВУ}}. \quad (4.75)$$

По вычисленным координатам ВУ $(x_{\text{ВУ}}, y_{\text{ВУ}}, z_{\text{ВУ}})$ вычисляются координаты $(x_{\text{РО}}, y_{\text{РО}}, z_{\text{РО}})$ и пространственное положение рабочего органа дорожно-строительной машины [286] (рис. 4.37).

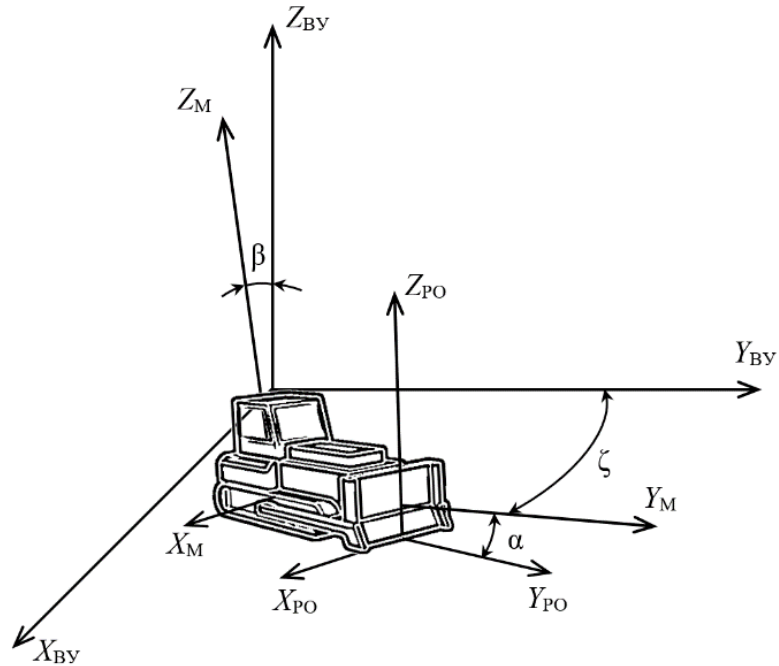


Рисунок 4.37 – Системы координат: видеограмметрического устройства (X_{BY} Y_{BY} Z_{BY}), строительной машины (X_B Y_B Z_B), рабочего органа (X_{PO} Y_{PO} Z_{PO})

Пространственное положение рабочего органа определяется по значениям углов поворота машины вокруг координатных осей (X_{BY} , Y_{BY} Z_{BY}) в элементах матрицы преобразования координат A :

$$\begin{pmatrix} \cos\beta\cos\zeta - \sin\beta\sin\alpha\sin\zeta & -\cos\beta\sin\zeta - \sin\beta\sin\alpha\cos\zeta & -\sin\beta\cos\alpha \\ \cos\alpha\sin\zeta & \cos\alpha\cos\zeta & -\sin\alpha \\ \sin\beta\cos\zeta + \cos\beta\sin\alpha\sin\zeta & -\sin\beta\sin\zeta + \cos\beta\sin\alpha\cos\zeta & \cos\beta\cos\alpha \end{pmatrix}. \quad (4.76)$$

Углы поворота α , β (крен и тангаж) машины вокруг осей X_{BY} , Y_{BY} измеряются с помощью инерциального датчика, встроенного в ВУ. После этого вычисляется угол поворота ζ (рыскание) машины вокруг оси Z_{BY} :

$$\zeta = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\lambda_i - \omega_i), \quad (4.77)$$

где n – количество измеряемых дирекционных углов ВЦ.

По найденным углам поворота машины (α, β, ζ) вокруг осей (X_{BY}, Y_{BY}, Z_{BY}) определяются координаты рабочего органа машины:

$$\begin{bmatrix} x_{PO} \\ y_{PO} \\ z_{PO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{BY} \\ y_{BY} \\ z_{BY} \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta l \\ h_{PO} - h_M \end{bmatrix}, \quad (4.78)$$

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

Δl – расстояние от вертикальной оси, проходящей через центр ВУ до рабочего органа машины;

h_M – высота машины;

h_{PO} – высота подъема рабочего органа машины.

В процессе строительства также возникает необходимость транспортировки строительной техники к месту проведения работ. Самой востребованной техникой на строительных площадках являются бульдозер и экскаватор на гусеничном ходу. Ввиду особенностей конструкции гусеничной техники запрещено её передвижение по дорогам федерального значения. Транспортировка такой техники осуществляется на большегрузных автоприцепах (тралах) с помощью седельных тягачей. Трал представляет собой грузовую платформу на низкой раме. Основной проблемой, возникающей при транспортировке техники, является её погрузка на трал и последующая разгрузка [298]. Наименее затратный способ погрузки техники – своим ходом. Однако такой способ всегда связан с риском падения транспортируемой техники [299] [300], поскольку ширина грузовой платформы трала ненамного больше, а иногда и меньше ширины гусеничного шасси этой техники [301]. Чтобы снизить вероятность повреждения техники, требуется строго соблюдать типовые инструкции по охране труда для машинистов (одноковшовых гусеничных и пневмоколесных экскаваторов ТОИ Р-218-25-94, бульдозеров ТИ РО-020-2003), меры безопасности при эксплуатации спецтехники при въезде на трал и съезде с него, а также правила перевозки грузов автомобильным транспортом (Постановление Правительства РФ № 272 от 15.04.2011). Снижение рисков погрузки гусеничной техники можно обеспечить с помощью ВСКЗ, позволяющей контролировать основные параметры и управлять процессом её погрузки [302].

Обзор литературы выявил возможные причины аварий при проведении строительных работ [299] [300] [303] [304]. Анализ факторов риска таких типов аварий на основе действующих правил безопасности позволил определить потребности в пространственных данных, необходимых для обеспечения

автоматизированной оценки безопасности с применением ВСКЗ.

В настоящее время применяются различные устройства и методы для повышения безопасности в условиях проведения строительных работ. Так, в целях идентификации технологических операций, выполняемых строительной техникой, применяется метод радиочастотной идентификация (RFID), позволяющий идентифицировать и отслеживать строительную технику, определяя ее местоположение и перемещение (скорость, ускорение, ориентация) [305]. Также находят применение системы для обеспечения интеллектуальной поддержки крановщиков, в которых используется сверхширокополосная технология (UWB) позволяющая в реальном времени обрабатывать данные о местоположении стрелы крана, помогая оператору предотвратить возможные столкновения [306].

Для оценки безопасности и предотвращения несчастных случаев на строительных площадках применяются системы компьютерного (технического) зрения [303] [304]. Автоматизированная система (Tracking-Leaming-Detection) [188] отслеживает положение экскаватора получая информации о его текущем состоянии и траектории движения с помощью предварительно обученного детектора, анализирующего видеоизображение и данные с GPS-трекера. Эта система локализует целевые объекты на изображении, определяя по пространственно-временным параметрам центроида экскаватора его состояние работы: «движение», «зачерпывание грунта», «погрузка грунта», «вращение» или «ожидание». Детектор построен на основе обучаемой нейронной сети, устойчивой к внезапным изменениям условий видимости объектов и окружающей среды, вызывающих резкие изменения характеристик объекта на изображении (цвет, форма, пространственное положение и скорость перемещения).

Решение задачи автоматизации процесса погрузки техники требует достаточно высокой точности определения её пространственного положения и низкого времени отклика от САУ. Соответственно такая система должна уметь ориентироваться в пространстве и решать координатно-измерительные задачи в реальном времени. Эти функции можно реализовать за счёт применения интеллектуальной технологии компьютерного зрения, которая применяется при

решении задач навигации автомобильного транспорта [302]. Однако, для расширения применимости компьютерного зрения, оно должно быть адаптировано к условиям работы в темное время суток.

Современная тенденция совершенствования строительной техники, неразрывно связана с обеспечением возможности максимальной автономности ее работы. Повышение автономности работы тяжелой строительной техники может осуществляться с помощью технологии компьютерного зрения, применяемой в целях обеспечения навигации и управлением ее рабочим органом [189] [304] [292]. Колесным погрузчикам необходима способность идентификации различных объектов и другого оборудования для выполнения задач, связанных с автоматической загрузкой и выгрузкой строительных материалов на автомобили-самосвалы, что достигается применением предварительно обученных глубоких нейронных сетей [307].

Методы распознавания объектов на основе нейронных сетей уже доказали свою эффективность при оценке безопасности проведения землеройных и открытых горных работ [304]. Однако обучение нейронных сетей с нуля требует итеративного сбора потенциально больших объемов видеоданных, что является затруднительным из-за сложности обеспечения безопасной эксплуатации тяжелого оборудования в реальных условиях работы на строительных площадках [189]. Следует также отметить, что вероятность идентификации ВЦ по визуальным признакам [200] существенно превышает вероятность идентификации объекта с помощью обученной нейронной сети [188] [305] [307].

С целью повышения безопасности транспортировки строительной техники был разработан способ применения данного сегмента ВСКЗ в целях контроля параметров погрузки строительной техники своим ходом [308]. При этом была решена геодезическая задача обратной однократной угловой засечки по трем равноудаленным друг от друга ВЦ активного типа, которые устанавливались на грузовой платформе транспортировочного средства [309]. С их помощью строилась локальная систему координат, в которой определялись координаты транспортируемой строительной техники [302]. Основная задача данного сегмента

ВСКЗ в процессе въезда техники на трал заключается в контроле параметров отклонения траектории её движения от продольной оси трала (рис. 4.38). Такой контроль необходим для своевременного обнаружения и предупреждения выхода контролируемых параметров за пределы допуска [302].

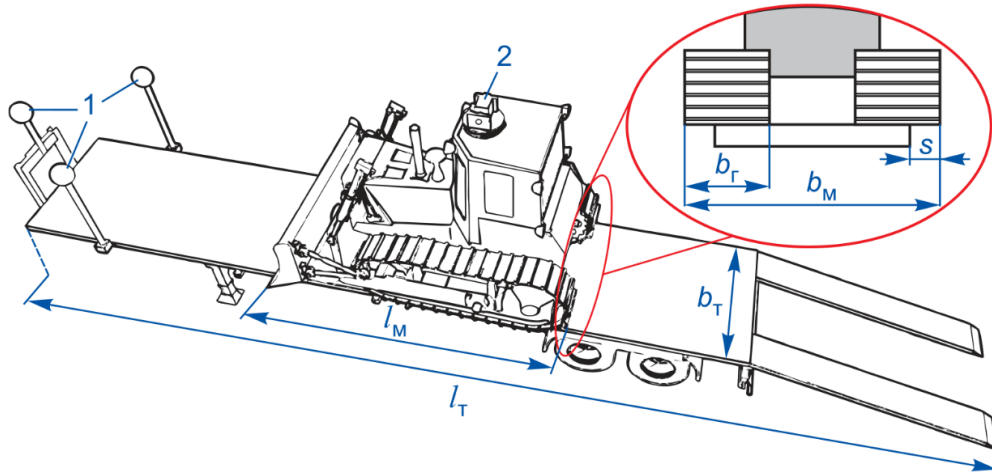


Рисунок 4.38 – Схема размещения ВЦ на грузовой платформе трала: 1 – ВЦ; 2 – ВУ; l_T , b_T – длина и ширина трала; l_M , b_M – длина и ширина гусеничного шасси машины; s – свес гусеницы с края грузовой платформы; b_T – ширина гусеницы

Допустимый свес s гусеницы с края грузовой платформы определяется из выражения:

$$\max(s) = |b_T - b_M + b_T|/2, \quad (4.79)$$

где b_T – ширина грузовой платформы трала;

b_M , b_T – ширина гусеничного шасси и гусеницы машины, соответственно.

Горизонтальный угол χ между продольными осями трала и техники в процессе въезда не должен превышать следующее значение:

$$\max(\chi) = \arctg(2s/l_M), \quad (4.80)$$

где l_M – длина гусеничного шасси машины.

Кроме указанных параметров необходимо контролировать превышение допустимого значения крена трала $\max(\psi)$ – угловое отклонение грузовой платформы трала от горизонтального положения. В случае превышения допустимых значений процесс погрузки техники прерывается для предотвращения схода ее с грузовой платформы и повреждения [302].

Ориентирование ВУ осуществляется по трем ВЦ активного типа, которые излучают видимый свет (мигают) с заданными частотами и образуют локальную систему координат с началом в геометрическом центре этих ВЦ. ВЦ устанавливаются на одинаковом расстоянии друг от друга в плоскости, параллельной грузовой платформе траля. Одна из ВЦ располагается в вертикальной плоскости с продольной осью траля, задавая направление отсчёта азимутального угла. ВУ устанавливается на кабине машины вдоль оси вращения гусеничного шасси. Посредством контроллера формируются управляющие сигналы для гиростабилизированной двухосевой платформы. Главная оптическая ось видеокамеры направляется на центр ВЦ, и та, через объектив проецируется на плоскость изображения видеокамеры. При этом центр проекции ВЦ совпадает с началом координат на плоскости изображения видеокамеры. Направление главной оптической оси видеокамеры (ω – вертикальный угол, λ – дирекционный угол) определяется с помощью энкодеров, устанавливаемых на осях платформы [302].

Поиск ВЦ осуществляется путем изменения направления обзора видеокамеры (ω, λ) с угловым шагом, не превышающим ее углы обзора. При попадании ВЦ в поле зрения видеокамеры определяется форма ВЦ, цвет излучаемого ею видимого света и частота мигания. Каждая из трёх ВЦ имеет своё цифровое обозначение: 1, 2, 3. ВЦ размещаются в плоскости, параллельной грузовой платформе траля, по часовой стрелке в порядке возрастания цифрового обозначения. При этом каждая ВЦ имеет отличительную частоту мигания, по которой её можно идентифицировать. Положение видеокамеры относительно ВЦ определяется по комбинации цифровых обозначений ВЦ в их упорядоченной последовательности [302] (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Определение сектора расположения ВСКЗ по комбинации ВЦ

Группа	G_1			G_2		
Комбинация	213	123	132	312	321	231
Сектор круга φ_0	0	$\pi/3$	$2\pi/3$	π	$4\pi/3$	$5\pi/3$

Комбинация ВЦ указывает на сектор круга φ_0 с центром в начале координат ВЦ, в котором находится машина. Эти комбинации условно подразделяются на две группы: группа G_1 содержит комбинации цифровых обозначений ВЦ (123, 312, 231), группа G_2 содержит комбинации (213, 132, 321). На рисунке 4.39 представлена принципиальная схема, в соответствии с которой ВУ, расположенное в точке D , определяет собственные координаты (r, θ, φ) . ВЦ расположены на одинаковом расстоянии b друг от друга, в точках A, B, C , а в точке O находится их геометрический центр [302].

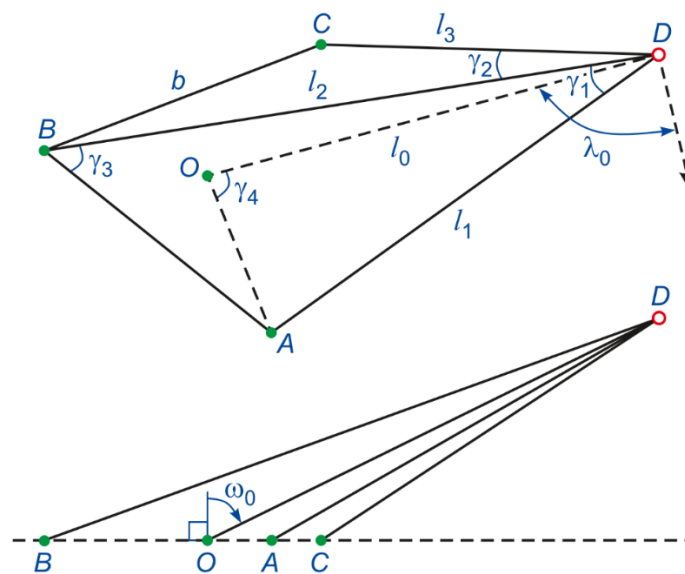


Рисунок 4.39 – Принципиальная схема определения собственных координат ВСКЗ в двух проекциях

Вначале измеряется дирекционные углы $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ направлений на левую, центральную и правую ВЦ. Затем вычисляются модули разности между дирекционными углами центральной ВЦ и двумя крайними ВЦ в соответствии с выражениями:

$$\gamma_1 = |\lambda_1 - \lambda_2| \quad (4.81)$$

$$\gamma_2 = |\lambda_2 - \lambda_3| \quad (4.82)$$

После этого определяется горизонтальный угол, образованный прямой, соединяющей левую ВЦ с центральной, и проектирующим лучом, идущим к видеокамере от центральной ВЦ. Для группы G_1 комбинаций цифровых обозначений ВЦ указанный угол находится из выражения:

$$\gamma_3 = \pi - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3} \operatorname{ctg} \gamma_2 + 1}{2 \operatorname{ctg} \gamma_1 + \operatorname{ctg} \gamma_2 + \sqrt{3}}. \quad (4.83)$$

Для группы G_2 комбинаций выражение принимает вид:

$$\gamma_3 = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3} \operatorname{ctg} \gamma_2 - 1}{2 \operatorname{ctg} \gamma_1 + \operatorname{ctg} \gamma_2 - \sqrt{3}}. \quad (4.84)$$

Также вычисляется горизонтальный угол между прямой, соединяющей левую ВЦ с началом координат, и проектирующим лучом от левой ВЦ. Для группы G_1 комбинаций угол определяется как:

$$\gamma_4 = \frac{7\pi}{6} - \gamma_3 - \gamma_1. \quad (4.85)$$

Для группы G_2 комбинаций угол вычисляется по формуле:

$$\gamma_4 = \frac{5\pi}{6} - \gamma_3 - \gamma_1. \quad (4.86)$$

Длины проекций на горизонтальную плоскость отрезков, соединявших ВСКЗ с левой и центральной ВЦ, вычисляются из выражений:

$$l_1 = \frac{b \sin \gamma_3}{\sin \gamma_1}, \quad (4.87)$$

$$l_2 = \frac{b \sin(\gamma_1 + \gamma_3)}{\sin \gamma_1}. \quad (4.88)$$

Рассчитывается длина проекции на горизонтальную плоскость отрезка, соединявшего ВУ с правой ВЦ, для группы комбинаций G_1 :

$$l_3 = \frac{b \sin(4\pi/3 + \gamma_3)}{\sin \gamma_2}. \quad (4.89)$$

Для группы комбинаций G_2 длину проекции определяют из выражения:

$$l_3 = \frac{b \sin(\pi/3 - \gamma_3)}{\sin \gamma_2}. \quad (4.90)$$

Затем вычисляется длина проекции на горизонтальную плоскость отрезка, соединявшего ВСКЗ с началом координат:

$$l_0 = b \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{\sin^2 \gamma_3}{\sin^2 \gamma_1} - \frac{2 \sin \gamma_3 \cos \gamma_4}{\sqrt{3} \sin \gamma_1}}. \quad (4.91)$$

Зенитный угол θ направления обзора видеокамеры определяется как:

$$\theta = \pi - \omega_0 = \pi - \operatorname{arctg} \left(\frac{l_1 \operatorname{tg} \omega_1 + l_2 \operatorname{tg} \omega_2 + l_3 \operatorname{tg} \omega_3}{3l_0} \right), \quad (4.92)$$

где $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ – вертикальные углы проектирующих лучей от начала координат, левой, центральной и правой ВЦ, соответственно.

Рассчитывается дальность ВУ:

$$r = \frac{l_0}{\cos \theta}. \quad (4.93)$$

Дирекционный угол λ_0 направления на начало координат для комбинаций G_1 :

$$\lambda_0 = \frac{\pi}{3} - \gamma_4 - \arccos \frac{3l_0^2 \sin^2 \gamma_1 - b^2 (\sin^2 \gamma_1 - 3 \sin^2 \gamma_3)}{6l_0 b \sin \gamma_1 \sin \gamma_3}. \quad (4.94)$$

Для группы комбинаций G_2 дирекционный угол определяется из выражения:

$$\lambda_0 = \frac{2\pi}{3} - \gamma_4 - \arccos \frac{3l_0^2 \sin^2 \gamma_1 - b^2 (\sin^2 \gamma_1 - 3 \sin^2 \gamma_3)}{6l_0 b \sin \gamma_1 \sin \gamma_3}. \quad (4.95)$$

Вычисляется азимутальный угол φ направления обзора видеокамеры:

$$\varphi = \varphi_0 + \lambda_0. \quad (4.96)$$

По собственным координатам ВУ рассчитывается горизонтальный угол между продольными осями трала и машины, а также расстояние от вертикальной оси вращения гусеничного шасси машины до продольной оси трала. Эти данные необходимо отображать на встраиваемом в приборную панель компьютере. По ним машинист корректирует направление движения машины в процессе погрузки на платформу. Если машина оснащена САУ, то по этим данным погрузка техники своим ходом на трал может выполняться автоматически [302].

Работоспособность сегмента ВСКЗ проверялась на полнофункциональных физических моделях трала и бульдозера, сделанных в масштабе 1:10. В составе ВСКЗ использовалась видеокамера с разрешением 1280×960 пикселей, фокусным расстоянием 4,4 мм, углом обзора 60° и кадровой частотой 30 Гц. Для эксперимента использовали три ВЦ с частотами мигания 4; 8; 12 Гц. Погрузка техники на трал своим ходом выполнялась в автоматическом режиме по заданному алгоритму работы программы [310] (рис. 4.40).

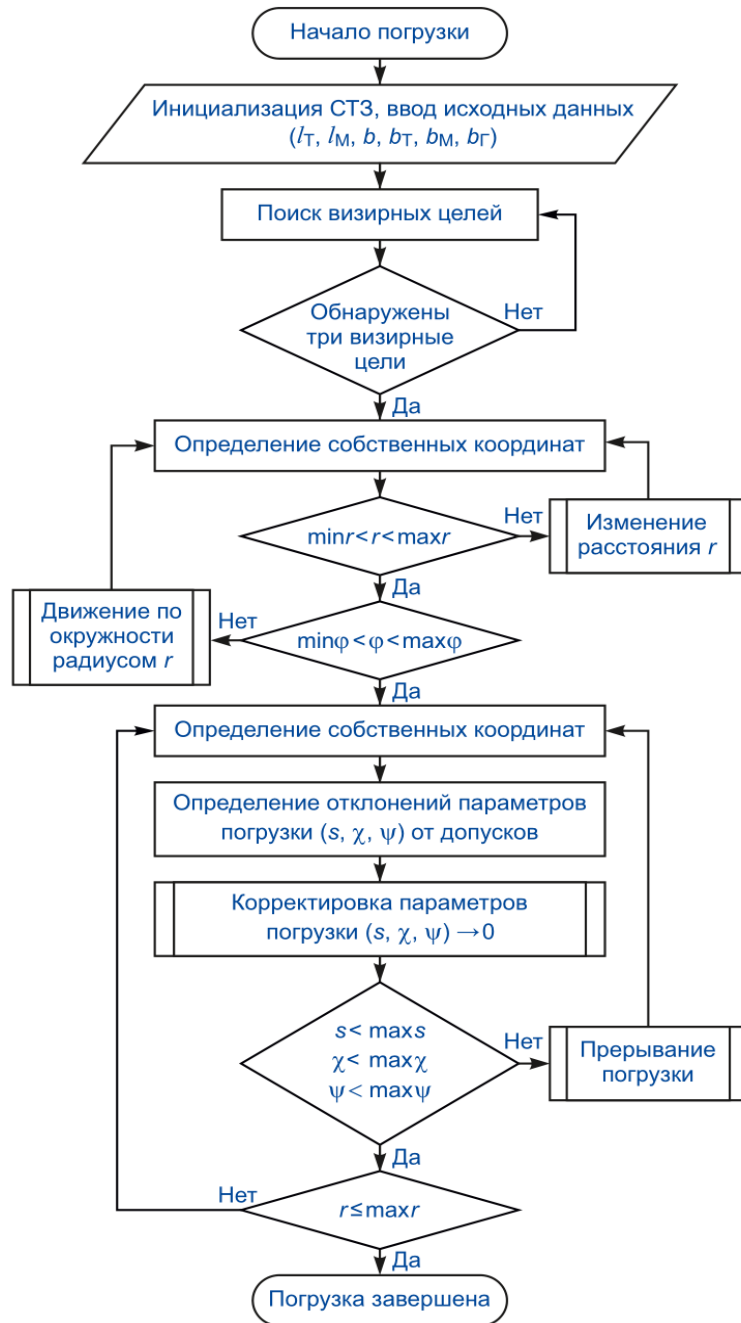


Рисунок 4.40 – Алгоритм погрузки гусеничной техники своим ходом

На первом этапе работы алгоритма данного сегмента ВСКЗ осуществляется поиск ВЦ. Если в поле зрения видеокамеры попадают сразу несколько ВЦ, то дирекционные углы направлений на них вычисляется из выражения

$$\lambda_i = \lambda + \arctg(x_i / f), \quad (4.97)$$

где x_i – абсцисса ВЦ i на плоскости изображения.

После обнаружения и идентификации всех трёх ВЦ определяются собственные координаты ВУ и строится оптимальная траектория движения

машины к грузовой платформе. В процессе въезда машины на платформу по аппаратам сегмент ВСКЗ контролирует, чтобы свес с гусеницы с аппарелей, а также угол между продольными осями трала и машины не превышали допустимых значений. Кроме того, контролировался крен грузовой платформы трала, определяемый из выражения:

$$\psi = |\omega_1 - \omega_3|. \quad (4.98)$$

При достижении заданного значения расстояния $\min(r)$ погрузка завершалась. Разгрузка техники выполнялась задним ходом в обратной последовательности. Если один из указанных параметров превышал допустимое значение, то в целях безопасности процесс погрузки (выгрузки) техники прерывался. В этом случае погрузка возобновлялась только после приведения в ручном режиме контролируемых параметров погрузки к допустимым значениям [302].

Решение задачи по определению координат и пространственного положения ВУ в локальной системе координат, образованной тремя равноудалёнными друг от друга ВЦ, обеспечило возможность ориентирования на местности и навигацию беспилотных дорожно-строительных машин. Кроме этого, ВСКЗ приобрела способность контролировать параметры ряда технологических операций, выполняемых в процесс строительства и эксплуатации ж/д путей. Например, осуществлять контроль параметров погрузки гусеничной техники своим ходом на грузовую платформу трала. По результатам экспериментов с применением физических моделей техники установлено, что ВСКЗ обеспечила контроль параметров отклонения направления движения гусеничной техники от продольной оси трала в пределах установленного допуска [302].

4.4 Контроль параметров геометрии рельсовой колеи

Параметры ГРК характеризуют положение рельсовых нитей в профиле, плане, по уровню и по ширине колеи. В ходе производства работ по текущему содержанию и ремонту пути контролируются такие параметры рельсовой колеи,

как ее ширина, взаимное положение головок рельсов по уровню, стрелы изгиба рельсовых нитей на криволинейных участках пути в плане и профиле [56]. По результатам анализа существующих технических средств для контроля параметров ГРК [53] [60] [311] было установлено, что высокая точность контроля и представление результатов измерений в абсолютных координатах с привязкой к реперной или геодезической сети возможна только за счет совместного применения путеизмерительных комплексов и геодезического оборудования.

Основное преимущество разработанного сегмента ВСКЗ заключается в возможности осуществлять контроль длинных неровностей рельсовой колеи. Большинство из существующих путеизмерительных тележек осуществляют только привязку измеренных параметров к одной из систем координат, но не позволяют контролировать длинные неровности. Такими неконтролируемыми отступлениями на сегодняшний день являются неровности продольного профиля, длиной более 10 м – они не нормируются, а следовательно, и не подвергаются контролю. Это связано с отсутствием нормативов и систем для непосредственного измерения длинных неровностей, а также с тем, что расчетные методы, пока еще, не верифицированы [312].

Соответственно, в состав сегмента ВСКЗ для контроля параметров ГРК были включены путеизмерительная тележка и ВУ для координатных измерений, с помощью которого фиксируется пространственное положение путеизмерительной тележки в процессе ее движения (рис. 4.41). Также был разработан способ применения данного сегмента ВСКЗ для контроля параметров ГРК посредством размещения ВЦ на путеизмерительной тележке [195].

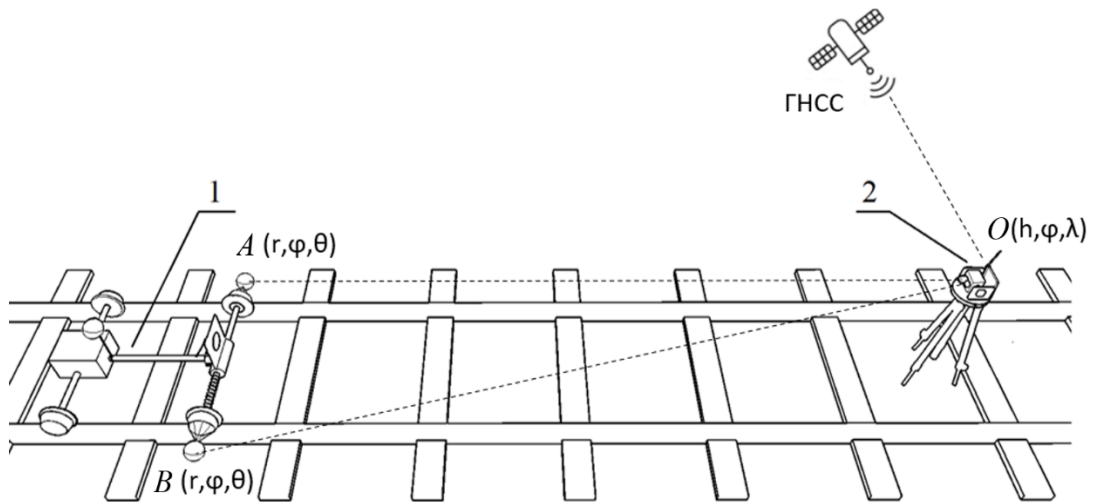


Рисунок 4.41 – Схема размещения компонентов сегмента ВСКЗ для контроля параметров ГРК: 1 – путеизмерительная тележка; 2 – видеограмметрическое устройство

Конструкция путеизмерительной тележки по сравнению с существующими аналогами отличается простотой и более высокой производительностью, обеспечивающей при этом требуемую точность измерений. При этом ВУ выполняет функции координатно-измерительного средства для контроля параметров ГРК, а путеизмерительная тележка с установленными на ней ВЦ является вспомогательным компонентом. Обобщенная структурная схема сегмента ВСКЗ для контроля геометрических параметров рельсовой колеи показан на рисунке 4.42.

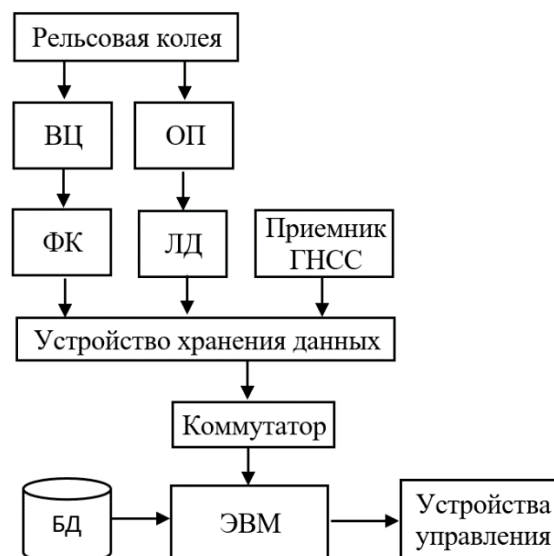


Рисунок 4.42 – Обобщенная структурная схема сегмента ВСКЗ для контроля параметров геометрии рельсовой колеи

Путеизмерительная тележка (рис. 4.43) состоит из двух колесных пар, соединенных между собой опорной рамой. Крепление рамы к передней оси колесной пары осуществляется при помощи шарнирного узла. С его помощью обеспечивается устойчивый контакт передней колесной пары с рельсовой колеей. ВЦ выполнены размещены на обоих концах оси передней колесной пары, при этом центр оси лежит на одной прямой с их центрами. Такая конструкция позволяет устранить возникновение погрешности при изменении углового положения путеизмерительной тележки относительно ее геометрического центра в процессе движения. Еще одна ВЦ прикреплена к корпусу подшипникового узла опорной рамы. На задней колесной паре размещен отсек с электродвигателем, микроконтроллером и аккумуляторной батареей. Колеса передней колесной пары прижимаются к боковым поверхностям рельсов распирающей пружиной, что позволяет определять расстояние между внутренними гранями головок рельсов и контролировать ширину рельсовой колеи [195].

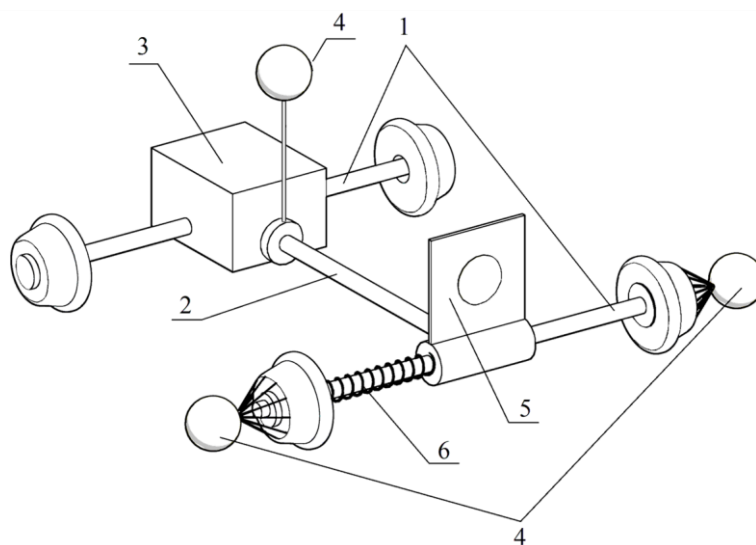


Рисунок 4.43 – Путееизмерительная тележка: 1 – колесная пара тележки; 2 – опорная рама; 3 – отсек размещения электродвигателя, аккумулятора и радиомодуля управления; 4 – ВЦ; 5 – отражательная пластина с визирной маркой; 6 – распирающая пружина

Оснащение путеизмерительной тележки приемником радиосигнала обеспечивает возможность дистанционного управления, что положительно сказывается на производительности и позволяет одному оператору контролировать

весь измерительный процесс. Над осью передней колесной пары размещена пластина отражателя лазерного излучения с визирной маркой в центре. ВЦ и марка на отражательной пластине окрашены в контрастный цвет, что позволяет ВУ обнаруживать их на фоне местности и определять по ним координаты рельсовых нитей с любого ракурса в зоне прямой видимости [195].

ВУ обрабатывает формируемые цифровые снимки с целью обнаружения визирной марки на отражательной пластине. Затем рассчитываются углы отклонения центра визирной марки от главной оптической оси и формируются управляющие команды для двухосевой платформы, которая с помощью встроенных в нее шаговых двигателей наводит фотокамеру и лазерный луч дальномера на отражательную пластину. Направление вектора главной оптической оси фотокамеры определяется абсолютными оптическими энкодерами, также находящимися на осях платформы. Отслеживание визирной марки и наведение производится системой автоматически в режиме реального времени. С помощью радиопередатчика осуществляется удаленное управление путеизмерительной тележкой [195].

Схема информационных потоков в сегменте ВСКЗ для контроля параметров ГРК изображена на рисунке 4.44. Из схемы видно, что в процессе своего движения, путеизмерительная тележка передает посредством ВЦ, размещенных на оси передней колесной пары, форму кривых, образованных точками контакта колес с головками рельсов. ВУ в составе сегмента ВСКЗ вычисляет положение ВЦ на видеоизображении и, принимая в расчет расстояние до тележки, измеренное лазерным дальномером, определяет различные параметры ГРК [195].

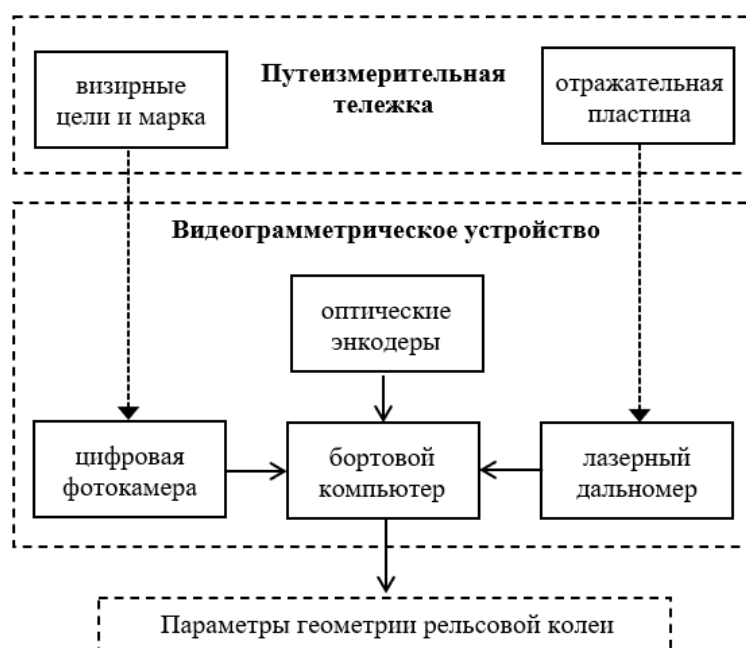


Рисунок 4.44 – Схема информационных потоков в сегменте ВСКЗ для контроля параметров ГРК

После того, как путеизмерительная тележка приблизится к ВУ на расстояние, при котором ВЦ окажутся вне поля его зрения, оно переустанавливается в конечную точку следующего контролируемого участка пути. Максимально допустимое удаление от путеизмерительной тележки определяется техническими характеристиками используемой видеокамеры и требованиями к точности получаемых результатов измерений. Каждая перестановка ВУ сопровождается его повторной привязкой к геодезической или реперной ж/д сети, в процессе которого определяются координаты ВУ [195].

Угловое положение ВЦ ($\Delta\omega$, $\Delta\psi$) вычисляется относительно главной оптической оси, в то время как само направление оси (φ , θ) относительно точки съемки определяется оптическими энкодерами. Принимая в расчет расстояние r с которого было получено изображение, вычисляются координаты центров ВЦ в собственной прямоугольной системе координат фотокамеры и в сферической системе координат ВСКЗ ($\varphi + \Delta\omega$, $\theta + \Delta\psi$, l) относительно точки съемки O . В этой точке размещается ВУ (рис. 4.45, а), которое обнаруживает визирную марку и наводит главную оптическую ось, а также луч лазерного дальномера в некоторую точку C на отражательной пластине, прикрепленную над осью передней колесной

пары. Расстояние OC измеряется с помощью лазерного дальномера. Точками A , B и D заданы координаты центров ВЦ, которые располагаются на концах оси передней колесной пары тележки и на опорной раме, соответственно. При этом расстояние AC является известным и неизменным, в то время как BC изменяется под воздействием распирающей пружины в зависимости от ширины рельсовой колеи. Оптические лучи OA , OB и OD пересекают в точках A , B и D центры ВЦ. Проекции точек A и B на главную оптическую ось обозначены A' и B' , соответственно [195].

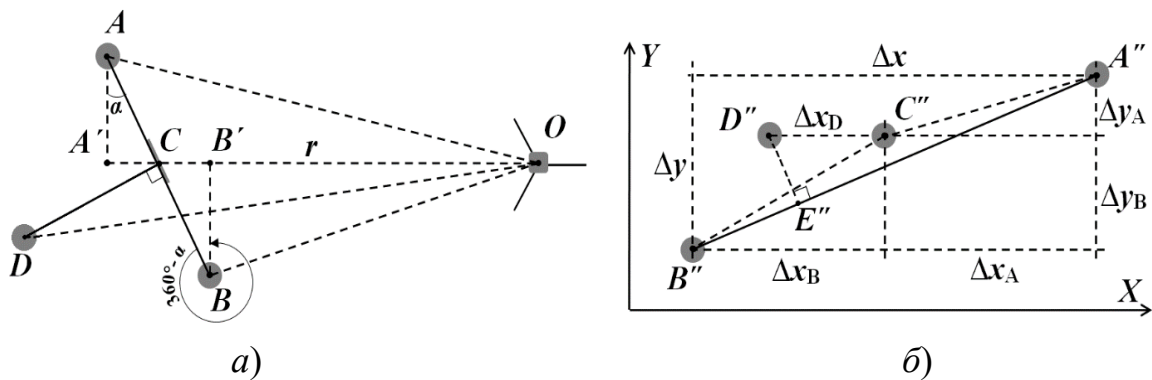


Рисунок 4.45 – Схема вычисления координат ВЦ:
а) вид сверху; б) фронтальный вид на изображении камеры

ВЦ и марка проецируются на ПЗС-матрицу ВУ в виде изображений с центрами в точках A'' , B'' , C'' и D'' . Если на изображении построить прямоугольную систему координат, то Δx и Δy будут обозначать расстояния между центрами ВЦ в точках A и B по осям X и Y . Эти расстояния необходимы для вычисления в сферической системе координат местоположения любой точки $M(r_M, \varphi_M, \theta_M)$, расположенной на прямой AB . Например, можно вычислить координаты правой ВЦ с центром в точке A . Ее угловое положение в системе координат ВУ ($\Delta\omega_A, \Delta\psi_A$) определяется из выражения:

$$A \left(\arctg \frac{\Delta x_A}{f}, \arctg \frac{\Delta y_A}{f} \right). \quad (4.99)$$

Чтобы получить расстояние до ВЦ вначале необходимо вычислить длину отрезка $A''C''$ из выражения:

$$A''C'' = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}. \quad (4.100)$$

Длина $A''C''$ на плоскости изображения камеры выражена через пиксели. Для ее преобразования в метрическую меру длины необходимо рассчитать коэффициент преобразования (множитель):

$$k = \frac{OC}{f} px, \quad (4.101)$$

Затем определяется угол между прямой, проходящей через центры ВЦ и плоскостью изображения видеокамеры:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{A''C''}{AC}k\right). \quad (4.102)$$

Расстояние до точки A вычисляется из выражения:

$$r_A = \sqrt{(AA')^2 + (OC + CA')^2} = \sqrt{(A''C''k)^2 + (r + AC \sin \angle A'AC)^2}, \quad (4.103)$$

где

$$\angle A'AC = \begin{cases} 360^\circ - \alpha, & \text{если } \Delta x_D > 0 \\ \alpha, & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (4.104)$$

Расстояние до точки B :

$$r_B = \sqrt{(BB')^2 + (OC - CB')^2} = \sqrt{(B''C''k)^2 + (r + BC \sin \angle B'BC)^2}, \quad (4.105)$$

где

$$\angle B'BC = \begin{cases} 360^\circ - \alpha, & \text{если } \Delta x_D < 0 \\ \alpha, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4.106)$$

Чтобы определить точку контакта колеса тележки с рельсом необходимо вычислить на прямой AB координаты точки M , которой обозначим центр колеса с прикрепленной к нему ВЦ A . При этом точка M будет располагаться над внутренней гранью головки рельса. Координаты ВЦ переводятся из сферической (r, θ, φ) в прямоугольную (x, y, z) систему координат с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases}. \quad (4.107)$$

Обозначив $\overrightarrow{AB}(AB_x, AB_y, AB_z)$ направляющий вектор прямой AB , вычисляются его координаты из системы уравнений:

$$\begin{cases} AB_x = x_A - x_B \\ AB_y = y_A - y_B \\ AB_z = z_A - z_B \end{cases} \quad (4.108)$$

Следовательно, параметрические уравнения прямой AB можно записать:

$$\begin{cases} x = x_A - AB_x \lambda \\ y = y_A - AB_y \lambda \\ z = z_A - AB_z \lambda \end{cases} \quad (4.109)$$

где λ – параметр уравнения.

Поскольку длина отрезка AM известна, то можно вычислить параметр λ :

$$\lambda = AM / AB. \quad (4.110)$$

Длина отрезка AB вычисляется из выражения:

$$AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \quad (4.111)$$

Для вычисления координат центра колеса, обозначенной точкой N , необходимо решить параметрическое уравнение прямой AB :

$$\begin{cases} x = x_B + AB_x \lambda \\ y = y_B + AB_y \lambda \\ z = z_B + AB_z \lambda \end{cases} \quad (4.112)$$

Вычислив, таким образом, координаты центров колес $M_i(x_M, y_M, z_M)$ и $N_i(x_N, y_N, z_N)$ для каждой i -ой точки ж/д пути, определяются текущие координаты его оси $(x_{MN\ i}, y_{MN\ i}, z_{MN\ i})$ из выражений:

$$x_{MN\ i} = \frac{x_{Mi} + x_{Ni}}{2}, \quad (4.113)$$

$$y_{MN\ i} = \frac{y_{Mi} + y_{Ni}}{2}, \quad (4.114)$$

$$z_{MN\ i} = \frac{z_{Mi} + z_{Ni}}{2}. \quad (4.115)$$

Редуцирование координат $(x_{MN\ i}, y_{MN\ i}, z_{MN\ i})$ оси ж/д пути с центров колес на уровень головок рельсов осуществляется по известным в геодезии вычислительным процедурам с получением значений координат

$(x_{ocu\ i}, y_{ocu\ i}, z_{ocu\ i})$ оси пути (редуцированные). Ширина рельсовой колеи S_i в каждой i -ой точке определяется длиной отрезка MN из выражения:

$$S_i = \sqrt{(x_{M\ i} - x_{N\ i})^2 + (y_{M\ i} - y_{N\ i})^2 + (z_{M\ i} - z_{N\ i})^2} \quad (4.116)$$

Уровень рельсовых нитей, под которым понимается разница в расположении верха головок рельсов по высоте, определяется из выражения:

$$\Delta Z_i = Z_{M\ i} - Z_{N\ i} \quad (4.117)$$

В процессе контроля параметров ГРК встроенный компьютер, в соответствии с вычислительной программой [313], по координатам ВЦ строит две пространственные кривые, характеризующие изгибы рельсовых нитей в плане и профиле [195]. Кроме этого, данный сегмент ВСКЗ также может быть применен для контроля состояния ж/д пути под нагрузкой посредством размещения ВЦ на передней оси колесной пары путеизмерительных вагонов.

4.5 Повышение безопасности грузопассажирских перевозок

Ж/д транспорт является одним из наиболее эффективных и одновременно уязвимых видов транспорта. Гораздо более низкая сила трения качения стальных колесных пар поезда по рельсам в сравнении с силой трения качения автомобильных покрышек по асфальтовому покрытию дороги позволяет существенно снизить стоимость и ускорить грузопассажирские перевозки. Однако, помимо этого преимущества, имеется и ряд недостатков. Обладая большой массой и, как следствие, большой кинетической энергией, поездам требуется более длинный тормозной путь. Учитывая, что рельсы не позволяют поезду маневрировать, очень сложно избежать столкновения при неожиданном появлении на путях препятствия [314]. Несмотря на то, что абсолютное большинство машинистов квалифицированно управляют подвижным составом, проявляют высокую бдительность, не допуская нарушений инструкций и Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [315], возникают непредвиденные ситуации, приводящие к авариям, иногда с тяжелыми последствиями, которые вносят серьезные затруднения в организацию нормальной

работы ж/д сети. Анализ состояния безопасности движения на железных дорогах за длительный период показывает, что еще продолжают иметь место грубые нарушения, такие как проезды запрещающих сигналов и превышение установленных скоростей [316]. Это свидетельствует о недостаточном уровне организации безопасности движения ж/д транспорта и обуславливает необходимость принятия дополнительных мер, способствующих его повышению [314]. В качестве одной из таких мер рассматривается возможность применения технологии компьютерного зрения в системе безопасности движения поездов [253]. Интеграция ВСКЗ в систему безопасности движения поезда обеспечит своевременное информирование машиниста об угрозе возможного столкновения с препятствием на путях ж/д состава.

В настоящее время предусмотрен целый комплекс различных мер, направленный на обеспечение безопасности ж/д перевозок. В первую очередь – это изоляция ж/д участков путем их ограждения, создание пересечений с автомобильными и железными дорогами на разных уровнях. Для предотвращения столкновений, переезды организовываются на прямых, хорошо просматриваемых участках пути, оборудуются сигнализацией и шлагбаумами. Управление сигнализацией производится на специальных постах электрической централизации, расположенных на определённых интервалах вдоль ж/д путей или в единых региональных контрольных центрах. Пути поделены на отдельные зоны (блок-участки), контролируемые сочетанием светофоров, правил и автоматических контрольных систем, таким образом, что на одном участке может находиться только один поезд, а длина блок-участка должна быть не меньше тормозного пути при полном торможении для максимальной скорости движения [315]. На каждом участке применяется система автоматического регулирования интервалов между поездами, попутно следующими по ж/д перегону. Локомотивы, мотор-вагонный и некоторые другие типы подвижного ж/д состава, используемые для перевозки пассажиров, специальных и опасных грузов, оснащаются аппаратурой спутниковой навигации (ГЛОНАСС, GPS и др.) [314].

Помимо вышеперечисленных мер существует также комплекс технических средств ж/д автоматики, который включает в себя устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС) предназначена для предотвращения проезда запрещающего сигнала и служит для постоянной передачи на локомотив показаний путевого светофора. АЛС дополняет автоблокировку, особенно в условиях плохой видимости из-за тумана, дождя, снегопада и в других сложных условиях, когда машинист не всегда может различить показания светофора своевременно. Локомотивный светофор, находящийся в кабине машиниста, дублирует показания (цвет огня) путевого светофора, к которому приближается локомотив, получая их по тем же рельсовым цепям, что и устройства автоблокировки. Однако, вследствие несовершенства конструкции и низкого уровня технического содержания АЛС, могут происходить сбои в ее работе [317].

Частые отказы рельсовых цепей происходят по трем причинам: загрязнения балласта в результате потерь перевозимого в вагонах токопроводящего груза, обрывы шунтирующих соединений на стыках, нарушение изоляции. Кроме того, искажение информации может происходить из-за создания взаимных помех от гармонических составляющих тягового тока, контрольных токов цепей электрической централизации станционных устройств, кодовых сигналов от соседних путей и находящегося впереди блок-участка, а также от впереди идущего поезда. Нередко происходят отказы аппаратных средств этой системы на локомотиве: скоростемера, электрического монтажа, устройств безопасности. Неполадки в АЛС могут повлечь проезд запрещающих сигналов путевых светофоров. Практически каждый девятый проезд запрещающего сигнала оканчивается аварией или крушением, и в этом немалую роль играют частые отказы рельсовых цепей, которые составляют основу работы АЛС, системы автоматического управления тормозами и других устройств безопасности, установленных на локомотиве [318].

Причинами крушений могут также являться неисправности стрелочных переводов, падение на путь различных деталей вагонов, застрявшие на переезде

автомобили, последствия оползней, размывы пути, снижение видимости сигналов, а также человеческие факторы. Действительно, около половины несчастных случаев обусловлено именно психологическими или социально-психологическими причинами [317], которые приводят к ошибкам машинистов локомотивов, вследствие: отвлечения их внимания от управления движением поезда или локомотива; отсутствия контроля за показаниями каждого сигнала по пути передвижения по станциям; снижения бдительности и увеличения времени реакции из-за усталости в конце рабочего дня, после алкогольного опьянения, повышенной температуры в кабине и высокой влажности [318].

Машинист на основе воспринимаемой информации оценивает ситуацию и производит управляющее действие на состав, поэтому очень важно, чтобы воспринимаемая им информация соответствовала действительности. Информация, получаемая только от устройств АЛС, машинисту бывает часто недостаточна, но и на свои органы чувств он не должен полагаться полностью. Известно, что динамический глазомер в светлое и темное время суток, а также в начале и в конце рабочего дня значительно изменяется. Предметы с разной освещенностью воспринимаются различными механизмами восприятия света: более яркие – центральным зрением, более темные – боковым. Центральное зрение различает форму, размеры и цвет, а боковое – только черное и белое, и общую ориентировку в пространстве. При резком изменении освещенности, глаз переключается с одной системы рецепторов на другую, поэтому некоторое время машинист не видит, так как сетчатке глаза необходимо время для адаптации. Это время с возрастом увеличивается. В темноте пропадает объемность восприятия, резко снижается видимость промежуточных ориентиров перед сигналом и очень легко ошибиться в выборе дистанции для торможения: разброс ошибок машинистов в определении расстояния в 4 раза больше, чем в определении скорости [318].

Анализ проездов запрещающих сигналов показывает, что их причиной часто бывает не отказ тормозов, а неумение правильно оценить расстояние до сигнала, т.е. позднее применение тормозов. В дождь, сумерки и туман эта дистанция представляется значительно длиннее действительной, поэтому тормозной путь

больше расстояния до сигнала [318]. Существенную помощь машинисту могут оказать ВСКЗ, построенные на базе ИК камер, работающих в среднем (3 – 5 мкм) и коротковолновом диапазоне спектра (0,9 – 1,7 мкм). Они позволяют визуализировать ИК-изображение в видимом для человеческого глаза диапазоне спектра и передать качественную картинку местности в любое время суток и при любых погодных условиях: полная темнота, снег и дождь (рис. 4.46), дым и туман. Благодаря присутствию в таких камерах объектива, обладающего свойством оптического приближения, у машиниста появляется возможность издалека обнаружить препятствие на путях в сложных метеоусловиях и успеть выполнить торможение [314].

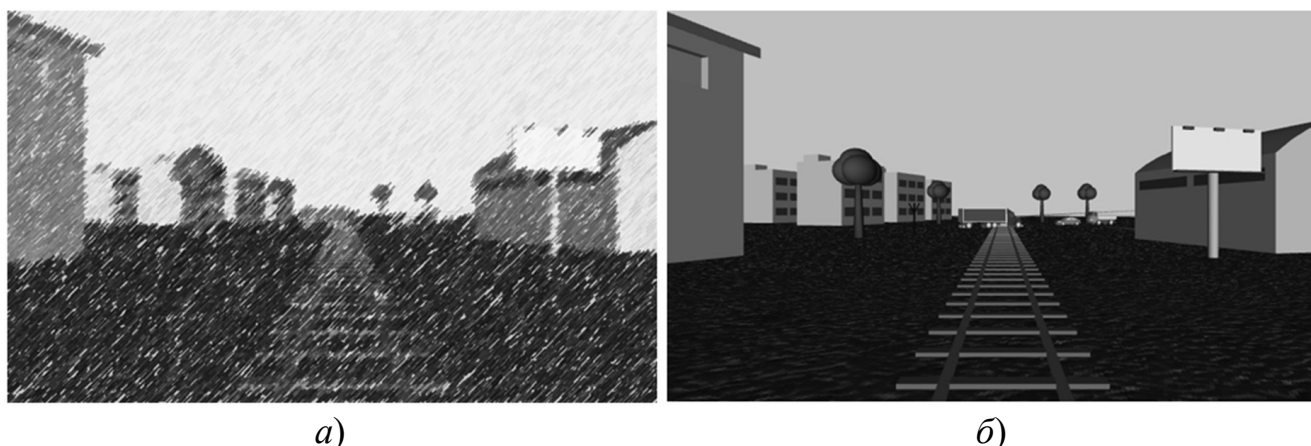


Рисунок 4.46 – Смоделированный вид в сложных метеоусловиях: а) из кабины машиниста; б) на информационном экране машиниста, полученный с помощью коротковолновой ИК-камеры

Использование в беспилотных транспортных системах управления движением поездов технологии компьютерного зрения определяет актуальность создания алгоритмов обработки информации, обеспечивающих высокий уровень безопасности управления [319]. Подобные системы можно наделить рядом других полезных свойств, например, определять расстояние до объектов на путях, а также их размеры, скорость и направление движения. Основным предназначением ВСКЗ при их интеграции в систему безопасности движения поезда станет заблаговременное обнаружение объектов, находящихся на путях в зоне их прямой видимости. Для этого, ВСКЗ должна обладать следующими способностями: выполнять одновременную обработку нескольких кадров видеоизображения,

проводить сегментацию изображений, обнаруживать на них идентичные области, определять изменение размера и положения областей изображения по двум кадрам. Структурная схема данного сегмента ВСКЗ, предназначенного для обеспечения безопасности движения ж/д транспорта показана на рисунке 4.47.

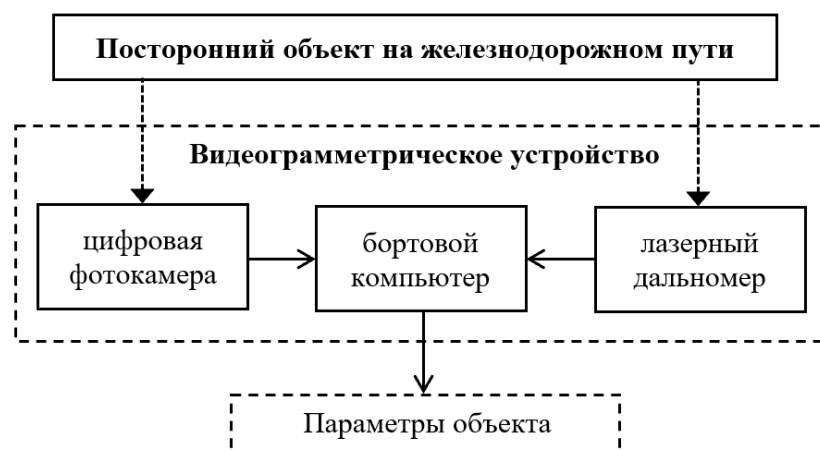


Рисунок 4.47 – Схема обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта

Сегментация является ключевым звеном в цепочке операций по обработке изображения и позволяет установить принадлежность всех составляющих его пикселей к запечатленным на нем объектам [159]. Процесс сегментации направлен на обнаружение изолированных по цвету областей, состоящих из связанных друг с другом пикселей, цвет которых находится в одном цветовом диапазоне. Каждый пиксел в такой области связан, по крайней мере, с одним из соседних, которые образуют некоторое подмножество связанных с ним пикселей [199].

Методы, применяемые для обработки видеоизображения, будут отличаться в зависимости от выбранного типа устройства компьютерного зрения: моно-стереофотограмметрическое или комбинированное. В случае использования монофотограмметрического устройства, оснащенного одной видеокамерой, выполняется анализ областей для каждого кадра видеоизображения по цвету или уровню яркости в зависимости от способности используемой видеокамеры передавать цвет объектов.

После определения принадлежности всех пикселей на изображении к тем или иным областям, производится сопоставление размеров получившихся областей по двум кадрам видеоизображения с помощью выражения:

$$L(t) = F_2 \frac{F_1(h_1 - h_2) - v h_1 \Delta t}{F_2 h_1 - F_1 h_2}, \quad (4.118)$$

где F_1 и F_2 – граничные фокусные расстояния оптической системы;

h_1 и h_2 – размеры изображения объекта при F_1 и F_2 , соответственно;

v – скорость поезда;

Δt – интервал времени, за который получены два кадра изображения.

Поскольку кадры формируются через некоторый период, следует учитывать, что точка съемки в процессе движения поезда будет меняться, и изображения объектов получатся с разных ракурсов. Соответственно цвет или уровень яркости одного и того же объекта на двух разных кадрах может отличаться. Поэтому выбор областей для сопоставления на этих кадрах производится по двум критериям: близость положения центров сравниваемых областей и схожесть средних значений их компонентов цвета. Найденные расстояния до объектов позволяют составить карту глубины и объединить те смежные области на изображении, которые находятся на одинаковом удалении от точки съемки.

Данный метод сегментации применим и для обработки стереопар изображений, формируемых стереофотограмметрическим устройством, состоящим из двух камер. В этом случае расстояние до идентичных областей изображений определяются путем сравнения их местоположения на двух полученных кадрах с помощью выражения:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = b \sqrt{\left(\frac{x_1 + x_2}{2(x_1 - x_2)}\right)^2 + \left(\frac{y_1 + y_2}{2(y_1 - y_2)}\right)^2 + \left(\frac{F}{x_1 - x_2}\right)^2}, \quad (4.119)$$

где (X, Y, Z) – координаты наблюдаемого объекта в системе координат с центром в середине прямой, соединяющей центры объективов видеокамер;

(x_1, y_1) и (x_2, y_2) – координаты проекции наблюдаемого объекта в картинной плоскости первой и второй видеокамеры, соответственно;

b – расстояние между оптическими осями видеокамер.

После формирования карты глубины и объединения смежных областей, равноудаленных от точки съемки, можно определить скорость и направление движения изображенных объектов. В случае применения комбинированного устройства, в состав которого помимо камеры входит дальномер [320], измеряющий расстояние до объекта, отпадает необходимость проводить сегментацию и остается только определить до какого из объектов на кадре было измерено расстояние. Если оптическая ось камеры и луч дальномера сонаправлены, то изображение объекта, до которого измеряется расстояние, будет находиться в центре кадра.

Оценка погрешности определения ВСКЗ дальности препятствий на пути следования поезда проводилась с помощью программного средства имитационного моделирования, в котором была создана следующая аварийная ситуация. На путях следования ж/д состава, движущегося в условиях недостаточной видимости (рис. 4.46), в месте переезда застрял грузовой автомобиль. ВСКЗ, только с помощью одной видеокамеры, без применения лазерного дальномера, фиксирует препятствия на путях и определяет расстояние, на котором оно находится, а также его видимые габариты.

Заданы следующие параметры имитационной модели: поезд движется по прямолинейному участку пути со скоростью 10 м/с; на расстоянии 500 метров впереди поезда помещен грузовой автомобиль; частота формирования кадров видеоизображения виртуальной камерой составляет 1 Гц. В качестве видеокамеры, имитирующей видеоизображение из кабины машиниста, была использована виртуальная видеокамера, которая выполняла визуализацию моделируемого процесса, отображая на экране монитора окно трехмерной анимации. Виртуальная видеокамера имела фокусное расстояние 1 мм, разрешение 1920 x 1080 пикселей и физический размер пикселя матрицы 1,2 мкм [199].

Обработка видеоизображения проводилась в соответствии с разработанной методикой применения устройств компьютерного зрения для повышения безопасности движения ж/д транспорта [253]. На рисунке 4.48 представлена диаграмма, отображающая относительную погрешность определения с помощью

ВСКЗ расстояния до грузового автомобиля в зависимости от действительного значения этого расстояния.

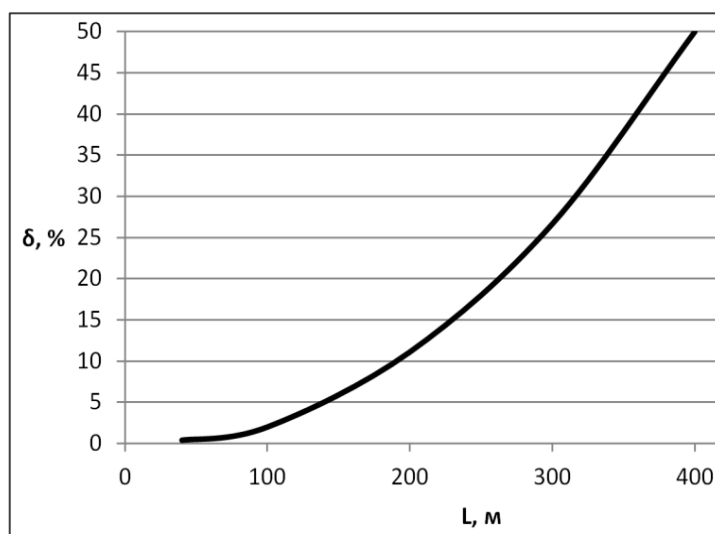


Рисунок 4.48 – Диаграмма изменения относительной погрешности измерения расстояния

Относительная погрешность определения ВСКЗ дальности препятствия увеличивается по мере увеличения расстояния до него. В связи с этим на большом расстоянии до препятствия, полученные результаты измерений нельзя считать достоверными. Соответственно, для повышения диапазона измерений дальности в ВСКЗ необходимо применять видеокамеры с длиннофокусными объективами, а также использовать методы цифровой обработки изображений, обеспечивающие погрешность измерений видимых размеров препятствий на изображении в субпиксельном диапазоне.

4.6 Выводы по четвертой главе

По результатам имитационного моделирования был оценен эффект от применения разработанной комплексной ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути, состоящей из четырех сегментов (табл. 4.3), в совокупности, обеспечивающих повышение оперативности производства строительно-восстановительных работ на участке ж/д пути. В частности, было выявлено следующее:

1. Применение сегмента ВСКЗ для оценки состояния железных дорог с помощью БпЛА позволяет в среднем на 75 % быстрее получать информацию о его состоянии и координаты места повреждения участка ж/д пути по сравнению с диагностическими комплексами на комбинированном ходу.

2. Проект строительно-восстановительных работ формируется до 10 раз быстрее с применением трехмерных моделей ж/д пути, а также сегмента ВСКЗ для планово-высотного обоснования и выноса проекта железных дорог в натуру, по сравнению с применением геодезических планов местности и ручного измерительного инструмента.

3. Применение сегмента ВСКЗ для контроля параметров погрузки (выгрузки) гусеничной техники снижает риск ее повреждения, что влияет на время восстановления ж/д пути. В случае опрокидывания транспортируемой техники в процессе ее выгрузки увеличивает время восстановления ж/д пути вследствие необходимости доставки другой строительной техники к месту производства строительно-восстановительных работ.

4. Дорожно-строительные машины, снабженные системами геодезического управления рабочими органами, обеспечивают сокращение числа проходов по сравнению с ручным управлением до 2 раз для бульдозера и скрепера, а для автогрейдера до 75%. Соответственно, применение сегмента ВСКЗ для контроля геометрических параметров нижнего строения ж/д пути, обеспечивающего определение координат и пространственного положения рабочего органа дорожно-строительных машин, производительность земляных работ для бульдозера и скрепера повышается до 2 раз, а для автогрейдера до 67 %.

5. Современные путеизмерительные тележки позволяют контролировать пространственное положение ж/д пути с помощью электронного тахеометра, однако производительность этих комплексов очень низкая и составляет около 1 км/ч. Производительность разработанного сегмента ВСКЗ для контроля параметров ГРК составляет более 3 км/ч, что позволяет повысить оперативность контроля параметров геометрии верхнего строения ж/д пути до 2 раз.

Таблица 4.3 – Оценка оперативности применения сегментов ВСКЗ для контроля геометрических параметров железнодорожного пути

Этапы производства строительно- восстановительных работ	Длина участка ж/д пути, км	Время выполнения работ традиционными средствами контроля, час	Время выполнения работ с помощью разработанных сегментов ВСКЗ, час	Повышение оперативности работ
Применение БпЛА для формирования трехмерной модели строящегося или поврежденного участка ж/д пути	100	Автомобиль на комбинированном ходу – до 2,22 часов	Сегмент ВСКЗ с БпЛА – до 1,6 часов	до 75 %
Формирование проекта строительно-восстановительных работ и вынос проекта железных дорог в натуру	1	Ручной измерительный инструмент и геодезические планы местности – до 1 часа	Сегмент ВСКЗ с БпЛА и трехмерные модели ж/д пути – до 6 минут	до 10 раз
Доставка строительной техники к месту проведения строительных или ремонтных работ	100	В случае опрокидывания строительной техники – до 6 часов	Сегмент ВСКЗ для контроля параметров погрузки техники – до 3 часов	до 2 раз
Операционный контроль формы и геометрических параметров земляного полотна железной дороги	1	Геодезическое оборудование – до 1 часа	Сегмент ВСКЗ для контроля пространственного положения рабочего органа – до 20 минут	до 75 %
Приемочный контроль параметров геометрии рельсовой колеи, вводимого в эксплуатацию участка железной дороги	1	Путеизмерительная тележка – до 1 часа	Сегмент ВСКЗ для контроля параметров ГРК – до 30 минут	до 2 раз
Итого	100	до 11, 22 ч	до 6 ч	до 2 раз

Таким образом, разработанная ВСКЗ позволяет решать большое многообразие стандартных контрольно-измерительных задач. Отличительной особенностью перспективной ВСКЗ является её многофункциональность и приспособляемость к решению специфических измерительных задач. Эта особенность дает возможность разрабатывать дополнительные программы и отличается простотой их установки на вычислительное устройство ВСКЗ с целью расширения ее функциональности.

Применение в САПР трехмерных моделей, сформированных с помощью разработанного сегмента ВСКЗ для мониторинга и оценки технического состояния железных дорог, позволяет повысить производительность выполнения проектных работ, а также снизить вероятность появления ошибок на этапе проектирования. Дальнейшее повышение эффективности применения САПР для проектирования земляных работ может быть достигнуто за счет использования в качестве исходных данных нормативно-справочных и инструктивных материалов, а также путем внедрения в их состав экспертных систем, основанных на опыте проектировщиков.

Применение в ВСКЗ разработанной технологии видеограмметрического позиционирования позволило автоматизировать процесс производства земляных работ. При этом с помощью ВСКЗ появилась возможность контролировать плановое и высотное положение рабочего органа строительной техники, а также отклонение вектора ее перемещения от заданной траектории движения. Благодаря определению пространственного положения рабочего органа все операции по производству земляных работ могут выполняться в автоматическом режиме, что способствует повышению производительности и точности выполнения технологических операций производства земляных работ в процессе строительства земляного полотна ж/д пути.

Применение разработанного сегмента ВСКЗ для операционного контроля пространственного положения дорожно-строительных машин в процессе выполнения операции по их погрузке своим ходом на грузовую платформу снижает риск повреждения техники, особенно в условиях недостаточной видимости. При интеграции компонентов ВСКЗ в систему автоматического управления техникой, операция погрузки техники может осуществляться под управлением ВСКЗ в автоматическом режиме.

Благодаря применения в сегменте ВСКЗ, предназначенного для контроля параметров ГРК, технологии компьютерного зрения стало возможным осуществлять контроль длинных неровностей рельсовой колеи и достигнуть более высокого уровня автоматизации процесса контроля, что расширяет возможности ВСКЗ и приводит к значительному приросту ее производительности. Кроме этого,

данный сегмент ВСКЗ также может быть использован для контроля геометрических параметров рельсовой колеи под нагрузкой посредством размещения ВЦ на передней оси колесной пары путеизмерительных вагонов.

Перспективная ВСКЗ также может применяться для обнаружения препятствий на пути следования поезда в условиях недостаточной видимости, что дает возможность машинисту оперативно оценить возникшую опасную ситуацию и произвести экстренное торможение для предотвращения аварии. Помимо обнаружения препятствий на путях, ВСКЗ способна определять визуальные сигналы, в том числе дублировать сигналы путевых светофоров, фиксируя их на больших расстояниях. Также ВСКЗ может оказаться полезной для визуального оповещения на информационном экране машиниста места остановки ж/д состава, исходя из расчета тормозного пути.

5 МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИДЕОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Оптико-электронные устройства являются составной частью многих ИИУС. Сложность задач, решаемых ИИУС, постоянно увеличивается, а требования к их техническим и метрологическим характеристикам повышаются. При этом все острее встают вопросы повышения надежности и точности этих систем, особенно для таких важных направлений, как безопасность и автоматизация процессов управления техникой. ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути разрабатывалась на базе оптико-электронных средств измерений, в том числе сканирующих. Погрешность ВСКЗ зависит от множества факторов, и задача метрологического анализа состоит в том, чтобы эти факторы выявить, установить степень их влияния, характер проявления каждого из них и найти способы для их устранения или компенсации. На рисунке 5.1 приведена блок-схема, отражающая всю совокупность измерительных операций с помощью ВСКЗ, построенной на базе радиоэлектронных и оптико-электронных средств измерений.

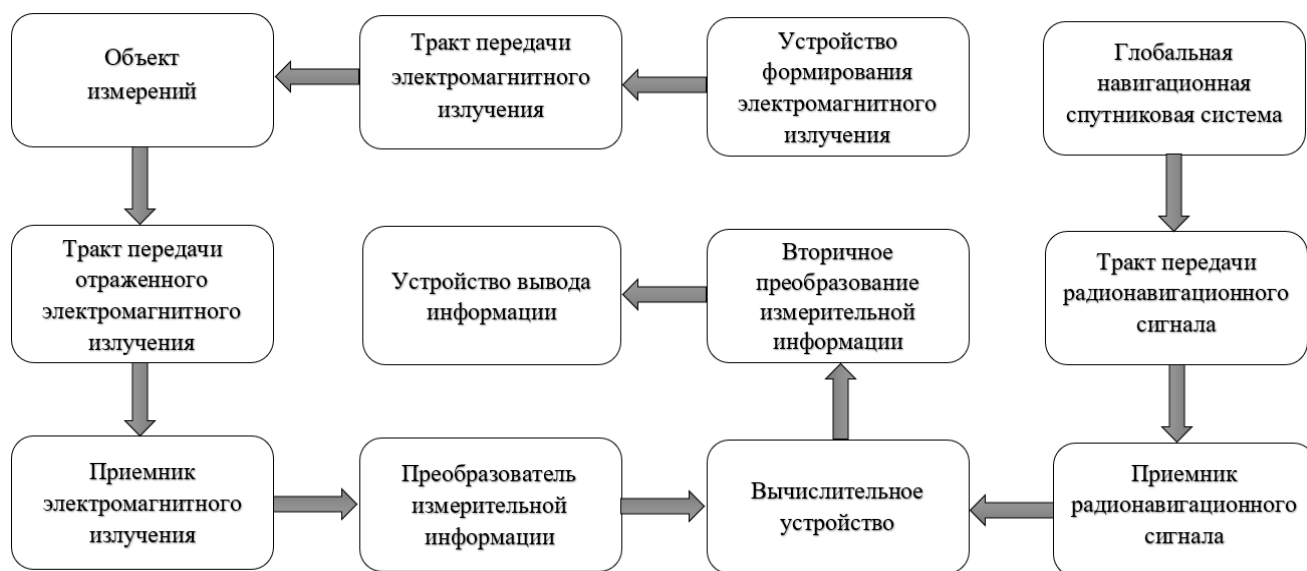


Рисунок 5.1 – Схема преобразования измерительной информации в ВСКЗ

На точность измерений ВСКЗ оказывают условия распространения излучения в измерительном тракте. Носителем исходной информации для ВСКЗ является сам объект измерений, поверхность которого характеризуется геометрической формой, шероховатостью и её анизотропией по направлениям и в

различных частях объекта. Особенность любых лазерных сканирующих и оптико-электронных систем состоит в том, что измерения производятся не на самом объекте, а на его модели, представляющей собой массив координат точек [321]. Координаты точек передают информацию о геометрических параметрах объекта измерений в таком виде, который обеспечивает возможность их расчета с заданной точностью при соблюдении условий к отражающим свойствам его поверхности, взаимному положению объекта и измерительной системы, а также к измерительному каналу передачи информации. Объект измерений с его естественными свойствами далеко не всегда удовлетворяет этим условиям и для их выполнения требуется на объекте искусственно создавать источник исходной информации. Таким образом, объект измерений, всегда оставаясь носителем исходной информации, не всегда может быть её удовлетворительным источником [322].

Приемник лазерного излучения представляет собой устройство с зарядовой связью (ПЗС-матрицу), который преобразует световой поток в электрический сигнал. Устройства формирования и приема лазерного излучения неразрывно связаны между собой и в совокупности выполняют функцию определения координат точек на поверхности объекта измерений. Преобразование измерительной информации в трехмерный массив координат точек, который является моделью реального объекта, представляет собой последовательность операций, различающихся физическими принципами выполнения, способами конструктивной реализации и характером воздействия на передаваемую информацию [323].

В приемнике радионавигационного сигнала происходит усиление и первичная обработка аналогового сигнала со спутников. На первом этапе приемник вычисляет соответствующие каждому спутнику значения псевдодальностей с учетом поправок на задержку сигнала в атмосфере, эффект Доплера и многолучевое распространения сигнала. В блоке преобразования измерительной информации частота сигнала понижается с несущей до промежуточной, после чего сигнал преобразуется в цифровую форму. Затем оцифрованный сигнал поступает

на вычислительное устройство, в котором производится демодуляция и декодирование сигнала [324].

В получаемом массиве координат точек, содержащих образ идеального объекта измерений, используется не вся передаваемая о нем информация, а только та часть, которая необходима для конкретных измерений. Однако, для получения достоверного результата измерений необходимо больше данных. Например, при определении ширины рельсовой колеи достаточно знать координаты положения двух точек рельсовых нитей, определяющих этот параметр, в то время как другая информация может быть искажена без ущерба для результата измерений. Расчет уклона ж/д пути потребует измерения координат большего числа точек и их последующей обработки для устранения грубых погрешностей или шумов измерительного канала.

Точность результата измерений выражается величиной абсолютной или относительной погрешности определения координат точек, расположенных на поверхности сканируемого объекта, и определяется суммарным действием элементарных составляющих погрешности измерительной системы в целом. Источников элементарных погрешностей существует много. При этом точность результата измерений зависит от конкретных условий проведения измерений и соблюдения требований, вытекающих из этих условий. Поэтому оценку точности следует производить с учетом конкретных условий работы ВСКЗ.

Вся совокупность погрешностей ВСКЗ (основных и дополнительных) может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 5.2). В соответствии с причинами возникновения они разделены на пять групп: инструментальные, динамические, шумовые, методические, вычисления. Каждая из этих групп включает в себя определенный перечень источников ошибок, в той или иной степени сказывающихся на погрешности результата измерений геометрических параметров ж/д пути [325].



Рисунок 5.2 – Структурная схема составляющих погрешности измерения ВСКЗ

К группе инструментальных погрешностей относятся погрешности, возникающие при отклонении параметров измерительной системы, представляющую собой конструктивную совокупность приемника, источника электромагнитного излучения и кинематической системы. При этом варьируемыми параметрами измерительной системы, характеризующими её точность, являются: энергия излучения в импульсе, дивергенция лазерного луча (угол расходимости излучения), длина волны, длительность импульса, частота следования импульсов, угол поля зрения приемной оптической системы [320].

Влияние на погрешность ВСКЗ могут оказать условия распространения излучения в измерительном тракте, а также кинематическая система, которая служит для согласованных измерительных перемещений сканируемого объекта и измерительных преобразователей. Компенсация погрешностей кинематической системы за счет изменения конструкции может сказаться положительно, но не является вынужденной мерой. Флуктуации интенсивности лазерного излучения также вызывают появление случайной погрешности. Первой причиной возникновения флуктуаций является неупорядоченное изменение модового состава излучения лазера в течении импульса и от импульса к импульсу. Вторая

причина – интерференция излучения отраженного различными участками объекта. Третья – статистический характер потока фотоэлектронов. Чем выше количество фотоэлектронов, тем ниже флуктуации сигнала. Кардинальным методом повышения точности измерения дальности является уменьшение длительности импульса лазерного дальномера.

Динамические погрешности возникают при быстрых изменениях входного сигнала и обусловлены инерционными свойствами измерительной системы, а также динамическими перегрузками, возникающими в механической системе. Если параметры входного сигнала не изменяются или изменяются с постоянной скоростью и ускорением, то динамические погрешности носят систематический характер. В этом смысле при известной и постоянной угловой скорости движения средства измерения относительно объекта измерения динамические погрешности являются систематическими.

Шумовые погрешности обусловлены действием внешних и внутренних помех. Обычно помехи имеют широкий спектр и для снижения их влияния необходимо уменьшить полосу пропускания частот оптико-электронных звеньев. Оценка действия этих шумовых помех производится по величине дисперсии шума. Из качественной оценки влияния полосы пропускания частот на динамические и шумовые погрешности следует, что существует оптимальная передаточная функция измерительной системы в режиме измерения координат [192].

К группе методических погрешностей относятся погрешности, характерные для применяемого метода формирования и передачи измерительной информации, которые не зависят от конструктивного решения и качества изготовления системы. Источниками погрешностей этой группы являются тракт передачи информации, режим сканирования и свойства поверхности объекта измерений. В тракте передачи информации возможны флуктуации оптической плотности воздушной среды, вызывающие отклонение лучей. Компенсировать погрешности от воздушных рефракций невозможно, поэтому необходимо убедиться в их отсутствии [326].

Неправильно выбранный режим сканирования, определяющийся

геометрической формой объекта, может привести к большим погрешностям измерения координат на поверхностях недоступных для индикации ПЗС приемником, где угол падения лазерного излучения близок к 0° [86]. Например, при “круговом” режиме сканирования, целые области объекта, поверхность которого близка к цилиндрической или сферической, будут недоступны для сканирования.

Изменение температуры компонентов измерительной системы проявляется в приращении параметров положения источника и приемника лазерного излучения вследствие линейного расширения корпусных деталей, а также изменении геометрических параметров самого сканируемого объекта. Изменение температуры компонентов может происходить по разным причинам: в результате изменения температуры окружающей среды, от нагревания собственным источником излучения или рабочим током [326].

Методические погрешности могут быть определены и количественно оценены с помощью формального описания (математической модели) измерительной процедуры. Количественная оценка погрешностей и их характеристик при этом выполняется на основе расчетов или имитационного моделирования. Таким образом, отличительной особенностью методических погрешностей является то, что они могут быть определены только средствами математического или имитационного моделирования процесса измерений и не могут быть найдены сколь угодно тщательным исследованием лишь самого средства и объекта измерений [327].

Погрешность вычисления возникает на каждом из этапов обработки выходной информации с помощью программно-математического обеспечения, установленного на ЭВМ. Например, в процессе определения координат объекта измерений вычисляются поправки между мгновенными значениями координат приемника радионавигационных спутниковых сигналов и известными координатами опорного пункта. Эти поправки по каналам радиосвязи (FM, GSM/GPRS, Wi-Fi, BT, ZigBee) передаются в ВСКЗ. Методы обработки радионавигационных спутниковых сигналов, лежащие в основе программного обеспечения, также оказывают влияние на погрешность измерения координат.

В теории точности используется принцип независимости элементарных погрешностей, согласно которому влияние каждого источника погрешности рассматривается отдельно, вне связи с другими, а затем определяется результирующая погрешность, как алгебраическая сумма элементарных составляющих, если они проявляются по системному закону, и по формулам теории вероятностей, если характер проявления случайный [328]. Влияние каждого фактора в отдельности может иметь любой закон распределения плотности вероятности, но поскольку факторов много, то результирующее воздействие подчиняется нормальному закону распределения и оценивается дисперсией [192]. Если реальные условия функционирования системы с достаточной степенью приближены к идеальным, то основное влияние на точность результата измерений будут оказывать погрешности задания начала отсчета $\{X_H, Y_H, Z_H\}$ и погрешности измерения координат. Абсолютная величина основной погрешность при этих условиях определяется по формуле для каждой координаты:

$$\begin{cases} \Delta X = \pm(\Delta X_H + k_x X') \\ \Delta Y = \pm(\Delta Y_H + k_y Y') \\ \Delta Z = \pm(\Delta Z_H + k_z Z') \end{cases} \quad (5.13)$$

Соответственно, относительная величина погрешности:

$$\begin{cases} \frac{\Delta X}{X} = \pm\left(\frac{\Delta X_H}{X} + \frac{k_x X'}{X}\right) \\ \frac{\Delta Y}{Y} = \pm\left(\frac{\Delta Y_H}{Y} + \frac{k_y Y'}{Y}\right), \\ \frac{\Delta Z}{Z} = \pm\left(\frac{\Delta Z_H}{Z} + \frac{k_z Z'}{Z}\right) \end{cases} \quad (5.14)$$

где $\{\Delta X, \Delta Y, \Delta Z\}$ – абсолютные погрешности определения координат точки;

$\{\Delta X_H, \Delta Y_H, \Delta Z_H\}$ – абсолютные погрешности задания начала отсчета;

$\{X', Y', Z'\}$ – погрешности измерения координат;

$\{k_x, k_y, k_z\}$ – коэффициенты влияния погрешностей.

Коэффициенты влияния погрешностей представляет собой производную от измерительного соотношения:

$$\begin{cases} k_x = \frac{dX}{dX'} \\ k_y = \frac{dY}{dY'} \\ k_z = \frac{dZ}{dZ'} \end{cases} \quad (5.15)$$

Основной вес приходится на группу инструментальных погрешностей. В известной мере это обстоятельство предопределяет возможность достижения высокой точности ВСКЗ, поскольку инструментальные погрешности, по большей части, являются систематическими. Соответственно, они могут быть скомпенсированы конструктивно или в процессе юстировки и настройки. Точность определения координат точек, характеризуется величиной относительной погрешности порядка 10^{-2} . Однако эта оценка справедлива лишь при определенных условиях, когда влияние погрешностей двух других групп пренебрежимо мало. Отступление от этих условий приводит к увеличению погрешности или вообще исключает применение какого-то метода измерений. Например, погрешность оптико-электронных измерительных систем значительно увеличивается в запыленной атмосфере или при наличии осадков. Кроме этого, существует ещё множество источников дополнительных погрешностей в тракте передачи измерительной информации, суммарное действие которых может намного превышать инструментальную составляющую погрешности измерения.

5.1. Источники шума в оптико-электронных приборах и их влияние на погрешность определения геометрических параметров

Точность измерений ВСКЗ во многом зависит от оптической системы и фотоприёмного устройства, входящего в ее состав. Помимо полезного сигнала на выходе фотоприемника всегда присутствует шум – хаотический сигнал со случайными значениями амплитуды и частоты [149]. Шум, проявляющийся на изображении, вызывает искажение всех запечатленных на нем объектов. Очевидно, что при увеличении уровня шума снижается точность измерений ВСКЗ. Уровень шума задает ограничения на обработку слабых сигналов, которые становятся

незаметными на его фоне и тем-самых снижает точность ВСКЗ. В связи с этим возникла необходимость оценить влияние шума на погрешность измерения угловых координат ВСКЗ.

Источниками шума могут являться, как внутренние процессы, происходящие в чувствительном слое фотоприемника, так и внешние по отношению к оптоэлектронному устройству в целом, зависящие от флуктуации принимаемого сигнала. Причиной появления периодического шума могут стать электрические или электромеханические помехи возникающие в процессе формирования изображения. К основным факторам, влияющими на величину шума, относятся уровень освещенности и температура фотоприёмного устройства. Также, при передаче с использованием беспроводной связи, изображения искажается под воздействием различных возмущений атмосферы [84].

5.1.1 Подавление темнового и фотонного шума на изображении

В настоящее время наибольшее распространение получили фотоприемники, изготовленные по технологии КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник). Их основное отличие от фотоприемников ФПЗС (фоточувствительный прибор с зарядовой связью) является использование координатной адресации к каждому элементу зарядового рельефа, полученного в результате фотогенерации [329]. На выходе фотоприемника помимо полезного сигнала также присутствует шум приемника излучения. Чувствительность КМОП-фотоприемника ниже, чем у ФПЗС, соответственно уровень шума выше. Источниками шума могут являться, как внутренние процессы, происходящие в чувствительном слое фотоприемника, так и воздействия внешних факторов по отношению к ВСКЗ, приводящие к флуктуациям измерительного сигнала [330].

Основными составляющими шума являются шум усилителя считывания и темновой шум фотоприемника, возникающий в результате образования тепловых электронов в кремниевом кристалле [331]. Уровень шума в сигнале измеряется отношением сигнал-шум. Характерно то, что даже в идеальном бесшумном фотоприемнике возникают случайные колебания потока фотонов [97]. Такой

сигнал источника собственного шума определяет постоянное минимальное отношение сигнал-шум, которое фотоприёмник может обеспечить. Поэтому даже в лабораторных условиях невозможно получить изображение, не содержащее шум [84].

Параметры функции плотности распределения вероятностей шума могут быть частично известны исходя из технических характеристик используемого фотоприемника, однако они в значительной степени варьируют исходя из условий проведения измерений. Поэтому первоочередной задачей является получение функциональных зависимостей уровня шума на изображении от основных факторов, приводящих к его появлению. Зависимость отношения сигнал-шум от температуры для фотоприемника, изготовленного по технологии КМОП, были получены экспериментально (рис. 5.3). При этом отношение сигнал-шум определялось из выражения:

$$SNR = 20 \lg(\mu/\sigma), \quad (5.16)$$

где μ – среднее или ожидаемое значение сигнала;

σ – стандартное отклонение шума или его оценка.

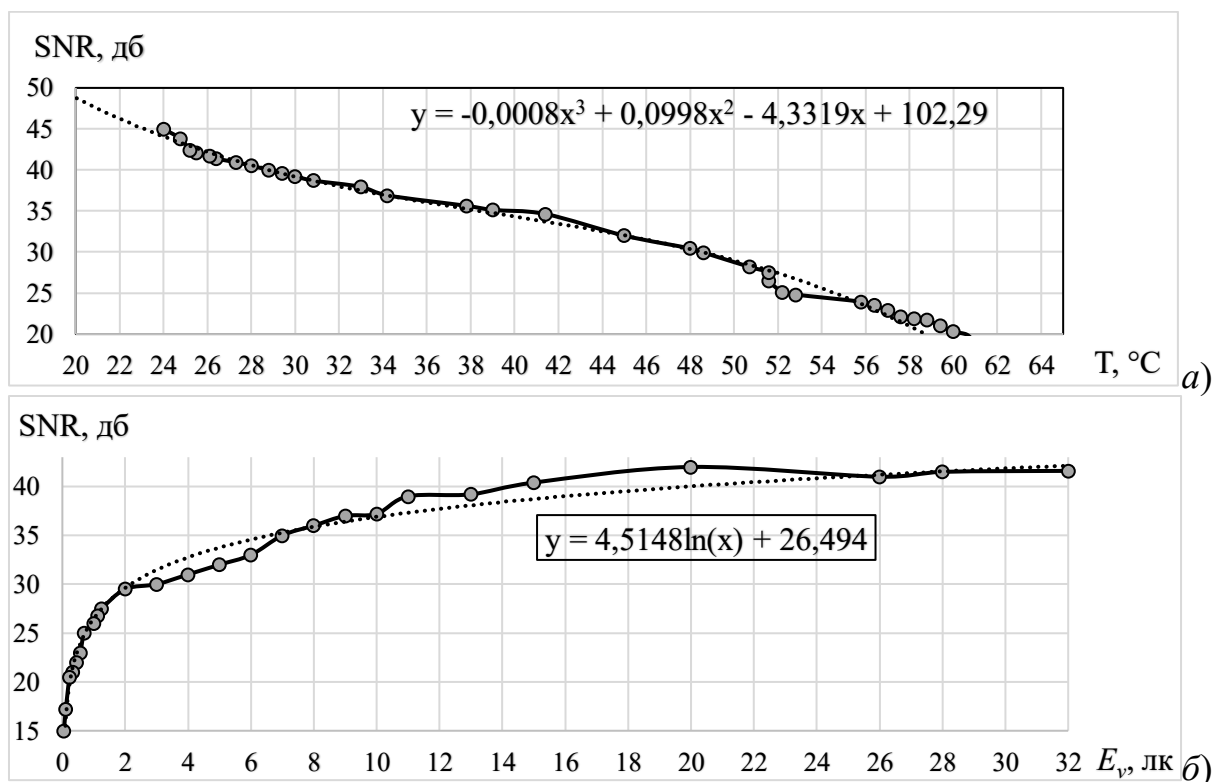


Рисунок 5.3 – Графики зависимости отношения сигнал-шум от температуры и освещенности фотоприемника

На графике (а) приведена функциональная зависимость отношения сигнал-шум от температуры фотоприемника, выраженная через многочлен третьей степени:

$$SNR(dB) = -0,0008T^3 + 0,0998T^2 - 4,3319T + 102,29, \quad (5.17)$$

где T , °C – температура фотоприемника видеокамеры.

Охлаждение фотоприемника ниже 20°C значительно уменьшает накопление темнового заряда и позволяет достигнуть оптимального отношения сигнал-шум. Однако, темновой ток не связан с фотонно-индуцируемым сигналом поскольку фоточувствительные элементы непрерывно осуществляют накопление «шумовых» электронов. Уровень фотонного шума зависит от освещенности фотоприемника за период накопления «сигнального» заряда [329]. При малом уровне освещенности и длительном времени накопления заряда уровень фотонного шума возрастает [84].

Также определялось влияние освещенности фотоприемника на величину отношения сигнал-шум [84]. Из графика (б) видно, что при освещенности фотоприемника ниже 2 лк отношение сигнал-шум начинает резко уменьшаться. При этом наблюдается логарифмическая зависимость:

$$SNR(dB) = 4,5148 \ln(E_v) + 26,494, \quad (5.18)$$

где E_v – освещенность фотоприемника.

Таким образом, подавление шума на изображении может быть достигнуто путем охлаждения фотоприемника и повышением уровня его освещенности. Тем не менее, охлаждение фотоприемника не способствует полному устранению шума, остается еще шум чтения, который вызывает предварительный усилитель на кристалле в процессе преобразования носителей заряда в сигнал напряжения. Шум чтения может быть устранен посредством анализа и цифровой обработки изображения [84].

5.1.2 Фильтрация остаточного шума в частотной области изображения

Шум, проявляющийся на изображении, вызывает искажение всех запечатленных на нем объектов. Существует много различных типов шума и

математических моделей, описывающих их функции плотности распределения вероятностей (Гауссова, Рэлея, Эрланга, экспоненциальная, равномерная, импульсная и др.). В настоящее время нет универсального фильтра в равной степени эффективного для устранения всех присутствующих типов шумов на изображении. Поэтому выбор наиболее приемлемого метода фильтрации шума осуществляется путем анализа изображения в частотной области и определения типа шума, преобладающего на нем. Наиболее простой способ определения типа шума, заключается в том, чтобы получить набор изображений однородных тестовых объектов [84]. В качестве примера на рисунке 5.4 представлена частотная область изображения ВЦ, заснятая на однородном фоне.

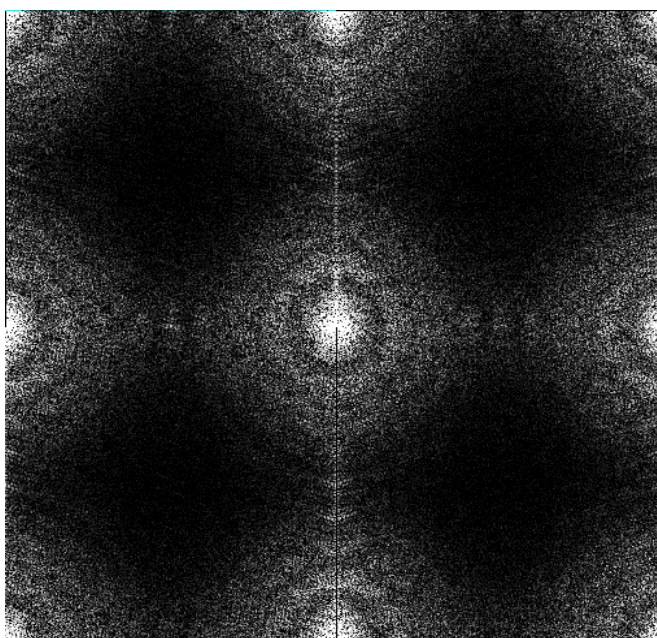


Рисунок 5.4 – Частотная область изображения ВЦ

Полученные тестовые изображения обычно достаточно хорошо характеризуют шум фотоприемника. В этом представляет интерес фоновое изображение ВЦ являющейся сплошной, равномерно освещенной, одноцветной областью. Построив гистограмму компонентов цвета шумовой составляющей фонового изображения ВЦ (рис. 5.5) можно определить какие шумы присутствуют на нем, и подобрать соответствующие фильтры для их устранения.

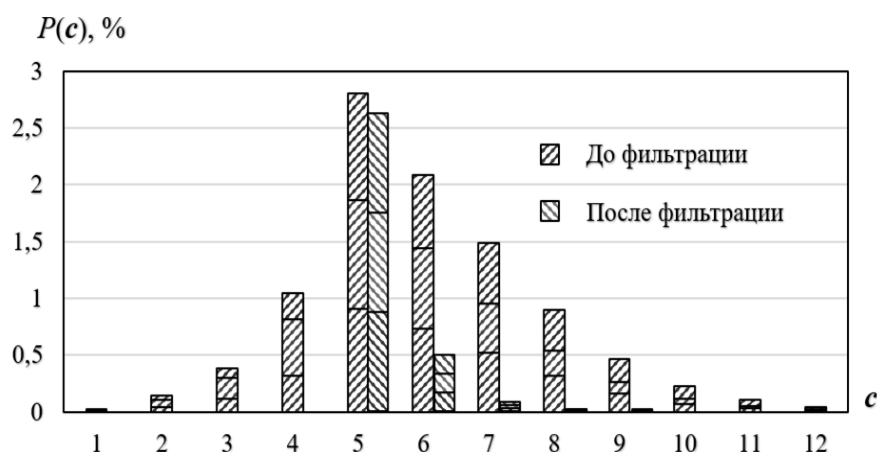


Рисунок 5.5 – Гистограммы компонентов цвета шумовой составляющей изображения ВЦ до и после фильтрации

Характерная асимметричная (перекося вправо) форма гистограммы свойственна модели функции плотности распределения вероятностей шума Рэлея. Данная модель распределения применяется при моделировании шума, который возникает на снимках, снятых с большого расстояния. Функция плотности распределения вероятностей Рэлея задается выражением:

$$\rho(z) = \begin{cases} \frac{2}{b}(z-a)e^{-(z-a)^2/b} & \text{при } z \geq a \\ 0 & \text{при } z < a \end{cases}, \quad (5.19)$$

где (a, b) – координаты экстремума функции $\rho(z)$.

Остаточный шум отдельных усилителей, в том числе шум чтения являются частотно зависимыми. Его устранение может быть достигнуто в частотной области при помощи процедуры высокочастотной фильтрации, которая подавляет низкочастотные составляющие и не затрагивает высокочастотную часть спектра изображения. В основе частотных методов улучшения изображений положены интегральные преобразования: свертка, преобразование Фурье и другие частотные методы. Методы фурье-анализа дают практичные способы реализации совокупности подходов для улучшения качественных характеристик изображения [84].

Прямое дискретное преобразование Фурье для функции изображения $f(x, y)$ с разрешением $M \times N$ определяется двукратно периодической функцией фурье-образа с периодами M и N :

$$f(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) (-1)^{x+y} e^{-i2\pi(ux/M + vy/N)}. \quad (5.20)$$

С помощью этого выражения был получен фурье-образ изображения ВЦ, на котором проявляется аддитивный шум. Он приводит к появлению пиков в частотной области изображения ВЦ (рис. 5.6), которые можно обнаружить в процессе визуального анализа его фурье-спектра [332], определяемого из выражения:

$$|f(u, v)| = \sqrt{R^2(u - M/2, v - N/2) + I^2(u - M/2, v - N/2)}. \quad (5.21)$$

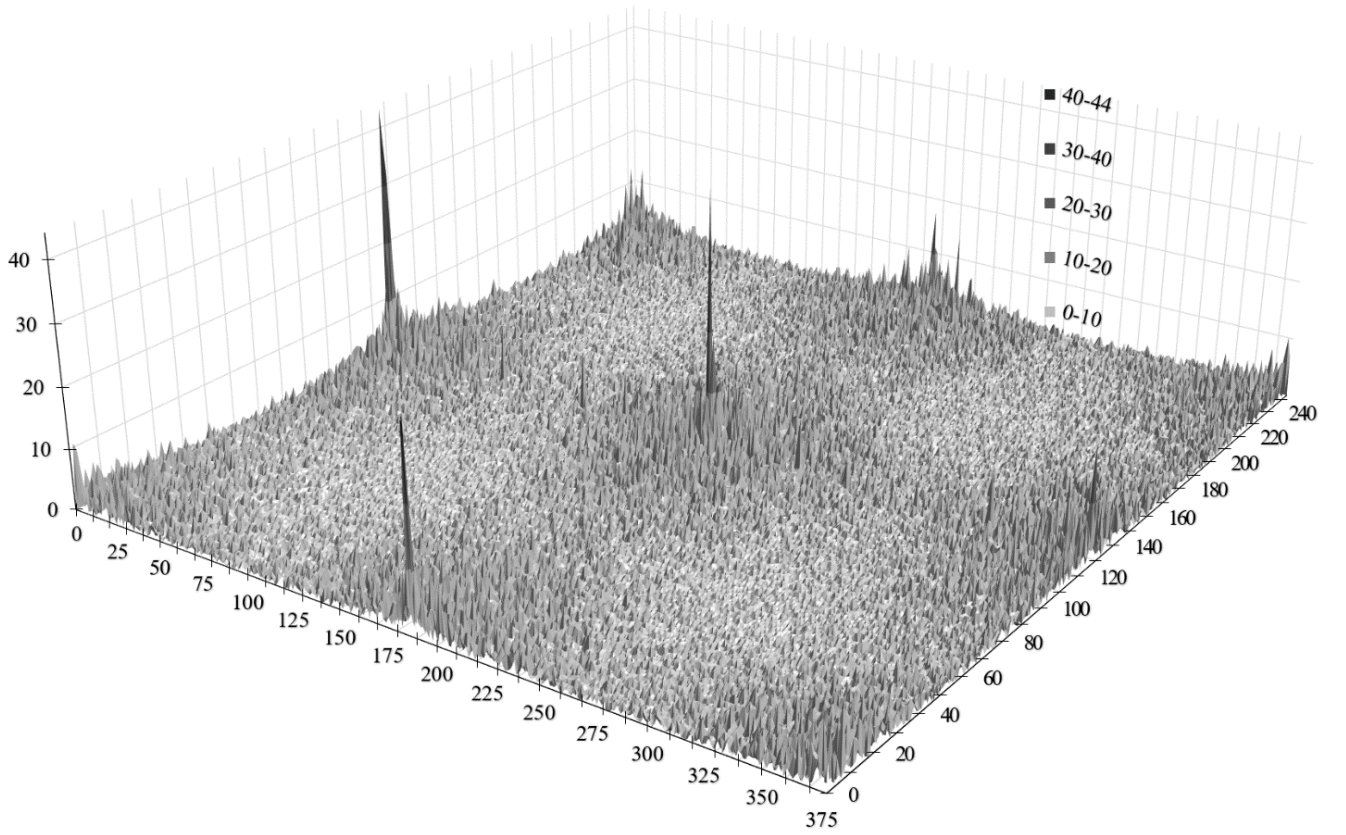


Рисунок 5.6 – Фурье-спектр шумовой составляющей изображения ВЦ

Аддитивный шум устранялся посредством узкополосной фильтрации с помощью передаточной функции гауссова узкополосного режекторного фильтра с центром в точке (u_0, v_0) , заданного выражением:

$$h(u, v) = 1 - e^{-\frac{1}{2} \sqrt{\left[(u - M/2 - u_0)^2 + (v - N/2 - v_0)^2 \right] \left[(u - M/2 + u_0)^2 + (v - N/2 + v_0)^2 \right]} / D_0}. \quad (5.22)$$

Фильтрованное изображение получали путем вычисления обратного преобразования Фурье:

$$g(x, y) = \mathfrak{F}^{-1} [f(u, v) h(u, v)]. \quad (5.23)$$

Данный фильтр позволил снизить общий уровень шума на изображении. Результат воздействия фильтра оценивался с помощью отношения сигнал-шум. При среднем квадратическом отклонении яркости изображения 13,6 стандартное отклонение шума на изображении до фильтрации составило 0,365. После фильтрации это значение снизилось до 0,063. Соответственно значение сигнал-шум увеличилось на 67,3% (с 31,5 дБ до 46,7 дБ) [84].

5.2.3 Оценка влияния шума на точность измерения параметров ВЦ

Высокочастотная фильтрация позволяет уменьшить вариация яркости на изображении в пределах больших гладких областей и уменьшает диапазон яркости изображения ВЦ, что повышает точность определения координат ее центра. Снижение шума также способствовало повышению резкости контура ВЦ на изображении, что в свою очередь оказало непосредственное влияние на точность измерения её радиуса. На рисунке 5.7 показана зависимость относительной погрешности определения радиуса ВЦ от величины отношения сигнал-шум на изображении [84].

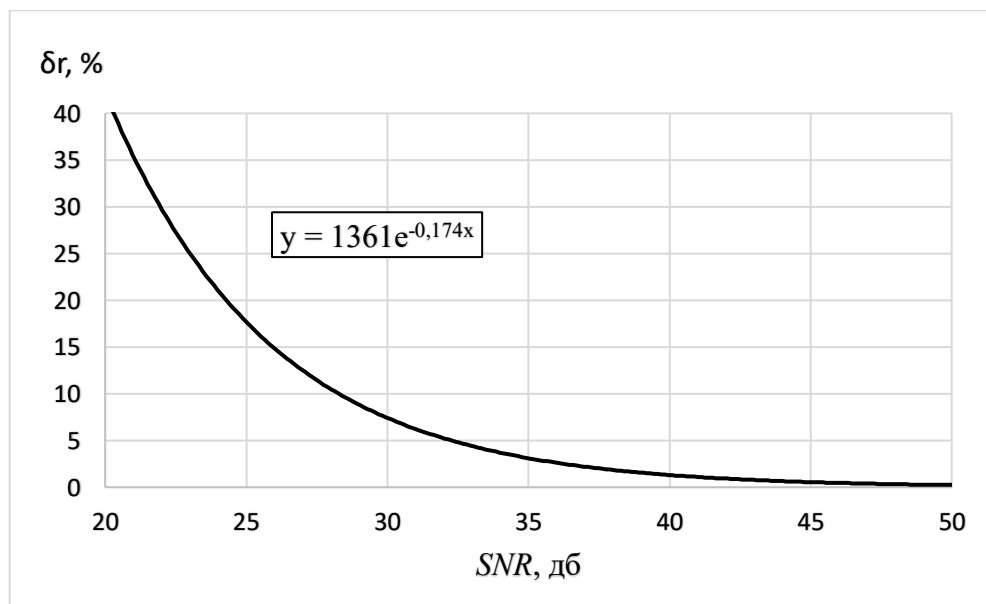


Рисунок 5.7 – График зависимости погрешности измерения радиуса ВЦ от отношения сигнал-шум

Из графика следует, что относительная погрешность измерения радиуса ВЦ на изображении имеет следующую функциональную зависимость от величины отношения сигнал-шум:

$$\delta_r = 1361 \exp(-0,174 SNR). \quad (5.24)$$

Таким образом, основными факторами, влияющими на шумовые характеристики фотоприёмника и, как следствие, на точность определения параметров ВЦ на изображении, являются температура, освещенность, электрические и электромеханические помехи в каналах связи. Снижение влияния этих факторов достигалось путем охлаждения фотоприемника ВСКЗ, повышением уровня его освещенности, а также с помощью высокочастотной фильтрации в частотной области изображения ВЦ. В результате этих действий удалось снизить уровень шума фотоприемника на 67,3% и тем-самым уменьшить относительную погрешность измерения радиуса ВЦ на 2,9% [84]. Влияние шума на погрешность измерения угловых координат ВЦ менее значительно. Абсолютные погрешности результатов измерений угловых координат ВЦ варьировали в пределах $\Delta\varphi \approx \Delta\theta \approx 0,71''$. Полученные результаты свидетельствуют, что применение изложенных способов подавления шума на изображении позволяет уменьшить погрешность измерения параметров ВЦ.

5.2 Оценка погрешностей измерения параметров визирной цели

Повысить достоверность и точность, содержащихся на изображении сведений об объекте измерений можно, используя специальные прецизионные фотокамеры и разработанные методы проведения съемки, благодаря чему получают цифровые изображения объектов измерений, по которым с высокой точностью можно определять их геометрические параметры [198]. Для этого очень важно, чтобы объект измерений обладал какими-то уникальными цветовыми характеристиками, был светлее (темнее) других объектов, или же, содержал присущий только ему набор цветовых компонент, позволяющих однозначно выделить его на изображении [159]. Идеальным объектом для проведения

измерений является ВЦ с известными геометрическими параметрами, что позволяет легко обнаружить ее на фоне других объектов. Соответственно ВЦ может применяться в качестве вспомогательного объекта, прикрепляемого к объекту измерений для увеличения вероятности его обнаружения.

5.2.1 Погрешность измерения дальности

Определение дальности объектов – одна из наиболее часто встречающихся измерительных задач в фотограмметрии. При наличии одной фотокамеры эта задача может быть решена, только в том случае если заранее известны размеры объекта, дальность которого требуется определить, а также известны характеристики используемой фотокамеры (фокусное расстояние, разрешение, физические размеры ПЗС матрицы). В тех случаях, когда информация о геометрических размерах объекта измерений отсутствует можно воспользоваться ВЦ с известными геометрическими параметрами. При этом следует выбрать ВЦ такой формы, чтобы форма её проекции на плоскость изображения была всегда идентична вне зависимости от ракурса съемки. Единственной существующей формой, удовлетворяющей этому требованию, является форма шара, проекцией которой на плоскость является круг. Прикрепив ВЦ к интересующей точке объекта, измеряется расстояние до ВЦ, тем самым определяется дальность самого объекта измерений [224].

Абсолютная инструментальная погрешность оптико-электронного прибора зависит от физического размера пиксела фотоматрицы:

$$\Delta L = \frac{Df\Delta n}{d^2 px} \quad (5.25)$$

где D – диаметр ВЦ;

d – диаметр ВЦ на изображении;

Δn – погрешность измерения размера объекта на изображении;

px – физический размер пиксела.

Относительная погрешность результата измерений определяется из выражения:

$$\varepsilon = \frac{D \cdot \Delta n}{d \cdot n^2 + D \cdot n} \cdot 100\%, \quad (5.26)$$

где n – число пикселей в строке матрицы фотоприемника.

Если оптическая система позволяет определить размер объекта на изображении с погрешностью до одного пикселя, то при физическом размере пиксела равном 5×10^{-6} м и диаметре ВЦ равном 0,2 м наблюдается следующую функциональную зависимость величины погрешности результата измерений от числа пикселей в строке матрицы фотоприемника:

$$\varepsilon(n) = \frac{40000}{(dn^2 + 40000 \cdot n)} \cdot 100\% \quad (5.27)$$

Как видно из графика (рис. 5.8), относительная погрешность составляет менее 1% при диаметре ВЦ на изображении более 100 пикселей, что соответствует расстоянию 80 метров до ВЦ.

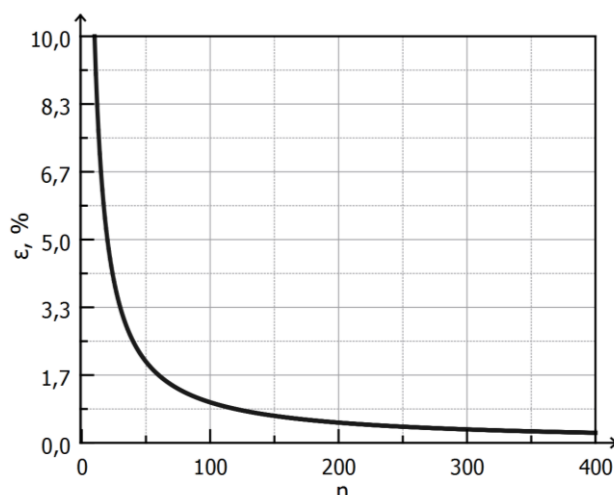


Рисунок 5.8 – График зависимости относительной погрешности от размера изображения в пикселях.

Для определения дальности ВЦ требуется знать точное значение фокусного расстояния объектива. Использование длиннофокусного объектива позволяет повысить точность определения дальности ВЦ. Однако конструкция оптической системы с таким объективом значительно усложняется. В связи с тем, что расстояние до ВЦ может быть достаточно большим, ручная фокусировка может не обеспечивать достаточную точность измерений. Поэтому предпочтительнее производить автофокусировку на гиперфокальном расстоянии. Это обеспечит

максимальную глубину резко изображаемого пространства (ГРИП) и упрощает процесса фокусировки при на малых дальностях ВЦ.

Гиперфокальное расстояние в этом случае определяется по формуле:

$$H = \frac{f^2}{K \cdot z} + f \quad (5.28)$$

Так как $f \ll f^2/(k \cdot z)$, то формулу можно записать в виде:

$$H = \frac{f^2}{k \cdot z} \quad (5.29)$$

Если принять за минимальный диаметр кружка рассеяния размер пиксела матрицы фотоприемника, то это обеспечит максимальную точность измерений, сохраняя большую ГРИП. Передняя и задняя границы резко изображаемого пространства могут быть определены по формулам [333]:

$$R_1 = \frac{Rf^2}{f^2 - Kfz + KRz} \quad (3.30)$$

$$R_2 = \frac{Rf^2}{f^2 + Kfz - KRz} \quad (3.31)$$

где R – дистанция фокусировки;

R_1 – дистанция до передней границы резко изображаемого пространства;

R_2 – дистанция до задней границы резко изображаемого пространства;

f – заднее главное фокусное расстояние объектива в метрах;

K – знаменатель геометрического относительного отверстия объектива или диафрагменное число;

z – диаметр кружка нерезкости или допустимый кружок рассеяния, для негативов форматом 24×36 мм равный 0,03–0,05 мм (в формулу подставляется значение в метрах).

Величину интервала ГРИП можно найти по следующей формуле:

$$dR = R_2 - R_1 \quad (5.32)$$

Поскольку расстояние между ВЦ может быть достаточно большим, последовательная фокусировка на каждой из них значительно снижает скорость измерений. Поэтому используется фокусировка объектива на гиперфокальное

расстояние. Это обеспечивает максимально возможную глубину резко изображаемого пространства (ГРИП). ГРИП вариообъективов изменяется одновременно с фокусным расстоянием объектива. Максимальная глубина резкости достижима на бесконечности, которая для большинства объективов начинается с 15–20 метров [334].

Диафрагменное число K вычисляется как отношение фокусного расстояния объектива к диаметру его входного зрачка и обозначается цифрой. Шкала диафрагменных чисел современных цифровых фотоаппаратов содержит следующие значения: 1.0, 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 2.2, 2.5, 2.8, 3.2, 3.5, 4, 4.5, 5.0, 5.6, 6.3, 7.1, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 29, 32. На каждом делении шкалы светосила объектива изменяется в два раза. Границы ГРИП для объектива с фокусным расстоянием 50 мм и диафрагменным числом 5 в зависимости от дальности ВЦ изображены на рисунке 5.9.

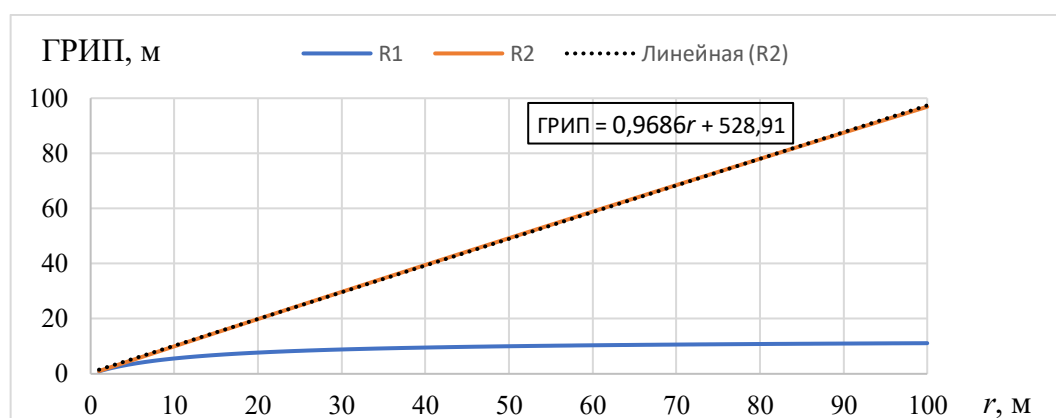


Рисунок 5.9 – Границы ГРИП на дальности r

Для определения погрешности измерения дальности ВЦ был проведен эксперимент, в котором ВЦ размещалась на разных расстояниях от фотокамеры в диапазоне [200, 10000] мм, действительные значения расстояния до ВЦ определялись лазерным дальномером с абсолютной погрешностью 1 мм. Дальность ВЦ определялась из выражения (3.65). Зависимости относительной и абсолютной погрешности измерения дальности ВЦ представлены на графиках (рис. 5.10). Абсолютная погрешность измерения дальности ВЦ не превысила 12 мм на расстоянии до 10 м. Уменьшение погрешности измерений дальности ВЦ по ее

размеру возможно путем увеличения радиуса ВЦ или фокусного расстояния объектива.

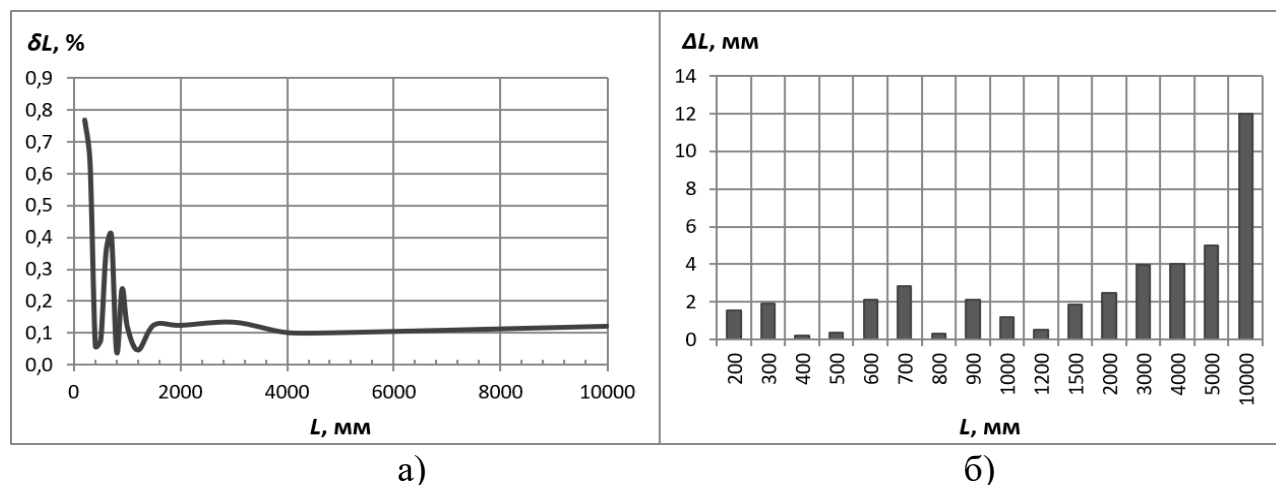


Рисунок 5.10 – Погрешности измерений расстояния с помощью фотокамеры: а) относительная погрешность; б) абсолютная погрешности

Современные оптоэлектронные устройства позволяют обнаруживать ВЦ, радиусом несколько сантиметров, на расстоянии до 1 км, но измерить ее дальность с погрешностью до 1 см разработанным методом представляется возможным только на небольшом расстоянии ($<10 \text{ м}$). При этом наблюдается квадратичная зависимость погрешности измерения от дальности ВЦ. Для прикладного применения рекомендуется использовать ВЦ с уникальным набором визуальных признаков, позволяющих обнаружить их среди других объектов. При обработке изображения целесообразно вводить целевую функцию, принимающую максимальное значение в области изображения ВЦ. Такой подход облегчит ее обнаружение и позволит избежать выделения ложных контуров.

С целью оценки погрешности измерения геометрических параметров ВЦ был проведен следующий эксперимент. Для эксперимента использовалась фотокамера, обладающая фокусным расстоянием 5 мм с разрешением 4000×3000 пикселей и физическим размером пиксела фотоматрицы 1,6 мкм. ВЦ, радиусом 45 мм, размещалась на различных расстояниях от фотокамеры, действительные значения расстояния до ВЦ определялись лазерным дальномером с предельной абсолютной погрешностью 1 мм. Обнаружение ВЦ в безотражательном режиме осуществляется по их визуальным признакам в соответствии с разработанным методом.

Геометрические параметры ВЦ определялись путем обнаружения ее контура на цветном изображении с помощью метода Ди Зензо и оператора Лапласа $\nabla^2 f(x, y)$, для которого предварительно задавался пороговый коэффициент. На рисунке 5.11 показан график зависимости относительной погрешности измерения радиуса ВЦ на дальности 1 м от принятого значения порогового коэффициента k .

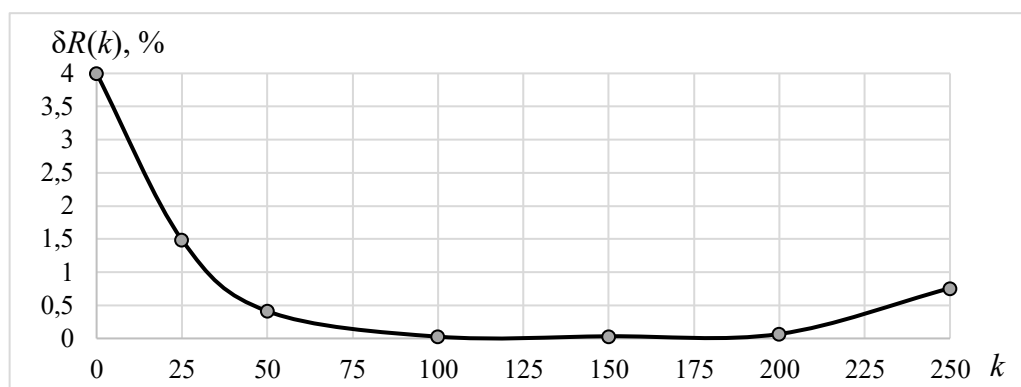


Рисунок 5.11 – График относительной погрешности измерения радиуса ВЦ от порогового коэффициента

Наиболее оптимальные значения порогового коэффициента находятся в достаточно широком диапазоне [100, 200]. Относительная погрешность измерения радиуса ВЦ в этом диапазоне значений порогового коэффициента оставалась в пределах 0,1%. Даже при малых значениях порогового коэффициента относительная погрешность измерения радиуса ВЦ не превысила 4% на дальности до 1 м. С увеличением дальности ВЦ абсолютная погрешность измерения ее диаметра также увеличивается (рис. 5.12). В лабораторных условиях, при правильно подобранном пороговом коэффициенте, абсолютная погрешность измерения диаметра ВЦ находилась в пределах 1 мм на дальности до 38 м.

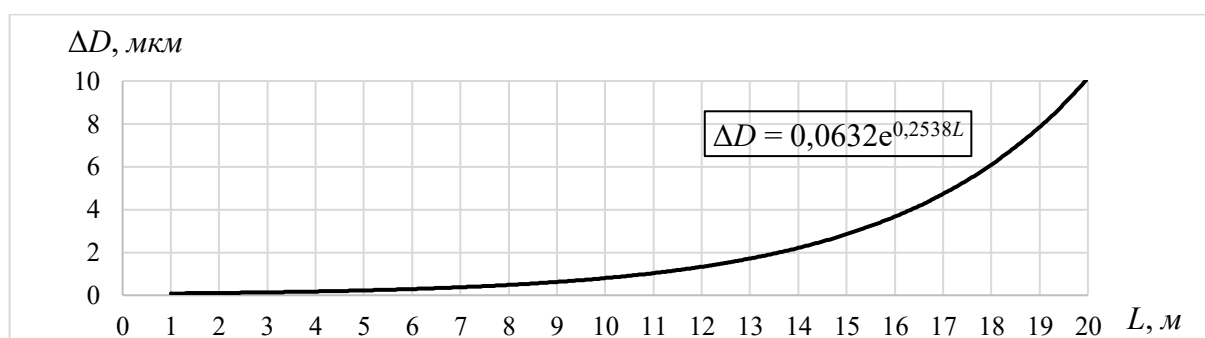


Рисунок 5.12 – График абсолютной погрешности измерения диаметра ВЦ в зависимости от дальности.

Метод обнаружения контуров ВЦ на изображении по максимальным значениям оператора Лапласа является наиболее устойчивым к влиянию порогового коэффициента, что позволяет избежать появления грубых ошибок при измерении геометрических параметров ВЦ [198].

5.2.2 Погрешность измерения углов

Обычно систематическая погрешность, вызванная отклонением оптической оси объектива, устраняется с помощью двух вспомогательных пластин, установленных под определенным углом. Однако из-за ограничений в конструкции лазерных сканеров такая схема измерения неосуществима, поскольку дискретные положения лазерного луча не могут быть воспроизведены на второй пластине. Одним из выходов является использование сферических ВЦ, центры которых заданы дискретными точками [335]. Поскольку разрешающая способность оптико-электронного устройства при измерении угловых координат, как правило, меньше разрешающей способности оптических энкодеров, то именно оно характеризует инструментальную погрешность видеограмметрического устройства.

Рассмотрим одну из наиболее распространенных схема измерения дальности, в которой решается задача определения расстояния L между двумя точками до короткой стороны (базиса) b параллактического (равнобедренного или прямоугольного) треугольника [336]. Сущность данной схемы измерения основана на измерении угла при базисе параллактического треугольника (рис. 5.13) При этом решение возможно, как при условии постоянного базиса, так и при постоянном значении параллактического угла.

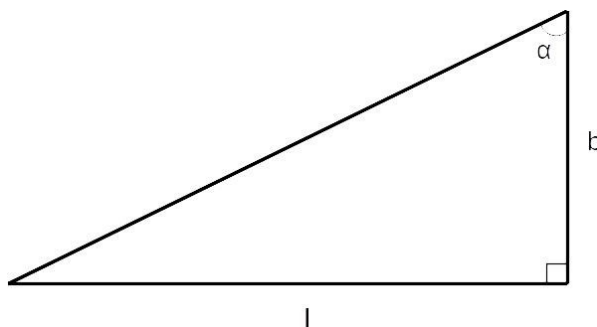


Рисунок 5.13 – Параллактический треугольник

Дальность объекта измерений определяется следующей формулой:

$$L = b \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (3.33)$$

где b – база;

α – угол при базисе.

Абсолютная погрешность измерения дальности определяется по формуле:

$$\Delta_L = \sqrt{\frac{b^2 \Delta_\alpha^2}{\cos^2(\alpha)} + \operatorname{tg}^2(\alpha) \Delta_b^2} \quad (3.34)$$

Если база определена с большой точностью, то используется выражение:

$$\Delta_L = \frac{b}{\cos^2(\alpha)} \cdot \Delta_\alpha \quad (3.35)$$

Поделив эту величину на L , получим относительную погрешность:

$$\varepsilon = \frac{2\Delta_\alpha}{\sin^2(\alpha)} \quad (3.36)$$

Удобно получить зависимость относительной погрешности от коэффициента K , который равен отношению расстояния до объекта к базе:

$$K = 2\Delta\alpha \sqrt{\frac{1+K^4}{4K^2} + 0,5} \quad (3.37)$$

Данный коэффициент позволяет оценить оптимальный диапазон измеряемых расстояний. На графике зависимости относительной погрешности от параметра K (рис. 5.14) видно, что минимальная погрешность появляется при равенстве базы и измеряемого расстояния.

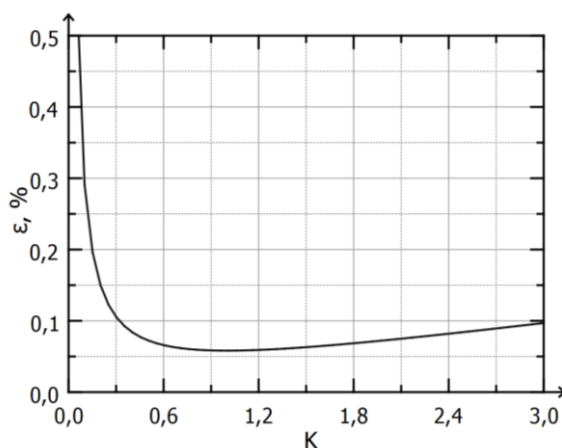


Рисунок 5.14 – График зависимости относительной погрешности от величины отношения расстояния к базису

Для оценки погрешности измерения ВУ углов между направлениями на ВЦ проведен следующий эксперимент, схема измерения которого представлена на рисунке 5.15. В качестве объекта измерений использовались ВЦ, координаты которых определялись в собственной сферической системе координат ВУ по измеренным с помощью энкодеров значениям углов наклона и поворота видеокамеры, а также дальности ВЦ, определяемого лазерным дальномером. За начало координат принималось местоположение ВУ. В составе ВУ использовались шаговые двигатели, вал которых имеет угловой шаг поворота $1,2'$.

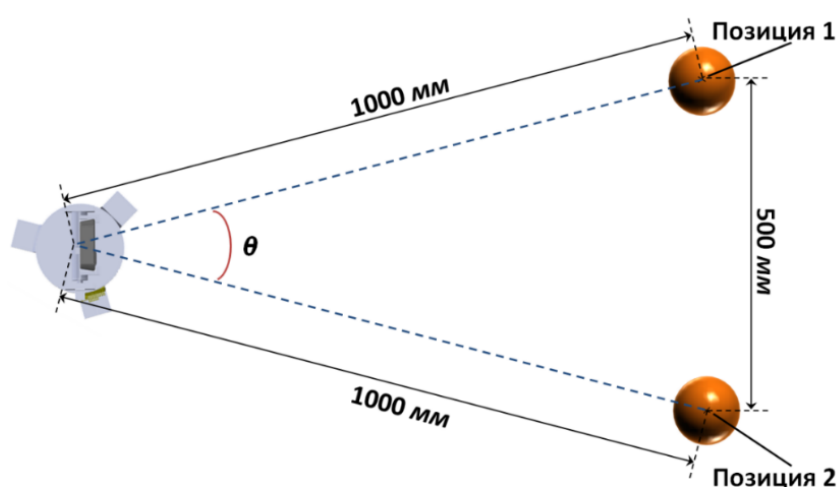


Рисунок 5.15 – Схема проведения эксперимента

В соответствии с приведенной схемой эксперимента была выбрана горизонтальная плоскость, на которую помещены ВЦ в позиции 1 и 2. ВЦ размещались на расстоянии 0,5 м друг от друга и удалении 1 м от ВСКЗ. Действительные значения дальности ВЦ определялись с помощью лазерного дальномера с абсолютной погрешностью 1 мм. Действительное значение угла между оптическими лучами, направленных на центры ВЦ, определялось расчетным методом и составило $\theta \approx 28,955^\circ$.

По результатам 10 измерений средняя абсолютная погрешность измерения угла θ составила $1,2'$. Как и следовало ожидать, значение погрешности угловых измерений превысило расчетное значение, поскольку в теоретических расчетах не были учтены некоторые методические, инструментальные и субъективные составляющие систематической погрешности. Такие погрешности могли стать

следствием неточности позиционирования ВЦ, люфта вала шаговых двигателей, дисбаланса и эксцентриситета поворотной платформы ВСКЗ относительно осей вращения, различных aberrаций объектива и ряда других неучтенных факторов [87].

5.2.3 Инструментальная погрешность измерения координат визирных целей

Инструментальная погрешность ВУ зависит от метрологических характеристик входящих в ее состав средств измерений: энкодеры абсолютные многооборотные, оптико-электронное устройство, лазерный дальномер. Двухосевая платформа ВУ обладает двумя степенями свободы и служит каркасом для крепления средств измерений. С помощью шаговых двигателей задается направление обзора видеокамеры. Схема оценки погрешности измерения координат ВЦ показана на рисунке 5.16. При этом ВУ находится в точке O , а ВЦ расположена в точке O' . Инструментальные погрешности измерений ВУ зенитного и азимутального углов направления на ВЦ обозначены $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$. Погрешности измерения дальности визирной цели r определяются величиной Δz .

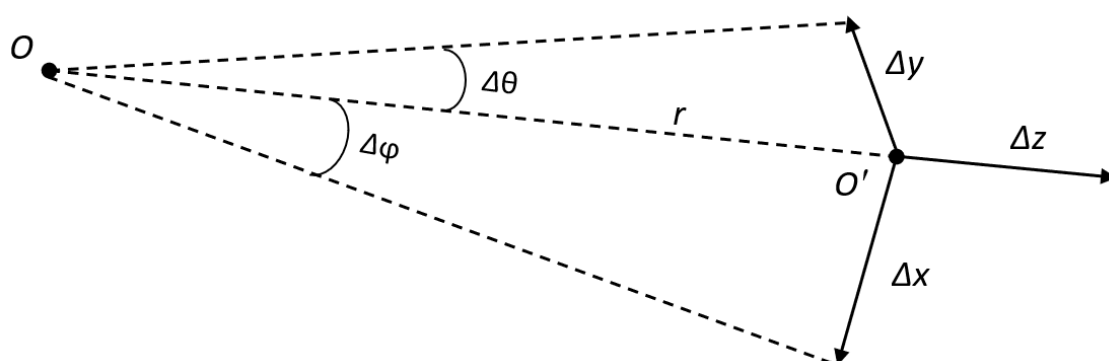


Рисунок 5.16 – Схема оценки инструментальной погрешности ВУ

Погрешности измерения координат визирной цели $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ имеют линейную зависимость от дальности измерений r , а также погрешностей оптических энкодеров $(\Delta\theta_{\text{ОЭ}}, \Delta\varphi_{\text{ОЭ}})$ и видеокамеры $(\Delta\theta_{\text{В}}, \Delta\varphi_{\text{В}})$, входящих в состав ВУ. Посредством наведения оптической оси видеокамеры на ВЦ устраняется значительная часть геометрических aberrаций, поскольку оптические лучи,

входящие в объектив под малым углом к его оптической оси, преломляются незначительно. Соответственно инструментальные погрешности ВУ определяются из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= r \operatorname{tg}(\Delta\varphi_{оэ} + \Delta\varphi_B) \\ \Delta y &= r \operatorname{tg}(\Delta\theta_{оэ} + \Delta\theta_B) \\ \Delta z &= \Delta r_D \end{aligned} \right\} \quad (5.38)$$

По результатам анализа утвержденных типов средств измерений были определены наиболее точные средства для измерения угловых величин: инкрементные оптические датчики ЛИР-4200 (Россия) и RON-905 (Германия). Пределы допускаемой абсолютной погрешность этих угловых датчиков составляют $\pm 0,2''$. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений одного из наиболее точных лазерных дальномеров LDM51 составляют $\pm 1,0$ мм. Погрешность видеокамеры при измерении угловых координат ВЦ зависит от размера ячейки фотоприёмной матрицы. Абсолютная погрешность измерений углового положения ВЦ для видеокамеры высокого разрешения 8192×4320 пикселей с углом обзора 25° равна $1,4''$. Таким образом инструментальная погрешность ВУ при измерении координат ВЦ составит:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= r \operatorname{tg}(1,4'' + 0,2'') \\ \Delta y &= r \operatorname{tg}(1,4'' + 0,2'') \\ \Delta z &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$

Зависимости погрешностей измерений координат ВЦ от ее дальности изображены на графиках (рис. 5.17). Для указанных типов средств измерений инструментальная погрешность измерений координат ВЦ не превысила 1 мм при дальности ВЦ до 128 м. Дальность измерений ВУ можно зависит от разрешения фотоприёмной матрицы и фокусного расстояния объектива. Однако, длиннофокусные объективы имеют небольшой угол обзора, вследствие чего увеличиться время обнаружения ВЦ. Вариофокальный объектив позволяет оптимизировать работу ВУ и повысить скорость измерений.

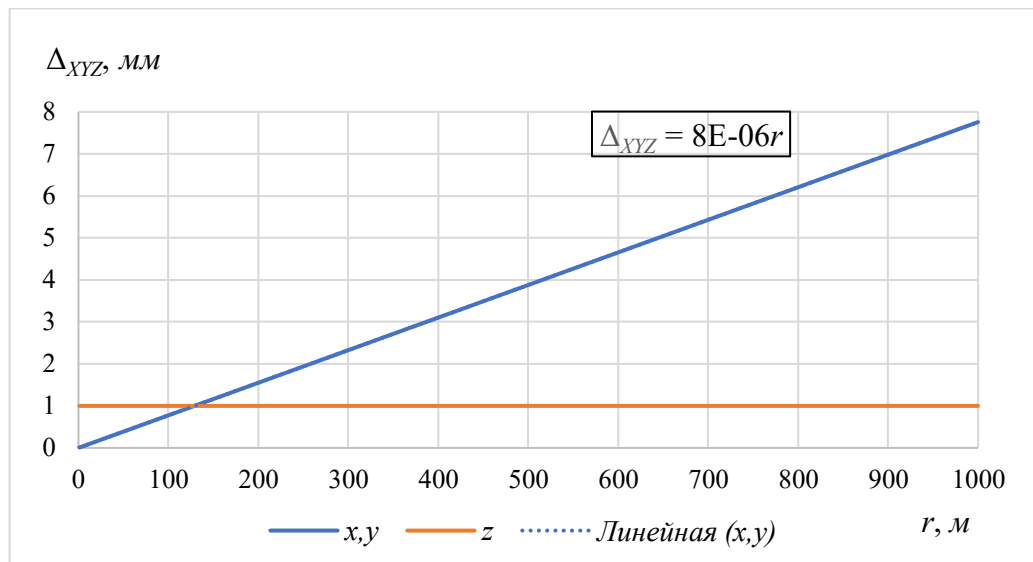


Рисунок 5.17 – Графики инструментальной погрешностей измерения координат ВЦ

Оценка инструментальной погрешности измерений ВУ координат статической ВЦ на изображении проводилась в условиях малых шумов. По результатам экспериментов была получена следующая генеральная совокупность из 1000 результатов измерений координат ВЦ на изображении (рис. 5.18).

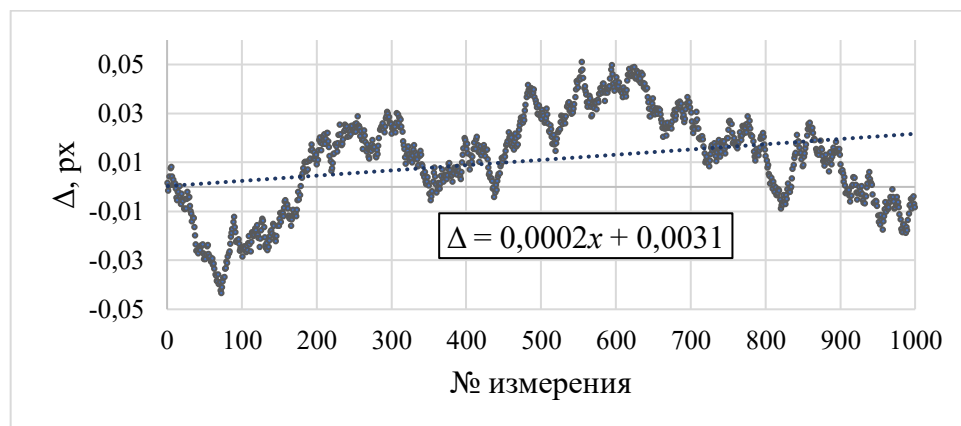


Рисунок 5.18 – Генеральная совокупность из 1000 результатов измерений координат ВЦ на изображении

Полученные результаты измерений упорядочивались:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n \quad (5.40)$$

Определялось выборочное среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,011 \quad (5.41)$$

Оценивалось выборочное среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,02 \quad (5.42)$$

В экспериментальной практике результаты измерений, находящиеся на значительном расстоянии от центра наблюдения исключаются из генеральной совокупности. Признаком аномального результата измерений является его аномально большое удаление от центра распределения. Чтобы оценить принадлежность результата измерений к данной нормальной совокупности и принять решение об исключении или оставлении его в составе выборки, определялись границы цензурирования:

$$U_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{\beta\sigma} = 0,075 \quad (5.43)$$

$$U_n = \frac{\bar{x} - x_n}{\beta\sigma} = -0,0547 \quad (5.44)$$

В случае выполнения условия $U_1 < |x_i| < U_n$, результат измерений можно считать нормальным, в противном случае результат измерений являлся аномальным и исключался из конечной выборки. Табличное значение границы определялось исходя из объема выборки по ГОСТ 11.002–73. Вероятность определения достоверной абсолютной погрешности измерения по экспериментальным данным для объема выборки $n=1000$ составила:

$$P_o \leq \frac{n-1-3n_{омб}}{n+1} \leq 0,998 \quad (5.45)$$

В книгах по метрологии нередко утверждается, что складывать между собой случайные и систематические составляющие погрешности нельзя с принципиальных позиций, так как систематические и случайные погрешности имеют разную природу. Однако это утверждение вряд ли, бесспорно, хотя бы потому, что разделение погрешности на систематическую и случайную составляющие мы вводим сами для облегчения анализа. После проведения такого анализа правомерна постановка и обратной задачи по разделению этих составляющих [327].

Для разделения случайной и систематической составляющих погрешности вводился скользящий интервал наблюдений по объему выборки $n=15$. Положение линии регрессии, если ее определять не по 15, а по 20 точкам, практически не изменится. Это доказывает устойчивость (обусловленность) данного решения. Определялась линия регрессии, которая отражает наиболее подходящую связь в наборе данных между независимыми и зависимыми переменными, на заданном интервале наблюдения. Регрессионная модель задается выражением:

$$y = f(x, b) + \varepsilon \quad (5.46)$$

где b – параметры модели,

ε – случайная ошибка модели.

Усредненная оценка погрешности с применением регрессионной модели на скользящем интервале наблюдений позволяет выделить случайную составляющую погрешности результатов измерений (рис. 5.19). При этом выборочное среднеквадратическое отклонение составило $\sigma_{\text{сл}}=0,00488$ с нулевым математическим ожиданием.

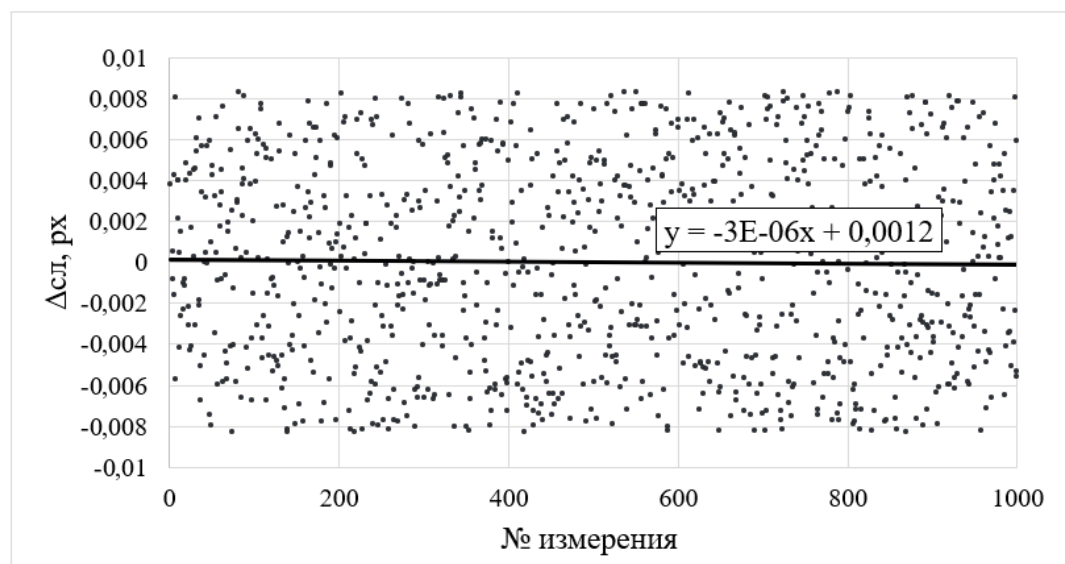


Рисунок 5.19 – Случайные составляющие погрешности результатов измерений координат ВЦ на изображении

После исключения случайной составляющей из результатов измерений определялась систематическая составляющая погрешности результатов измерений

координат ВЦ на изображении (рис. 5.20). При этом выборочное среднеквадратическое отклонение составило $\sigma_{\text{сист}} = 0,0195$.

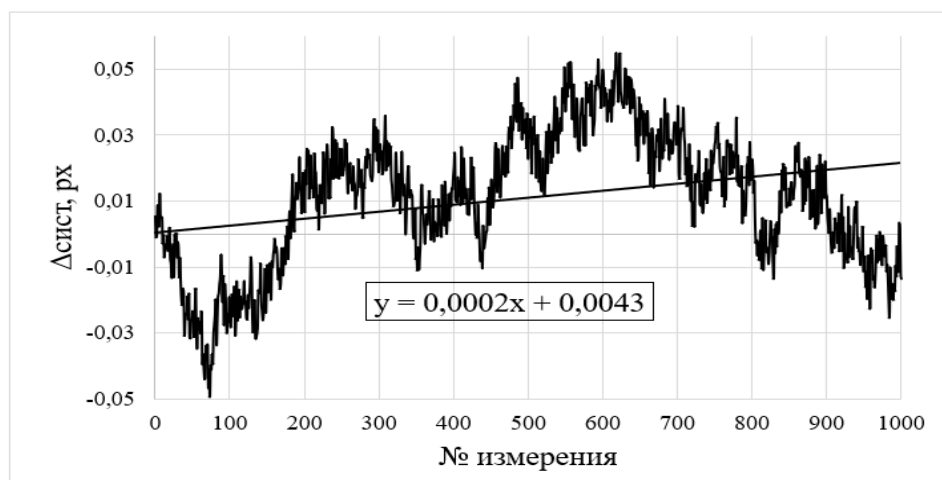


Рисунок 5.20 – Систематические составляющие погрешности результатов измерений координат ВЦ на изображении

В соответствии с ГОСТ 8.207-76 систематической составляющей погрешности следует пренебречь если $\Delta_{\text{сист}} < 0,8\sigma$ и учитывать только случайную погрешность усредненного результата в виде $t\sigma$. В случае $\Delta_{\text{сист}} > 8\sigma$ следует пренебречь случайной составляющей и усредненный результат характеризовать лишь его систематической погрешностью. Данные ограничения являются не совсем корректными, так как наличие неисключённой систематической погрешности делает практически бессмысленным использование статистического усреднения [327].

5.2.4 Сравнительная оценка вычислительной погрешности измерения координат визирных целей

Погрешность визирования ВУ напрямую зависит от погрешности определения координат центра ВЦ. При этом выделение ВЦ на изображении зависит от следующих качественных характеристик изображения: контрастность, резкость, освещенность, цветопередача, оптические искажения, шумы, экспозиция, динамический диапазон, засветка, блики на линзах и т.д. В связи с этим при измерениях с применением ВЦ возникает задача обеспечения высокой точности

визирования оптико-электронного устройства для точного определения угловых координат ВЦ. Эта задача решалась в научном исследовании [337] на основе сравнительного анализа алгоритмов взвешенного суммирования (ВС), взвешенного квадратичного суммирования (ВКС) и аппроксимации функцией Гаусса по методу наименьших квадратов (АГМНК).

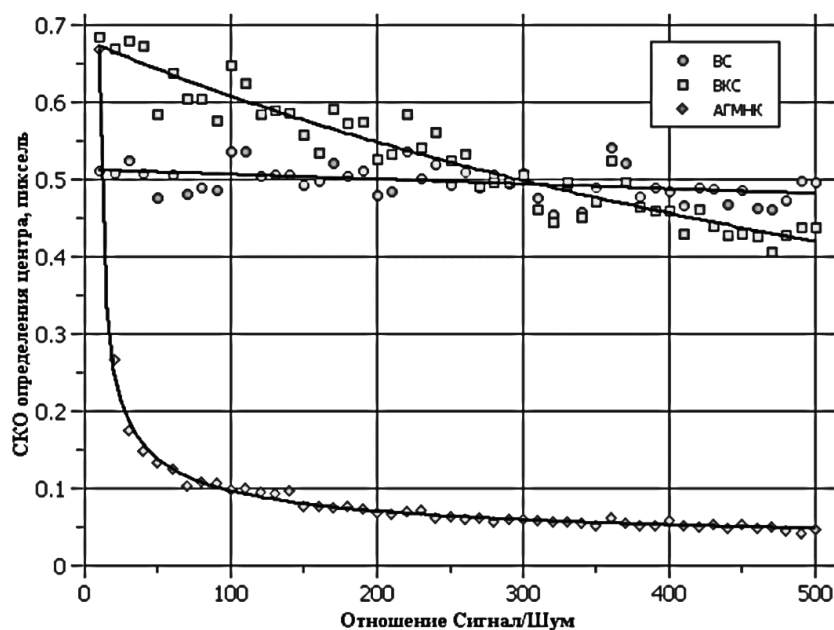


Рисунок 5.21 – Эмпирические зависимости точности определения центра ВЦ на изображении и отношения сигнал-шум

В ходе экспериментов было установлено, что при отношении сигнал-шум $SNR > 300$ применение алгоритма ВКС дает меньшую погрешность результата измерений, чем классический алгоритм ВС (рис. 5.21). Погрешность при использовании суммирующих алгоритмов зависит от первоначальной оценки координат центра окна. При малых размерах изображений и значениях сигнал-шум $SNR > 100$ алгоритм АГМНК превосходит по точности другие алгоритмы в 5 -10 раз. Однако, данный алгоритм менее производителен и занимает на 2 порядка больше процессорного времени, чем другие алгоритмы. При увеличении уровня шума погрешности результатов измерений по всем алгоритмам также возрастают и становятся близкими по значению [337].

В последнее время значительное внимание уделяется частотным методам обработки изображений, что в первую очередь вызвано возросшей производительностью вычислительных машин, а также появлением более

совершенных методов обработки изображения в частотной области [316]. Уровень резкости контура и другие скачкообразные изменения яркости ВЦ на изображении связаны с высокочастотными составляющими [338]. Для анализа и расчета погрешностей определений контура ВЦ необходима информация о законах распределения случайных величин, характеризующих погрешности определения параметров ВЦ. Первая группа погрешностей вызывает рассеивание усредненной оценки радиуса ВЦ r_0 , вторая – рассеивание амплитуд A_k гармонических составляющих некруглости; третья – приводит к случайным значениям фазовых углов φ_k . Двумерная функция плотности вероятности параметров A и φ задается выражением:

$$p(A, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.47)$$

Для определения одномерной функции плотности вероятности $p(A)$ двумерная функция интегрируется по всем возможным значениям фазы:

$$p(A) = \int_0^{2\pi} p(A, \varphi) d\varphi = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right); 0 < A < \infty. \quad (3.48)$$

Интегрируя двумерную функцию плотности вероятности по всем возможным значениям амплитуды, находят функцию плотности вероятности:

$$p(\varphi) = \int_0^{\infty} p(A, \varphi) dA = \frac{1}{2\pi} \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) A dA. \quad (3.49)$$

Используя замену переменной $A^2 = z$, получают:

$$p(\varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{z}{2\sigma^2}\right) dz = \frac{1}{4\pi\sigma^2} 2\sigma^2 = \frac{1}{2\pi}; 0 < \varphi < 2\pi. \quad (3.50)$$

Отсюда следует, что фаза распределена равномерно в промежутке $(0, 2\pi)$. Сопоставляя $p(A)$ и $p(\varphi)$ с выражением $p(A, \varphi)$ можно сделать вывод, что амплитуда и фаза нормального узкополосного процесса, характеризующего отклонение формы ВЦ от окружности, являются независимыми случайными величинами в совпадающие моменты времени. Из центральной предельной теоремы также следует, что сумма достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин, имеющих примерно одинаковые масштабы (ни

одно из слагаемых не доминирует, не вносит в сумму определяющего вклада), имеет распределение близкое к нормальному. С учетом данной теоремы рассмотрим выражение для вычисления радиуса базовой окружности:

$$r_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\pi}^{\pi} r(\varphi) \Delta\varphi, \quad (5.51)$$

где $r(\varphi)$ – достаточно большое количество слабо зависимых значений радиуса, взятых с малым шагом $\Delta\varphi$.

Тогда распределение $f(r_0)$ будет близко к нормальному:

$$f(R_0) = \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(r_0 - m_r)^2}{2\sigma_r^2} \right], \quad (5.52)$$

где m_r – математическое ожидание значения радиуса.

Соответственно амплитуда распределена по закону Рэлея:

$$f(A_k) = \begin{cases} \frac{A_k}{\sigma_k^2} \exp \left(-\frac{A_k^2}{2\sigma_k^2} \right) & \text{при } A_k > 0 \\ 0 & \text{при } A_k \leq 0 \end{cases}, \quad (5.53)$$

Фаза имеет равномерный закон распределения:

$$f(\varphi_k) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{при } 0 \leq \varphi_k \leq 2\pi \\ 0 & \text{при } \varphi_k < 0, \varphi_k > 2\pi \end{cases}. \quad (5.54)$$

В результате математических преобразований получен теоретический закон распределения некруглости [339]:

$$f(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \sigma_k^2}} \exp \left[-0,5(r - m_r)^2 \left(\sigma_r^2 + \sum_{k=2}^p \sigma_k^2 \right)^{-1} \right]. \quad (5.55)$$

Изображение ВЦ представлялось в виде двумерной функции $f(x, y)$.

Насыщенность компонентов цвета на изображении определялась из выражения:

$$\zeta(x, y) = |r(x, y) - g(x, y)| + |r(x, y) - b(x, y)| + |g(x, y) - b(x, y)| \quad (5.56)$$

Обнаружение контура ВЦ осуществлялось путем вычисления градиента для каждой точки изображения по методу Ди Зензо [207]. На гистограмме насыщенности цвета, построенной в горизонтальном сечении изображения ВЦ, из-

за недостаточной резкости изображения наблюдается размытость краев (рис. 5.22). Вследствие этого, контур ВЦ имеет выраженное отклонение формы от окружности.

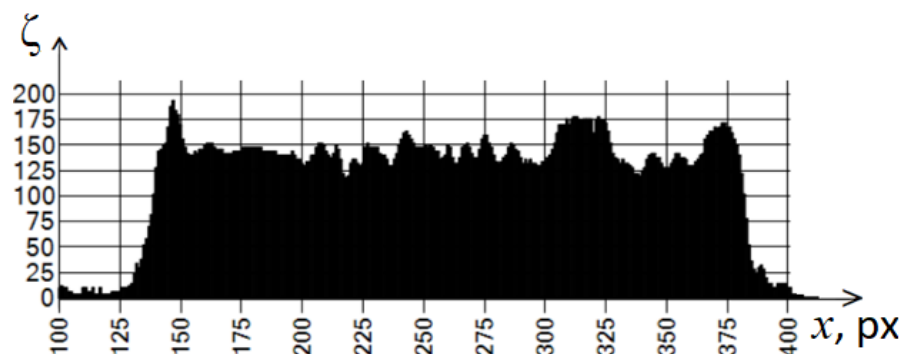


Рисунок 5.22 – Гистограмма насыщенности цвета $\zeta(x)$ в горизонтальном сечении изображения ВЦ, где x – абсцисса в системе координат изображения

Значение среднеквадратического отклонения радиуса ВЦ на изображении составило $\sigma_R \approx 5,22px$, также были определены среднеквадратическое отклонение высшей гармонической составляющей $\sigma_k \approx 2,21px$ и величина центра рассеивания $m_R \approx 132,62px$. График функции распределения $f(r)$ с этими значениями характеристик показан на рисунке 5.23.

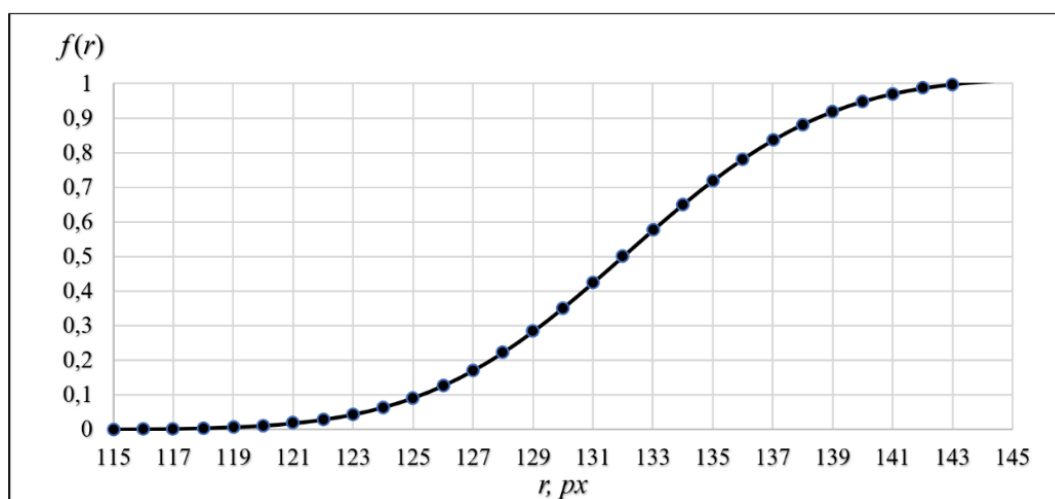


Рисунок 5.23 – График функции распределения

Применив фильтр низких частот в радиусе действия гармоники p из профилограммы были исключены значения радиусов, превышающих центр рассеивания m_R на величину σ_k :

$$h(u) = \begin{cases} 0 & \text{при } f(u) \leq \sigma_k \\ 1 & \text{при } f(u) > \sigma_k \end{cases}. \quad (5.57)$$

Чтобы оценить результат фильтрации гармоник спектр частот Фурье-образа контура ВЦ необходимо привести к исходному виду – профилограмме (рис. 5.24). С этой целью применялось обратное преобразование Фурье:

$$g(\varphi) = \mathfrak{F}^{-1} [h(u) f(u)]. \quad (5.58)$$

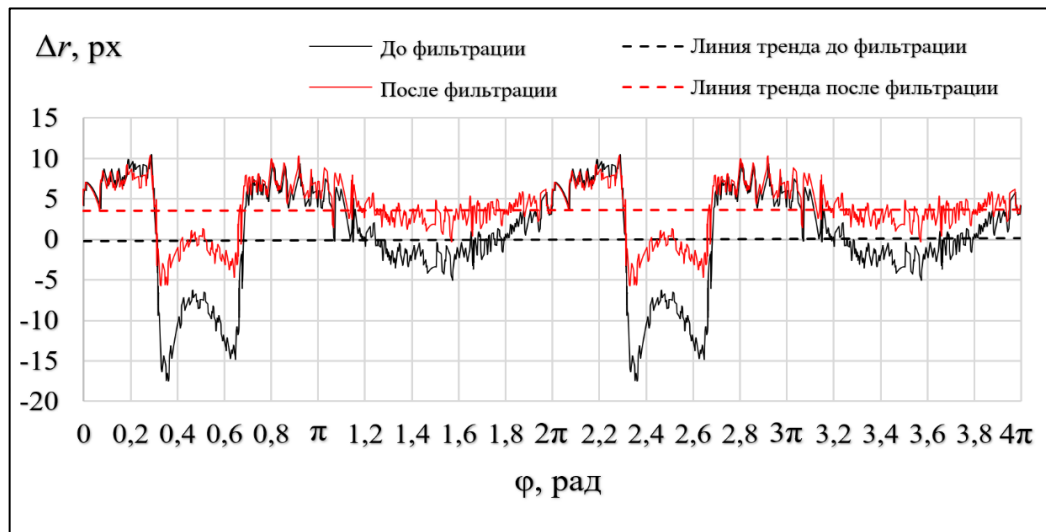


Рисунок 5.24 – Развернутая профилограмма контура ВЦ относительно базовой окружности до и после фильтрации в частотной области

Значение среднего радиуса r_0 вычислялось повторно для точек контура, оставшихся после фильтрации в частотной области изображения. Для определения параметров контура ВЦ с помощью формул Спрэгга решалась оптимизационная задача на вычисление минимума гладкой целевой функции:

$$\min_{x,y,R} \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r_0 \right)^2. \quad (5.59)$$

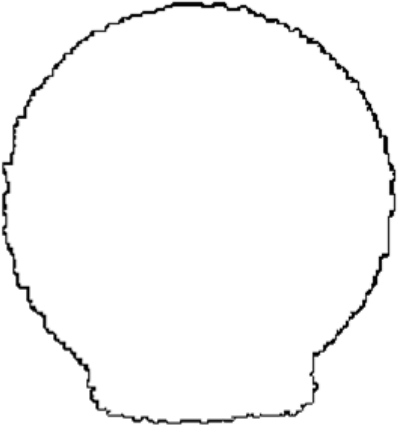
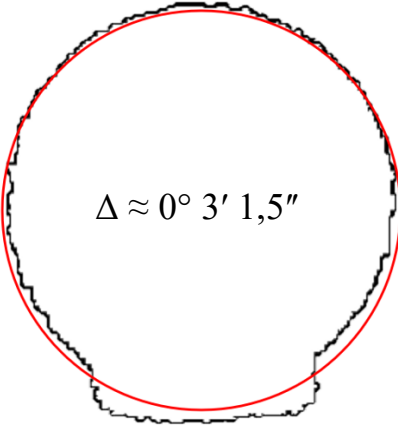
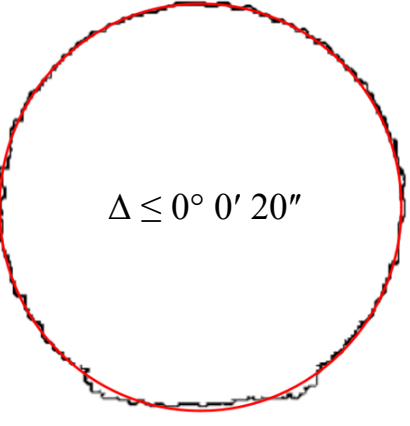
В результате значение среднего радиуса контура ВЦ на изображении уменьшилось до $r_0 \approx 130,86 \text{ px}$, также были найдены координаты центра окружности, аппроксимирующей контур ВЦ на изображении:

$$(x_0, y_0) \approx (130, 52, 137, 97) \text{ px}. \quad (5.60)$$

Сравнительная оценка параметров ВЦ проводилась с помощью метода наименьших квадратов (табл. 5.1). Отклонение формы контура ВЦ на изображении

от формы аппроксимирующей окружности определялось на основании смещенной оценки дисперсии точек контура.

Таблица 5.1 – Сравнительная оценка методической погрешности обработки результатов измерений

Контур визирной цели	Метод наименьших квадратов	Фильтрация контура в частотной области
		

В результате относительная погрешность измерения радиуса ВЦ на изображении уменьшилась на 2,9%. Смещенная оценка дисперсии точек контура относительно параметров ВЦ, определенных частотным методом, уменьшилась в 2,85 раза (с 6,3 до 2,21) по сравнению с оценкой этих параметров, полученных методом наименьших квадратов. При этом абсолютные погрешности результатов измерения радиуса ВЦ Δr и координат центра ($\Delta x, \Delta y$) на изображении составили: $\Delta r \approx 1,76 \text{ px}$, $\Delta x \approx 0,04 \text{ px}$, $\Delta y \approx 0,05 \text{ px}$. Погрешность определения угловых координат ВЦ уменьшилась до пределов допустимой погрешности измерения углов тахеометром технического класса точности 20" (в соответствии с ГОСТ Р 51774-2001). Таким образом, применение частотных методов цифровой обработки изображений позволило повысить точность оптических систем при определении координат ВЦ и способствовало увеличению дальности измерений.

5.2.5 Динамическая погрешность измерения параметров визирной цели

Применение ВСКЗ для решения измерительных задач становится возможным только после калибровки системы, в процессе которой определяются

ее метрологические характеристики и выполняется проверка пригодности данной системы к применению в качестве средства измерения. Калибровка выполняется в соответствии с выбранным методом, в котором описывается совокупность операций, обеспечивающих получение результатов измерений с установленными показателями точности. После калибровки ВСКЗ признается пригодной для измерений, если действительные значения её метрологических характеристик соответствуют заданным техническим требованиям.

Погрешность результата измерений ВСКЗ содержит динамические и статические составляющие, причем первые зависят от изменения параметров объекта измерений во времени. Давая характеристику точности средства измерения, обычно имеют в виду только статические погрешности, а динамические свойства характеризуют отдельно как реакцию на какое-либо изменение параметра объекта измерений $x(t)$. Таким образом, погрешность результата измерений может быть больше погрешности прибора за счет динамических составляющих погрешности. В более общем смысле динамические составляющие погрешности связаны с показателями быстродействия получаемых цифровых результатов измерений. При большой скорости изменения параметра $x'(t) \gg 0$ они увеличиваются, если значение параметра не изменяется за период дискретизации $x(t) = const$, они исчезают [340].

Для ВСКЗ может применяться один из следующих методов калибровки: прямые, косвенные, сличение с эталоном или с помощью компаратора. Косвенный метод калибровки средства измерения используется, когда действительные значения измеряемых величин невозможно определить прямыми измерениями, либо если косвенный метод оказывается более точным. Вначале этим методом находят не искомую характеристику, а другие характеристики, связанные с искомой определенной зависимостью. При этом искомая характеристика определяется расчетным методом [341].

В настоящее время калибровка фотограмметрических систем в основном сосредоточена на калибровке статических параметров камеры. В большинстве из существующих способов [342] [343] [344], позволяющих оценить метрологические

характеристики фото-видеограмметрических систем применяется метод сличения с эталоном. В основном применяется тест-объект, на котором задаётся маркерами множество узловых точек. Координаты маркеров предварительно измеряют высокоточными инструментальными средствами, например посредством трехкоординатной измерительной машины [345]. Подобные тест-объекты хорошо подходят для калибровки фото-видеограмметрических систем, объекты измерения которых находятся в статическом равновесии. Такая калибровка может обеспечить точный захват и отображение точек пространственного положения, но не позволяет определить динамические характеристики фотограмметрической системы. В тех случаях, когда измеряются параметры движущихся объектов, тестовый объект для определения метрологических характеристик таких систем также должен обладать механическим движением.

Для оценки погрешности измерения ВСКЗ скорости и перемещения объектов был разработан способ калибровки видеограмметрической системы с помощью маятника [346], совершающего плоскопараллельные затухающие колебания (рис. 5.25). Затухание нарушает периодичность колебаний физического маятника, поэтому они не являются гармоническими – это означает, что смещение маятника от положения равновесия не изменяется во времени по синусоидальному закону. Однако, физический маятник при малых амплитудах колеблется так же, как математический с приведённой длиной. Таким образом, определив параметры физического маятника можно с высокой точностью вычислить скорость и направление его движения в требуемый момент времени. Приняв эти расчетные значения за действительные, определялись метрологические характеристики ВСКЗ путем сравнения с ними измеренных значений скорости и направления движения маятника [347].

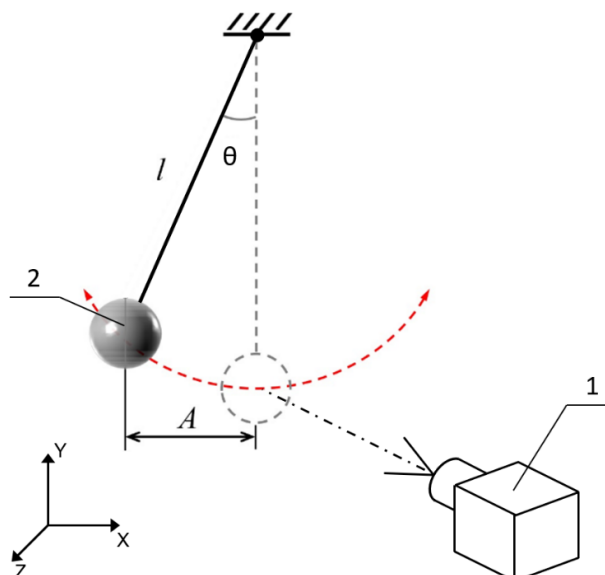


Рисунок 5.25 – Схема калибровки ВСКЗ с помощью простого физического маятника: 1 – видеокамера ВСКЗ; 2 – маятник с формой шара; A – амплитуда колебаний маятника; h – длина подвеса маятника; θ – угол отклонения подвеса маятника от вертикали; X , Y , Z – оси координат

Применение физического маятника для оценки метрологических характеристик ВСКЗ позволяет задавать сложную, контролируруемую траекторию движения объекта измерений по сравнению с неподвижными тест-объектами. Затухающие колебания математического маятника описываются дифференциальным уравнением движения:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (5.61)$$

где φ – угол отклонения подвеса от положения равновесия;

ω_0 – циклическая частота математического маятника.

Решением данного уравнения является функция:

$$\varphi(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (5.62)$$

где x – абсцисса в системе координат маятника;

t – время;

δ – коэффициент затухания колебаний маятника;

ω_0 – циклическая частота собственных незатухающих колебаний маятника.

Решением данного уравнения в случае малых затуханий ($\delta^2 \ll \omega_0^2$) является функция:

$$x(t) = A_0 e^{-\delta t} \cos(t\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} + \varphi_0), \quad (5.63)$$

где A_0 – начальная амплитуда колебаний;

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

φ_0 – начальная фаза колебаний.

Декремент затухания колебаний маятника определяется отношением амплитуд двух его последовательных колебаний [348]:

$$e^{-\delta T} = \frac{A(t)}{A(t+T)}, \quad (5.64)$$

где T – период колебаний маятника.

Циклическая частота собственных незатухающих колебаний маятника зависит от длины его подвеса:

$$\omega_0 = \sqrt{h/g}, \quad (5.65)$$

где h – длина подвеса маятника;

g – ускорение свободного падения.

Момент времени определяющий угол отклонения маятника от вертикали вычисляется из выражения:

$$t = F(\psi, \lambda) / \omega_0, \quad (5.66)$$

где $F(\psi, \lambda)$ – неполный эллиптический интеграл 1-го рода при модуле λ и амплитуде интеграла ψ [349].

При малой угловой амплитуде отклонения подвеса маятника от вертикали ($\theta_0 \leq 19^\circ 43' 19''$) данная зависимость принимает вид:

$$t = \frac{2K}{\pi\omega_0} \arcsin \frac{1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta}}{(1 - \sqrt{1 - \lambda^2}) \sin \theta}, \quad (5.67)$$

где K – полный эллиптический интеграл 1-го рода.

Для определения значения интеграла применялись расчетные зависимости [350], позволяющими находить искомые значения интеграла, которые совпадают с точными табличными данными (с погрешностью $\ll 1\%$), на основе элементарной функции:

$$K = \frac{\pi}{2} + \frac{\ln \sqrt{1-\lambda^2}}{\ln \left[0,35 \left(1 - 0,2\sqrt{1-\lambda^2} \right) \right]}. \quad (5.68)$$

Модуль эллиптического интеграла 1-го рода зависит от амплитуды угла отклонения подвеса маятника в выбранный момент времени:

$$\lambda = \sin \frac{\theta_0(t)}{2}. \quad (5.69)$$

Амплитуда интеграла имеет следующую функциональную зависимость от времени:

$$\psi = \arcsin \frac{2 \left(1 - \sqrt{1-\lambda^2} \right) \sin(\pi t / 2K\omega_0)}{\left(1 - \sqrt{1-\lambda^2} \right)^2 \sin^2(\pi t / 2K\omega_0) + \lambda^2}. \quad (5.70)$$

Изменение угла отклонения маятника от вертикали с учетом декремента затухания его колебаний задается функцией:

$$\theta(t) = 2e^{-\delta t} \arcsin(\lambda \sin \psi). \quad (5.71)$$

Следовательно угол отклонения маятника от вертикали в заданный момент времени определяется из выражения:

$$\theta(t) = 2e^{-\delta t} \arcsin \frac{2\lambda \left(1 - \sqrt{1-\lambda^2} \right) \sin(\pi t / 2K\omega_0)}{\left(1 - \sqrt{1-\lambda^2} \right)^2 \sin^2(\pi t / 2K\omega_0) + \lambda^2}. \quad (5.72)$$

Видеокамера, входящая в состав ВСКЗ, устанавливается в заданной точке, находящейся на известном расстоянии от плоскости колебания маятника, после чего горизонтируется так, чтобы данная плоскость была параллельна плоскости изображения видеокамеры, а ее оптическая ось была направлена на вертикальную ось, проходящую через центр маятника, находящегося в состоянии равновесия. После этого маятник отклоняется от вертикали на заданный угол в пределах угла обзора видеокамеры и отпускается, начиная совершать свободные затухающие колебания под действием силы тяжести.

ВСКЗ обнаруживает маятник и отслеживает его перемещения. Направление движения маятника, выражалось через вектор перемещения относительно нижней

точки равновесия маятника, выбранной за начало координат. Угловые координаты центра маятника определялись ВСКЗ по его координатам на изображении:

$$\alpha = \arctg(sx/f) \quad (5.73)$$

$$\beta = \arctg(sy/f) \quad (5.74)$$

где s – физический размер пиксела фотоматрицы видеокамеры;

(x, y) – координаты центра маятника на изображении.

Координаты центра физического маятника определялись из выражений:

$$X = l \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.75)$$

$$Y = l \operatorname{tg} \beta, \quad (5.76)$$

где l – расстояние между плоскостью изображения видеокамеры и плоскостью колебаний маятника.

Вычислив перемещение маятника $(\Delta X, \Delta Y)$ за некоторый интервал времени τ , определяется его средняя скорость на этом интервале времени усреднения:

$$\bar{v} = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2} = \tau \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}. \quad (5.77)$$

Оценка метрологических характеристик ВСКЗ выполнялась экспериментально [351] с помощью цифровой видеокамеры, обладающей следующими техническими характеристиками: разрешение – 2048×1536 *px*, размер пиксела – $2,2 \times 2,2$ *мкм*, фокусное расстояние объектива – $8,7$ *мм*, динамический диапазон – 100 *дБ*, кадровая частота видеокамеры – 30 *Гц*. В качестве физического маятника был выбран шарообразный объект, радиусом 45 *мм* и массой $0,2$ *кг*, подвешенный на нихромовой проволоке диаметром $0,2$ *мм*. Физический маятник имел следующие параметры: длина подвеса – 2 *м*, амплитуда колебаний – $0,5$ *м*. Ускорение свободного падения в месте проведения эксперимента составило $9,8155$ *м/с²*. Видеокамера устанавливалась на расстоянии $1,5$ *м* от плоскости колебаний маятника.

Посредством цифровой обработки видеоизображения осуществлялось обнаружение маятника по его форме и цветовой окраске. Затем на каждом кадре видеоизображения с помощью разработанной программы для ЭВМ [352] вычислялись координаты маятника в системе координат изображения. В

соответствии с заданными параметрами физического маятника была получена следующая функция, описывающая изменение его свободных затухающих колебаний во времени:

$$\theta(t) = 2e^{-0,002642675t} \arcsin \left(\frac{0,000663 \sin(2,200151741t)}{0,000014803 \sin^2(2,200151741t) + 0,007596123} \right) \quad (5.78)$$

Взаимосвязь измеренных и расчетных значений отклонений маятника от нижнего положения равновесия задается следующим выражением:

$$X(t) = h \sin \theta(t) = l s x(t) / f, \quad (5.79)$$

где f – фокусное расстояние объектива видеокамеры;

$x(t)$ – абсцисса центра маятника на изображении в заданный момент времени.

На графиках (рис. 5.26) изображена функция изменения абсциссы центра маятника в выбранном интервале времени, на которую наложены результаты измерений ВСКЗ значений абсциссы центра маятника в данном интервале времени, а также значения погрешностей этих измерений.

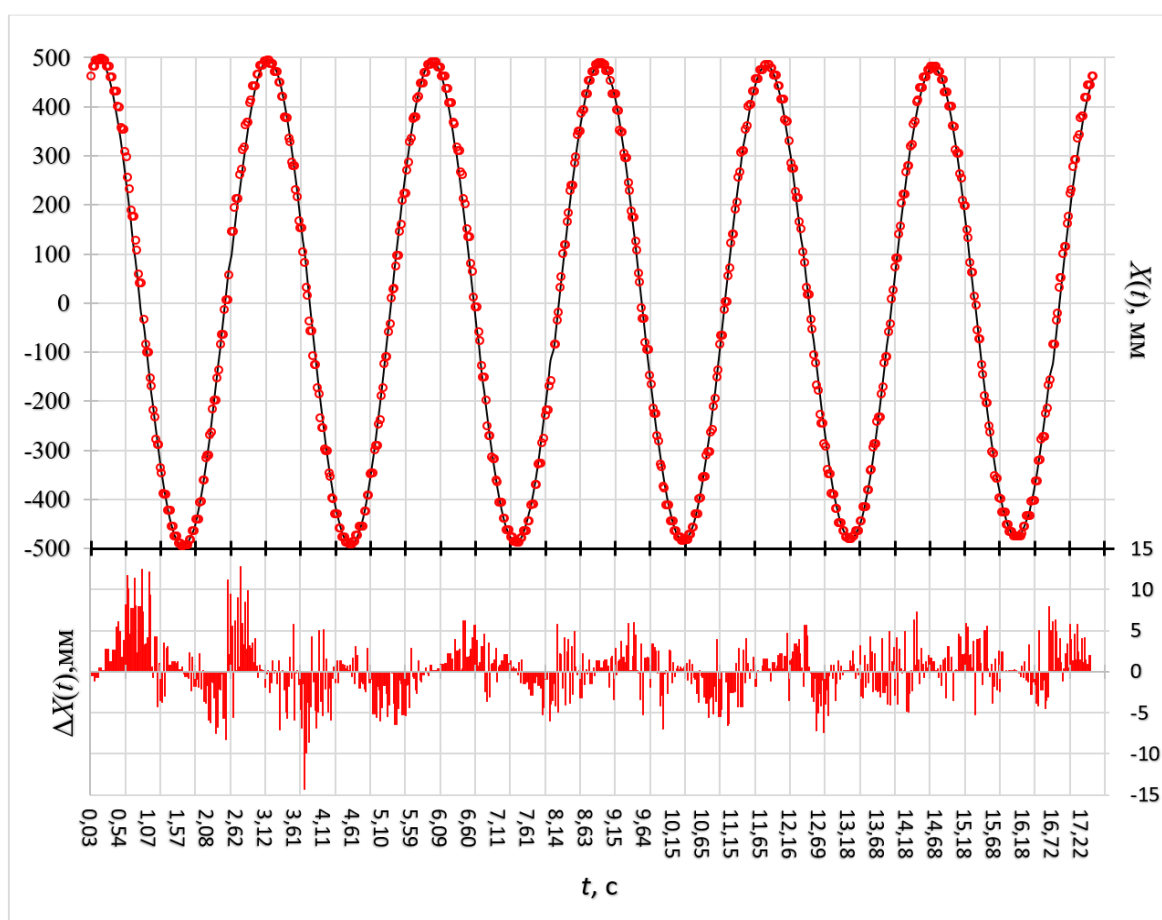


Рис. 5.26. График погрешности измерения ВСКЗ абсциссы маятника

Погрешности измерения зенитного и азимутального углов маятника определялись из следующих выражений:

$$\Delta\alpha = \arctg\left(\frac{htg\theta}{l}\right) - \arctg\left(\frac{sx}{f}\right), \quad (5.80)$$

$$\Delta\beta = \arctg\left(\frac{h-h\cos\theta}{l}\right) - \arctg\left(\frac{sy}{f}\right). \quad (5.81)$$

Результаты оценки абсолютной погрешности ВСКЗ при измерении угловых координат маятника представлены в виде гистограммы на рисунке 5.27. Линия Парето на гистограмме отображает распределение вероятности погрешности измерения. Из гистограммы следует, что погрешность измерения ВСКЗ угловых координат маятника не превысила $0,13^\circ$. Наибольших значений погрешность измерений достигала при прохождении маятником точки равновесия, в те моменты времени, когда его скорость принимала наибольшее значение за период колебания.

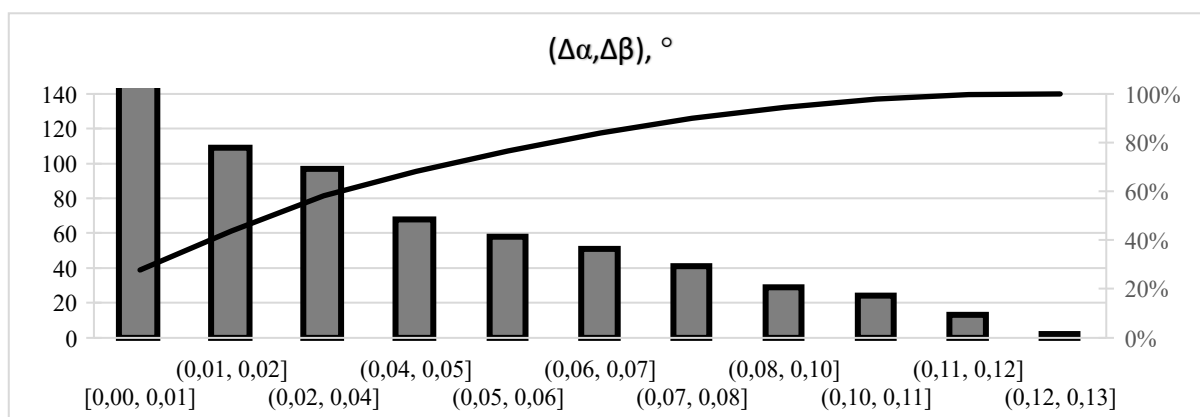


Рисунок 5.27 – Гистограмма результатов оценки абсолютной погрешности измерения ВСКЗ угловых координат маятника

По результатам измерений координат маятника вычислялась амплитуда каждого периода колебаний и рассчитывалась его максимальная скорость, достигаемая им в точке равновесия. Измеренное значение скорости маятника сравнивалось с расчетным значением и определялась абсолютная погрешность измерения его скорости, которая уменьшалась по мере затухания амплитуды колебаний маятника. Максимальная расчетная скорость маятника, достигаемая им в точке равновесия за начальный период колебаний, составила:

$$\max(v_i) = \omega_0 A(T_1) \approx 1,1 \text{ м/с}. \quad (5.82)$$

Измеренное значение скорости маятника сравнивалось с расчетным значением и определялась абсолютная погрешность измерения его скорости на заданном интервале времени усреднения:

$$\Delta v = l\tau \sqrt{\operatorname{tg}^2 \Delta \alpha + \operatorname{tg}^2 \Delta \beta}. \quad (5.83)$$

Был построен график функции (рис. 5.28), отображающий изменение абсолютной погрешности измерения ВСКЗ максимальной скорости маятника в каждом периоде колебаний на интервале времени усреднения 0,25 с. При максимальной скорости маятника 1,1 м/с абсолютная погрешность измерения ВСКЗ его скорости не превысила 5 мм/с.

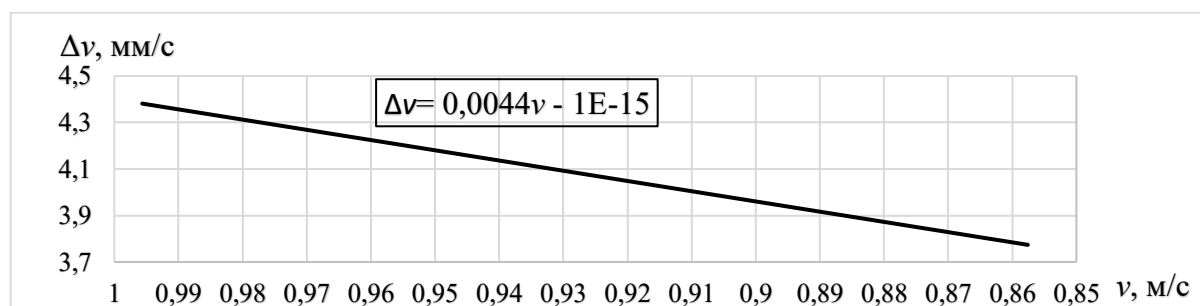


Рисунок 5.28 – График изменения абсолютной погрешности измерения максимальной скорости маятника в каждом периоде колебаний

Таким образом, в ходе экспериментов с помощью свободных затухающих колебаний простого физического маятника были определены метрологические характеристики ВУ, позволяющие оценить погрешности измерения угловых координат, скорости и перемещения движущихся объектов.

5.2.6 Погрешность определения собственных координат видеограмметрического устройства

Для оценки погрешности определения собственных координат ВУ был проведен ряд экспериментов. На участке местности устанавливали три ВЦ на одинаковом базисном расстоянии друг от друга, которое измерялось с высокой точностью с помощью универсального электронного тахеометра. ВЦ размещали на координатной плоскости OXY по часовой стрелке (рис. 5.29), начиная с ВЦ, расположенной на координатной оси OX . Каждая ВЦ имела отличительную

частоту мигания. В составе ВУ использовались три цифровые видеокамеры с типом сенсора CMOS, имеющие разрешение 2048x1536 пикселей, фокусное расстояние объектива 5 мм и кадровую частоту 30 Гц. Предварительно, для всех видеокамер выполнялась юстировка, в процессе которой определялось их фокусное расстояние, а также проводилась калибровка, в ходе которой устанавливались их фотограмметрические характеристики (углы обзора, физический размер пиксела, глубина резкости и т.д.).

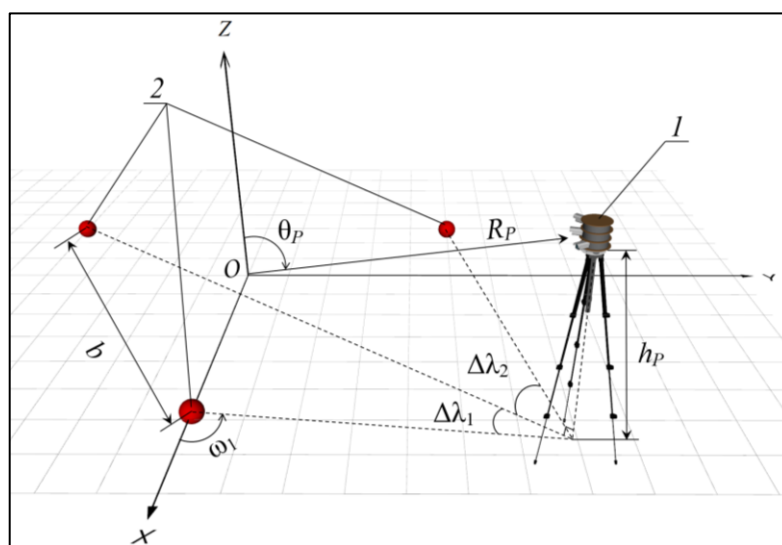


Рисунок 5.29 – Принципиальная схема определения координат видеограмметрического устройства (1) по визирным целям (2)

Обнаружение ВЦ осуществлялось по визуальным признакам с применением разработанных методов цифровой обработки видеоизображений. Направление обзора видеокамер определялось с помощью абсолютных оптических энкодеров, установленных на оси платформы. Ориентирование ВУ осуществлялось методом обратной пространственной фотограмметрической засечки [79]. Для этого использовалась система элементов внешнего ориентирования, состоящая из координат точки съёмки, зенитного и азимутального углов, определяющих направление оптического луча видеокамер. Действительные значения координат ВУ получали с помощью тахеометра. Погрешность измерения дирекционных углов направлений на ВЦ составила 0,06° [87]. Погрешности определения собственных координат ВУ (рис. 5.30) оценивались в диапазоне изменения радиального расстояния R_p [0, 25] м при базисном расстоянии между ВЦ равном 10 м.

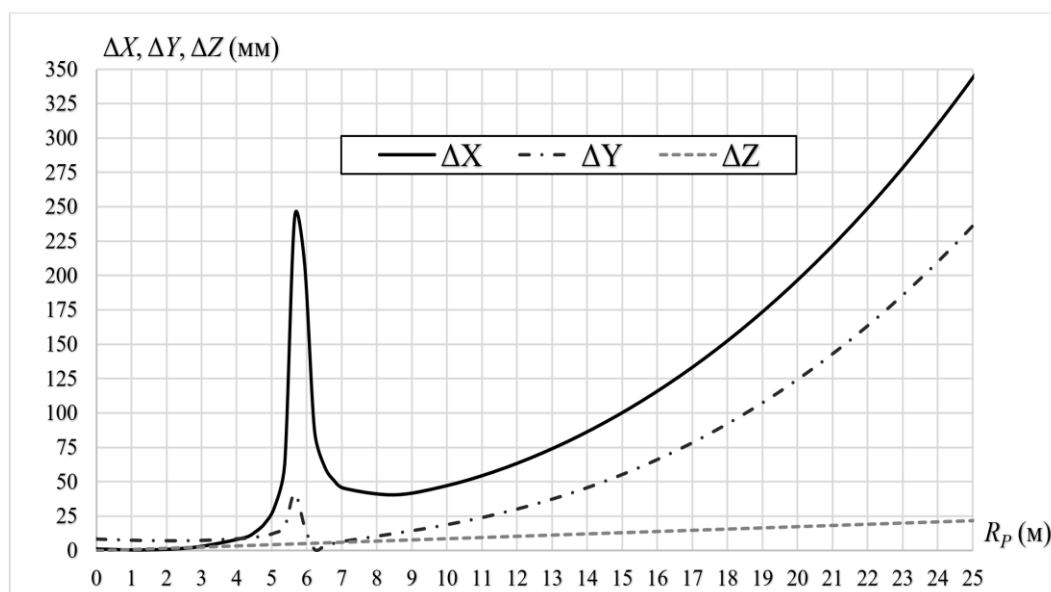


Рисунок 5.30 – Предельные погрешности определения координат ВСКЗ при базисном расстоянии 10 м между визирными целями

На полученных графиках наблюдается увеличение погрешности ВСКЗ в непосредственной близости к воображаемой окружности, на пересечении с которой расположены ВЦ. Это связано с проявлением известного в геодезии эффекта «опасного круга» [353]. Чтобы избежать влияния данного эффекта на точность ВСКЗ целесообразно применять метод многократной угловой засечки по дополнительно устанавливаемым ВЦ. Также были построены карты погрешностей ВУ в зависимости от базисного расстояния между ВЦ (рис. 5.31).

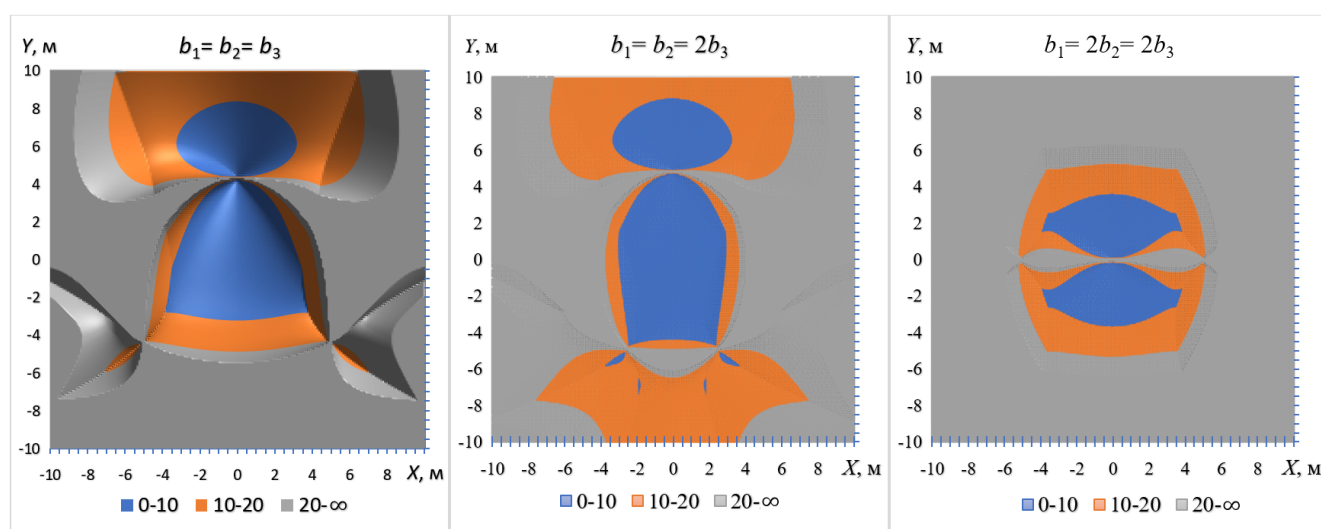


Рисунок 5.31 – Предельные погрешности определения координат ВСКЗ при разных базисных расстояниях между ВЦ: а) все базисные расстояния равны; б) одно базисное расстояние меньше остальных в два раза; в) одно базисное расстояние больше остальных в два раза

Уменьшение одного из трёх базисных расстояний между ВЦ в два раза привело к уменьшению площади области измерения ВСКЗ на 14,3% (с 76,1 м² до 58,4 м²) при допустимой погрешности измерения 20 мм. В случае уменьшения двух из трёх базисных расстояний между ВЦ (b_2 , b_3) в два раза, возникают две разделённые области, площадь каждой из которых меньше на 43% (43,3 м²) при такой же допустимой погрешности измерения. Из полученных результатов следует, что при базисном расстоянии между ВЦ равном 100 м плановое положение ВУ может быть определено в пределах допуска 85 мм, а высотное положение в пределах допуска 35 мм с вероятностью идентификации ВЦ до 99,6 %.

5.2.7 Оценка суммарной стандартной неопределенности результата измерений координат визирной цели

Суммарная стандартная неопределенность результата измерений ВУ координат ВЦ учитывает методические, динамические, шумовые инструментальные и вычислительные составляющие погрешности измерений. Перед суммированием все составляющие погрешности должны быть выражены в виде стандартных неопределенностей. Погрешность результата измерения определяет границы неопределенности значения измеряемой величины. При этом необходимо учитывать степень доверия к такой оценке неопределенности результата измерений:

$$u(y(x_1, x_2, \dots)) = c\sigma(y(x_1, x_2, \dots)), \quad (5.84)$$

где $y(x_1, x_2, \dots)$ – функция результата измерений с учетом параметров x_1, x_2, \dots ;
 $\sigma(y(x_1, x_2, \dots))$ – стандартное отклонение результата измерений при заданных параметрах;

c – коэффициент неопределенности.

Общее соотношение между суммарной стандартной неопределенностью $u_c(y)$ результата измерений y и неопределенностью параметров (x_1, x_2, \dots, x_n) от которых зависит результат измерений, имеет вид:

$$u_c(y(x_1, x_2, \dots)) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 \sigma_i^2(y(x_1, x_2, \dots))} \quad (5.85)$$

Коэффициент неопределенности зависит от вероятности нахождения истинного значения измеряемой величины в заданных границах неопределенности результата измерения. Для закона распределения случайной величины, близкому к нормальному, значение этого коэффициента может быть определено из табличных значений нормированных квантилей нормального распределения (табл. 5.2).

Таблица 5.2 – Значения нормированных квантилей для нормального распределения

Вероятность P	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995	0,997	0,998	0,999
Процентная точка c	1,65	1,96	2,33	2,58	2,81	2,97	3,09	3,29

Вклад каждой составляющей погрешности представляет собой оценку дисперсии погрешности, умноженную на соответствующий коэффициент неопределенности, характеризующего степень доверия к данной оценке. Следовательно суммарная стандартная неопределенность измерения угла может быть задана моделью, учитывающей степень доверия к составляющим погрешности результата измерений:

$$u_c(\varphi(f, px, r, v, fps, T, E_v)) = \sqrt{c_i^2 \sigma_i^2(\varphi(f, px)) + c_d^2 \sigma_d^2(\varphi(r, v, fps)) + c_{ш}^2 \sigma_{ш}^2(\varphi(r, T, E_v))} \quad (5.86)$$

где σ_i , σ_d , $\sigma_{ш}$, – оценки влияния составляющих погрешности (инструментальной, динамической, шума) на стандартное отклонение результатов измерений.

В данной модели не учитываются вычислительная и методическая составляющие погрешности результата измерений. Современные вычислительные средства обеспечивают достаточно высокую точность вычислений, в связи с чем вычислительной составляющей погрешности можно пренебречь. Методическая погрешность возникает вследствие неточности или неполноты априорной информации о влиянии физических процессах. Например, на величину стандартного отклонения результата измерений оказывают влияние следующие условия проведения измерений:

- климатические (температура окружающей среды, освещенность, относительная влажность, атмосферное давление);
- колебания тока в электрической сети, магнитные поля и др.;
- внешние нагрузки (вибрации, ударные нагрузки, внешние касания деталей приборов, ионизирующее излучение, состав атмосферы и т. д.).

Влияние атмосферы, фоновых помех изучены недостаточно, поэтому точно учесть их влияние на стандартное отклонение результатов затруднительно. Принципиально методические погрешности неустранимы, можно лишь по мере приобретения знаний все с большей точностью учитывать их влияние. Характер этих погрешностей случайный, в большинстве случаев описывается нормальным законом распределения плотности вероятности и оценивается с помощью моделей, учитывающих влияние основных физических процессов на результат измерений [168].

К параметрам инструментальной погрешности относятся границы основной погрешности, класс прибора, погрешность квантования, которые указывается в паспорте и используется для оценки неопределенности результатов измерений. Так, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений, указанные в описании типов инкрементных оптических угловых датчиков ЛИР-4200 или RON-905 составляют $\pm 0,2''$ при доверительном уровне 99,7%. По таблицам процентных точек нормального распределения 99,7%-й доверительный интервал углового датчика (УД) вычисляется исходя из значения 2,97 дает стандартную неопределенность:

$$\sigma_{уд} = 0,2 / 2,97 \approx 0,067''. \quad (5.87)$$

С помощью натурных экспериментов было оценено стандартное отклонение результата измерений оптико-электронным устройством (ОЭУ) координат ВЦ на изображении, которое составило $\sigma_0 = 0,06$. Соответственно стандартное отклонение результата измерений ОЭУ углового положения ВЦ может быть получено из выражения:

$$\sigma_{\text{ОЭУ}}(\varphi(f, px)) = \text{arctg}\left(\sigma_0 \frac{px}{f}\right). \quad (5.88)$$

Для ОЭУ (Leica APO-Vario-Elmarit-SL) высокого разрешения, обладающим фокусным расстоянием фотообъектива $f=28$ мм и фотоприемной матрицей с физическим размером пиксела $px=4,3$ мкм, при доверительном уровне 99,7% стандартное отклонение результата измерений углового положения ВЦ составляет 1,4". Соответственно стандартная неопределенность ОЭУ при измерении угловых координат ВЦ составит:

$$\sigma_{\text{ОЭУ}}(\varphi(f, px)) = 1,4 / 2,97 \approx 0,47'' \quad (5.89)$$

Влияние инструментальной погрешности на стандартное отклонение результатов измерений можно оценить из выражения:

$$\sigma_{\text{и}}(\varphi(f, px)) = \sqrt{\sigma_{\text{уд}}^2 + \sigma_{\text{ОЭУ}}^2(\varphi(f, px))} \quad (5.90)$$

В случае применения указанных средств измерений оценка влияния инструментальной погрешности на стандартное отклонение результата измерений составит:

$$\sigma_{\text{и}}(\varphi(f, px)) = \sqrt{\sigma_{\text{уд}}^2 + \text{arctg}^2\left(\sigma_0 \frac{px}{f}\right)} \approx 0,475'' \quad (5.91)$$

Влияние динамической составляющей погрешности оценивалось с помощью физического маятника. Приращение угла между направлением на маятник и оптической осью ВУ определяется угловой скоростью маятника:

$$d\varphi = \vec{\omega} dt \quad (5.92)$$

Максимальное значение, которое может принять угловая скорость маятника:

$$\max(\vec{\omega}) = \text{arctg}\left(\frac{|\vec{v}|}{|\vec{r}|}\right), \quad (5.93)$$

где \vec{r} – радиус-вектор точки (из начала координат),

\vec{v} – вектор скорости маятника.

Тогда максимальное приращение угла определяется из выражения:

$$\max(d\varphi) = \text{arctg}\left(\frac{|\vec{v}|}{|\vec{r}|} dt\right). \quad (5.94)$$

Вследствие погрешности измерения скорости маятника Δv возникает погрешность измерения углового отклонения маятника от линии его подвеса $\Delta\varphi$. Выразив приращение $d\varphi$ через погрешность измерения углового отклонения маятника от линии подвеса $\Delta\varphi$, запишем это выражение в следующем виде:

$$\Delta\varphi = \arctg \left(\frac{\Delta v}{|\vec{r}|} dt \right) \quad (5.95)$$

По результатам натурного эксперимента была определена следующая функциональная зависимость абсолютной погрешности измерения скорости ВУ от скорости маятника:

$$\Delta v = 0,0044v \quad (5.96)$$

Поскольку плоскость колебания маятника перпендикулярна оптической оси ВУ, то величину радиус-вектора можно выразить через дальность ВЦ, а приращение по времени dt через кадровую частоту fps обработки видеоизображения ВУ. Подставив функциональную зависимость погрешности измерения скорости ВУ от скорости маятника в предыдущее выражение, получим:

$$\Delta\varphi = \arctg \left(\frac{0,0044v}{r \cdot fps} \right), \quad (5.97)$$

где v – скорость ВЦ;

r – дальность ВЦ;

fps – кадровая частота обработки видеоизображения ВЦ.

При доверительном уровне 95% оценка влияния динамической погрешности на стандартное отклонение результатов измерений угловых координат ВЦ составит:

$$\sigma_d(\varphi(v, r, fps)) \approx 0,51 \arctg \left(\frac{0,0044v}{r \cdot fps} \right) \quad (5.98)$$

Влияние динамической погрешности на результат измерения увеличивается с уменьшением дальности ВЦ. При кадровой частоте обработки видеоизображения 30 Гц, стандартное отклонение результатов измерений угловых координат ВЦ,

находящейся на расстоянии более 10 м от ВУ и движущейся со скоростью менее 1 м/с, составит:

$$\sigma_d(\varphi(v, r, fps)) \approx 0,5 \operatorname{arctg}\left(\frac{0,0044 \cdot 1}{10 \cdot 30}\right) \approx 1,54'' \quad (5.99)$$

На изображении ВЦ возникает шум вследствие недостатка освещения, а также повышенной температуры [338]. Зависимость отношения сигнал-шум от среднеквадратического отклонения шума определяется из выражения:

$$SNR = 20 \lg(\mu/\sigma), \quad (5.100)$$

где μ – среднее значение сигнала;

σ – среднеквадратическое отклонение шума.

Тогда, среднеквадратические отклонения составляющих шума, возникающих из-за недостатка освещения и повышенной температуры, определяются следующими выражениями:

$$\sigma(SNR(T)) = \mu 10^{-SNR(T)/20} \quad (5.101)$$

$$\sigma(SNR(E_v)) = \mu 10^{-SNR(E_v)/20} \quad (5.102)$$

Суммарное среднеквадратическое отклонение шума определяется квадратным корнем из суммы дисперсий всех некоррелированных составляющих:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^K \sigma_i^2} \quad (5.103)$$

Откуда следует:

$$\sigma(SNR(T, E_v)) = \mu \sqrt{10^{-SNR(T)/10} + 10^{-SNR(E_v)/10}} \quad (5.104)$$

Суммарное значение шума на изображении определяется из:

$$SNR(T, E_v) = 20 \lg \left(10^{-SNR(T)/10} + 10^{-SNR(E_v)/10} \right)^{-0,5} \quad (5.105)$$

Для оценки влияния шума на стандартное отклонение результата измерений были определены, посредством проведения натурных экспериментов, функциональные зависимости отношения сигнал-шум от температуры и освещенности фотоприёмного устройства [84]. Функциональная зависимость отношения сигнал-шум от температуры может быть приближенно выражена через многочлен третьей степени:

$$SNR(T) = -0,0008T^3 + 0,0998T^2 - 4,3319T + 102,29 \quad (5.106)$$

Влияние освещенности фотоприемника на величину отношения сигнал-шум также может быть приближенно выражено логарифмической зависимостью:

$$SNR(E_v) = 4,5148 \ln(E_v) + 26,494 \quad (5.107)$$

Относительная погрешность измерения радиуса ВЦ на изображении имеет следующую функциональную зависимость от величины отношения сигнал-шум:

$$\delta_r = 1361e^{-0,174SNR(T,E_v)} \quad (5.108)$$

Предположим, что предельная относительная погрешность измерения координат центра ВЦ имеет такую же функциональную зависимость от уровня шума. Тогда, предельная абсолютная погрешность измерения координат центра ВЦ может быть найдена из выражения:

$$\Delta_o = \frac{1361e^{-0,174SNR(T,E_v)}r}{100} \quad (5.109)$$

При доверительном уровне 95% стандартное отклонение координат центра ВЦ составит:

$$\sigma(O(r, E_v, T)) = \frac{1361e^{-0,174SNR(T,E_v)}r}{196} \quad (5.110)$$

Размер радиуса ВЦ на изображении зависит от физического размера радиуса, дальности ВЦ и фокусного расстояния объектива, соответственно стандартное отклонение координат ВЦ можно представить в следующем виде:

$$\sigma(O(R, f, l, E_v, T)) = \frac{1361e^{-0,174SNR(T,E_v)}Rf}{196l} \quad (5.111)$$

Тогда, оценку стандартного отклонения результатов измерений угловых координат ВЦ от величины сигнал-шум можно определить из выражения:

$$\sigma_{III}(\varphi(R, px, l, E_v, T)) = \arctg\left(\sigma_{xy} \frac{px}{l}\right) \quad (5.112)$$

Откуда, получим выражение:

$$\sigma_{III}(\varphi(R, px, l, E_v, T)) = \arctg\left(\frac{1361e^{-0,174SNR(T,E_v)} \cdot R \cdot px}{196l}\right) \quad (5.113)$$

Влияние шума на результат измерений угловых координат ВЦ увеличивается с уменьшением дальности ВЦ. При температуре фотоприёмного устройства (ФУ) менее $T < 30^\circ\text{C}$ и его освещенности $E_v > 10$ лк отношение сигнал-шум составит $\text{SNR}(T, E_v) > 35$ дБ. С учетом физического размера пиксела фотоприёмного устройства $px = 2,2$ мкм и радиуса ВЦ равном $R = 25$ мм оценка влияния шума на стандартное отклонение результата измерений угловых координат ВЦ, находящейся на дальности $r > 1$ м, составит:

$$\sigma_{\text{ш}}(\varphi(R, px, r, E_v, T)) = \arctg\left(\frac{1361e^{-0,174 \cdot 3} \cdot 25 \cdot 0,0022}{196 \cdot 1000}\right) \approx 0,18'' \quad (5.114)$$

Суммарная неопределенность рассчитывалась с учетом параметров и условий проведения измерений, приведенных в таблице 5.3. При этих параметрах и доверительном уровне 95% суммарная неопределенность составит:

$$u_c(\varphi(f, px, r, v, fps, R, T, E_v)) = \sqrt{1,96^2 (0,475^2 + 1,54^2 + 0,18^2)} \approx 3,18'' \quad (5.115)$$

Таблица 5.3 – Параметры и условия проведения измерений

Параметры	Обозначения	Величины
Фокусное расстояние объектива	f , мм	28
Физический размер пиксела фотоматрицы	px , мкм	2,2
Относительная скорость визирной цели	v , м/с	<1
Кадровая частота обработки видеоизображения	fps , Гц	30
Температура фотоприемника	T , °C	<30
Освещенность фотоприемника	E_v , лк	>10
Радиус визирной цели	R , мм	25
Дальность визирной цели	r , м	10

Графики оценки влияния составляющих погрешности измерения ($\Delta_{\text{и}}$ – инструментальной, $\Delta_{\text{д}}$ – динамической, $\Delta_{\text{ш}}$ – шума) на стандартное отклонение ($\sigma_{\text{и}}$, $\sigma_{\text{д}}$, $\sigma_{\text{ш}}$) и суммарную неопределенность результата измерений $\mu_{\text{с}}$ угловых координат ВЦ, при доверительном уровне 95%, изображены на рисунке 5.32. Из графиков видно, что основное влияние на стандартное отклонение результата измерений на расстоянии до 20 м оказывает динамическая составляющая погрешности.

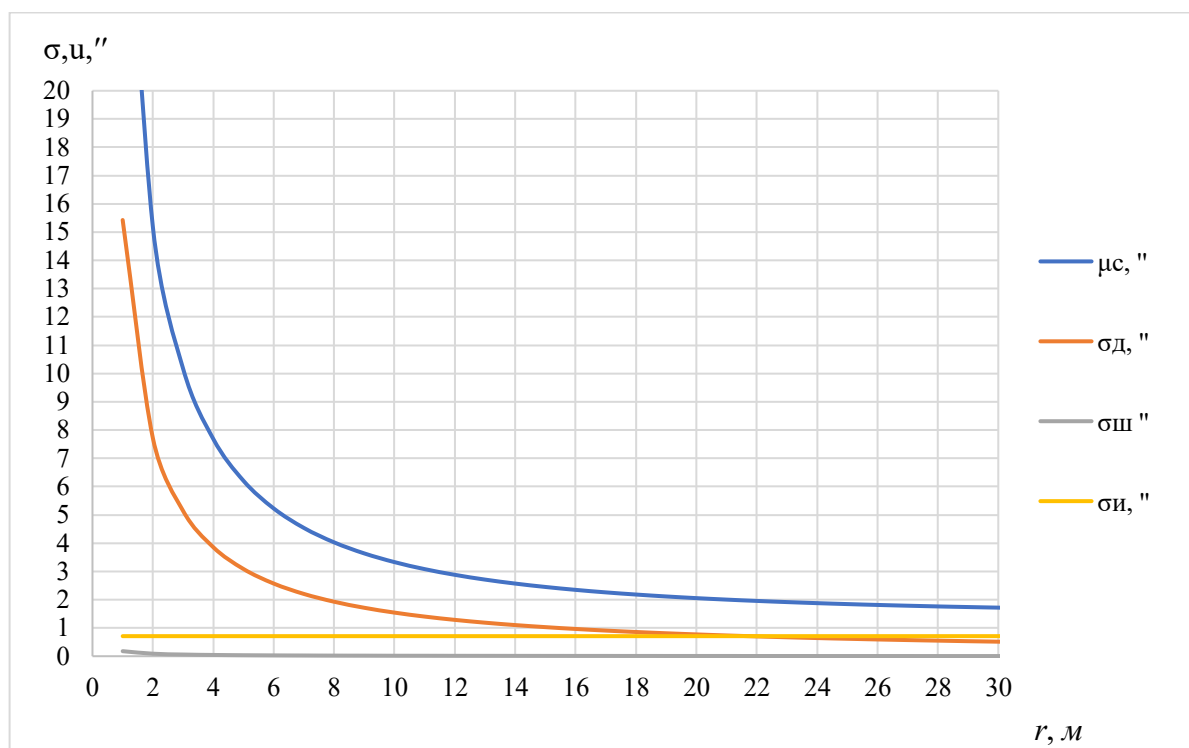


Рисунок 5.32 – Графики влияния составляющих погрешности измерения на стандартное отклонение и суммарную неопределенность результата измерений угловых координат визирных целей

Для представления суммарной неопределенности результата измерения угловых координат ВЦ в прямоугольной системе координат используются следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} u_c(x) &= (u_{\text{лд}}(l) + l) \operatorname{tg}(u_c(\varphi)) \\ u_c(y) &= (u_{\text{лд}}(l) + l) \operatorname{tg}(u_c(\theta)) \\ u_c(z) &= u_c(l) \end{aligned} \right\} \quad (5.116)$$

При этом учитывается неопределенность результата измерений лазерного дальномера $\mu_{\text{лд}}$. Например, в таблице Б.7 приведены основные метрологические характеристики лазерного дальномера DISTOMAT WILD D12002. Допускаемое СКО результата измерений расстояния лазерным дальномером составляет не более: $1 + 1 \times 10^{-6} \times l$, где l – измеряемое расстояние, мм. Подставив это выражение в (5.116), были построены графики, отображающие влияние составляющих погрешности измерения на суммарную неопределенность результата измерений координат ВЦ (рис. 5.33).

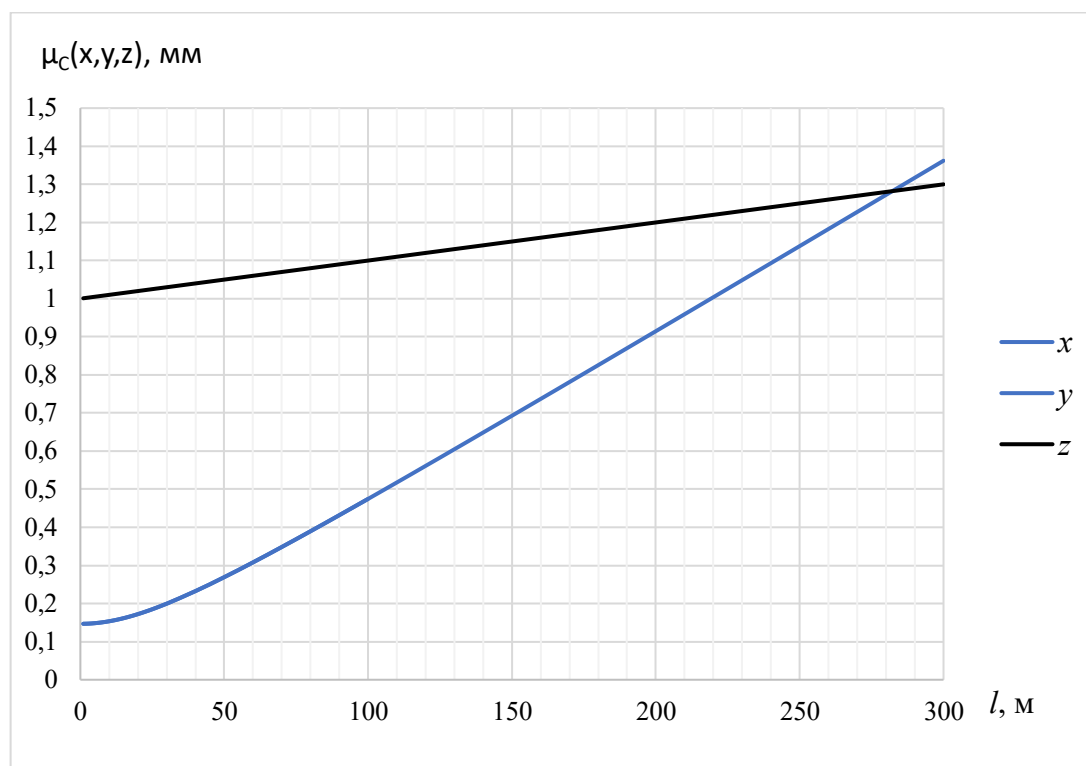


Рисунок 5.33 – Графики влияния составляющих погрешности измерения на суммарную неопределенность результата измерений координат

Следует отметить, что суммарная стандартная неопределенность соответствует одному стандартному отклонению и запись результата измерений с использованием знака « \pm » не является корректной, поскольку ассоциируется с интервалом, соответствующим высоким уровням достоверности [354]. Таким образом, были оценены составляющие погрешности и суммарная неопределенность результата измерений ВУ координат ВЦ. Снижение шума может достигаться путем охлаждения фотоприемника ВУ и повышением уровня освещенности. Применение частотных методов цифровой обработки изображений ВЦ также способствует повышению точности ВУ. Уменьшение инструментальной составляющей погрешности ВУ может быть достигнуто с помощью длиннофокусного объектива и матрицы фотоприемника высокого разрешения. Динамическую составляющую погрешности ВУ можно уменьшить путем увеличения кадровой частоты обработки видеоизображения, а также с помощью поправочных коэффициентов, определяемых в процессе калибровки ВУ.

5.3 Оценка погрешности определения координат точек железнодорожного пути

Для оценки погрешности определения координат точек на местности по материалам проведения аэрофотосъёмки и данным лазерного сканирования была создана имитационная модель проведения плановой аэрофотосъёмки (авиасимулятор). В состав модели вошли спутниковая карта местности и БПЛА с прикрепленной к нему АФК и ВЛС. С помощью модели задавались следующие параметры БПЛА: высота, скорость и направление полета. В качестве средства, имитирующего АФК, использовалась виртуальная видеокамера, которая выполняла визуализацию моделируемого процесса, отображая на экране монитора окно анимации вместе с телеметрической информацией (рис. 5.34). В имитационной модели учитывались реальные условия проведения аэрофотосъёмки, а также технические характеристики современных устройств, применяемых для этой цели. Принимались в расчет технические характеристики среднеформатной цифровой АФК, имеющей разрешение 11608 x 8708 пикселей, физический размер пикселя 4,6 мкм и фокусное расстояние объектива 100 мм [199].

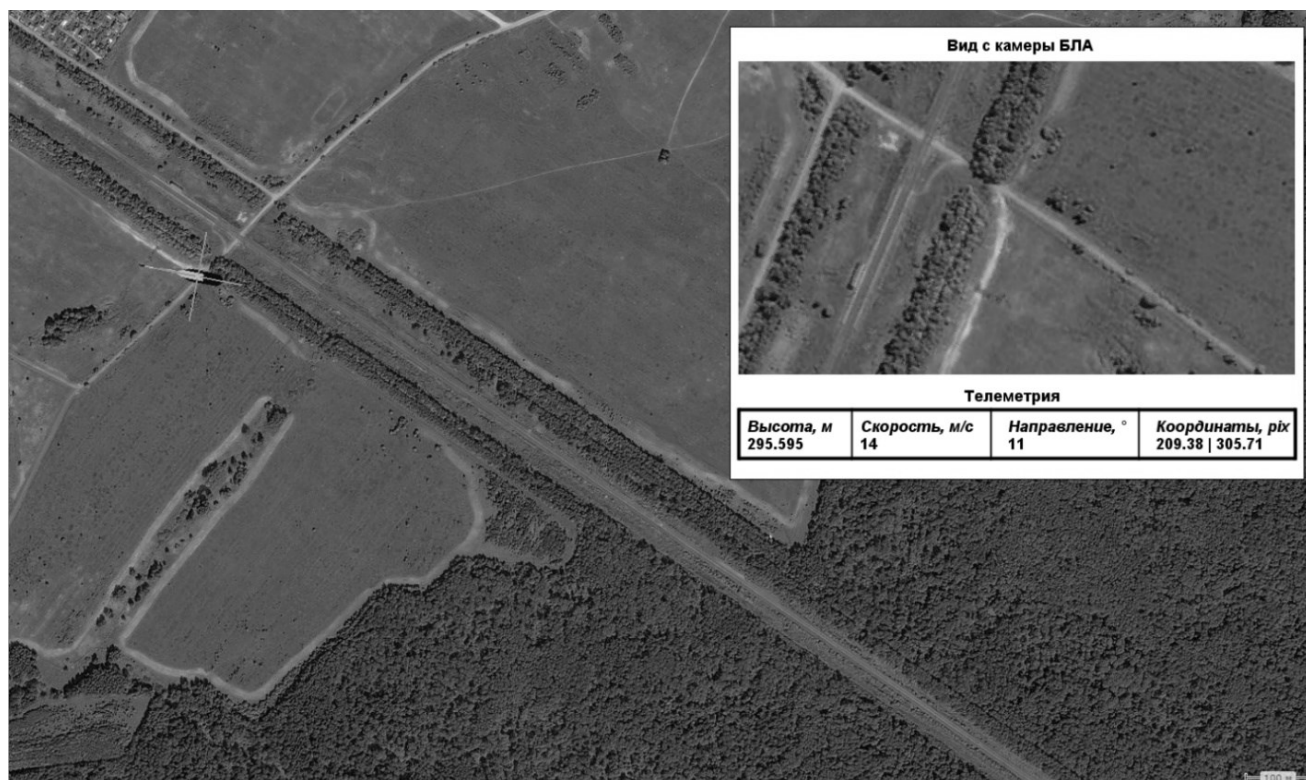


Рисунок 5.34 – Имитационная модель проведения плановой аэрофотосъёмки

В процессе моделирования проводилась маршрутная съемка местности вдоль полотна ж/д пути на протяжении 16 минут при переменном ветре со скоростью до 12 м/с. Схема координат точек на сканируемой поверхности ж/д пути показана на рисунке 5.35. Высота аэрофотосъемки была установлена на отметке $h=50$ м. Погрешность ориентирования АФК гиросtabilизирующей установкой принята $\Delta\omega=\pm 0,1^\circ$. Погрешность измерения координат приемником сигналов ГНСС задавалась в пределах $\delta_{\text{ГНСС}} = \pm 15$ мм.

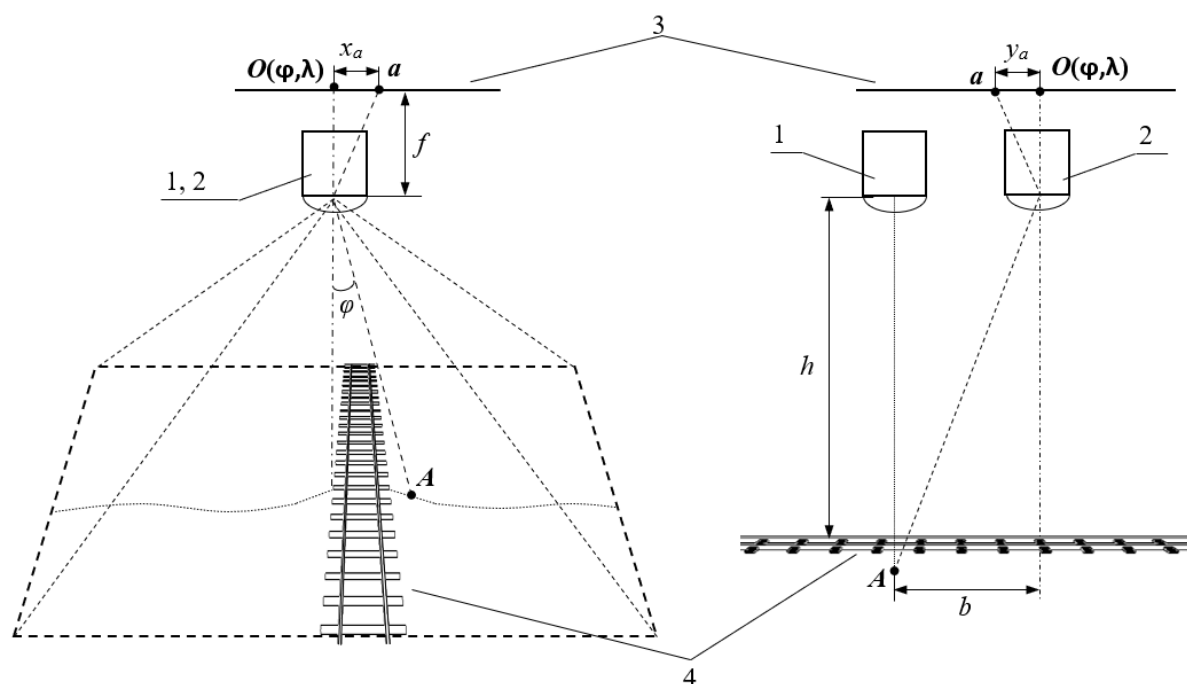


Рисунок 5.35 – Схема измерения координат точки A на поверхности железнодорожного пути: 1 – аэрофотокамера; 2 – лазерный сканер; 3 – плоскость снимка; f – фокусное расстояние аэрофотокамеры; h – результат измерения дальности лазерным дальномером

В соответствии с разработанным способом [261], посредством компьютерной обработки АФС, определялись изменения координат центров АФС на стереопарах. Измерения проводились в собственной декартовой системе координат ВСКЗ, где за единицу измерения принимался размер пиксела. Путем сопоставления 10-ти пар действительных и измеренных значений относительного смещения координат центров двух объединяемых АФС была оценена методическая погрешность (рис. 5.36). Стереопары АФС выбирались в произвольные моменты времени на различных участках маршрута полета. В качестве действительных значений

принималось величина перемещения АФК в имитационной модели за период фотографирования [262].

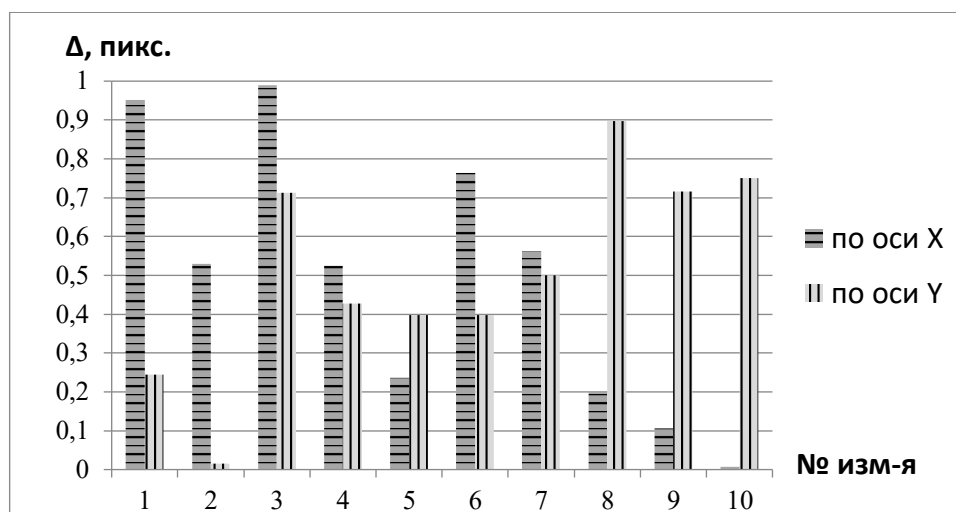


Рисунок 5.36 – Абсолютные погрешности определения относительного положения координат центров двух объединяемых кадров стереопар

На графике значения абсолютной погрешности во всех полученных результатах не превышают одного пиксела. Значения данной абсолютной погрешности характеризуют методическую погрешность способа и свидетельствует о пригодности его применения в процессе проведения аэрофотосъемки. Полученные значения абсолютной погрешности по оси Y определяют точность, обеспечиваемую ВСКЗ, с которой определяется отклонение БпЛА от маршрута полета. Благодаря этому появляется возможность оценить зависимость погрешности отклонения БпЛА от маршрута с изменением высоты полета. Приняв значение методической погрешности равной одному пикселу, была произведена оценка этой зависимости. Подставив характеристики АФК в формулу для расчета длины области захвата (4.5), был построен график, отображающий точность, с которой ВСКЗ способна определить отклонение БпЛА от маршрута на заданной высоте полета (рис. 5.37). Также, для сравнения изображен график зависимости требуемого поперечного перекрытия от высоты полета, построенный для этой АФК [262].

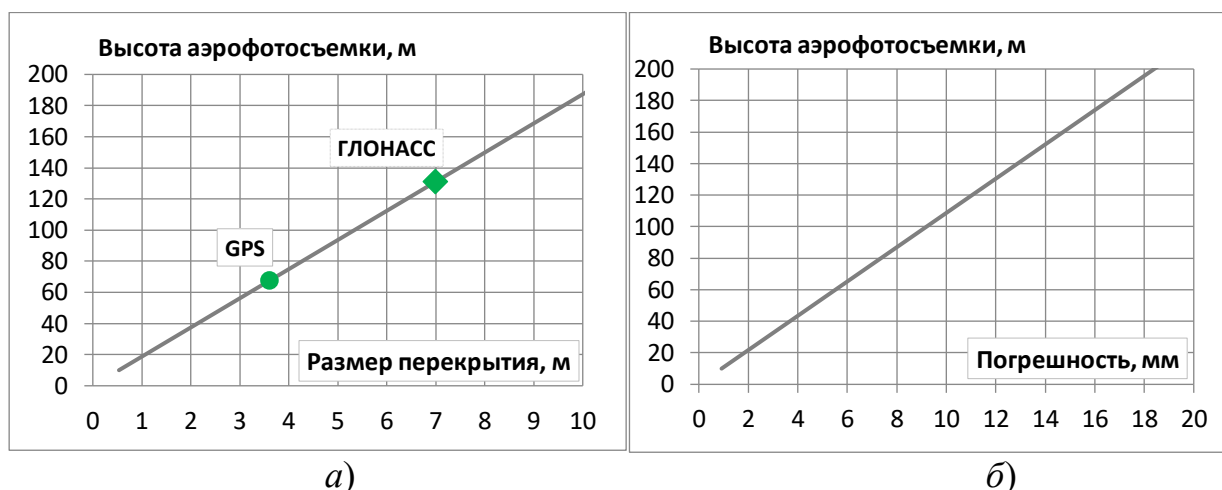


Рисунок 5.37 – Графики влияния высоты аэрофотосъемки на: а) погрешность определения ВСКЗ отклонения ЛА от маршрута полета; б) размер поперечного перекрытия полей зрения

Из первого графика видно, что ВСКЗ, построенная на базе современной АФК, позволяет с высокой точностью (менее 1 м), не доступной, в настоящее время, для спутниковых систем навигации, определять отклонения от маршрута полета БПЛА даже на больших высотах (до 10 км). Второй график показывает, что БПЛА, оснащенные только системой спутниковой навигации GPS или ГЛОНАСС, имеют ограничения по высоте полета (~ 65 м для GPS и ~ 130 м для ГЛОНАСС), поскольку не способны обеспечить навигацию БПЛА в пределах допустимого отклонения от маршрута на низких высотах. В следствие этого контролируемый участок ж/д пути оказывается вне поля зрения АФК [262].

Применение ВСКЗ для проведения аэрофотопографической съемки местности позволяет повысить точность определения отклонений от маршрута полета БПЛА и обеспечивает автоматическое формирование ортофотоплана в режиме реального времени. Это дает возможность проводить аэрофотосъемочные работы на низких высотах и создавать фотосхемы в крупных масштабах с соблюдением требуемых перекрытий АФС [262]. На небольших высотах проведения плановой аэрофотосъемки (до 100 м) с применением современной АФК методическая погрешность определения координат ЛА указанным способом не превышает 10 мм. Угловая погрешность определения вектора перемещения ЛА составляет менее 1', что позволяет снизить составляющую погрешности,

возникающую из-за рыскания. Благодаря этому повышается точность координатных измерений точек. Также данный способ позволяет более точно объединять последовательно сделанные АФС за счет приведения их к единому масштабу и формировать по ним фотосхему местности без значительных искажений.

Затем посредством имитационного моделирования оценивалась методическая погрешность разработанного способа для определения координат точек на участке ж/д пути [266]. С помощью имитационной модели проводилась маршрутная аэрофотосъёмка и лазерное сканирование местности вдоль ж/д пути в течение 16 минут при переменном ветре со скоростью до 12 м/с. В результате была построена цифровая модель участка ж/д пути и прилегающей к нему местности (рис. 5.38).

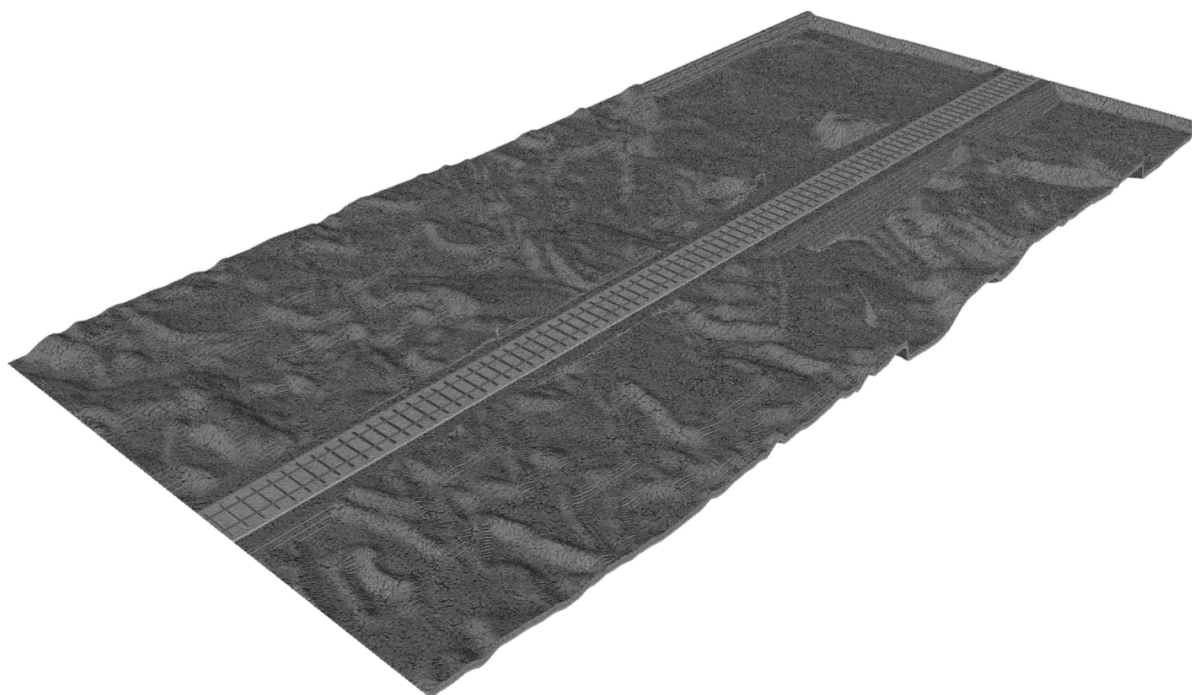


Рисунок 5.38 – Цифровая модель местности участка железнодорожного пути

На рисунке 5.39 изображены проекции погрешности измерения (ΔX , ΔY , ΔZ) в системе координат $\Delta_{\text{БПЛА}}$. В горизонтальной плоскости погрешность определения координаты ΔY произвольной точки A на поверхности местности зависит от погрешности измерения угла отклонения БПЛА от курса $\Delta\theta$. В вертикальной плоскости погрешности определения координат ΔX , ΔZ зависят от величины

погрешности ориентирования гиросtabilизирующей установки $\Delta\omega$ и погрешности определения возвышения БПЛА над местностью Δh .

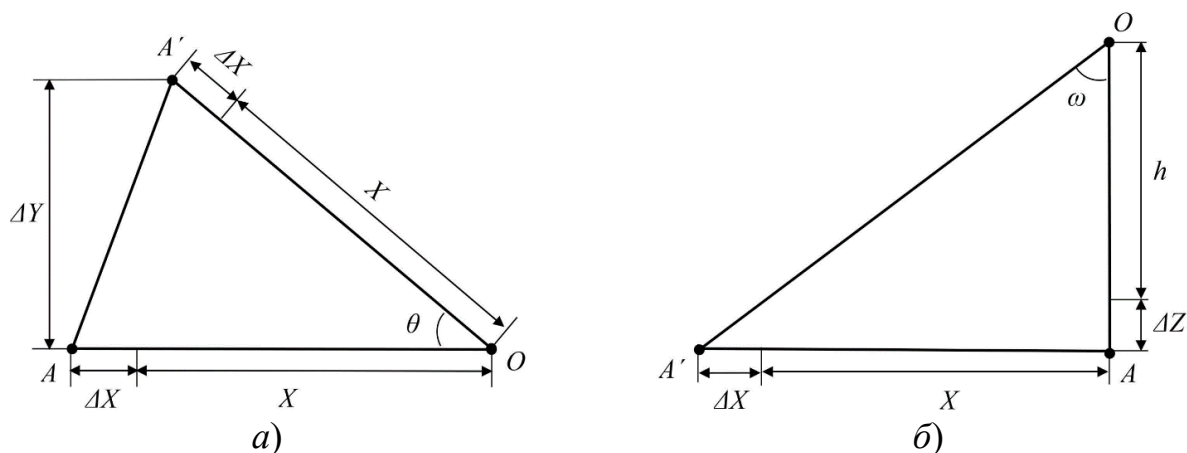


Рисунок 5.39 – Проекция погрешностей измерения в системе координат БПЛА: а) на горизонтальную плоскость; б) на вертикальную плоскость

Погрешность измерения координат точек на модели участка ж/д пути Δ_{XYZ} представляет собой суммарную погрешность, состоящую из погрешностей измерения координат точек в системе координат БПЛА и в глобальной системе координат ГНСС:

$$\Delta_{XYZ} = \Delta_{\text{БПЛА}} + \Delta_{\text{ГНСС}}. \quad (5.117)$$

Наибольший вклад в погрешность $\Delta_{\text{БПЛА}}$ на малой высоте h проведения аэрофотосъёмки вносит погрешность определения координаты ΔY , поскольку погрешность измерения угла отклонения БПЛА от курса (рыскание) превышает погрешность ориентирования гиросtabilизирующей установки [249]. Следовательно, погрешность $\Delta_{\text{БПЛА}}$ можно выразить через ΔY – наибольшую из погрешностей измерения координат, и представить с помощью следующего равенства:

$$\Delta_{\text{БПЛА}} = \Delta Y = \Delta Y \frac{(X + \Delta X)(h + \Delta Z)}{(X + \Delta X)(h + \Delta Z)}. \quad (5.118)$$

Поскольку погрешность измерения расстояний ВЛС пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью $\Delta_{\text{ГНСС}}$, то ей можно пренебречь и с помощью тригонометрических формул представить это равенство в виде:

$$\Delta_{\text{БПЛА}} = (h + \Delta_{\text{ГНСС}}) \operatorname{tg}(\omega + \Delta\omega) \sin \Delta\omega. \quad (5.119)$$

Тогда погрешность измерения координат точек на местности Δ_{XYZ} можно записать в виде:

$$\Delta_{XYZ} = (h + \Delta_{ГНСС}) \operatorname{tg}(\omega + \Delta\omega) \sin \Delta\omega + \Delta_{ГНСС}. \quad (5.120)$$

На рисунке 5.40 представлены результаты оценки погрешности измерения координат точек, полученные в процессе имитационного моделирования. При этом учитывалось отклонение БПЛА от курса и заданной высоты полета. На полученной гистограмме отображено распределение погрешности измерения координат точек на местности.



Рисунок 5.40 – Результаты имитационного моделирования аэрофотосъемки

Для сравнительной оценки представлены две гистограммы распределения погрешности измерения координат точек на местности, полученные до и после компьютерной обработки, произведенной по материалам аэрофотосъемки посредством описанного способа. Без компьютерной обработки АФС и данных лазерного сканирования местности стандартное отклонение по выборке результатов измерений составило 7,9 мм. В случае компьютерной обработки данных стандартное отклонение не превысило значения 3,5 мм. Следовательно, можно сделать вывод, что разработанное техническое решение [257] позволяет приблизительно на 50% уменьшить доверительный интервал распределения погрешности, возникающей при измерениях координат точек на местности.

При выносе участка железной дороги в натуру с помощью БПЛА, в соответствии с разработанным способом [250], погрешность измерения координат точки $(\Delta r, \Delta \theta, \Delta \varphi)$ в сферической системе координат (рис. 5.41) определяется погрешностями ВУ $(\Delta r_0, \Delta \theta_0, \Delta \varphi_0)$, лазерного дальномера Δr , а также гиростабилизированной платформы $\Delta \omega$, вследствие чего луч лазерного дальномера отклоняется от вертикали:

$$\Delta r = r_0 [\cos(\theta_0 + \Delta \theta_0) - \cos \theta_0] + \Delta r_0 \cos(\theta_0 + \Delta \theta_0) \quad (5.121)$$

$$\Delta \theta = \arctg \frac{\Delta h}{r_0 + \Delta r} + \Delta \theta_0 \quad (5.122)$$

$$\Delta \varphi = 2 \arcsin \left(\frac{\tg \Delta \omega (h + \Delta h)}{2(r_0 + \Delta r_0)} \right) + \Delta \varphi_0 \quad (5.123)$$

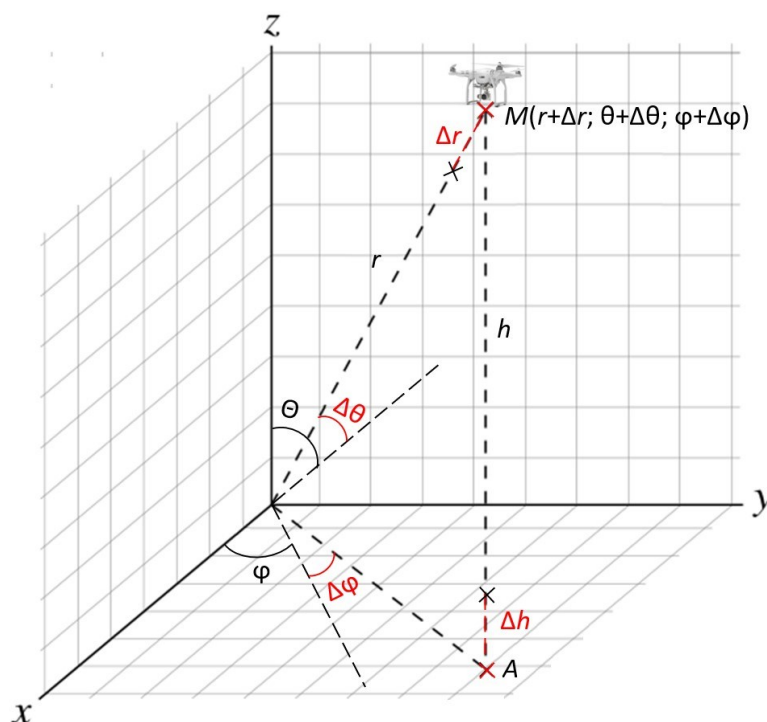


Рисунок 5.41 – Схема измерения проектных значений координат точки при выносе в натуру на поверхность железнодорожного пути

Оценка погрешностей измерения координат точки при выносе на поверхность строящегося участка ж/д пути осуществлялась с учетом следующих параметров и условий проведения измерений: высота полета БПЛА не более 3 м, погрешность измерения угловых координат ВЦ составляет 3,18", погрешности измерения дальности ВЦ и возвышения БПЛА составляют 1 мм, отклонение луча

лазерного дальномера от вертикали не превышает $1'$. В радиусе 100 м погрешность измерения координат точек находится в пределах 2,5 мм. (рис. 5.42).

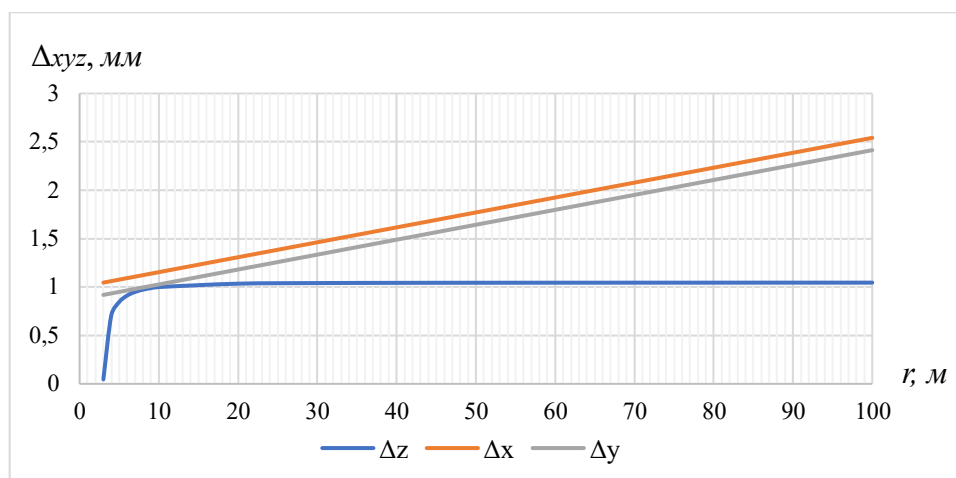


Рисунок 5.42 – Погрешности измерения значений координат точки при выносе в натуру в зависимости от дальности БПЛА

Применение БПЛА для планово-высотного обоснования и выноса проекта железных дорог в натуру позволяет повысить оперативность и достоверность определения координат наземных объектов, находящихся вне зоны прямой оптической видимости ВУ, благодаря этому повышается производительность проектно-изыскательных и строительных работ на участке ж/д пути.

5.4 Оценка погрешностей определения координат рабочего органа строительной техники

Оценка погрешностей определения координат рабочего органа осуществлялась с помощью полнофункциональной радиоуправляемой физической модели бульдозера, сделанной в масштабе 1:10. Для эксперимента использовались три ВЦ с разными частотами мигания. С помощью модели бульдозера в автоматическом режиме выполнялось профилирование земляного полотна дороги в соответствии с проектным заданием (рис. 5.43). При этом учитывалось влияние климатических факторов, категории и состава разрабатываемого грунта, а также особенности рельефа местности [285].

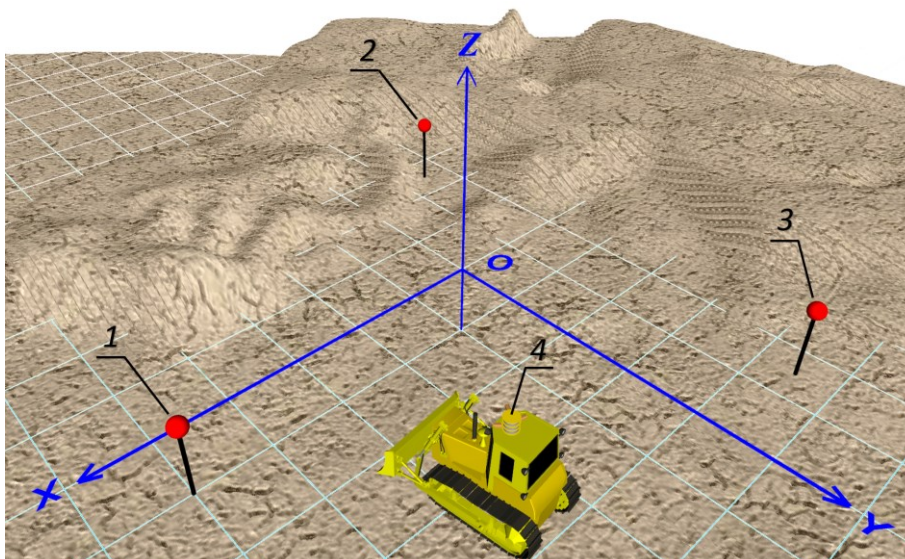


Рисунок 5.43 – Локальная система координат на строительном участке:
1, 2, 3 – визирные цели; 4 – видеограмметрическое устройство

Выполнение технологических операций осуществлялось в соответствии с типовой технологической картой. Планировка земляного полотна дороги производилась с нулевым балансом земляных масс под заданным уклоном и с привязкой к существующему рельефу местности. В процессе работы ВСКЗ осуществляло поиск ВЦ. После обнаружения и идентификации всех ВЦ определялись координаты и пространственное положение бульдозера, что позволило контролировать углы и толщину среза грунта. При достижении проектной формы земляного полотна зарезание грунта прекращалось [285]. В ходе экспериментов оценивались максимальные значения погрешностей в радиусе 50 м от начала координат в системе координат, образованной ВЦ (рис. 5.44).

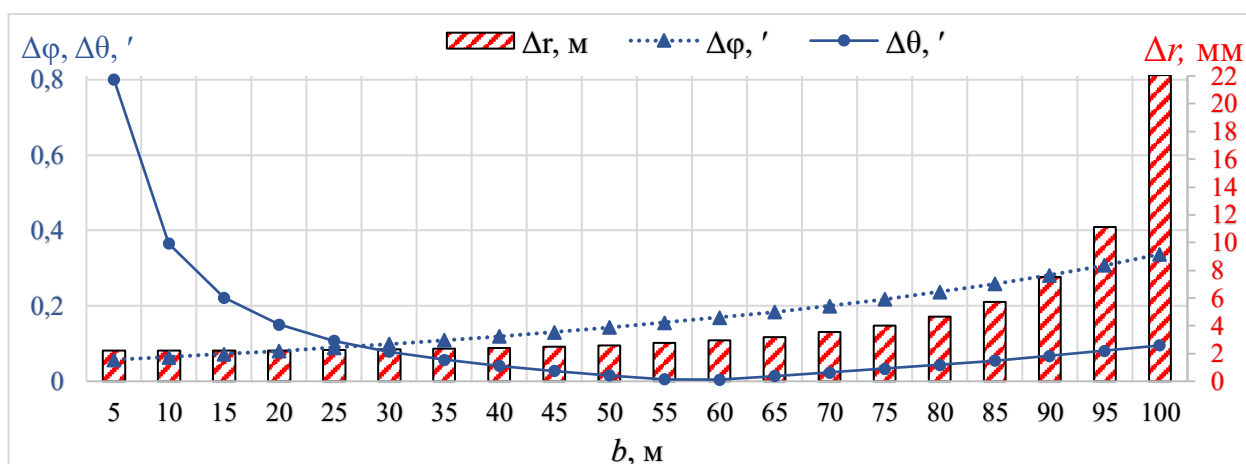


Рисунок 5.44 – Графики погрешностей определения координат бульдозера

Из графиков следует, что с изменением базисного расстояния между ВЦ в диапазоне $b[5;100]$ м, погрешности определения дальности Δr , азимутального угла $\Delta\phi$ и зенитного угла $\Delta\theta$ варьируются в диапазонах: $\Delta r[2;22]$ мм, $\Delta\phi[0,05;0,34]'$, $\Delta\theta[0,005;0,8]'$. Также, погрешность ВСКЗ увеличивалась, когда бульдозер приближался к воображаемой окружности, на пересечении с которой расположены ВЦ (рис. 5.45). Для устранения влияния данного эффекта устанавливались вспомогательные ВЦ, на которые ВУ переключалось в случае приближения к границам «Опасного круга» [285].

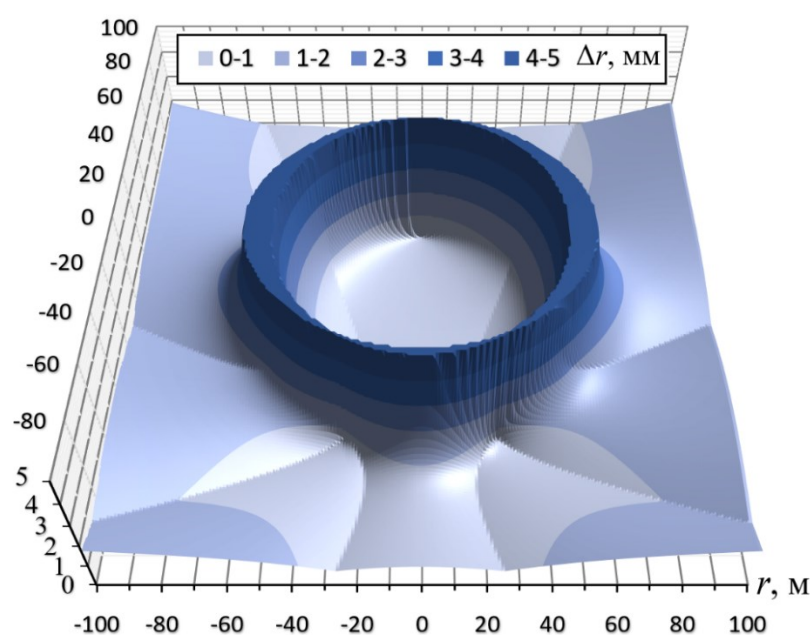


Рисунок 5.45 – График погрешностей определения координат бульдозера при базисном расстоянии 50 м между визирными целями

Разработанный способ контроля координат и пространственного положения рабочего органа строительной техники обеспечил возможность выполнения всех технологических операций по производству земляных работ в автоматическом режиме. По результатам экспериментов с применением физической модели бульдозера определены технические и метрологические характеристики ВСКЗ. Установлено, что при базисном расстоянии 50 м между ВЦ, ВСКЗ обеспечивает в радиусе 50 м контроль планового и высотного положения рабочего органа строительной техники в пределах допуска 3 мм [286].

В ходе экспериментов также оценивались погрешности ВСКЗ при определении основных параметров, которые оказывают влияние на безопасность погрузки техники своим ходом на трал. Погрешности (рис. 5.46, 5.47) оценивались в зависимости от радиального расстояния техники при постоянном размере базисного расстояния между ВЦ $b=2,5$ м, и в зависимости от базисного расстояния между ВЦ на дальности $r=10$ м.

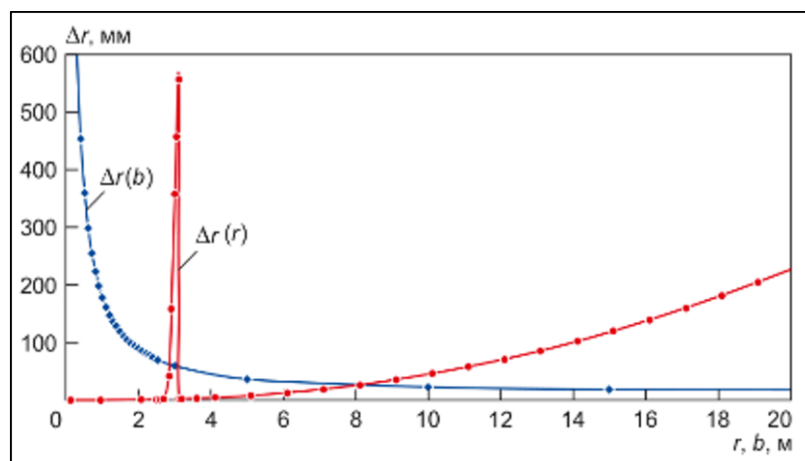


Рисунок 5.46 – Графики погрешностей измерения радиального расстояния

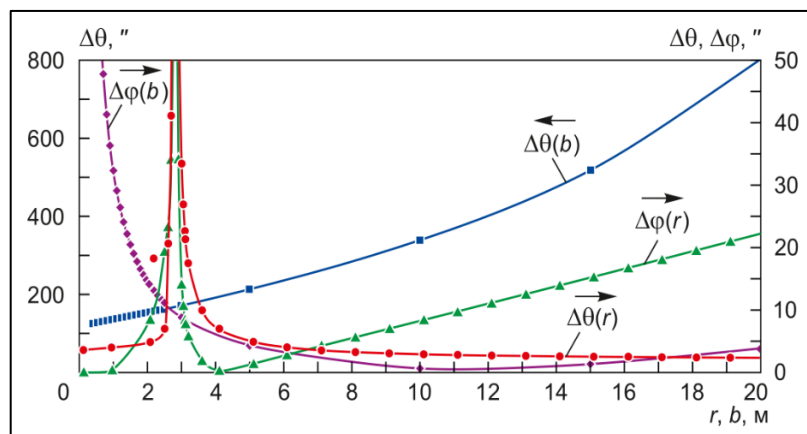


Рисунок 5.47 – Графики погрешностей измерения угловых координат

На графиках видно, что значения погрешностей резко возросли в диапазоне изменения дальности $\Delta r[2,7;3,1]$ м. Рост погрешности в этой области связан с эффектом «опасного круга». Однако с учётом габаритных размеров гусеничной техники в реальных условиях она не может оказаться в пределах этой области и данный фактор не влияет на безопасность выполнения её погрузки [302].

Абсолютная погрешность определения ВСКЗ угла χ между продольными осями траля и гусеничной техники при базисе 2,5 м на дальности 30 м составила:

$$\Delta\chi = \left| \pi/6 - \arctg \left(\frac{\sqrt{3} \operatorname{ctg}(\gamma_2 - \Delta\lambda) - 1}{2 \operatorname{ctg}(\gamma_1 + \Delta\lambda) + \operatorname{ctg}(\gamma_2 - \Delta\lambda) - \sqrt{3}} \right) \right| \approx 0,66^\circ, \quad (5.124)$$

где $\Delta\lambda$ – погрешность измерения ВСКЗ дирекционных углов ВЦ.

Абсолютная погрешность определения расстояния от начала координат до оси вращения гусеничного шасси определялась из выражения:

$$\Delta r = b \left| \cos \gamma_3 - \cos(\gamma_3 + \Delta\chi) + \sin \gamma_3 \operatorname{ctg} \gamma_1 - \sin(\gamma_3 + \Delta\chi) \operatorname{ctg}(\gamma_1 + \Delta\lambda) \right| \approx 2,3 \text{ мм}. \quad (5.125)$$

Абсолютная погрешность определения расстояния от оси вращения гусеничного шасси машины до продольной оси грузовой платформы составила:

$$\Delta b = (l_0 + \Delta l) \operatorname{tg} \Delta\chi \approx 345 \text{ мм}. \quad (5.126)$$

Исходя из полученных метрологических характеристик ВСКЗ были определены её технические характеристики. Так, при базисном расстоянии 2,5 м между ВЦ и допустимом отклонении оси вращения гусеничного шасси машины от продольной оси грузовой платформы равном 15 см, обеспечивается контроль параметров погрузки гусеничной техники длиной до 8 м на грузовую платформу длиной до 16 м.

5.5 Оценка погрешности определения геометрических параметров рельсовой колеи

В целях проверки разработанного способа [195] для определения геометрических параметров рельсовой колеи и оценки методической погрешности ВСКЗ была построена имитационная модель [313] для моделирования процесса контроля параметров ГРК (рис. 5.48). В составе модели использовались рельсовая колея, путеизмерительная тележка, с установленными на ней ВЦ, а также ВУ. С помощью модели задавалась кривизна рельсовых нитей в плане и профиле, а также скорость движения тележки. Для имитации работы ВУ, использовалась виртуальная видеокамера, которая выполняла визуализацию моделируемого

процесса, отображая на экране монитора окно анимации движения путеизмерительной тележки.

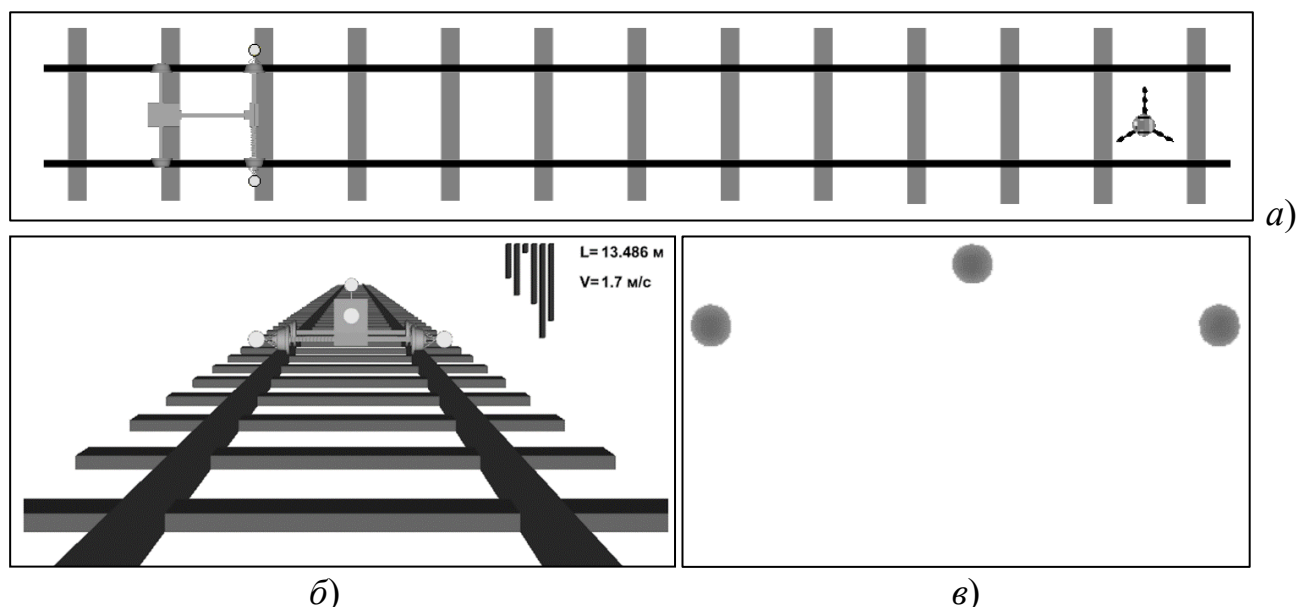


Рисунок 5.48 – Имитационная модель контроля параметров ГРК: а) вид сверху, б) фронтальный вид на изображении видеокамеры, в) вид изображения ВЦ после компьютерной обработки

Виртуальная видеокамера имела следующие технические характеристики: объектив с фокусным расстоянием 1 мм, физический размер пиксела ПЗС-матрицы 1,2 мкм, разрешение 1920×1080 пикселей, кадровая частота видеокамеры 25 Гц. Поскольку дальномер, так же, как и видеокамера являлся виртуальным, то информация отображалась не только в цифровой, но и в графической форме для последующего распознавания и привязки к конкретному кадру. Скорость тележки была задана 1,7 м/с, при этом ВСКЗ обеспечивала непрерывные измерения параметров ГРК через каждые 70 мм ж/д пути. Схема оценки погрешностей измерения координат ВЦ, размещенных на концах передней колесной пары путеизмерительной тележки показана на рисунке 5.49.

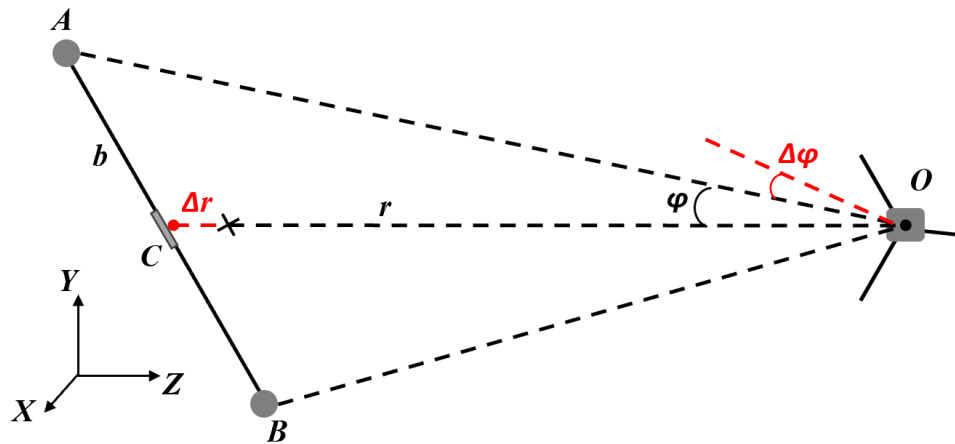


Рисунок 5.49 – Схема оценки погрешностей измерения координат визирных целей

Погрешность измерения координат ВЦ зависит от инструментальной погрешности измерения ВУ угловых величин $\Delta\varphi_0$, фиксированного размера колесной балки путеизмерительной тележки $AC=b$, дальности путеизмерительной тележки r и погрешности измерения лазерного дальномера Δr :

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= b \left(\cos \left(\pi - \varphi - \arcsin \left(\frac{r}{b} \sin \varphi \right) \right) - \cos \left(\pi - \varphi - \Delta\varphi - \arcsin \left(\frac{r}{b} \sin (\varphi + \Delta\varphi) \right) \right) \right) \\ \Delta z &= b \left(\sin \left(\pi - \varphi - \arcsin \left(\frac{r}{b} \sin \varphi \right) \right) - \sin \left(\pi - \varphi - \Delta\varphi - \arcsin \left(\frac{r}{b} \sin (\varphi + \Delta\varphi) \right) \right) \right) \\ \Delta y &= (r + \Delta r) \operatorname{tg} \Delta\theta \end{aligned} \right\} \quad (5.127)$$

В ходе моделирования процесса контроля параметров ГРК, проводилась обработка видеоизображения, на котором обнаруживались ВЦ и определялись их координаты. По координатам ВЦ, в режиме реального времени, были построены графики (рис. 5.50), изображающие продольный профиль пути, уровень рельсовых нитей и ширину рельсовой колеи.

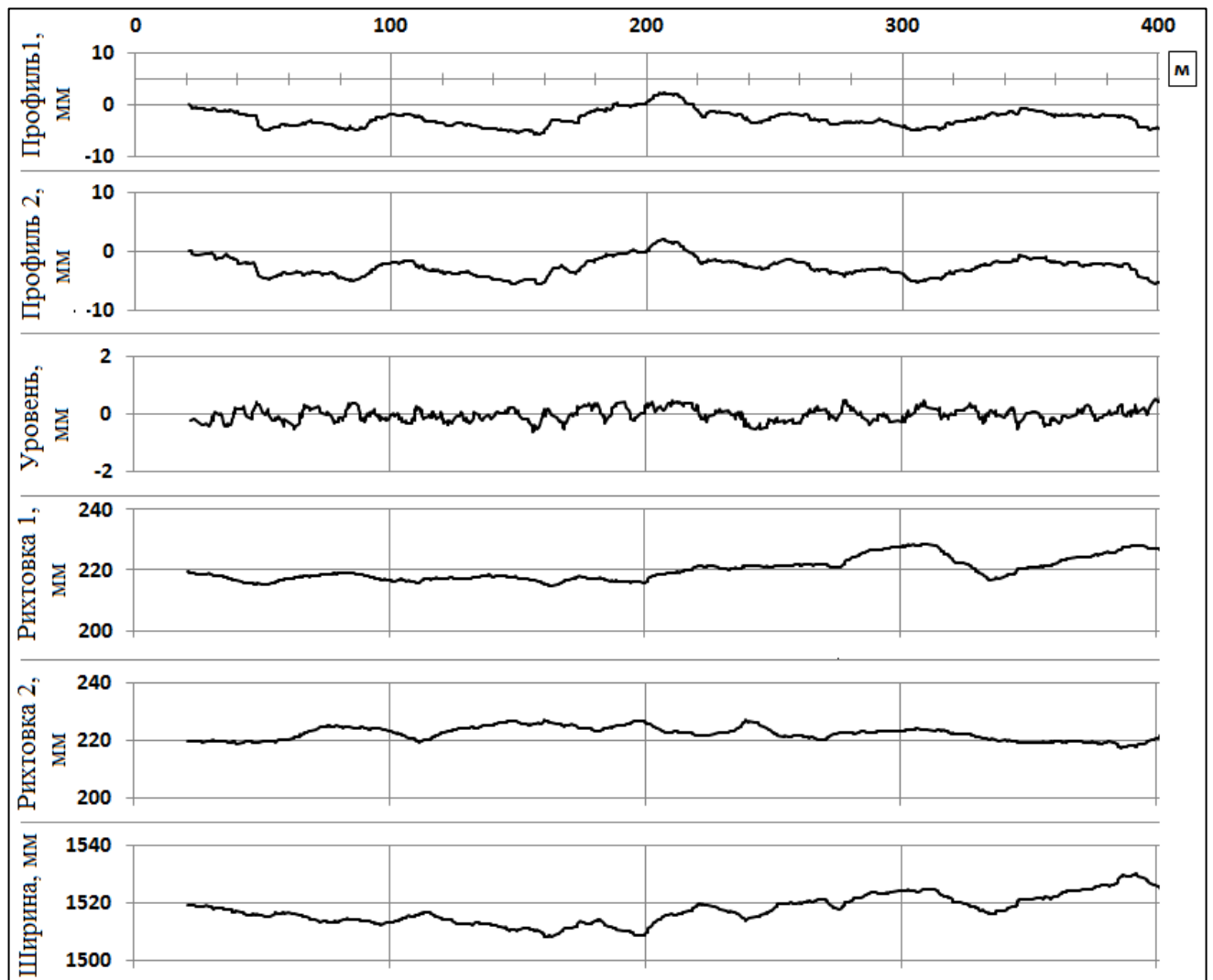


Рисунок 5.50 – Графики параметров геометрии рельсовой колеи

Сопоставляя полученные результаты измерений с действительными значениями координат ВЦ в имитационной модели, была произведена оценка методической погрешности системы. На рисунке 5.51 изображены абсолютные значения погрешности по каждой координате, выраженные в пикселах. Стандартное отклонение результата измерений координат ВЦ имеет незначительную зависимость от дальности путеизмерительной тележки и составляет 0,06 пиксела в диапазоне измерений дальности до 100 м.

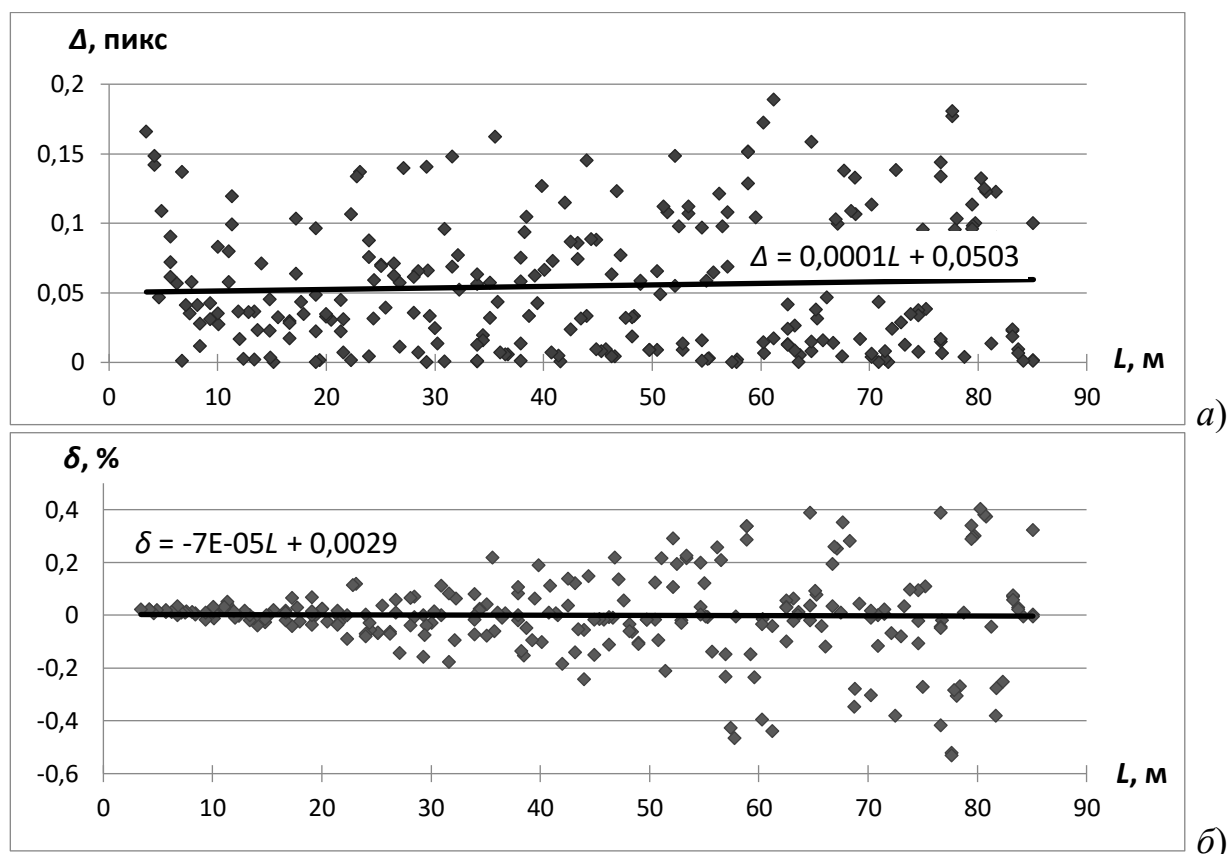


Рисунок 5.51 – Графики методической погрешности измерения фотограмметрической системы контроля ГРК: а) абсолютные значения; б) относительные значения

Также были получены относительные значения погрешности при измерении расстояния между ВЦ на дистанции до 100 м. Этот график позволяет рассчитать максимальное значение диапазона измерений, при котором система будет определять параметры ГРК в пределах допустимой погрешности. Максимальная погрешность в поставленном эксперименте не превысила 0,6 %, следовательно, абсолютная погрешность определения расстояния между ВЦ с помощью виртуальной камеры находилась в пределах 1 см. В качестве примера построены графики погрешностей определения координат точек рельсовых нитей (рис. 5.52) при использовании видеокамеры высокого разрешения 8192×4320 пикселей с углом обзора 25°.

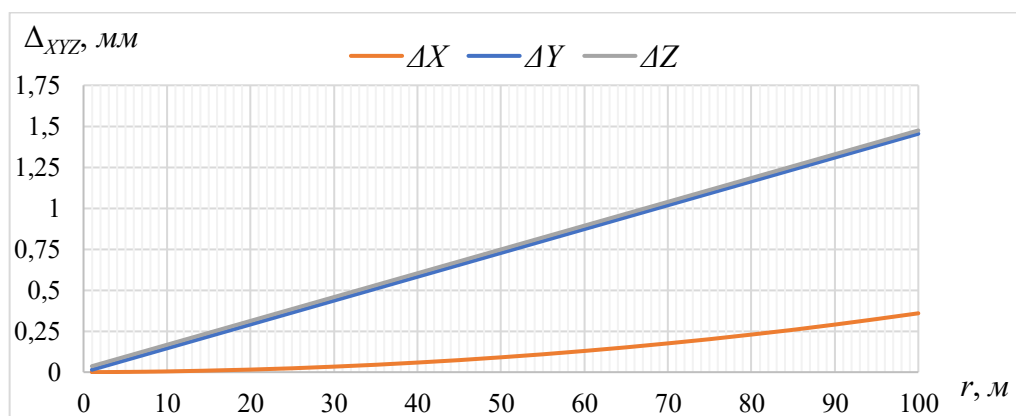


Рисунок 5.52 – Графики погрешностей определения координат точек рельсовых нитей

К геометрическим параметрам рельсовой колеи, которые выражаются через линейные размеры, определяемые по координатам двух точек, относятся: продольный уклон рельсов, взаимное смещение торцов стыкуемых рельсов, зазоры в стыках рельсов, разность высотных отметок головок рельсов на пути. По координатам трех и более точек вычисляется радиусы стрел изгиба рельсовых нитей в плане и профиле. По координатам четырех точек (и более) определяются: ширина колеи, сужение или расширение колеи рельсового пути в плане, поперечный уклон рельсовых нитей [355]. Координаты точки рельсовой нити содержат некоторую неопределенность результата измерений (рис. 5.53). Соответственно действительное положение точки на рельсовой нити находится на некотором расстоянии Δ_A от измеренных значений ее координат, определяемого погрешностью результата измерений:

$$\Delta_A = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2} \quad (5.128)$$

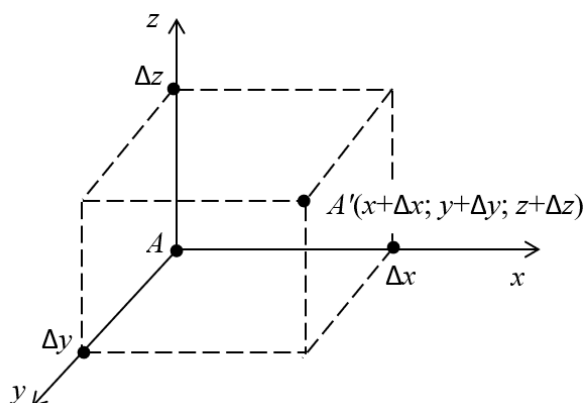


Рисунок 5.53 – Отклонение измеренных значений координат точки от действительных значений

Линейное отклонение измеренного положения произвольной точки в зависимости от дальности показано на графике (рис. 5.54). Например, для точки, координаты которой были измерены с погрешностью равной 1 мм, ее линейное отклонение от действительного положения в пространстве может достигать 1,73 мм. При этом наблюдается следующая линейная зависимость:

$$\Delta_A = 8 \cdot 10^{-12} l^2 + 2 \cdot 10^{-6} l + 1,0042 \quad (5.129)$$

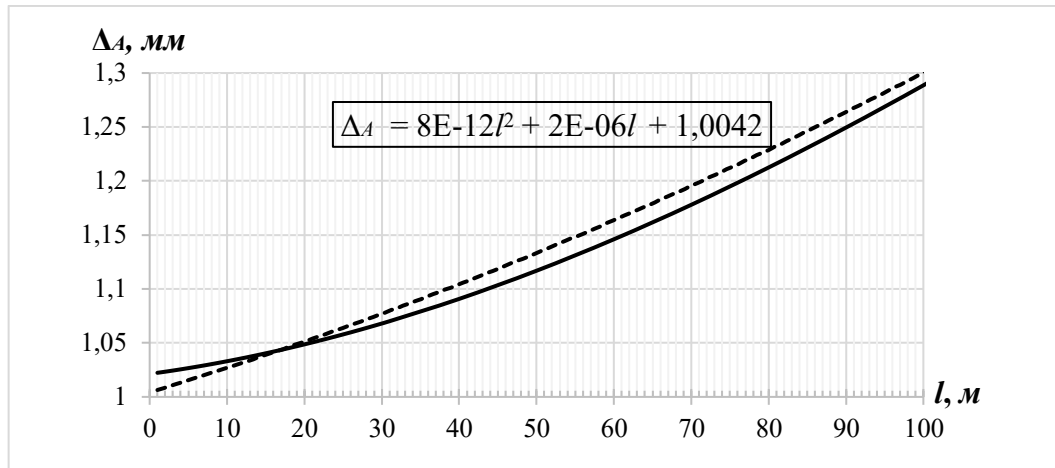


Рисунок 5.54 – График линейного отклонения действительного положения точки в зависимости от предельной погрешности измерения ее координат

Для геометрического параметра ж/д пути, определяемого по координатам двух точек, например, ширины рельсовой колеи, действительное значение параметра определяется длиной вектора (рис. 5.55), образованного этими точками, из выражения:

$$l_d = |\overrightarrow{A_1 A_2}| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} = \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2} \quad (5.130)$$

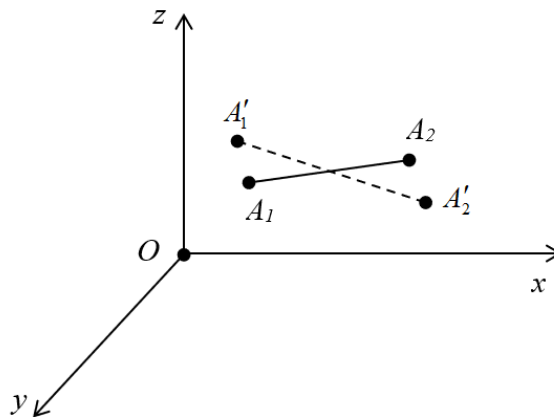


Рисунок 5.55 – Отклонение параметра железнодорожного пути, определяемого по координатам двух точек

Измеренное значение параметра определяется из выражения:

$$l_{\text{и}} = |\overrightarrow{A_1 A_2}| = \left| \sqrt{(x_1 - x_2 + 2\Delta_x)^2 + (y_1 - y_2 + 2\Delta_y)^2 + (z_1 - z_2 + 2\Delta_z)^2} \right| \quad (5.131)$$

Это выражение можно записать в упрощенном виде:

$$l_{\text{и}} = \left| \sqrt{(l_x + 2\Delta_x)^2 + (l_y + 2\Delta_y)^2 + (l_z + 2\Delta_z)^2} \right| \quad (5.132)$$

Погрешность измерения параметра ж/д пути по двум точкам определяется разностью между действительным и измеренным значениями этого параметра:

$$l_{\text{д}}^2 - l_{\text{и}}^2 = l_x^2 + l_y^2 + l_z^2 - (l_x + 2\Delta_x)^2 - (l_y + 2\Delta_y)^2 - (l_z + 2\Delta_z)^2 \quad (5.133)$$

Откуда получают уравнение:

$$(l_{\text{д}} - l_{\text{и}})(l_{\text{д}} - l_{\text{и}} + 2l_{\text{и}}) = -4(\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2) - 4(l_x \Delta_x + l_y \Delta_y + l_z \Delta_z) \quad (5.134)$$

Разность между действительным и измеренным значениями параметра определяется величиной абсолютной погрешности результата измерений:

$$\Delta_l (\Delta_l + 2l_{\text{и}}) + 4(\Delta_x^2 + l_x \Delta_x + \Delta_y^2 + l_y \Delta_y + \Delta_z^2 + l_z \Delta_z) = 0 \quad (5.135)$$

Решая данное уравнение относительно Δl , находят корни уравнения:

$$\Delta l_{1,2} = -l_{\text{и}} \pm \sqrt{l_{\text{и}}^2 + 4(\Delta_x^2 + l_x \Delta_x + \Delta_y^2 + l_y \Delta_y + \Delta_z^2 + l_z \Delta_z)} \quad (5.136)$$

Погрешность измерения параметра будет определяться наименьшим значением модуля из найденных корней уравнения:

$$\Delta_l = \min(|\Delta l_1|, |\Delta l_2|) = \min \left| \sqrt{l_{\text{и}}^2 + 4(\Delta_x^2 + l_x \Delta_x + \Delta_y^2 + l_y \Delta_y + \Delta_z^2 + l_z \Delta_z)} - l_{\text{и}} \right| \quad (5.137)$$

В случае измерения ширины рельсовой колеи сегментом ВСКЗ для контроля параметров ГРК можно принять значения $l_y \approx l_z \approx 1$, поскольку ВУ устанавливается на ж/д путях и его главная оптическая ось направлена под прямым углом на пластину отражателя, находящегося в середине передней колесной пары, на концах которой установлены ВЦ. Соответственно, ординаты и аппликаты ВЦ будут приблизительно равны ($y_1 \approx y_2$) и ($z_1 \approx z_2$). Тогда предыдущее выражение примет следующий вид:

$$\Delta_l = \min(|\Delta l_1|, |\Delta l_2|) = \min \left| \sqrt{l_{\text{и}}^2 + 4(\Delta_x^2 + l_x \Delta_x + \Delta_y^2 + \Delta_y + \Delta_z^2 + \Delta_z)} - l_{\text{и}} \right| \quad (5.138)$$

Погрешность измерения ширины рельсовой колеи сегментом ВСКЗ для контроля параметров ГРК зависит от расстояния между путеизмерительной тележкой и ВУ (рис. 5.56). Например, для ширины рельсовой колеи 1520 мм погрешность измерения ее величины на дальности до 100 м не превысит 1 мм. При этом функциональную зависимость погрешности от дальности измерений можно выразить через полином четвертой степени:

$$\Delta_l = 3 \cdot 10^{-22} l^4 - 2 \cdot 10^{-16} l^3 + 6 \cdot 10^{-11} l^2 + 3 \cdot 10^{-6} l + 0,278 \quad (5.139)$$

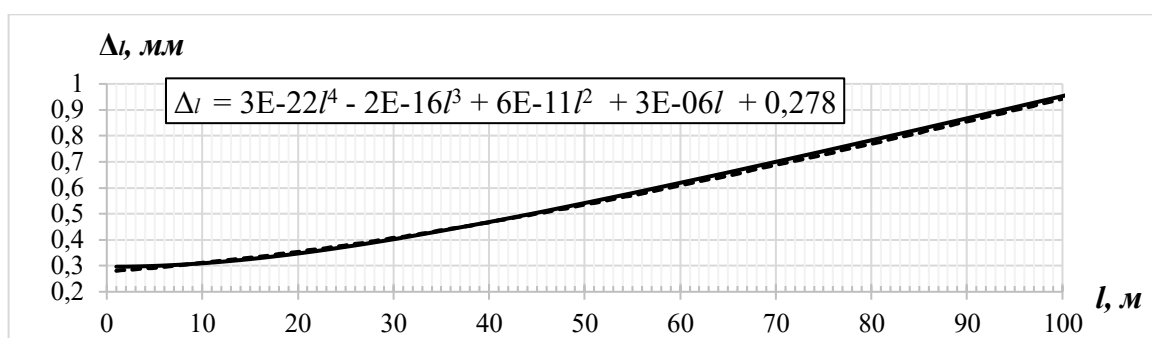


Рисунок 5.56 – График отклонения параметра железнодорожного пути, определяемого по двум точкам в зависимости от дальности измерений

Для геометрического параметра ж/д пути, определяемого по координатам трех точек (рис. 5.57), например, радиуса кривизны рельсовых нитей, действительное значение которого вычисляется из системы уравнений:

$$\begin{cases} R_d^2 = (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 \\ R_d^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 \\ R_d^2 = (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 \end{cases} \quad (5.140)$$

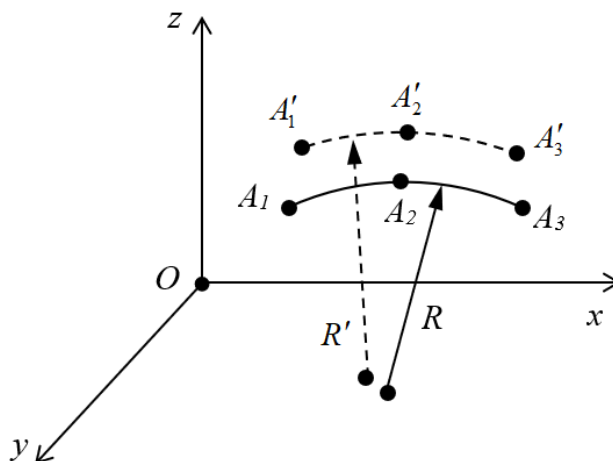


Рисунок 5.57 – Отклонение радиуса кривизны железнодорожного пути, определяемого по координатам трех точек

Значения радиуса содержат погрешности измерений координат трех точек. Допустим, что абсолютные погрешности измерений координат каждой из них приблизительно равны между собой $\Delta_x \approx \Delta_y \approx \Delta_z \approx \Delta_A$, тогда система уравнений для определения измеренного значения радиуса примет вид:

$$\begin{cases} R_{\text{и}}^2 = (x_1 - x_0 + \Delta_A)^2 + (y_1 - y_0 + \Delta_A)^2 + (z_1 - z_0 + \Delta_A)^2 \\ R_{\text{и}}^2 = (x_2 - x_0 + \Delta_A)^2 + (y_2 - y_0 + \Delta_A)^2 + (z_2 - z_0 + \Delta_A)^2 \\ R_{\text{и}}^2 = (x_3 - x_0 + \Delta_A)^2 + (y_3 - y_0 + \Delta_A)^2 + (z_3 - z_0 + \Delta_A)^2 \end{cases} \quad (5.141)$$

Решая систему уравнений (5.140), получают выражения для определения действительного значения радиуса:

$$R_{\text{д}}^2 = 0,25 \left[\left(\frac{|\overrightarrow{A_1 A_2}| - |\overrightarrow{A_2 A_3}| \cos \angle A_1 A_2 A_3}{\sin \angle A_1 A_2 A_3} \right)^2 + |\overrightarrow{A_2 A_3}|^2 \right] \quad (5.142)$$

Длины векторов, образованных двумя точками, вычисляются из выражений:

$$\begin{cases} |\overrightarrow{A_1 A_2}| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ |\overrightarrow{A_2 A_3}| = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 + (z_3 - z_2)^2} \\ |\overrightarrow{A_1 A_3}| = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2} \end{cases} \quad (5.143)$$

Угол α , образованный двумя векторами, определяется из выражения:

$$\alpha = \angle A_1 A_2 A_3 = \arccos \left(\frac{|\overrightarrow{A_1 A_2}|^2 + |\overrightarrow{A_2 A_3}|^2 - |\overrightarrow{A_1 A_3}|^2}{2 |\overrightarrow{A_1 A_2}| |\overrightarrow{A_2 A_3}|} \right) \quad (5.144)$$

Поскольку интервалы времени, через которые берутся отсчеты координат точек на ж/д пути приблизительно одинаковые, то для упрощения данного выражения примем равными длины, образованных этими точками векторов:

$$l \approx |\overrightarrow{A_1 A_2}| \approx |\overrightarrow{A_2 A_3}| \quad (5.145)$$

Предельная погрешность угла между векторами $|\overrightarrow{A_1 A_2}|$ и $|\overrightarrow{A_2 A_3}|$ будет определяться выражением:

$$\Delta_{\alpha} = 2 \arcsin(2\Delta_A/l) \quad (5.146)$$

Тогда разность квадратов действительного и измеренного значений радиуса кривизны определяется с учетом абсолютной погрешности измерения длины отрезка Δ_l , образованного двумя точками:

$$(R_{\text{д}}^2 - R_{\text{и}}^2) = \frac{l^2 (1 - \cos \alpha)}{\sin^2 \alpha} + l^2 - \frac{(l + \Delta_l)^2 (1 - \cos(\alpha + \Delta_\alpha))}{\sin^2(\alpha + \Delta_\alpha)} - (l + \Delta_l)^2 \quad (5.147)$$

Откуда получаем квадратное уравнение:

$$\Delta_R^2 + 2R_{\text{и}}\Delta_R - \frac{l^2 (1 - \cos \alpha)}{\sin^2 \alpha} + \frac{(l + \Delta_l)^2 [1 - \cos(\alpha + \Delta_\alpha)]}{\sin^2(\alpha + \Delta_\alpha)} + \Delta_l^2 + 2l\Delta_l = 0 \quad (5.148)$$

Предельная погрешность измерения радиуса кривизны определяется наименьшим модулем корня уравнения:

$$\Delta_R = \min \left| \sqrt{\frac{(l + \Delta_l)^2 [1 - \cos(\alpha + \Delta_\alpha)]}{2 \sin^2(\alpha + \Delta_\alpha)} + 0,5\Delta_l^2 + l\Delta_l - R_{\text{и}}} \right| \quad (5.149)$$

Отклонение измеренного значения радиуса криволинейного участка пути от действительного значения, определяемого по координатам трех точек в зависимости от предельной погрешности измерения координат этих точек представлено на графике (рис. 5.58). Например, для радиуса, измеряемого по трем точкам, находящимся на расстоянии 10 м друг от друга, координаты которых были измерены с предельной погрешностью равной 1 мм, отклонение его размера от действительного значения, равного 500 м, составит приблизительно 70 мм. При этом наблюдается следующая линейная зависимость:

$$\Delta_R = 0,0001R + 0,04 \quad (5.150)$$

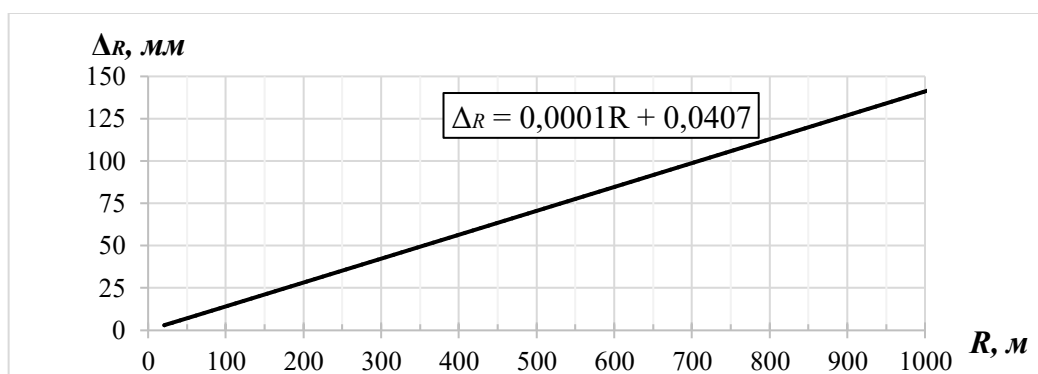


Рисунок 5.58 – График отклонения радиуса кривизны ж/д пути, определяемого по трем точкам в зависимости от предельной погрешности измерения их координат

Для геометрического параметра ж/д пути, определяемого по координатам четырех точек (рис. 5.59), например, сужения или расширения колеи рельсового пути, действительное значение которого вычисляется из выражения:

$$S_d = \frac{2|s_1 - s_2|}{|\overrightarrow{A_1 A_2}| + |\overrightarrow{A_3 A_4}|} \quad (5.151)$$

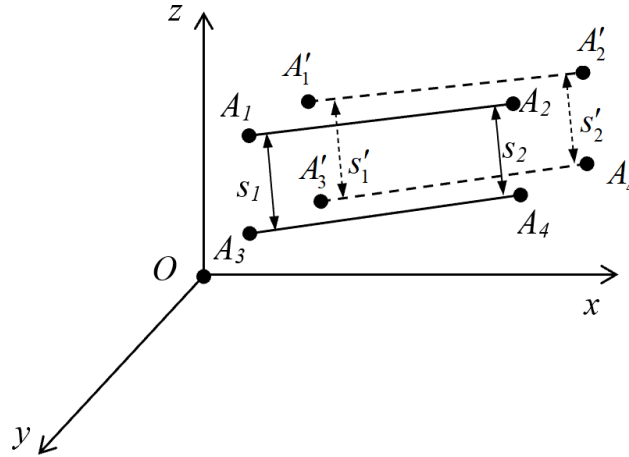


Рисунок 5.59 – Сужение или расширение колеи рельсового пути, определяемое по координатам четырех точек

Соответственно, измеренное значение сужения или расширения колеи рельсового пути вычисляется из выражения:

$$S_{и} = \frac{2|s'_1 - s'_2|}{|\overrightarrow{A'_1 A'_2}| + |\overrightarrow{A'_3 A'_4}|} \quad (5.152)$$

В большинстве случаев при измерении сужения или расширения колеи рельсового пути расстояния между точками $|\overrightarrow{A_1 A_2}|$ и $|\overrightarrow{A_3 A_4}|$ достаточно велики и погрешностями измерения этих размеров можно пренебречь, тогда предельная погрешность измерения сужения или расширения колеи рельсового пути определяется из выражения:

$$\Delta_s = 2 \frac{|s_1 - s'_1| + |s'_2 - s_2|}{|\overrightarrow{A_1 A_2}| + |\overrightarrow{A_3 A_4}|} = \frac{4|\Delta_l|}{|\overrightarrow{A_1 A_2}| + |\overrightarrow{A_3 A_4}|} \quad (5.153)$$

Учитывая, что расстояния между точками приблизительно равны между собой $|\overrightarrow{A_1 A_2}| \approx |\overrightarrow{A_3 A_4}| \approx l_{и}$, а также подставляя (5.137) в данное выражение, можно записать его в виде:

$$\Delta_s = \frac{2 \min \left| \sqrt{l_{\text{и}}^2 + 4(\Delta_x^2 + l_x \Delta_x + \Delta_y^2 + l_y \Delta_y + \Delta_z^2 + l_z \Delta_z)} - l_{\text{и}} \right|}{l_{\text{и}}} \quad (5.154)$$

Отклонение размера сужения или расширения колеи рельсового пути, определяемого по координатам четырех точек, в зависимости от дальности измерения их координат представлено на графике (рис. 5.60). Например, для участка пути длиной 1 м, на котором были измерены координаты 4 точек рельсовых нитей на дальности до 25 м (длина звена рельсошпальной решетки Р65), погрешность измерения сужения или расширения колеи рельсового пути находится в пределах 0,76 мм. При этом наблюдается следующая квадратичная зависимость:

$$\Delta_s = 8 \cdot 10^{-11} l^2 + 8 \cdot 10^{-6} l + 0,565 \quad (5.155)$$

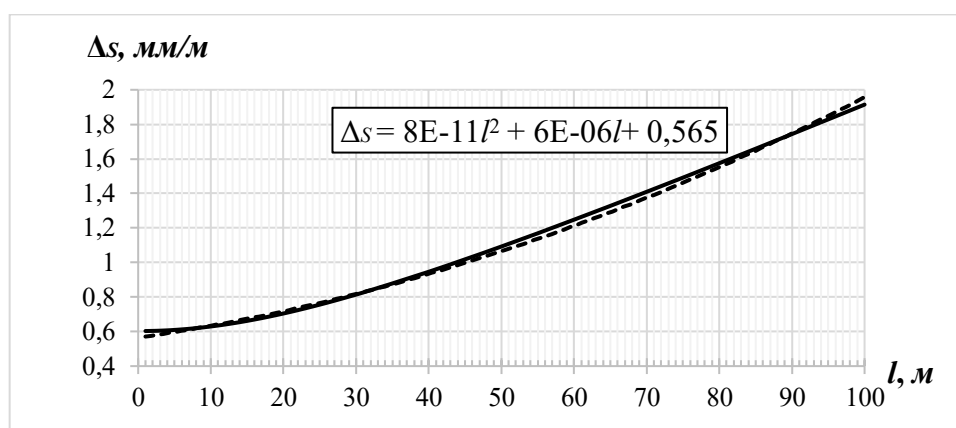


Рисунок 5.60 – График погрешности измерения сужения или расширения рельсовой колеи в зависимости от дальности измерения их координат

Контроль параметров рельсовой колеи проводится систематически, что позволяет оценивать влияние различных эксплуатационных факторов на ее стабильность и появление характерных расстройств. Разработанный сегмент ВСКЗ для контроля параметров ГРК, отличается более высокой производительностью по сравнению с существующими путеизмерительными тележками и при этом обеспечивает необходимую точность и достоверность результатов измерений. Применение координатного метода измерений также позволило достигнуть более высокого уровня автоматизации процесса контроля ГРК и обеспечило возможность обнаружения длинных неровностей рельсовой колеи на криволинейных участках пути.

5.6 Оценка погрешностей определения координат по спутниковым сигналам

Определение относительных координат пункта наблюдения ВСКЗ выполнялось по кодовым псевдодальностям. Получение спутниковых сигналов с опорного пункта и с пункта наблюдения осуществлялось двумя однотипными равноточными приемниками. Исходными данными являлись результаты измерения псевдодальности на частоте модуляции, измерения псевдодальности на несущей частоте и высокоточная эфемеридно-временная информация [356]. С помощью специально разработанной программы для ЭВМ [357] производилась регистрация данных с результатами сеансных оценок разности шкал времени опорного генератора и спутников системы ГНСС на интервале времени наблюдения не менее $t_n = 1$ сутки.

Расхождение шкал времени определялось по формуле:

$$\Delta t_{\text{оп}}^i = \frac{\rho_{\text{оп}}^{i(\text{геом})} - \rho_{\text{оп}}^i}{c} + dt_{\text{оп}}, \quad (5.156)$$

где $dt_{\text{оп}}$ – поправки к часам приемника опорного генератора;

$\rho_{\text{оп}}^{i(\text{геом})}$ – геометрическая дальность спутника, определяемая по формуле:

$$\rho_{\text{оп}}^{i(\text{геом})} = \sqrt{(X_i - X_{\text{оп}})^2 + (Y_i - Y_{\text{оп}})^2 + (Z_i - Z_{\text{оп}})^2}. \quad (5.157)$$

Зная координаты спутника (X_i, Y_i, Z_i) и приемника на опорном пункте $(X_{\text{оп}}, Y_{\text{оп}}, Z_{\text{оп}})$, а также значения поправок на трассе следования сигнала, вычислялось расхождение шкал времени:

$$\Delta t_{\text{оп}}^i = \frac{\sqrt{(X_i - X_{\text{оп}})^2 + (Y_i - Y_{\text{оп}})^2 + (Z_i - Z_{\text{оп}})^2}}{c} - (t_{\text{оп}} - t_i + \sum dt_{\text{тр}}) + dt_{\text{оп}}, \quad (5.158)$$

где $t_{\text{оп}}$ – время часов приемника в момент приема им сигнала;

t_i – время часов спутника в момент излучения им навигационного сигнала;

$\sum dt_{\text{тр}}$ – совокупность поправок на трассе следования сигнала, включая задержки сигнала в кабеле и антенне, ионосферную и тропосферную задержку, а также релятивистскую поправку, учитывающую вращение Земли.

Реализовав процедуру несмещенной оценки результатов измерений времени прохождения радионавигационного сигнала с доверительным интервалом $3s$ была

получена конечная выборка, функция плотности вероятности которой, близка к нормальному распределению. На рисунке 5.61 представлены полученные функции плотности вероятности, построенные по выборкам результатов измерений до и после исключения грубых погрешностей, наличие которых приводит к смещенной оценке математического ожидания результатов измерений времени прохождения радионавигационного сигнала [243].

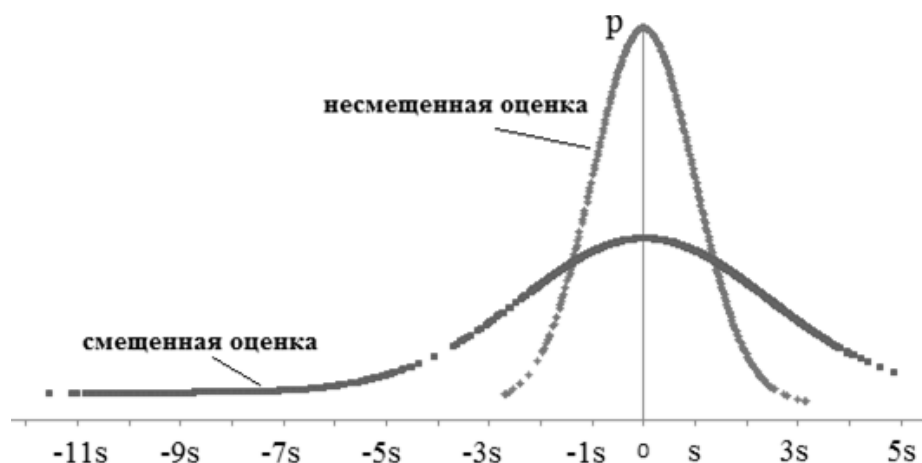


Рисунок 5.61 – Графики функций плотности распределения вероятности, полученные до и после исключения грубых погрешностей

Для подтверждения эффективности предложенного метода был проведен сравнительный анализ СКО с аналогичным методом расчета расхождения шкал времени, в котором не проводилась несмещенная оценка времени прохождения радионавигационного сигнала. Сравнительный анализ проводился с помощью двух равноточных средств измерений, расположенных в одном пункте и определяющих значения $t_{оп} - t_i$ между ГНСС GPS и одним и тем же ЭВЧ на интервале времени усреднения 1 сутки. Таким образом, действительное значение расхождений ШВ между пунктами Δt , априори, равно нулю, поскольку в данном случае погрешности следования сигнала на трассе «Спутник-приемник» взаимоисключаются [243]. Измерения проводились на интервале времени наблюдения 40 суток. На рисунке 5.62 приведены результаты оценки времени прохождения радионавигационного сигнала по сравнению с модифицированным фильтром Калмана.

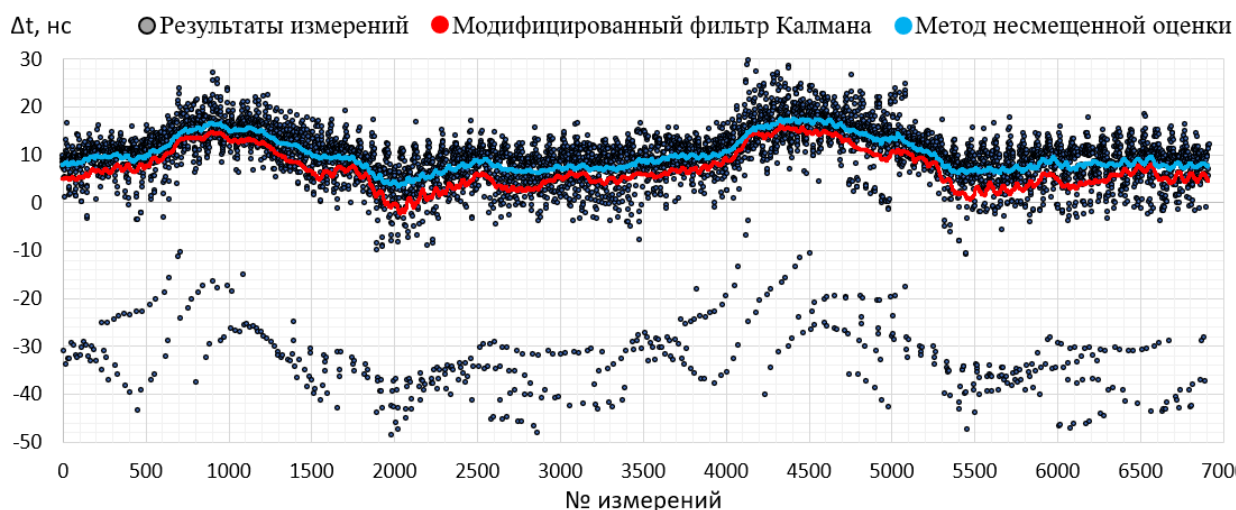


Рисунок 5.62 – Результаты применения S-модифицированного фильтра Калмана и метода несмещенной оценки времени прохождения радионавигационного сигнала

Фильтр Калмана является одним из наиболее эффективных рекурсивных фильтров для зашумленных результатов измерений, позволяющий оценить вектор состояния динамической системы. Увеличение вычислительных затрат S-модифицированного фильтра Калмана незначительно по сравнению с классическим. В соответствии с алгоритмом работы фильтра Калмана по каждой гипотезной траектории вычисляется рекуррентно в «скользящем окне» функция правдоподобия:

$$L(k) = L(k-1) + DL(k), \quad (5.159)$$

где D – вероятность правильного результата измерений.

В случае если гипотезная траектория не обновляется:

$$\Delta L(k) = \ln(1 - D) \quad (5.160)$$

В противном случае:

$$\Delta L(k) = (z(k) - x(k|k-1))^T R^{-1} (z(k) - x(k|k-1)), \quad (5.161)$$

где z – вектор параметров отметки;

$x(k|k-1)$ – вектор экстраполированных значений результатов измерений;

R – ковариационная матрица ошибок измерений.

S-модификация фильтра Калмана включает выражение для определения элементов матрицы дисперсий экстраполяции:

$$\mathbf{D}_e(k) = S \cdot \Phi^T(k, k-1) \mathbf{D}(k-1) \Phi(k, k-1) + \mathbf{Q}_x, \quad (5.162)$$

где $\Phi(k, k-1)$ – фундаментальная матрица;

$\mathbf{D}(k)$ – матрица дисперсий фильтрации;

\mathbf{Q}_x – шумы.

Коэффициент S определяется из выражения:

$$S = \frac{\text{tr}(\Delta \mathbf{z}^T \mathbf{Q} \Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}^T \mathbf{Q}_x \mathbf{H} - \mathbf{R})}{\text{tr}(\mathbf{H}^T \Phi^T(k, k-1) \mathbf{D}(k-1) \Phi(k, k-1) \mathbf{H})} \quad (5.163)$$

где $\Delta \mathbf{z}$ – вектор невязок;

\mathbf{R} – ковариационная матрица ошибок измерений.

Матрица \mathbf{H} преобразует вектор состояния в вектор измерений, который будет увеличивать элементы матрицы \mathbf{D}_e и коэффициенты усиления фильтра, что вызовет усиление невязки и приближение $\hat{x}(k|k)$ к истинному значению [358]. Размерность квадратной матрицы \mathbf{Q} определяется числом измеряемых параметров, в частности, при измерении на этапе первичной обработки результатов измерений ее размерность равна 1. На рисунке 5.63 изображена гистограмма с результатами сравнений СКО измерений $\Delta t_{\text{оп}}^i$ на сутках, полученных с помощью S-модификации фильтра Калмана и метода несмещенной оценки времени прохождения радионавигационного сигнала.

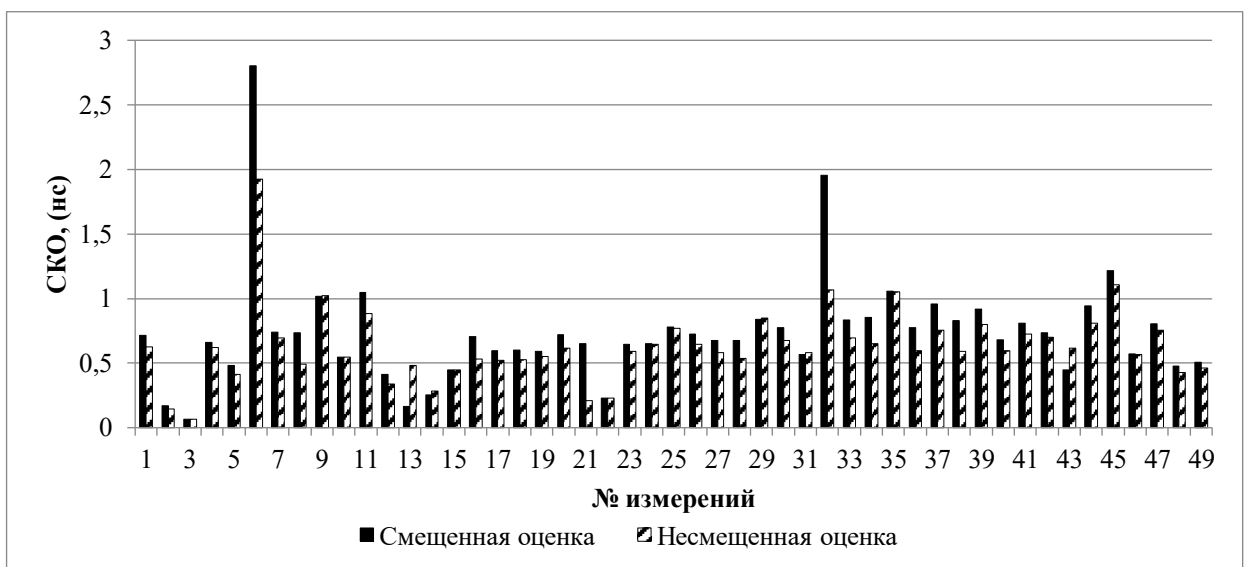


Рисунок 5.63 – Сравнительный анализ результатов измерений с помощью s-модифицированного фильтра Калмана и метода несмещенной оценки времени прохождения радионавигационного сигнала

Значения СКО результатов измерений на суточном интервале наблюдения для выборок значений $\Delta t_{\text{оп}}^i$, полученных методом с несмещенной оценкой времени прохождения радионавигационного сигнала не превысили 2 нс и были в среднем меньше на 12%, чем значения СКО результатов измерений для выборок значений $\Delta t_{\text{оп}}^i$, полученных s-модифицированным фильтром Калмана. При этом среднее арифметическое значение погрешности определения времени прохождения радионавигационного сигнала на интервале времени наблюдения 49 суток уменьшилось приблизительно на 12%. Следовательно, абсолютная погрешность определения координат пункта наблюдения ВСКЗ также уменьшилось приблизительно на 12%.

5.7 Сравнительный анализ метрологических характеристик видеограмметрической системы компьютерного зрения

В целях проведения сравнительной оценки метрологических характеристик разработанных сегментов ВСКЗ были выбраны в информационном фонде государственного реестра средства измерений утвержденного типа (прил. А), которые применяются в настоящее время для контроля геометрических параметров ж/д пути. Метрологические характеристики данных средств измерений приведены в приложении Б. Сравнительная оценка погрешности сегментов ВСКЗ и средств измерений утвержденного типа, выбранных в качестве аналогов, представлена в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Сравнительная оценка погрешности сегментов ВСКЗ и средств измерений утвержденного типа

Виды контроля геометрических параметров железнодорожного пути	Средства контроля, (погрешность)	Сегмент ВСКЗ, (погрешность)
Мониторинг и оценка состояния ж/д пути	Комплекс лазерного сканирования с БПЛА «Геоскан» (30-50 мм)	Сегмент ВСКЗ для мониторинга и формирования 3-D моделей железных дорог (10 мм)
Планово-высотное обоснование и вынос проекта железной дороги в натуру	Тахеометр 6Та2 (средняя квадратическая погрешность измерения: вертикальный и горизонтальный углы 2" расстояния по призмённому отражателю от 2 мм)	Сегмент ВСКЗ для планово-высотного обоснования и выноса проекта железной дороги в натуру (средняя квадратическая погрешность измерения: вертикальный и горизонтальный углы 1,62" расстояния по ВЦ от 1 мм)
Контроль геометрических параметров нижнего строения пути	Спутниковый геодезический ГНСС-приемник TRIUMPH-3 (в плане, от 30 мм по высоте, от 45 мм)	Сегмент ВСКЗ для контроля геометрических параметров земляного полотна железной дороги (3 мм в радиусе 50 м)
Контроль геометрических параметров верхнего строения пути (ширина уровня, просадка)	Путеизмерительная тележка ПТ-12-01 (1 мм)	Сегмент ВСКЗ для контроля геометрических параметров рельсовой колеи (0,76 мм)

В качестве аналога сегмента ВСКЗ, разработанного для мониторинга и формирования трехмерных моделей железных дорог был выбран комплекс для лазерного сканирования с БПЛА «Геоскан-401 Лидар», выпускаемый российской группой компаний «Геоскан». Данный комплекс предназначен для автоматического выполнения аэрофотосъемочных работ и воздушного лазерного сканирования площадных и линейных объектов. БПЛА «Геоскан-401 Лидар» оснащается лазерным сканером АГМ-МС, позволяющего определять координаты точек сканируемой поверхности с погрешностью 30-50 мм (таблица Б.11).

Сравнительная оценка точности сегмента ВСКЗ, разработанного для планово-высотного обоснования и выноса проекта железной дороги в натуру

производилась с тахеометром 6Та2, выпускаемым АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод». Данный тахеометр предназначен для выполнения крупномасштабных топографических съемок, создания сетей планово-высотного обоснования, выполнения исполнительных съемок застроенных и строящихся территорий, а также автоматизированного решения в полевых условиях различных геодезических и инженерных задач при помощи прикладных программ.

Сегмент ВСКЗ, разработанный для контроля геометрических параметров земляного полотна железной дороги посредством создания с помощью ВЦ локальной системы координат, сравнивался по точности со спутниковым геодезическим ГНСС-приемником TRIUMPH-3, предназначенным для измерения приращений координат и геодезических определений относительного местоположения объектов, а также изменения во времени их положения в режиме “кинематика реального времени”. Метрологические характеристики данного приемника приведены в таблице Б.4.

Для сравнительной оценки точности сегмента ВСКЗ, разработанного для контроля геометрических параметров рельсовой колеи была выбрана в качестве аналога путеизмерительная тележка ПТ-12-01, предназначенная для измерения ширины рельсовой колеи (шаблон), взаимного положения обеих рельсовых нитей по высоте (уровень), стрел изгиба каждой рельсовой нити в горизонтальной плоскости (рихтовка), стрел изгиба каждой рельсовой нити в вертикальной плоскости (просадка). В таблице 5.5 приведены величины 1-й степени отступлений от нормативного и проектных значений геометрических параметров ж/д пути в соответствии со сводом правил СП 119.13330.2017 «Железные дороги колеи 1520 мм» для железных дорог с установленными скоростями движения поездов: 101-140 км/ч для пассажирских, 81-90 км/ч для грузовых.

Таблица 5.5 – Предельные допуски на отклонение геометрических параметров железнодорожного пути и результаты оценки погрешностей ВСКЗ

Виды отклонений параметров железнодорожного пути	Величина отклонений, мм	Погрешность ВСКЗ, мм
Уширение колеи при номинале	8	0,76
Сужение колеи при номинале	4	
Уровень	6	0,373
Перекос	8	
Просадка	10	
Разность смежных стрел, измеренных от середины хорды длиной 20 м	10	0,76
Отклонение высотных отметок оси земляного полотна	50	3 (при базисном расстоянии 50 м между ВЦ, в радиусе 50 м)
Отклонение в плане оси земляного полотна от проектного положения оси	100	
Отклонение от проектного положения оси подошвы откоса насыпи (выемки)	150	
Отклонение от толщины слоя дренирующего грунта в верхней части земляного полотна	100	

По точности результаты измерений координат, полученные с помощью разработанных сегментов ВСКЗ, сопоставимы с результатами измерений существующих путеизмерительных комплексов и средств измерений утвержденного типа, применяемых в целях контроля геометрических параметров ж/д пути. При этом результаты измерений ВСКЗ не зависят от условий приёма сигналов ГНСС и обеспечивают более высокую оперативность контроля геометрических параметров ж/д пути, тем самым сокращая время производства строительно-восстановительных работ.

5.8 Выводы по пятой главе

Основными факторами, влияющими на шумовые характеристики фотоприёмника и, как следствие, на точность определения параметров ВЦ на изображении, являются температура, освещенность, электрические и электромагнитные помехи в каналах связи. Снижение влияния этих факторов

достигалось путем охлаждения фотоприемника ВСКЗ, применения ВЦ активного типа, а также с помощью разработанного метода фильтрации шума в частотной области изображения ВЦ. В результате этих действий удалось снизить уровень шума фотоприемника на 67,3 % и тем-самым уменьшить относительную погрешность измерения радиуса ВЦ на 2,9 %.

Основное влияние на погрешность результата измерений на расстоянии до 20 м оказывает динамическая составляющая погрешности, которая оценивалась с помощью физического маятника. В ходе экспериментов с помощью свободных затухающих колебаний простого физического маятника были определены метрологические характеристики ВУ, позволяющие оценить погрешности измерения угловых координат, скорости и перемещения движущихся объектов. При относительной скорости ВЦ равной 1,1 м/с абсолютная погрешность измерения ВУ его скорости составила 5 мм/с на дальности более 1 м.

Выполнена оценка суммарная стандартной неопределенности результата измерений координат ВЦ с учетом составляющих погрешности измерений ВУ: методической, динамической, шумовой, инструментальной, вычислительной. Суммарная неопределенность результата измерений угловых координат ВЦ оценивалась в зависимости от метрологических характеристик средств измерений утвержденного типа, входящих в состав ВСКЗ и условий проведения измерений. По результатам оценки суммарная неопределенность результата измерений составила 3,18" на дальности более 1 м при доверительном уровне 95 %.

Разработанный сегмент ВСКЗ для аэрофотопографической съемки местности позволяет повысить точность определения отклонений БпЛА от маршрута полета и обеспечивает автоматическое формирование ортофотоплана в режиме реального времени. Это дает возможность проводить аэрофотосъемочные работы на низких высотах и создавать фотосхемы в крупных масштабах с соблюдением требуемых перекрытий АФС. На низких высотах проведения плановой аэрофотосъемки (до 100 м) с применением современной АФК методическая погрешность определения координат БпЛА составила 10 мм.

Применение разработанного сегмента ВСКЗ для планово-высотного обоснования и выноса проекта железных дорог в натуру позволяет повысить оперативность и достоверность определения координат точек на поверхности железной дороги, находящихся вне зоны прямой оптической видимости ВУ, благодаря этому повышается производительность проектно-изыскательных и строительных работ на участке ж/д пути. По результатам оценки погрешность измерения координат точки при выносе на поверхность строящегося участка ж/д пути не превышает 3 мм в радиусе 100 м при допустимом отклонении луча лазерного дальномера от вертикали 1'. Погрешности измерения дальности ВЦ и возвышения БПЛА составляют 1 мм.

Разработанный сегмент ВСКЗ для контроля геометрических параметров земляного полотна железной дороги, посредством определения координат и пространственного положения рабочего органа строительной техники, обеспечил возможность выполнения всех технологических операций по производству земляных работ в автоматическом режиме. Установлено, что при базисном расстоянии 50 м между ВЦ, данный сегмент ВСКЗ позволяет в радиусе 50 м осуществлять контроль планового и высотного положения рабочего органа строительной техники с погрешностью 3 мм.

В основу разработанного сегмента ВСКЗ для контроля параметров ГРК был положен координатный метод измерений, который обеспечивает необходимую точность и достоверность результатов измерений. Применение данного метода также позволило осуществлять комплексный контроль основных параметров ГРК и обеспечило возможность обнаружения длинных неровностей рельсовой колеи на криволинейных участках пути. На основе экспериментальных данных были получены зависимости составляющих погрешности ВСКЗ, позволяющих произвести оценку суммарной неопределенности результата измерений координат точек с учетом метрологических характеристик средств измерений, входящих в состав ВСКЗ, а также условий проведения измерений. Значение абсолютной погрешности измерения ВСКЗ координат точек рельсовых нитей составила 0,76 мм на дистанции до 25 м.

Метод несмещенной оценки времени прохождения радионавигационного сигнала по выборке результатов измерений расхождений шкалы времени спутника от шкалы времени опорного генератора времени и частоты, позволяет на 12 % снизить погрешность определения усредненной оценки этих измерений на интервале времени наблюдений. Тем самым была повышена точность определения псевдодальности спутников и вследствие этого повысилась точность определения координат пункта наблюдения ВСКЗ по сигналам ГНСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научно обоснована перспективная комплексная ВСКЗ для контроля геометрических параметров ж/д пути, обеспечивающая получение актуальной и достоверной информации о техническом состоянии железных дорог, а также высокую точность и оперативность производства строительно-восстановительных работ на участке ж/д пути. Расширение функциональности ВСКЗ стало возможным благодаря новым методам и техническим решениям, разработанным на основе технологий компьютерного зрения, обеспечивающей: построение трехмерных моделей ж/д пути, формирование проекта решения на производство строительно-восстановительных работ и вынос проекта железных дорог в натуру, контроль параметров ГРК и формы земляного полотна ж/д пути.

Потребность в решении широкого спектра измерительных задач, возникающих в процессе технического обслуживания железных дорог и обеспечения безопасности движения ж/д транспорта, привело к усложнению структуры ВСКЗ и вызвало необходимость разработки комплекса взаимосвязанных сегментов системы, обеспечивающих оперативную оценку технического состояния и контроль различных геометрических параметров ж/д пути. В целях выполнения назначенных функций ВСКЗ: разработано программное обеспечение, с помощью которого налажено взаимодействие всех сегментов ВСКЗ, выполнена проверка правильности реализации алгоритмов и произведена их отладка, отработаны методы координатных измерений и произведена оценка погрешности ВСКЗ. Для повышения точности привязки результатов измерений ВСКЗ к глобальной системе координат разработан усовершенствованный алгоритм обработки данных с приемников сигналов ГНСС.

2. Разработаны высокоточные фотограмметрические методы, направленные на решение различных измерительных задач ВСКЗ с применением ВЦ. Для идентификации ВЦ использовались их визуальные признаки и частота мигания. При этом вероятность обнаружения и идентификации ВЦ по совокупности визуальных признаков достигает 99,6 %. Погрешность ВСКЗ при измерении угловых координат ВЦ уменьшалась посредством цифровой обработки её

изображений в частотной области. Для этого на изображении определялся контур ВЦ, который представлялся в комплексной плоскости путем построения его профилограммы относительно базовой окружности.

В ходе анализа фурье-образа развернутой профилограммы контура ВЦ определялись характеристики рассеяния случайной составляющей погрешности измерения радиуса ВЦ. Для фильтрации гармоник в спектре частот Фурье-образа контура визирной цели применялся идеальный фильтр низких частот в радиусе действия гармоники, с которой начинается отсчет микрогеометрии контура ВЦ. При этом параметры контура ВЦ определялись по формулам Спрэгга путем решения оптимизационной задачи на вычисление минимума гладкой целевой функции.

По результатам фильтрации изображения ВЦ с помощью идеального фильтра низких частот, абсолютная погрешность измерения угловых координат ВЦ уменьшилась более чем в 2 раза относительно результатов, полученных с помощью метода наименьших квадратов. Применение фотограмметрических методов цифровой обработки изображения ВЦ в частотной области позволило привести погрешность измерения угловых координат ВСКЗ в пределы допускаемой средней квадратической погрешности измерения углов для тахеометра технического класса точности.

3. Разработан метод калибровки видеограмметрических систем с помощью расчетных функций времени для вычисления координат простого физического маятника, совершающего плоскопараллельные затухающие колебания. Физический маятник обладает сложной, контролируемой траекторией движения по сравнению с неподвижными тест-объектами, благодаря чему повышается точность и достоверность калибровки видеограмметрической системы, применяемой для измерения динамических параметров объектов, обладающих механическим движением. В ходе экспериментов с помощью простого физического маятника были определены метрологические характеристики видеограмметрической системы, позволяющие оценить погрешности измерения угловых координат, скорости и перемещения движущихся объектов.

4. Разработан видеограмметрический метод для решения геодезической задачи обратной однократной угловой засечки по трем равноудаленным друг от друга ВЦ активного типа. Решение данной задачи позволяет с помощью ВЦ строить реперную систему координат, в которой координаты и пространственное положения ВУ определяются посредством цифровой обработки видеоизображений и идентификации ВЦ по частоте мигания. Данный метод основан на технологии компьютерного зрения и может применяться для контроля геометрических параметров земляного полотна железной дороги посредством позиционирования рабочего органа строительной техники в процессе производства земляных работ, что в конечном итоге способствует повышению безопасности, качества и скорости их выполнения.

Благодаря применению технологии компьютерного зрения обеспечивается навигация беспилотной строительной техники (бульдозеров, экскаваторов, автогрейдеров и т.п.) и позиционирование ее рабочего органа. Применение данной технологии позволило автоматизировать процессы производства земляных работ, а также достигнуть более высокого уровня автоматизации процесса контроля и более высокой скорости измерения параметров ГРК, что обеспечило соблюдение допусков на параметры земляного полотна железной дороги в условиях неуверенного приема сигналов ГНСС.

5. Созданы теоретические основы для повышения точности формирования цифровых моделей ж/д пути и прилегающей к ним территории на базе технологий компьютерного зрения. Необходимость данного теоретического исследования была обусловлена наличием зон неуверенного приема сигналов ГНСС и снижением точности построения цифровых моделей в этих зонах. В основу теории положен разработанный метод компьютерной обработки АФС ж/д пути. При этом в качестве элементов внешнего ориентирования использовались нити рельсовой колеи, расположенные на нормированном расстоянии друг от друга. Применение данного метода позволило повысить точность определения траектории полета БПЛА над ж/д путями и, как следствие – точность измерения координат точек на сканируемой поверхности участка ж/д пути.

В результате компьютерной обработки материалов аэрофотосъемки и данных лазерного сканирования устранено 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 мониторинга и оценки технического состояния 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 радионавигационного сигнала по выборке результатов сравнений системной шкалы времени спутника со шкалой опорного генератора сигналов времени и частоты референцной станции. Исходными данными для сравнения шкал времени служат результаты измерения псевдодальности на частоте модуляции, результаты измерения псевдодальности на несущей частоте и высокоточная эфемеридно-временная информация. Применение данного метода позволило снизить погрешность усредненной оценки результатов измерений на интервале времени наблюдения, за счет чего снижается погрешность определения псевдодальности спутников и повышается точность определения собственных координат ВСКЗ по сигналам ГНСС. СКО по выборкам результатов сравнений шкал времени, полученных с помощью данного метода, уменьшилось до 4 раз и не превысило 5 нс. В результате абсолютная погрешность определения координат пункта наблюдения ВСКЗ уменьшается приблизительно на 12%.

7. Разработан сегмент ВСКЗ для мониторинга и оценки технического состояния ж/д пути, посредством совместного проведения аэрофотосъемки и лазерного сканирования участка ж/д пути. Данный сегмент ВСКЗ отличается высокой оперативностью применения и мобильностью по сравнению с диагностическими комплексами пространственного сканирования, построенными на базе путеизмерительных вагонов, и может применяться в случаях повреждения

ж/д пути, когда применение наземных диагностических комплексов становится невозможным.

Применение данного сегмента ВСКЗ позволило уменьшить до 50 % доверительный интервал распределения погрешности определения координат точек на местности и повысить точность формирования цифровой модели ж/д пути. Угловая погрешность определения вектора перемещения БПЛА составила менее 1', что позволило уменьшить составляющую погрешности, обусловленную его рысканием. На небольших высотах проведения плановой аэрофотосъёмки (до 50 м) с применением современной АФК средняя квадратическая погрешность измерений координат точек не превысила 10 мм.

8. Разработан сегмент ВСКЗ для планово-высотного обоснования и выноса проекта железных дорог в натуру. Данный сегмент позволяет до 10 раз повысить оперативность определения координат точек, находящихся вне зоны прямой оптической видимости ВУ, благодаря этому повышается производительность проектно-изыскательных и строительных работ на участке ж/д пути. По результатам оценки погрешность измерения координат точки при выносе на поверхность строящегося участка ж/д пути не превышает 3 мм в радиусе 100 м.

9. Разработан сегмент ВСКЗ для определения пространственного положения и координат рабочего органа строительной техники. Данный сегмент ВСКЗ позволяет в радиусе 50 м, при таком же базисном расстоянии между ВЦ, осуществлять контроль планового и высотного положения рабочего органа строительной техники в пределах допуска 3 мм. Благодаря этому, достигаются высокие точности определения геометрических параметров земляного полотна ж/д пути и привязка их к реперной системе координат. Расположение ВЦ на равном базисном расстоянии друг от друга повышает площадь области измерения ВСКЗ. Уменьшение одного из трёх базисных расстояний между ВЦ в два раза приводит к уменьшению площади области измерения ВСКЗ на 14,3 % при допустимой погрешности измерения координат 20 мм. В случае уменьшения двух базисных расстояний между ВЦ в два раза, возникают две разделённые между собой области,

площадь каждой из которых меньше на 43 % при такой же допустимой погрешности.

10. Разработан сегмент ВСКЗ для проведения сплошного контроля параметров ГРК, позволяющий осуществлять регистрацию пространственного положения рельсовых нитей и определять параметры ГРК с привязкой к системам координат ГНСС или реперной ж/д сети. Данный сегмент ВСКЗ также может применяться для сплошного контроля параметров ГРК под нагрузкой посредством размещения ВЦ на передней оси колесной пары путеизмерительных вагонов. Значение инструментальной составляющей погрешности ВСКЗ при измерении угловых координат составило 1,6", что сопоставимо с погрешностью геодезических приборов. При этом абсолютная погрешность ВСКЗ при определении координат точек рельсовых нитей находится в пределах 0,76 мм на дистанции до 25 м.

11. Совокупность полученных теоретических и технических результатов исследования позволяет сделать вывод о том, что в диссертационной работе решена научная проблема по созданию методов и средств для оперативного получения актуальной и достоверной информации о техническом состоянии поврежденных участков железных дорог в условиях быстрого реагирования и неуверенного приема спутниковых радионавигационных сигналов, которая имеет важное социально-экономическое значение для удовлетворения современным требованиям повышения безопасности, сокращения времени ремонтно-восстановительных работ на железных дорогах, а также увеличения пропускной и провозной способностей строящихся высокоскоростных ж/д магистралей в России. При этом создана методологическая основа для совместного применения технологий компьютерного зрения, лазерной съемки и координатных измерений по сигналам ГНСС в целях решения с помощью разработанной ВСКЗ ряда разнотипных координатно-измерительных задач, возникающих в процессе строительства, эксплуатации и ремонта ж/д пути.

Рекомендации. Строительство новых ж/д участков (объектов) предусматривает проведение инженерно-геодезических изысканий, при которых выполняются топографическая съемка, включая съемку сооружений. Инженерно-геодезические изыскания для строительства должны обеспечивать получение топографо-геодезических материалов и данных о ситуации и рельефе местности, существующих зданиях и сооружениях, других элементах планировки, необходимых для комплексной оценки природных и техногенных условий территории строительства с целью принятия решения о способах строительства железных дорог. Разработанные методы и комплекс лазерного сканирования с БПЛА позволят существенно облегчить решение задач, направленных на выявление: особенностей рельефа местности; состояния транспортных коммуникаций; наличия естественных препятствий; характера водных преград и условий их преодоления; районов разрушений, пожаров и затоплений, возможных путей их преодоления (обхода); местных ресурсов, которые могут быть использованы для выполнения строительно-восстановительных работ [255].

ВСКЗ может быть задействована для решения широкого круга измерительных задач в процессе строительства объектов инфраструктуры ж/д транспорта, а также при проведении испытаний специальной техники, инвентарных мостовых конструкций и искусственных сооружений. С её помощью можно измерять различные 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 (механизмов), например в целях проведения испытаний подвижного ж/д состава. ВСКЗ также может использоваться для обработки данных, получаемых от дефектоскопов (ультразвуковых, инфракрасных или электронно-оптических), что позволит автоматизировать процесс контроля сварных швов, температуры опытных образцов и их элементов, а также повысит эффективность обнаружения дефектов и трещин в металлоконструкциях. Оснащение ВСКЗ камерой высокого разрешения и устройством монохромного равномерного освещения позволит измерять перемещение каждой точки поверхности испытуемого объекта, с

точностью определяемой свойствами используемой фоточувствительной матрицы. Таким образом, могут решаться задачи по регистрации, как микродеформаций, так и очень больших деформаций в зависимости от области наблюдения [359].

Перспективы дальнейшей разработки темы. Результаты проделанной работы в дальнейшем могут быть использованы для проектирования координатно-измерительных систем подобного типа. Применение технологии компьютерного зрения позволяет расширить функциональные возможности информационно-измерительных систем, повышает точность координатных измерений и существенно 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 сокращений и условных обозначений

АЛС	– автоматическая локомотивная сигнализация
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
ж/д	– железнодорожный
ИИУС	– информационно-измерительная и управляющая система
ИК	– инфракрасный
КМОП	– комплементарная структура металл-оксид-полупроводник
ЛА	– летательный аппарат
ПЗС	– прибор с зарядовой связью
ПМК	– программно-математический комплекс
ПО	– программное обеспечение
САПР	– систем автоматизированного проектирования
САУ	– система автоматизированного управления
СЦБ	– устройства сигнализации, централизации и блокировки
СИ	– средство измерений
СКЗ	– система компьютерного зрения
ЭВМ	– электронная вычислительная машина

Список литературы

1. Гизатуллина, В. Г. Себестоимость железнодорожных перевозок и тарифы: учебное пособие / В. Г. Гизатуллина, Е. В. Бойкачева // Гомель: БелГУТ, 2015. – 308 с.
2. Лapidус, Б. М. Техническая политика как инструмент реализации экономической стратегии на железнодорожном транспорте. Подходы к методологии : [монография] / Б. М. Лapidус. – М.: Маршрут, 2004. – 207 с.
3. Белов, И. В. Экономика железнодорожного транспорта: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. Н. П. Терёшиной, Б. М. Лapidуса, М. Ф. Трихункова. – М.: УМК МПС России, 2001. – 596 с.
4. Транспорт в России. 2022: Статистический сборник. – М.: Росстат, 2022 – 101 с.
5. Рошин, Д. А. Построение информационно-измерительных и управляющих систем на базе технологий позиционирования и навигации для контроля пространственных параметров железной дороги / Д. А. Рошин // инновационные подходы в современной науке : сборник статей по материалам СХХХII международной научно-практической конференции. Москва, 20 декабря 2022 года. Том 24 (132). – Москва: ООО "Интернаука". – 2022. – С. 62-73. – DOI: 10.32743/25878603.2022.24.132.349660.
6. Солопченко Г.Н. Измерительные информационные системы: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров "Системный анализ и управление"., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2010. – 200 с.
7. РМГ 29-99. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2008. – 91 с.
8. Большая Российская энциклопедия [Текст] : [в 30 т.] / научно-редакционный совет: председатель - Ю. С. Осипов и др. – М.: Большая Российская энциклопедия, 2004. – 766 с.

9. Севостьянова, Л. Л. Устройство, проектирование и расчеты рельсовой колеи: Конспект лекций в двух частях. Часть первая / Л. Л. Севостьянова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. – 47 с.
10. Бахтина, Т. В. Учебное пособие для студентов 2 курса по дисциплине. Общий курс железных дорог / Т. В. Бахтина. – Волгоград: ВТЖТ – филиал ФГБОУ ВО РГУПС. – 2017. – 230 с.
11. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. ред. Н. С. Конарев. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 1994. – 559 с.
12. Васюкевич, Е. Б. На путевой секции научно-технического совета / Е. Б. Васюкевич // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 22–28.
13. Попов, С. Н. Балластный слой железнодорожного пути / С. Н. Попов. – М.: Транспорт, 1965. – 183 с.
14. Макушкина, Е. А. Природопользование при проектировании железных дорог : учеб. пособие для студентов специальности "Безопасность жизнедеятельности" / Е. А. Макушкина. – М.: Изд-во МИИТ, 2004. – 88 с.
15. Современные методы усиления земляного полотна. Евразия Вести VIII 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2015-08a07> (дата обращения: 27.02.2023).
16. Худяков, А. С. К вопросу волнового износа рельс [Электронный ресурс] / А. С. Худяков, А. А. Малыхин // Материалы IX Международной студенческой научной конференции Студенческий научный форум». – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2017/article/2017039813> (дата обращения: 21.05.2022).
17. Абрашитов, А. А. Механизм образования выплесков в балластной призме / А. А. Абрашитов // Мир транспорта. – 2015. – №3(58). – С. 210-217
18. Непомнящий, Н. В. Анализ работы балластного слоя железнодорожного пути при длительной эксплуатации / Н. В. Непомнящий, С. А. Косенко // Тенденции развития науки и образования. – 2018. – № 43-8. – С. 52-56. – DOI: 10.18411/lj-10-2018-194.
19. Шаповалов В. Л., Явна В. А., Ермолов К. М. и др. Инженерные решения по повышению устойчивости верхнего строения железнодорожного пути //

Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (68). С. 119–135.

20. Распоряжение ОАО «Российские железные дороги» от 27.04.2016 №777р "Об утверждении Концепции развития систем диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства на период до 2025 года"

21. Диагностика и мониторинг объектов инфраструктуры. Евразия Вести VII 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2015-07a04> (дата обращения: 25.12.2022)

22. Михалкин, И. К. Автоматизированные средства контроля балластной призмы и земляного полотна в системе комплексной диагностики инфраструктуры / И. К. Михалкин, О. Б. Симаков, Ю. А. Седелкин // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 16-18.

23. Распоряжение ОАО "РЖД" от 07.04.2017 №678р об утверждении положения о порядке контроля состояния главных и станционных путей путеизмерительными средствами.

24. Средства технического диагностирования и мониторинга железнодорожного пути высокоскоростных железнодорожных линий. Общие технические требования : ГОСТ 34783-2021. – Введ. 2022–07–01. – М.: ФГБУ РСТ». – 2022. – 16 с.

25. Оценка зависимости рисков и уровня травматизма от периодичности контроля состояния железнодорожного пути / В. П. Сычев, А. В. Сычева, П. Ф. Бестемьянов, В. Н. Филиппов // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 1. – С. 88-93.

26. Ковалева, О. В. Использование ГИС-технологий при определении пространственного положения и геометрических параметров железной дороги / О. В. Ковалева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 101-107.

27. Вербило, В. А. Проектирование новых и реконструкция существующих железных и автомобильных дорог: учеб. – метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию/ В. А. Вербило, Н. В. Довгелюк. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 23с.

28. Волков, Б. А. Экономические изыскания и основы проектирования железных дорог: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Б. А. Волков, И. В. Турбин, Е. С. Свинцов, Н. С. Лобанова; под ред. Б. А. Волкова. – М.: Маршрут, 2005. – 408 с.

29. Обеспечение безопасности скоростного движения. Евразия Вести XII 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2008-13a12> (дата обращения 02.01.2023).

30. Колтик, Е. Д. Инноватика в современной метрологии электрорадиоэлектроники / Е. Д. Колтик, А. И. Синяков, А. М. Федоров // Компетентность. – 2009. – № 3(64). – С. 19-21.

31. Колтик, Е. Д. Технологии и системы получения информации в метрологии / Е. Д. Колтик, Б. Я. Литвинов // Датчики и системы. – 2002. – № 10. – С. 21-22.

32. Рошин, Д. А. Формирование требований к информационно-измерительной и управляющей системе для контроля параметров железнодорожного пути / Д. А. Рошин // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сборник статей по материалам LXII международной научно-практической конференции. Новосибирск, 24 апреля 2023 года. Том 4 (53). - Новосибирск: ООО "Сибирская академическая книга". – 2023. – С. 47-55.

33. Парахуда Р. Н., Литвинов Б. Я. Информационно-измерительные системы: Письменные лекции. – СПб.: СЗТУ, 2002, – 74 с.

34. Рошин, Д. А. Радиоэлектронные и оптико-электронные измерительные технологии / Д. А. Рошин // Технические науки: проблемы и решения : Сборник статей по материалам LXXIV-LXXV международной научно-практической конференции. Москва, 18 августа 2023 года. Том 7-8 (69). – Москва: ООО "Интернаука", 2023. – С. 63-68. – DOI: 10.32743/2587862X.2023.7-8.69.361893.

35. Бруннер В. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 544 с.

36. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи. – М.: ЭКО-ТРЕНД. – 1999. – 96 с.
37. Роцин, Д. А. К вопросу о классификации измерительных технологий / Д. А. Роцин // Universum: технические науки. – 2023. – № 8-1(113). – С. 49-52. – DOI: 10.32743/UniTech.2023.113.8.15838.
38. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ от 24 февраля 2021 г. № 118 "Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук".
39. Основные виды наук, классификация наук, научные дисциплины [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://infoselection.ru/infokatalog/obuchenie-i-znaniya/znaniya-i-nauka-2/item/926-spisok-nauk>.
40. Селевко Г.К. Энциклопедия образовательных технологий. В 2-х т. Т. 1. – М.: Народное образование, 2005. 556 с.
41. Kaplan, Steven M. Wiley Electrical and Electronics Engineering Dictionary. — Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. – P. 234.
42. Жеребцов И.П. Радиотехника. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1965. – 656 с.
43. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учебное пособие. 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Издательство Лань», 2010. – 704 с.
44. Андреев, В. П. Система управления модульных мобильных роботов как мультиагентная система с пирамидальной топологией / В. П. Андреев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2020. – № 3(207). – С. 41-54. – DOI: 10.17213/1560-3644-2020-3-41-54.
45. Проектирование измерительных приборов и систем : учеб. пособие / Ю. Р. Кревченко, Д. В. Шайхутдинов. – Новочеркасск: Южно-Российский

государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2015. – 283 с.

46. Инструкция Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острорельсовых рельсов», утверждена распоряжением ОАО РЖД №2499р от 23.10.2014

47. Рощин, Д. А. Сравнительный анализ технических средств контроля параметров геометрии рельсовой колеи / Д. А. Рощин // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2023. – № 3(63). – С. 40-47.

48. Петухов, В. Ф. Учебное пособие для студентов 3-го курса по ПМ 03. Устройство, надзор и техническое состояние железнодорожного пути и искусственных сооружений. МДК 03.03. Неразрушающий контроль рельс. / В. Ф. Петухов. – Волгоград: ВТЖТ – филиал ФГБОУ ВО РГУПС. – 2017. – 154 с.

49. НПЦ ИНФОТРАНС. Измерительные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://infotrans-logistic.ru/pages.htm?category=Измерительные%20системы> (дата обращения 12.11.2021).

50. Путьизмерительные системы. ТВЕМА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tvema.ru/638> (дата обращения: 27.02.2023).

51. Бугаенко, В. М. Мониторинг и диагностика инфраструктуры скоростными мобильными комплексами / В. М. Бугаенко // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 12-16.

52. Михалкин, И. К. Диагностический комплекс СМДЛ-2ТЭ116 - новый подход к диагностике / И. К. Михалкин, Ю. А. Седёлкин // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – № 1 (33). – С. 64-67.

53. Кухливский, С. В. Автоматизированная система измерения кривизны железнодорожного пути на основе гироскопа / С. В. Кухливский, В. Н. Купрас, Б. М. Бондаренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2007. – № 18. – С. 7-10.

54. Реестр средств измерений, испытательного оборудования и методик измерений, применяемых в ОАО РЖД» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://rzd-](http://rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/Reestr_sredstv_izmereniy.pdf)

[expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/Reestr_sredstv_izmereniy.pdf](http://rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/Reestr_sredstv_izmereniy.pdf) (дата обращения: 27.02.2023).

55. Глазунов, Д. В. Диагностические и технологические способы повышения надежности рельсового пути / Д. В. Глазунов // Научно-технические проблемы машиностроения. – 2019. – №1. – С.32-40. – DOI: 10.30987/article_5c19275f9d3ee4.61908631.

56. Попович, М. В. Путевые машины : полный курс : учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта – М.: Желдориздат, 2009. – 818 с.

57. Специальная реперная система контроля состояния железнодорожного пути в профиле и плане. Технические требования: утверждены МПС России 26.03.1998.

58. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Государственный реестр средств измерений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> (дата обращения: 14.03.2023).

59. Щербаков, И. В. Аппаратно-программный комплекс Профиль-М» для определения пространственных и геометрических параметров рельсовой колеи / И. В. Щербаков // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22. – № 3, – С. 60-71.

60. Самратов, У. Д. О точности определения геометрических параметров железнодорожного пути с помощью АПК / У. Д. Самратов, Л. А. Сакович, Д. Г. Кривдин // Геопрофи. – 2007. – № 6. – С. 28–32.

61. МПС РФ № ЦПТ-52. Правила и технология выполнения основных работ при текущем содержании пути, утверждены 30.06.1997.

62. Рошин, Д. А. Сравнительный анализ технических средств для контроля параметров железнодорожного пути / Д. А. Рошин // Технические науки: проблемы и решения : сборник статей по материалам LXXI международной научно-

практической конференции. Москва, 18 апреля 2023 года. Том 4 (66). – Москва: ООО "Интернаука", 2023. – С. 28-37. – DOI: 10.32743/2587862X.2023.4.66.355459.

63. Курков, М. В. Применение технологий Геоскан для маркшейдерских работ / М. В. Курков, А. Е. Семенов, А. А. Котов // Маркшейдерский вестник. – 2017. – № 3(118). – С. 42-46.

64. Кадничанский, С. А. О сертификационных испытаниях программно-аппаратного комплекса на основе беспилотного воздушного судна "Геоскан 401" / С. А. Кадничанский, М. В. Курков, В. М. Курков, А. Г. Чибуничев // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 3. – С. 32-38. – DOI: 10.22389/0016-7126-2020-957-3-32-38.

65. Патент № 2591875С1 РФ / Ревель-Муроз П. А., Чужинов С. Н., Прохоров А. Н. и др. // Изобретения. Полезные модели. 2016. № 20.

66. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap2005.pdf (дата обращения: 05.03.2023)

67. Веремеенко, К. К. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / К. К. Веремеенко, А. Н. Головинский, В. В. Инсаров [и др.]. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 280 с.

68. Салычев, О. С. Автопилот БПЛА с Инерциальной Интегрированной Системой – основа безопасной эксплуатации беспилотных комплексов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://uav.ru/articles/TeKnol_Autopilot.pdf (дата обращения: 01.08.2022)

69. Руководство по эксплуатации Geoscan 701 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://download.geoscan.aero/site-files/701/Geoscan_701_Manual.pdf (дата обращения: 14.03.2023).

70. Путевые машины, применяемые в ОАО РЖД Региональный Центр Инновационных Технологий. Техническая информация. Конструкция, теория и расчет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rcit.su/techinfo35.html> (дата обращения: 15.08.2022).

71. Щербаков, В. В. Применение глобальных навигационных спутниковых систем ГНСС на скоростных железнодорожных магистралях / В. В. Щербаков // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 5. – С. 42-46.

72. Рубичев, Н. А. Измерительные информационные системы: учебное пособие / Н. А. Рубичев. – М.: Дрофа, 2010. – 334 с.

73. Куприянов, А. О. Глобальные навигационные спутниковые системы: Учебное пособие / А. О. Куприянов. – М.: МИИГАиК, 2017 – 76 с.

74. Рощин, Д. А. Сравнительный анализ метрологических характеристик приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Технические науки: проблемы и решения : Сборник статей по материалам LXXVIII международной научно-практической конференции. Москва, 18 ноября 2023 года. Том 11(72). – Москва: ООО "Интернаука", 2023. – С. 73-78.

75. Стандарт RTCM 90-94/SC104-1. Руководство по установке GPS антенн в дифференциальной подсистеме DGPS и нормы проверок при освидетельствовании опорной станции диффподсистемы.

76. Сети геодезические. Классификация. Общие технические требования : ГОСТ Р 55024-2012. – Введ. 2013–01–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 8 с.

77. Höglund, R. Технология безотражательных измерений dr для геодезистов и инженеров-строителей [Электронный ресурс] / R. Höglund, P. Large. // Trimble Survey, Westminster, Colorado, USA. – Режим доступа: <http://trimble.com>

78. Описание типа средства измерений. Дальномеры лазерные LDM51, LDM41, LDM42, LDM301, LDM302, LDS30 в редакции, утвержденной приказом Росстандарта № 1603 от 16.12.2015 г.

79. Павлов, В. И. Фотограмметрия. Теория одиночного снимка и стереоскопической пары снимков: Учеб, пособие. 2-е изд., переработанное и дополненное / В. И. Павлов. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). 2006. – 175 с.

80. Бохман, Е. Д. Автоматизированная углоизмерительная система для передачи направлений / Е. Д. Бохман, П. А. Иванов, Р. А. Ларичев, М. С. Николаев, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов, С. Б. Беркович, Н. И. Котов // Гироскопия и

навигация. – 2019. – Т. 27. – № 2(105). – С. 95-105. – DOI: 10.17285/0869-7035.2019.27.2.095-105.

81. Barinova, E. A. Optophysical measurements: A method and the results of investigating the random error of an optical angle encoder / E. A. Barinova, E. M. Ivashchenko, P. A. Pavlov, S. V. Gordeev // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 54 (9). – P. 1075-1080. – DOI: 10.1007/s11018-011-9852-3.

82. Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия / Б. В. Краснопевцев. – М.: УПП "Репрография" МИИГАиК, 2008 – 160 с.

83. Полозов, В. С. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи / В. С. Полозов, В. Л. Будеков, С. И. Ротков. – М.: Машиностроение, 1983. – 280 с.

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

85. Козин, Е. В. Фотограмметрия: учебное пособие / Е. В. Козин, А. Г. Карманов, Н. А. Карманова. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2019. – 142 с.

86. Визильтер, Ю. В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, В. А. Князь, А. Н. Ходарев, А. В. Моржин. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 464 с.

87. Рошин, Д. А. Модель видеограмметрической координатно-измерительной системы // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 6 (66). С. 65–77.

88. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Стадии создания. // ГОСТ 34.601 – 90, 1990.

89. Андреев, В. П. Проблемы трёхмерного восприятия окружающего пространства мобильными роботами / В.П. Андреев, С.В. Кувшинов, О.Н. Раев // Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе, науке, образовании и в других областях. *Материалы и доклады XIII международной научно-практической конференции, Москва, 15–16 апреля 2021 года.* – Москва: ООО "ИПП "КУНА", 2021

90. Соколов, С. М. Реализация алгоритмов обработки зрительных данных на бортовых вычислительных ресурсах / С.М. Соколов, А.А. Богуславский, С.А. Романенко // Робототехника и техническая кибернетика. – 2021. – Т. 9. – № 2. – С. 106-111. – DOI: 10.31776/RTCJ.

91. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утверждена приказом Минтранса России № 286 от 21.12 декабря 2010 года.

92. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути: утверждена распоряжением ОАО "РЖД" № 2288р от 14 ноября 2016 года.

93. Роцин, Д. А. Оценка возможностей фотокамеры в качестве средства измерения расстояний / Д. А. Роцин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2016. – Т. 14. – № 11. – С. 34-40.

94. Дамьяновски, В. Библия видеонаблюдения. Цифровые и сетевые технологии. / В. Дамьяновски, - М.: ООО Ай-Эс-Эс Пресс», 2006. – 480 с.

95. Айсманн, К. Цифровая фотография. Искусство фотосъемки и обработки изображений. 2-е издание: Пер. с англ. / К. Айсманн, Ш. Дугган, Т. Грей – СПб.: ООО ДиаСофтЮП», 2005. – 640 с.

96. Бокшанский, В. Б. Расчет характеристик фоточувствительных приборов с зарядовой связью : Учебно-методическое пособие / В. Б. Бокшанский, В. Е. Карасик. – М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2002. – 52 с.

97. Источники шумов в ПЗС-камерах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://microsystemy.ru/info/articles/istochniki-shumov-v-pzs-kamerakh> (дата обращения: 30.12.2022).

98. Роцин, Д. А. Формирование требований для разработки следящей оптической координатно-измерительной системы / Д. А. Роцин // Научный поиск в современном мире [Текст]. – Махачкала: ООО "Апробация", 2016. – С. 21-26.

99. Волковец, А. И. Радиоволновый бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации / А. И. Волковец, Д. Ф. Руденко, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // ДОКЛАДЫ БГУИР. –2007. – Том 20. – № 4. – С. 58-64.

100. Roshchin, D. Metrological analysis of optical methods for measuring railway track geometry parameters / D. Roshchin // Recent scientific investigation : Proceedings of XLV International Multidisciplinary Conference, Shawnee, 05 июня 2023 года. Shawnee: Primedia E-launch LLC, 2023. – P. 48-54.
101. Данилин, А. А. Измерения в радиоэлектронике: учебное пособие / А. А. Данилин, Н. С. Лавренко. – СПб.: Издательство Лань», 2017. – 408 с.
102. Викторов, В. А., Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 207 с.
103. Вахитов, Ш. Я. Акустика. / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Коватгин, А. А. Фадеев, Ю. П. Щевьев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 660 с.
104. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов. – М.: Логос, 2008. – 422 с.
105. Чугуй, Ю. В., 3D оптические измерительные технологии для научных и промышленных применений / Ю. В. Чугуй, А. Г. Верхогляд, И. В. Голубев [и др.] // Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 6. – С. 10-20.
106. Байбаков, А. Н. Лазерные триангуляционные датчики положения в промышленных системах контроля и диагностики / А. Н. Байбаков, В.И. Ладыгин, А.И. Пастушенко // Автометрия. – 2004. – Том 40. – № 2. – С. 105-113.
107. Liebe, C. C. Distance measurement utilizing image-based triangulation / C. C. Liebe, K. Coste // IEEE Sensors Journ. – 2013. – Vol. 13. – No. 1. – P. 234-244. – DOI: 10.1109/JSEN.2012.2212428.
108. Булычев, Ю. Г. Квазиоптимальный метод решения задачи триангуляции в условиях априорной неопределённости / Ю.Г. Булычев, Е.Н. Чепель // Автометрия. – 2017. – Том. 53. – № 6. – С. 83–91.
109. Триангуляционный метод. НПК Фотоника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://npk-photonica.ru/info/reading/18342> (дата обращения: 26.02.2023) [В Интернете].
110. Демкин, В. И. Оптико-электронная измерительная система для определения пространственного положения объекта на основе метода теневой

локации / В. И. Демкин, А. М. Литманович // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. – 2011. – Том 89. – №3. – С. 69–74.

111. Лемешко, Ю. А. Дифракционный метод измерения диаметров круговых отражающих цилиндров / Ю. А. Лемешко, Ю. В. Чугуй // Автометрия. – 2005. – Т. 41. – № 6. – С. 3-12.

112. Жимулева, Е. С. Разработка и создание оптико-электронных проекционных теневых систем для размерного контроля трехмерных объектов с повышенной точностью в промышленном производстве : специальность 05.11.07 "Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жимулева Елена Сергеевна, 2017. – 155 с.

113. Рождественский, Д. С. Когерентность лучей при образовании изображения в микроскопе \ Д. С. Рождественский \ Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1940. – Том. 10, – № 3, – С. 305-330

114. Быстров, Ю. А. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве / Ю. А. Быстров, Е. А. Колгин, Б. Н. Котлецов. – М.: Радио и связь, 1988. – 165 с.

115. Долгих, А. Е. Модель авиационного импульсного лазерного дальномера, работающего по аэродинамическим объектам / А. Е. Долгих, П. М. Жидков // ТРУДЫ МАИ. – 2018. – №100. – 20 с.

116. Ставров, А. А. Импульсные лазерные дальномеры для оптико-локационных систем \ А. А. Ставров, М.Г. Поздняков \ Доклады БГУИР. – 2003. – Том 1. – № 2. – С. 59-65.

117. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1983. - 696 с.

118. Физические основы электронной дальнометрии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://miigaik.vechno.info/um/modul49/GSNGS/R2.htm> (Дата обращения: 22.11.2022)

119. Могильницкий, Б. С. Лазерные технологии для прецизионных измерений больших длин / Б. С. Могильницкий // Компетентность. – 2020. – № 2. – С. 49-53.

120. Зак, Е. Когерентные световые методы измерения параметров механических колебаний / Е. Зак // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 12. – С. 70–76.

121. Мордасов, М. М. Бесконтактное триангуляционное измерение расстояния до зеркальных поверхностей / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, М. Э. Сафонова, В. А. Сычев // Автометрия. – 2018. – Т. 54. – № 1. – С. 80-88. – DOI: 10.15372/AUT20180111.

122. Михляев, С. В. Анализ оптических триангуляционных систем измерения профиля зеркальной поверхности / С. В. Михляев // Автометрия. – 2005. – Т. 41. – № 4. – С. 78-91.

123. Патент № 2541704 С2 Российская Федерация, МПК G01B 11/02. Способ калибровки и настройки системы лазерных датчиков и устройство для его осуществления наблюдения : опубл. 2013.03.19 / Борисов В. Н., Кириков А. В., Щербаков В. А.

124. Рахманов, Б. Н. Лазер. Все же какого он класса опасности? / Б. Н. Рахманов, В. Т. Кибовский // Фотоника. – 2015. – Том 53, – № 5. – С. 42–49.

125. Иванов, В. И. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. – М.: Машиностроение, – 2005. – 834 с.

126. Василевич, Ю. В. Акустический контроль качества изделий. Ультразвуковой дефектоскоп УД4-Т Томографик»: методическое пособие по дисциплине Неразрушающий контроль качества» [Текст] / Ю. В. Василевич, А.М. Якимович, А.М. Язневич, Е.Ю. Неумержицкая, С.А. Зубко. – Минск: БНТУ, 2011. – 94 с.

127. Женжурист, И. А. Методы исследования керамических материалов: Методические указания к практическим занятиям для студентов / И. А. Женжурист. – Казань: Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2017. – 88 с.

128. Жданкин, В. К. Ультразвуковые датчики для систем управления / В. К. Жданкин // Современные технологии автоматизации. – 2003. – №1. – С. 68-79.
129. Башарин, С. А. Физические основы звука: учеб. пособие / С. А. Башарин. – СПб.: СПбГИКиТ, 2014. – 83 с.
130. Катен-Ярцев, А. С. Основы регистрации дефектоскопного контроля рельсов и расшифровки дефектограмм : учеб. пособие / А. С. Катен-Ярцев, Ю. А. Сухобок. – Хабаровск: ДВГУПС, 2018. – 94 с.
131. Соколов, В. С. Дефектоскопия материалов [Текст]. – 2-е изд., перераб. / В. С. Соколов. – Москва; Ленинград : Госэнергоиздат, 1961. – 328 с.
132. Крылов, Ю. Акустические методы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geostart.ru/post/6058> (дата обращения 30.12.2022).
133. Зацепин, А. Ф. Акустические измерения : учеб. пособие для СПО / А. Ф. Зацепин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 211 с.
134. Коротков, М. М. Ультразвуковая толщинометрия: учебное пособие / М. М. Коротков. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 94 с.
135. Чернов, Д. В. Разработка методов диагностики усталостных трещин с помощью акустической эмиссии : дис. канд. техн. наук. / Д. В. Чернов – М., 2018.
136. Степанова, Л. Н. Влияние температуры на задержку времени распространения ультразвуковых волн в рельсе / Л.Н. Степанова, А.Н. Курбатов, Е.С. Тенитилов, Б.В. Глухов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 5(665). – С. 118-124.
137. Патент РФ № 2619842 от 18.05.2017. Степанова Л. Н., Курбатов А. Н., Тенитилов Е. С. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах.
138. Rudenko, D. F. The microwave vibration meter / D.F. Rudenko, A.I. Volkovets, A.V. Gusinski, A.M. Kostrikin, A.O. Herasimionak, A. B. Dzisiak // 15th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol, Ukraine. – 2005, – P. 829-830. – Vol. 2. – DOI: 10.1109/CRMICO.2005.1565159.

139. Мережин, Н. И. Экспериментальные исследования системы намагничивания рельсов с использованием постоянных магнитов / Н. И. Мережин, М. Н. Максимов, А. А. Легин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 11(160). – С. 135-145.
140. Сосновский, А. А. Авиационная радионавигация: Справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович, Э. А. Лутин, И. Б. Максимов; под ред. А. А. Сосновского. – М.: Транспорт, 1990. – 264 с.
141. Сосулин, Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб, пособие для вузов \ Ю.Г. Сосулин. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
142. Финкельштейн, М. И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / М. И. Финкельштейн. – М.: Радио и связь, 1983, –536 с.
143. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М.: Советское радио, 1975.
144. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов / П. А. Бакулев – М.: Радитехника, 2004, – 320 с.
145. Потылицын, В. С. Исследование влияния дефекта типа полости на частоты свободных колебаний рельсов радиолокационным методом / В. С. Потылицын, Д. С. Кудинов, Е. А. Кохонькова // Журнал Сибирского федерального университета. – 2019. – Том. 12. № 8. – С. 1006-1012.
146. Шайдуров, Г. Я. Параметрический радиолокационный метод диагностики объектов железнодорожного транспорта / Г. Я. Шайдуров, Д. С. Кудинов, В. В. Сухотин // Радиотехника. – 2013. – № 6, – С. 61-64.
147. Ефименко, Ю. И. Общий курс железных дорог: Учеб, пособие для студ. [Текст] / Ю. И. Ефименко, М. М. Уздин, В. И. Ковалев. – М.: Издательский центр Академия», 2005. – 256 с.
148. Носов, Ю. Р. Оптоэлектроника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 360 с.
149. Игнатов, А. Н. Оптоэлектронные приборы и устройства: Учеб, пособие. / А. Н. Игнатов. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 269 с.

150. Михеенко, А. В. Геометрическая оптика : учеб. пособие / А. В. Михеенко. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. – 100 с.
151. Федосов, И. В. Геометрическая оптика / И. В. Федосов – Саратов: Сателит, 2008, – 92 с.
152. Форсайт, Д. А. Компьютерное зрение. Современный подход.: Пер. с англ. / Д. А. Форсайт, Ж. Понс – М.: Издательский дом "Вильямс". – 2004. – 926 с.
153. Мошкин, В. И. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов, Ю. Г. Якушенков; под общ. ред. Ю. Г. Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1990. – 265 с.
154. Конюхов, Н. Е. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства / Н. Е. Конюхов, А. А. Плют, П. И. Марков – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
155. Sokolov, S. Methodological aspects for the development of information systems of unmanned mobile vehicles / S. Sokolov, A. Boguslavsky // ICINCO 2016 - Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics Lisbon, Portugal, 29–31 июля 2016 года. – Lisbon, Portugal: SciTePress. – 2016. – P. 492-498. – DOI: 10.5220/0006003904920498.11.
156. Sokolov, S. M. Development of software and hardware of entry-level vision systems for navigation tasks and measuring / S. M. Sokolov, A. A. Boguslavsky, A. I. Vasilyev, O. V. Trifonov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2013. – Vol. 208. – P. 463-476. – DOI: 10.1007/978-3-642-37374-9_45.
157. Шапиро Л. Компьютерное зрение [Электронный ресурс] / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ.— 2-е изд. (эл.). — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013 — 752 с.: ил. — (Лучший зарубежный учебник).
158. Патент № 2142892 С1 Российская Федерация, МПК В61К 9/08. Оптоэлектронная система бесконтактного измерения в движении геометрических характеристик железнодорожной колеи. Оптоэлектронный датчик бесконтактного измерения положения и износа рельса :, № 95113612 : заявл. 03.08.1995 : опубл. 20.12.1999 / В. В. Осипов, А. Г. Пахомов.

159. Яне, Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
160. Русинов, М. М. Композиция оптических систем / М. М. Русинов. – Л.: Машиностроение : Ленингр. отд-ние, 1989. – 382с.
161. Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. — СПб: Университет ИТМО, 2017. — 169с.
162. Georgescu, B. Point matching under large image deformations and illumination changes / B. Georgescu, P. Meer // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2004. – Vol. 26(6). – P. 674-68. – DOI: 10.1109/TPAMI.2004.2
163. Никитин, С. В. Алгоритм поиска сопряженных точек / С. В. Никитин, И. С. Грузман // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2007. – № 1. – С. 51-54.
164. Nikitin, S. V. Image stitching under projective and nonlinear distortion / S. V. Nikitin, I.S. Gruzman // 8th Siberian Russian Workshop and Tutorial on Electron Devices and Materials. – 2007. – P. 178-181. – DOI: 10.1109/SIBEDM.2007.4292949.
165. Грузман, И. С. Алгоритм оценки угла поворота дискретных изображений на основе свойств их амплитудных спектров / И. С. Грузман, С.В. Никитин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2010. – № 2(39). – С. 13-20.
166. Захаров, В. М. Метеорологическая лазерная локация / В. М. Захаров, О. К. Костко. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 222 с.
167. Давыденко, Е. В. Разработка и анализ алгоритмов цифровой обработки сигналов в задаче оптической лазерной триангуляции : дисс.. канд. техн. наук : 05.12.04 / Е. В. Давыденко; [Место защиты: Владимир. гос. ун-т]. – Ярославль, 2009. – 157 с.
168. Коллис, Р. Т. Х. Лазерный контроль атмосферы / Р. Т. Х. Коллис, Э. Д. Хинкли, Д. Инаба, и др. ; Под ред. Э. Д. Хинкли. – М.: Мир, 1979. – 416 с.

169. Magee, M. Location of features of known height in the presence of reflective and refractive noise using a stereoscopic light-stripping approach / M. Magee, R. Weniger, A. F. Ernest // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol. 3 – P. 1092–1098. – DOI: 10.1117/12.163139.

170. Trucco, E. Acquisition of consistent range data using local calibration / E. Trucco, R.B. Fisher // *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, USA, – 1994. – Vol. 4. – P. 3410–3415. – DOI: 10.1109/ROBOT.1994.351046.

171. Молебный, В. В. Оптико-локационные системы : Основы функцион. построения / В. В. Молебный. – М.: Машиностроение, 1981. – 183 с.

172. Nakano, K. Extraction and recognition of 3-dimensional information by projecting a pair of slit-ray beams / K. Nakano, Y. Watanabe, S. Kanno // *9th International Conference on Pattern Recognition*, Rome, Italy. – 1988. – Vol. 2. – P. 736-743. – DOI: 10.1109/ICPR.1988.28344.

173. Haverinen, J. An obstacle detection system using a light stripe identification-based method / J. Haverinen, J. Roning // *IEEE International Joint Symposium on Intelligence and Systems*. – 1998. – P. 232-236. – DOI: 10.1109/IJSIS.1998.685450.

174. Nygard J. Specular objects in range cameras: reducing ambiguities by motion / J. Nygard, A. Wernersson // *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. – 1994. – P. 320-328. – DOI: 10.1109/MFI.1994.398437.

175. Clark, J. Improving laser triangulation sensors using polarization / J. Clark, E. Trucco, H-F. Cheung // *Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on*. – 1995. – P. 981-986.

176. Аккерман, С. Г. Работа со спутниковой аппаратурой позиционирования на примере Trimble 5700: методические рекомендации / С. Г. Аккерман, В. М. Жидов. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2015. – 40 с.

177. Брынъ, М. Я. Оценка точности вычисления координат центра геодезического пункта на основе элементов центрировки при внецентренных

спутниковых измерениях / М. Я. Брынь, Ю. В. Лобанова, В. В. Симонян // Инженерные изыскания. – 2020. – Т. 14. – № 4-5. – С. 18

178. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография. В 2 т. - Т. 1 / К. М. Антонович, – М. : ФГУП Картгеоцентр», 2005. – 334 с.

179. Геоскан 701 – комплекс для аэрофотосъемки максимальной производительности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geoscan.aero/ru/products/geoscan701> (дата обращения: 13.03.2023)

180. Розенберг, И. Н. Применение спутниковых и геоинформационных технологий в развитии путевого хозяйства / И. Н. Розенберг // Бюллетень Объединённого учёного совета ОАО РЖД. – 2012. – № 5. – С. 8–20.

181. Жидов, В. М. Обоснование комплексирования спутниковых и инерциальных измерений для съёмки железнодорожных путей / В. М. Жидов // Геодезия и картография. – 2010. – № 11. – С. 10–12.

182. Hasan, H. An Overview of Local Positioning System: Technologies, Techniques and Applications / H. Hasan, M. Hussein, Sh. Mad saad, D. Mat , A. Mohd // International Journal of Engineering and Technology(UAE). – Vol. 7. – P. 1-5. – DOI: 10.14419/ijet.v7i3.

183. Григорьев, В. А. Системы и сети радиодоступа / В. А. Григорьев – М.: ЭкоТрендз, 2005. – 384 с.

184. Soltanaghaei, E. Millimetro: mmWave retro-reflective tags for accurate, long-range localization / E. Soltanaghaei, A. Prabhakara, A. Balanuta, M. Anderson, J. M. Rabaey, S. Kumar, A. Rowe // Proceedings of the 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, – 2021. – P. 69-82. – DOI: 10.1145/3447993.3448627.

185. Lorincz, K. MoteTrack: A robust, decentralized approach to RF-based location tracking / K. Lorincz, M. Welsh // Personal and Ubiquitous Computing. – 2007. – Vol. 11, – P. 489–503. – DOI: 10.1007/s00779-006-0095-2

186. Zhou, Y. Ultra-low-power UWB-RFID system for precise location-aware applications / Y. Zhou, C.L. Law, J. Xia // 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). – 2012, – P. 154-158. – DOI: 10.1109/WCNCW.2012.6215480.
187. Prashant, B. Comparative Study of IEEE 802.11, 802.15, 802.16, 802.20 Standards for Distributed VANET / B. Prashant // ICEEE-2012. Nagpur. – 2012. – Vol. 1(3). – P. 111-117.
188. Jinwoo, K. Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks / K. Jinwoo, Ch. Seokho, S. Jongwon // Automation in Construction, – 2018. – Vol. 87. – P. 297-308, ISSN 0926-5805. – DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.016.
189. Mamta, B. R. Automation: A New Millennium Technology for Construction Industries / B. R. Mamta, J. Pitroda // Global Research Analysis. – 2013. – Vol. 2. – P. 79–81.
190. Рощин, Д. А. Видеограмметрический контроль пространственного положения строительной техники / Д. А. Рощин // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований : сб. ст. по мат. XLVII межд. научно-практ. конф., Новосибирск, 24 января 2022 года. – Новосибирск: ООО "Сибирская академическая книга", 2022. – С. 64-70.
191. Малинин, В. В. Моделирование процесса преобразования оптического сигнала в электрический в ФПМ ПЗС / В. В. Малинин // Информация и космос. – 2004. – № 4. – С. 21-24.
192. Лазарев, Л. П. Автоматизация проектирования оптико-электронных приборов / Л. П. Лазарев, В. Я. Колючкин, А. Н. Метелкин, Рязанов В. Н., Чичварин Н. В. – М.: Научно-техническое издательство "Машиностроение", 1986. – 216 с.
193. Колючкин, В. Я. Методика обоснования требований к системам технического зрения промышленных робототехнических комплексов / В. Я. Колючкин, К. М. Нгуен // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2015. – № 7. – С. 198-205. – DOI: 10.7463/0715.0780867.

194. Р 50-605-80-93. Рекомендации. Система разработки и постановки продукции на производство. Термины и определения. ВНИИСтандарт, 1993. – 65 с.

195. Патент № 2686341 С1 Российская Федерация, МПК В61К 9/08, Е01В 35/00. Способ определения параметров геометрии рельсовой колеи и система для его осуществления : № 2018119378 : заявл. 27.05.2018 : опубл. 25.04.2019 / Д. А. Роцин.

196. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618224 Российская Федерация. Программа определения расстояний с использованием видеокамеры : № 2017613765 : заявл. 19.04.2017 : опубл. 26.07.2017 / Д. А. Роцин

197. Pololu Corporation. Pololu Maestro Servo Controller User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pololu.com/docs/0J40>.

198. Роцин, Д. А. Повышение точности обнаружения контура на цифровых изображениях объектов шарообразной формы / Д. А. Роцин // Прикладная информатика. – 2016. – Т. 11. – № 5(65). – С. 97-107.

199. Роцин, Д. А. Методика применения систем технического зрения для бесконтактных измерений параметров объектов на примере воздушной разведки / Д. А. Роцин // Прикладная информатика. – 2017. – Т. 12. – № 5(71). – С. 107-121.

200. Роцин, Д. А. Оценка влияния визуальных признаков визирных целей на вероятность их обнаружения оптико-электронным устройством / Д. А. Роцин // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Том 19, № 1, 5-13 с.

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

202. Витих, В. А. Обработка изображений в автоматизированных системах научных исследований / В. А. Витих, В. В. Сергеев, В. А. Сойфер. – М. : Наука, 1982. – 214 с.

203. Пытьев, Ю. П. Задачи морфологического анализа изображений / Ю. П. Пытьев // Сб. Математические методы исследования природных ресурсов Земли из Космоса – М.: Наука, 1984. – С. 41-83.

204. Желтов, С. Ю. Разработка теории, методов и алгоритмов машинного зрения в задачах обнаружения объектов : специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)" :, диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Желтов Сергей Юрьевич. – Москва, 2002. – 338 с.

205. Ballard, D. H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes / D. H. Ballard // Pattern Recognition. – 1981. – Vol. 13 (2), – P. 111-122.

206. Ballard, D. H. Computer Vision / D. H. Ballard, C. M. Brown // Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 1982. – 528 pp.

207. Zenzo, S. A Note on the Gradient of a Multi-Image / S. Zenzo // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1986. Vol. 33. – P. 116-125. – DOI: 10.1016/0734-189X(86)90223-9

208. Stubendek, A. Shape Recognition Based on Projected Edges and Global Statistical Features / A. Stubendek, K. Karacs // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – Article ID 4763050. – P. 1-18. – DOI: 10.1155/2018/4763050

209. Виноградов, А. В. Современные технологии геодезических изысканий: учебное пособие / А. В. Виноградов, А. В. Войтенко. – Омск: СибАДИ, 2012. – 129 с.

210. Song, Y. A three-stage real-time detector for traffic signs in large panoramas / Y. Song, R. Fan, S. Huang, Z. Zhu, R. Tong // Computational Visual Media. – 2019. – Vol. 5. – P. 403-416. – DOI: 10.1007/s41095-019-0152-1

211. Бокшанский В. Б., Бондаренко Д. А., Вязовых М. В [и др.] Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. Пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. 92 с.

212. Пат. ЕР №0379425 А1 Европа, МПК G01S 5/16. System for determining the position of at least one target by means of triangulation; опубл. 30.03.1994

213. Патент № 2685761 С1 Российская Федерация, МПК G01C 3/00. Фотограмметрический способ измерения расстояний вращением цифрового фотоаппарата : № 2018132133 : заявл. 09.09.2018 : опубл. 23.04.2019 / Д. А. Рощин.

214. Патент № 2804376 С1 Российская Федерация, МПК G03B 37/00, G01C 3/00. Устройство для панорамной пространственной фотосъемки : № 2023105044 : заявл. 06.03.2023 : опубл. 28.09.2023

215. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663547 Российская Федерация. Программа для создания панорамных пространственных изображений : № 2022662757 : заявл. 04.07.2022 : опубл. 15.07.2022 / Д. А. Рощин.

216. Mao J. Surveying Reflectors – White Paper Characteristics and Influences [Электронный ресурс] / J. Mao, D. Nindl // Switzerland: Leica Geosystems AG. – 2009. – Режим доступа: http://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/white-papers/leica_surveying_reflectors_wp.pdf?la=ru&hash=CD754F27568E746565C72ED5E687803D.

217. Климков, Ю. М., Лазерная техника: учебное пособие / Ю. М. Климков, М. В. Хорошев; Московский ин-т инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. – М.: МИИГАИК, 1991. – 155 с.

218. Карасик, В. Е. Анализ возможности повышения помехоустойчивости лазерных локационных систем, использующих эффект световозвращения при обнаружении скрытой камеры видеонаблюдения / В. Е. Карасик, Тэ. Вун. Е //, Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19. – № 6. – С. 54-59.

219. Владимирова, М. Р. Автоматизация топографических съёмок. Часть I. Работа с электронным тахеометром: Учебно-методическое пособие / М.Р. Владимирова, И. Ю. Алейникова, И. В. Калинина. – М.: МИИГАиК, 2018. – 36 с.

220. Canny, J. F. A Computational Approach To Edge Detection / J. F. Canny // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – Vol. PAMI-8. – P. 679-698. – DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851

221. Gonzalez, R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods // New Jersey, Printice-Hall, Inc. – 2002. – 1072 p.

222. Каретин, А. Н. МНК для аппроксимации данных окружностью [Электронный ресурс] / А. Н. Каретин. – Режим доступа: http://mykaralw.narod.ru/articles/mnk_circle.pdf (дата обращения: 30.12.2022)

223. Рощин, Д. А. Несмещенная оценка расхождения шкал времени территориально разнесенных эталонов времени и частоты по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем // Научный журнал Апробация – № 12 (39) - 2015. С. 35-39.

224. Патент № 2655467 С1 Российская Федерация, МПК G01C 3/06. Способ измерения расстояния на цифровой видеокамере с помощью мишени : № 2017110518 : заявл. 29.03.2017 : опубл. 28.05.2018 / Д. А. Рощин.

225. Gander, W. Least-squares fitting of circles and ellipses / W. Gander , G. H. Golub, R. Strebел // BIT Numerical Mathematics. 1994. – Vol. 34(4). – P. 558-578. – DOI: 10.1007/BF01934268

226. Рощин, Д. А. Классификация и представление образов деталей машиностроения с помощью системы машинного зрения под управлением SQL Server / Д. А. Рощин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2011. – Т. 9, № 12. – С. 111-120.

227. Рощин, Д. А. Способ применения технологии "Лидар" в фотограмметрической координатно-измерительной системе / Д. А. Рощин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16. – № 10. – С. 19-24. – DOI: 10.18127/j20700814-201810-03.

228. Жуков Д. В., Усик А. А., Коняхин И. А. Адаптивный многопроходный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. №38.

229. Жуков, Д. В. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей / Д. В. Жуков, И. А. Коняхин, А. А. Усик // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 1. – С. 43-45.

230. Гебель, И. Д. Инвариантные свойства отклонения профиля от круглой формы / И. Д. Гебель // Измерительная техника. – 1978. – № 11. – С.16-19.
231. Гебель, И. Д. Выбор базовой окружности при измерении формы профиля тел вращения / И. Д. Гебель // Измерительная техника. – 1971. – № 10. – С. 20-24.
232. Шилин, А. Н. Анализ методов и схем измерения геометрических параметров обечаек в процессе их формообразования / А. Н. Шилин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 9. – С. 44–52.
233. Авдулов, А. Н. Контроль и оценка круглости деталей машин / А.Н. Авдулов. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 175 с.
234. Spragg, R. C. Accurat calibration of Surface Texture and roundness Measuring Instruments / R. C. Spragg // Proc. Instr. Mech. Engrs." 1967–1968, – Vol. 182. – Part 3k. – P. 497.
235. Spragg, R. C. New Unified Approach to Surface Metrology / R. C. Spragg, D. J. Whitehouse // Proc. Instr. Mech. Engrs. 1970-1971. – Vol. 185. – P. 47-71.
236. Гаврилова, А. Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении / А. Н. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
237. Шилин, А. Н. Применение частотного метода обработки изображения для повышения точности определения параметров визирной цели / А. Н. Шилин, Д. А. Рощин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 3. С. 199-208. – DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-199-208.
238. Патент № 2779703 С1 Российская Федерация, МПК G01C 11/36. Видеограмметрическая система для определения собственных координат по трем источникам света : № 2022100033 : заявл. 09.01.2022 : опубл. 12.09.2022 / Д. А. Рощин.
239. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661474 Российская Федерация. Программа для вычисления координат точки съемки по изображению трех опорных пунктов с известными координатами : № 2022660743 : заявл. 05.06.2022 : опубл. 22.06.2022 / Д. А. Рощин.

240. Большаков, В. Д. Справочник геодезиста. В 2-х книгах. Кн. 2/- 3-е изд., перераб. и доп. / В. Д. Большаков, Г. П. Левчук. – М.: Недра, 1985. – 440 с.

241. Патент № 2752687 РФ. Способ определения дальности с помощью цифровой видеокамеры и трех источников света // Изобретения. Полезные модели. 2021. № 22.

242. Информационный портал системы ГЛОНАСС. Современные ГНСС. Основные характеристики систем навигации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://glonassgsm.ru/glonass_sovremen.php (дата обращения: 30.12.2022).

243. 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.

244. Allan, D. W. Technical Directives for Standardization of GPS Time Receiver Software / D. W. Allan, C. Thomas // Metrologia. – 1994. – Vol. 31. – P. 69-79.

245. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661921 Российская Федерация. Программа для автоматического обновления данных с FTP-серверов по расписанию : № 2018619128 : заявл. 24.08.2018 : опубл. 21.09.2018 / Д. А. Рошин.

246. Blagouchine, V. Unbiased Adaptive Estimations of the Fourth-Order Cumulant for Real Random Zero-Mean Signal / V. Blagouchine , E. Moreau // IEEE Transactions on Signal Processing, – 2009, – Vol. 57 (9), – P. 3330-3346

247. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). -Л.: Энергоатомиздат, 1983. -320 с.

248. Gentleman, W. M. An approximation for Student's t-Distribution / W. M. Gentleman, M. A. Jenkins // Biometrika. – 1968. – Vol. 55(3), – P. 571-572.

249. Рошин, Д. А. Повышение точности формирования цифровой модели местности вдоль железнодорожного пути / Д. А. Рошин // Измерительная техника. – 2021. – № 2. – С. 22-29. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-2-22-29.

250. Патент РФ № 2809177. Способ применения роботизированного тахеометра и беспилотного летательного аппарата для определения координат наземного объекта. Опубл. 07.12.2023 / Д. А. Роцин.

251. Роцин, Д. А. Применение трехмерных моделей местности для оценки объемов грунта при возведении земляного полотна железных дорог / Д. А. Роцин // Прикладная информатика. – 2019. – Т. 14. – № 3(81). – С. 103-112.

252. Роцин, Д. А. Способ применения автоматизированной фотограмметрической системы для контроля параметров геометрии рельсовой колеи / Д. А. Роцин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – Т. 16. – № 7. – С. 56-64. – DOI: 10.18127/j2070081

253. Роцин, Д. А. Методика применения устройств компьютерного зрения для повышения безопасности движения железнодорожного транспорта / Д. А. Роцин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – Т. 15. – № 11. – С. 47-53.

254. Роцин Д.А. Перспективы и тенденции развития железнодорожной информационно-измерительной системы // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. LXXVII междунар. науч.-практ. конф. № 7(68). – Новосибирск: ООО "Сибирская академическая книга", 2024.

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

256. Роцин, Д. А. Технология восстановления железнодорожного пути // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований : сборник статей по материалам LXVII международной научно-практической конференции. Новосибирск, 25 сентября 2023 года. Том 9 (58). – Новосибирск: ООО "Сибирская академическая книга", 2023. – С. 19-24.

257. Патент № 2726256 С1 Российская Федерация, МПК G01C 11/02. Способ построения трехмерной модели местности вдоль полотна

железнодорожного пути : № 2020109110 : заявл. 01.03.2020 : опубли. 10.07.2020 / Д. А. Рощин.

258. Антонов, А. Сканирующие лазерные дальномеры (LIDAR) / А. Антонов // Современная электроника. – 2016. – №1. – С. 10-16.

259. Дубиновский, В. Б. Построение фотограмметрических сетей с одновременным выявлением и устранением ошибок опорных данных / В.Б. Дубиновский, В. К. Львов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 5. – С. 91-100.

260. Дубиновский, В. Б. Выявление и устранение ошибок опорных данных при пространственном фототриангулировании / В. Б. Дубиновский, Т. Н. Скрипицына // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 3. – С. 69-75.

261. Рощин, Д. А. Способ применения компьютерного зрения для повышения точности проведения аэрофототопографической съемки местности // Прикладная информатика. 2017. № 6 (72). С. 58–70.

262. Рощин, Д. А. Способ применения компьютерного зрения для повышения точности проведения аэрофототопографической съемки местности / Д. А. Рощин // Научный поиск в современном мире : сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции. Махачкала, 30 сентября 2017 года. – Махачкала: ООО "Апробация", 2017. – С. 18-26.

263. Путин потребовал довести точность ГЛОНАСС до GPS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://interfax.ru/russia/579714>. (дата обращения: 01.08.2022).

264. Малогабаритный воздушный лазерный сканер с анализом формы отраженного сигнала [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lazerg.nt-rt.ru/images/manuals/VUX-1.pdf> (дата обращения 30.12.2022).

265. Рощин, Д. А. Создание цифровой модели местности вдоль полотна железнодорожного пути посредством аэрофотосъемки / Д. А. Рощин // Технические науки: проблемы и решения : сборник статей по материалам XXXIV

международной научно-практической конференции. Москва, 17 марта 2020 года. Том 3 (31). – Москва: ООО "Интернаука", 2020. – С. 64-71.

266. Рощин, Д. А. Повышение точности формирования трехмерной модели местности / Д. А. Рощин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2019. – Т. 17. – № 2. – С. 46-52. – DOI: 10.18127/j20700814-201902-04.

267. Съёмка аэрофототопографическая. Технические требования : ГОСТ Р 59562-2021. – Введ. 2021-12-01. – М: Стандартинформ, 2021. – 90 с.

268. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. Проектирование производства земляных работ. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2000. – 42 с.

269. Лиферова, О. Л. Autodesk Land Desktop + Autodesk Civil Design. Реальное решение для реальной работы / О. Л. Лиферова // CADmaster. – 2002, – № 3. – С. 56-61.

270. Бойков, В. Н. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог (на примере IndorCAD/Road) / В.Н. Бойков, Г. А. Федотов, В.И. Пуркин. – М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2005. – 224 с.

271. Афоничев, Д. Н. Совершенствование расчета профильного объема земляных работ в системе автоматизированного проектирования / Д. Н. Афоничев // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 75. - С. 419-430.

272. Аманова, А. К. Разработка методики трехмерного моделирования объектов ситуации и рельефа городской территории по данным наземного лазерного сканирования Г. Томска / А. К. Аманова, Т. А. Широкова, А. В. Комиссаров // Гео-Сибирь. – 2010. – Т.1. – №3. – С. 79-83.

273. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613583 Российская Федерация. Программа для высокоточной оценки объемов грунта при возведении земляного полотна железных дорог : № 2021612757 : заявл. 04.03.2021 : опубл. 11.03.2021 / Д. А

274. Дерягин, А. А. Моделирование 3D-объектов и сцен на основе использования тетраидной регулярной сетевой модели / А. А. Дерягин // Журнал Прикладная информатика – 2013. – №1 (43). – С. 76–86.
275. Немтинов, В. А. Трехмерная визуализация территории муниципального образования для управления коммунальными системами / В.А. Немтинов, П.И. Пахомов, К.В. Немтинов // Прикладная информатика. – 2009. – № 2(20). – С. 55-62.
276. ВСН 186-75. Технические указания по технологии сооружения железнодорожного земляного полотна. – М.: ОРГТРАНСТРОЙ, 1975. –369 с.
277. Першин, С. П. Железнодорожное строительство. Технология и механизация. – М.: Транспорт, 1991. –399 с.
278. СТО РЖД 1.14.002-2009. Строительство железнодорожного пути и капитальных сооружений. Порядок инженерных изысканий. – М.: ОАО РЖД, 2009.
279. СНиП 32-01-95. Железные дороги колеи 1520 мм.
280. Черненко В. К. Проектирование земляных работ. Программированное пособие. Киев: Изд. объединение Вища школа», 1976. – 160 с.
281. Комиссаров, А. В. Сравнение точности определения объемов сыпучих материалов по данным съемки с беспилотных летательных аппаратов и геодезическим измерениям / А. В. Комиссаров, Е. И. Аврунев, Х. К. Ямбаев, Е. П. Хлебникова // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2019. – Т. 24. – № 4. – С. 70-77. – DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-4-70-77.
282. Инструкция по разбивочным работам при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог и искусственных сооружений (ВСН 5-81) / Минавтодор РСФСР, -М.: ОАО ЦИТП им. Г.К. Орджоникидзе», 2014. -104 с.
283. Управление дорожно-строительной техникой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gfk-leica.ru/tehnologii/uypravlenie_dorojnoi_tehnikoi (дата обращения: 27.02.2023).

284. Trimble-Transforming the Way the World Works [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://onroadpositioning.trimble.com/onroad> (дата обращения: 12.11.2021)

285. 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.

286. Рошин, Д. А. Технология видеограмметрического позиционирования рабочего органа строительной техники в задачах автоматизации производства земляных работ / Д. А. Рошин // Интерстроймех-2022 : Материалы XXVI Международной научно-технической конференции. Ярославль, 12–14 октября 2022 года. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2022. – С. 228-236.

287. Jones, J. C. Developments in design of electrohydraulic control valves from their initial concept to present day design and applications / J. C. Jones // Moog Technical Paper. – 1997.

288. Chiba, J. Electronic Control System for Construction Equipment / J. Chiba // SAE Technical Paper 820921. – 1982. – DOI: 10.4271/820921

289. Skibiniewski, M. J. Current Status of Construction Automation and Robotics in the United States of America / M. J. Skibiniewski // Proceedings of the 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Tokyo, Japan, June 3–5, 1992. – P. 17-24. – DOI: 10.22260/ISARC1992/0003.

290. Bing-wei, C. Intelligent Operation of Wheel Loader Based on Electrohydraulic Proportional Control / C. Bing-wei, L. Xin-hui, Ch. Wei, P. Tan, Niu Ping-fang // Mathematical Problems in Engineering. – 2020, – Vol. 2020, – Article ID 1730946. – P. 1-11. – DOI: 10.1155/2020/1730946.

291. Qing, H. C., Applied Mechanics and Materials / H. C. Qing. – 2010, – Vol. 40-41, – P. 771–773. – DOI: 10.4028/scientific.net/AMM.40-41.771

292. Щербаков, В. В. Системы автоматизированного управления строительной техникой (САУ-3D) / В. В. Щербаков, И. А. Бунцев, И. В. Щербаков,

В. Д. Астраханцев // Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – 2018. – № 1. – С. 57-63.

293. Колосов, С. Е. 3D GPS система автоматизированного управления строительной техникой [Электронный ресурс] / С. Е. Колосов. – Режим доступа: http://sitech-cr.ru/upload/120328_GPS_система_как_работает.pdf (дата обращения: 30.12.2022)

294. Сторожилов, Д. С. Лазерная 2D система автоматизированного управления строительной техники [Электронный ресурс] / Д.С. Сторожилов. – Режим доступа: http://sitech-cr.ru/upload/120417_2D_Лазерная_система_как_работает_common_edition.pdf (дата обращения: 01.08.2022).

295. Патент № 2769637 С1 Российская Федерация, МПК G01C 11/36. Способ определения собственных координат по трем визирным целям и видеограмметрическая система для его осуществления : № 2021106692 : заявл. 15.03.2021 : опубл. 04.04.2022 / Д. А. Роцин.

296. Роцин, Д. А. Применение системы машинного зрения для контроля пространственного положения строительной техники / Д. А. Роцин // Измерительная техника. – 2022. – № 3. – С. 29-35. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-3-29-35.

297. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661237 Российская Федерация. Программа для идентификации источника света по визуальным признакам : № 2022660320 : заявл. 04.06.2022 : опубл. 17.06.2022 / Д. А. Роцин.

298. Правила и особенности транспортировки бульдозеров на трале: разбираем тщательно [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arendavlg.com/buldozery/transportirovka-gusenichnoy-tehniki.html/> (дата обращения: 14.03.2023). [В Интернете].

299. Duarte, J. Occupational Accidents Related to Heavy Machinery: A Systematic Review / J. Duarte, A. Marques, J. Baptista // Safety. – 2021. – Vol. 7(1): 21. – DOI: 10.3390/safety7010021

300. Gurcanli, G. E. Risk perception of construction equipment operators on construction sites of Turkey / G.E. Gurcanli, S. Baradan, M. Uzun // *International Journal of Industrial Ergonomics*. – 2015. – Vol.46. – P.59-68. – DOI: 10.1016/j.ergon.2014.12.004

301. Малютин, Л. Перевозка гусеничной техники [Электронный ресурс] / Л. Малютин // *Основные средства: сетевой журнал*. – 2016. – № 9. – Режим доступа: <http://os1.ru/article/9064-perevozka-gusenichnoy-tehniki> (дата обращения 09.07.2021).

302. Рощин, Д. А. Погрузка гусеничной техники своим ходом на автоприцеп: управление с помощью системы технического зрения / Д. А. Рощин // *Измерительная техника*. – 2022. – № 1. – С. 23-29. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-1-23-29

303. Kim, H. Vision-Based Object-Centric Safety Assessment Using Fuzzy Inference: Monitoring Struck-By-Accidents with Moving Objects / H. Kim, K. Kim // *Journal of Computing in Civil Enginee*. – 2015, – Article 04015075. – DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943- 5487.0000562

304. Chi, S. Image-Based Safety Assessment: Automated Spatial Safety Risk Identification of Earthmoving and Surface Mining Activities / S. Chi, C. H. Caldas // *Journal of Construction Engineering and Management*. – 2012. – Vol. 138 (3), – P. 341-351. – DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000438.

305. Valero, E. Evolution of RFID Applications in Construction: A Literature Review / E. Valero, A. Adán, C. Cerrada // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15(7). – P. 15988-16008. – DOI: 10.3390/s150715988

306. Zhang, C. Estimation Using UWB Real-Time Location System / C. Zhang, A. Hammad, S. Rodriguez // *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 2012. – Vol. 26(5). – P. 625-637. – DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000172

307. Borngrund, C. Machine Vision for Construction Equipment by Transfer Learning with Scale Models / C. Borngrund, U. Bodin, F. Sandin // *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, – 2020, – P. 1-8. – DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207577.

308. Патент № 2808213 С1 Российская Федерация, МПК G01C 3/00, B65G 67/04. Способ определения параметров погрузки гусеничной техники своим ходом с помощью системы компьютерного зрения : № 2023116786 : заявл. 27.06.2023 : опубл. 27.11.2023

309. Патент № 2809177 РФ. Способ определения дальности с помощью цифровой видеокамеры и трех источников света // Изобретения. Полезные модели. 2023. № 34

310. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661514 Российская Федерация. Программа для контроля параметров погрузки транспортируемой техники своим ходом на полуприцеп : № 2022660663 : заявл. 05.06.2022 : опубл. 22.06.2022 / Д. А. Роцин.

311. Непомнящих, Е. В. Диагностика состояния железнодорожного пути : Учебное пособие по выполнению лабораторных работ для студентов 2 и 4 курса очной и заочной форм обучения специальности 271501 Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей» / Е. В. Непомнящих, К. А. Кирпичников. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения". 2012. – 109 с.

312. Певзнер, В.О. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в условиях интенсификации перевозочного процесса / В.О. Певзнер, А.И. Чечельницкий, К.В. Шапетько, Е.А. Сидорова, А.Ю. Слостенин // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВЕСТНИК ВНИИЖТ). – 2020. – 79(5). – С. 271-275. – doi:10.21780/2223-9731-2020-79-5-271-275.

313. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616210 Российская Федерация. Программа для расчёта параметров геометрии рельсовой колеи с помощью фотограмметрической системы : № 2019614875 : заявл. 29.04.2019 : опубл. 20.05.2019

314. Рощин, Д. А. Повышение безопасности движения железнодорожного транспорта за счет внедрения систем компьютерного зрения / Д. А. Рощин // Перспективы развития научных исследований в 21 веке :, сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции. Махачкала, 28 февраля 2017 года. – Махачкала: ООО "Апробация", 2017. – С. 32-36.

315. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации // в ред. Приказа Минтранса России от 13.06.2012 № 164

316. Венцевич, Л. Е. Локомотивные устройства обеспечения безопасности движения поездов и расшифровка информационных данных их работы / Л.Е. Венцевич. – М.: Маршрут, 2006. – 328 с.

317. Никифоров, Б. Д. Автоматизация управления торможением поездов / Б. Д. Никифоров, В. И. Головкин, Ю. Г. Кутыев. – М.: Транспорт, 1985. – 263 с.

318. Козубенко, В. Г. Безопасное управление поездом : Вопр. и ответы / В. Г. Козубенко. – М.: Транспорт, 1993. – 253 с.

319. Методология обоснования требований безопасности при использовании систем технического зрения в интеллектуальных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, А. Л. Охотников // Интеллектуальные транспортные системы : материалы Международной научно-практической конференции. Москва, 26 мая 2022 года. – М.: Российский университет транспорта, 2022. – С. 54-58.

320. Батраков, А. С., Лазерные измерительные системы / А. С. Батраков, М. М. Бутусов – М.: Издательство Радио и связь», 1981. – 456 с.

321. Сарвин, А. А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров / А. А. Сарвин – Л.: Изд. Ленинградского университета, 1983. – 144 с.

322. Кульчицкий, А. А. Автоматизация технологических процессов и производств: учебно-методический комплекс / А. А. Кульчицкий, А. А. Сарвин. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 197 с.

323. Гапшис, А. А. Координатные измерительные машины и их применение / А. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтес, М. Б. Модестов. – М.: Машиностроение, 1988. – 102 с.

324. Алексеев, В. Приемники GNSS для спутниковых навигационных систем GPS/GLONASS / В. Алексеев // Беспроводные технологии. – 2013. – № 2(31). – С. 52-59.

325. Рощин Д.А. Оценка суммарной стандартной неопределенности результата измерений видеограмметрическим устройством координат визирной цели //Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам LXXXVI Международной научно-практической конференции Технические науки: проблемы и решения – № 7(80). – М., Изд. Интернаука», 2024. – С.30-39.

326. Лысов, И. А. Оптический метод бесконтактного измерения малых линейных перемещений : специальность 05.02.11 "Методы контроля и диагностика в машиностроении" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лысов Илья Александрович. – Санкт-Петербург, 2006. – 20 с.

327. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

328. Слепова, С. В. Основы теории точности измерительных приборов / Слепова С. В. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2008. – 192 с.

329. Горбачёв, А. А. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе / А. А. Горбачёв, В. В. Коротаев, С. Н. Ярышев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 98 с.

330. Торшина, И. П. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного прибора: учебное пособие / И. П. Торшина, Ю. Г. Якушенков – М.: Изд-во МИИГАиК, 2017. – 58 с.

331. Гауэр, Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. / Дж. Гауэр; Пер. с англ. под ред. А. И. Ларкина. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.

332. Julliland, T. Image Noise and Digital Image Forensics / T. Julliland, V. Nozick, H. Talbot // Lecture Notes in Computer Science, – 2016. - Vol. 9569. – P. 3-17. – DOI: 10.1007/978-3-319-31960-5_1

333. Гордийчук О. Ф., Пелль В. Г. Раздел III. Киносъёмочные объективы // Справочник кинооператора / Н. Н. Жердецкая. — М.: Искусство», 1979. — С. 143—173. — 440 с.

334. Фомин А. В. Общий курс фотографии / Т. П. Булдакова. — 3-е. — М.: Легпромбытиздат», 1987 — 256 с.

335. Gielsdorf, F. A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners [Электронный ресурс] / F. Gielsdorf, A. Rietdorf, L. Gruendig // FIG Working Week 2004. Athens, Greece, May 22-27, — 2004. — Режим доступа: http://researchgate.net/publication/253726574_A_Concept_for_the_Calibration_of_Terrestrial_Laser_Scanners.

336. Атаманюк, Р. Г. Метрологический анализ оптических методов измерения расстояний // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. — 2021. — № 2(35). — С. 54-57.

337. Жуков, Д. В. Аналитический обзор способов определения координат изображений точечных источников / Д. В. Жуков, И. А. Коняхин, А. А. Усик // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. — 2007. — № 43. — С. 212-216.

338. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное / Р. Гонсалес, Р. Вудс. — М.: Техносфера, 2012. — 1104 с.

339. Сизенов, Л. К. Суммирование погрешностей размеров и формы в поперечном сечении цилиндрических деталей / Л. К. Сизенов // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 1969. — №11. — С. 134—138.

340. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства. - М.: Энергоатомиздат. — 1985. — 304 с.

341. Шишмарёв В. Ю. Метрология, стандартизация, сертификация и техническое регулирование: учебник для студ. учреждений сред, проф. образования, 6-е изд., испр. М.: Издательский центр Академия», 2016. 320 с.

342. Способ калибровки видеограмметрических систем и контрольное приспособление для его осуществления: пат. RU 2645432 C1 / В. П. Кулеш // Изобретения. Полезные модели. – 2018. – № 6.

343. Устройство для автоматизированной калибровки видеокамер различных спектральных диапазонов: пат. RU 2749363 C1 / И. А. Кудинов, И. С. Холопов // Изобретения. Полезные модели. – 2020. – № 16.

344. Способ калибровки изображений стереофотограмметрической системы: пат. SU 1 703 972 A1 / Л. Д. Бурьянова, В. А. Гоголев, Л. Е. Горша и др. // Изобретения. Полезные модели (бюл. № 1) . – 1992. – № 1.

345. Кулеш В. П. Бесконтактные измерения геометрических параметров формы, движения и деформации объектов в экспериментальной аэродинамике // Датчики и системы. – 2004. – №3. С. 22-27.

346. Патент РФ № 2809177. Способ калибровки видеграмметрической системы с помощью маятника. Оpubл. 24.07.2024 / Д. А. Рошин

347. Рошин, Д. А. Оценка погрешностей видеограмметрической системы с помощью маятника // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сборник статей по материалам LI международной научно-практической конференции. Новосибирск, 25 мая 2022 года. Том 5 (43). – Новосибирск: ООО "Сибирская академическая книга". – 2022. – С. 74-81.

348. Лопарев А. В., Соколов А. Ю. Методы теории колебаний. СПб.: Университет ИТМО, 2019. 81 с.

349. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М.: Наука. – 1977. – 342 с.

350. Анахаев, К. Н. К расчету математического маятника / К. Н. Анахаев // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 459, № 3. – С. 288. – DOI 10.7868/S0869565214330081.

351. Рошин, Д. А. Калибровка видеограмметрической системы с помощью физического маятника / Д. А. Рошин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 1.

352. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661446 Российская Федерация. Программа для определения характеристик гармонических колебаний маятника : № 2022660797 : заявл. 05.06.2022 : опубл. 21.06.2022 / Д. А. Роцин.

353. Bektas, S. Three Point Resection in 3D with Distances / S. Bektas, N. Karaahmetoglu, R. Yildirim, A. Uyar, Yildirim, E. Pakel // GRANTHAALAYAH. – 2018. – Vol. 6(2). – P. 292-298. – DOI: 10.29121/granthaalayah.v6.i2.2018.1575.

354. Шилин, А. Н. Основы теории точности измерительных систем: учеб.-метод. пособие / А. Н. Шилин, В. Е. Аввакумов, С.В. Макартичан. – Волгоград: ВолгГТУ, 2019. – 176 с.

355. Роцин Д.А. Оценка точности фотограмметрической системы для контроля параметров геометрии рельсовой колеи // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. LXXVII междунар. науч.-практ. конф. № 7(68). – Новосибирск: ООО "Сибирская академическая книга". – 2024.

356. Одуан, К. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино; Пер. с англ. Ю. С. Домнина под ред. В. М. Татаренкова с доп. (гл. 10) М. Б. Кауфмана. – М.: Техносфера, 2002. – 399 с.

357. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661435 Российская Федерация. Программа для сравнения шкал времени по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем : № 2017618348 : опубл. 12.10.2017 / Д. А. Роцин.

358. Efe M., Ruan Y. Probablistic multihipithesis tracker: addressing some basic issues / IEE Proc.-Radar Sonar Navig. – 2004. – №8. – С. 189-196.

359. Роцин, Д. А. Перспективы применения систем компьютерного зрения в Железнодорожных войсках / Д. А. Роцин // Научный поиск в современном мире : сборник материалов XV Международной научно-практической конференции. Махачкала, 31 мая 2017 года. – Махачкала: ООО "Апробация". – 2017. – С. 40-44.

Приложение А

Утвержденные типы средств измерений

Таблица А.1 – Утвержденные типы ГНСС устройств

Номер в госреестре	Наименование СИ	Обозначение типа СИ	Изготовитель
82782-21	Система высокоточного взаимного позиционирования объектов по сигналам ГНСС	ИВЯФ.466453.067	Акционерное общество Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем, г. Москва
78106-20	GNSS-приемники спутниковые геодезические многочастотные	TRIUMPH-3	Фирма Javad GNSS Inc., США
74993-19	Аппаратура навигационная потребителей ГНСС ГЛОНАСС/GPS/SBAS/Galileo	ПРО-04	АО НИИ микроэлектронной аппаратуры Прогресс, г.Москва
73643-18	Комплекты высокоточной геодезической аппаратуры потребителей ГНСС	ГЛОНАСС/GPS/GA LILEO/BEIDOU (индекс 14Ц8030)	Акционерное общество НАВИС-Электроника, г. Москва
72948-18	ГНСС-приемники спутниковые геодезические одночастотные	Emlid Reach RS+	Фирма Emlid Limited Co. LTD., Китай
72743-18	GNSS-приемники спутниковые геодезические многочастотные	ТРИУМФ-ОМЕГА	ООО Джавад Джи Эн Эс Эс, г.Москва
71704-18	ГНСС-приемники спутниковые геодезические многочастотные	Geobox Fora20	Фирма Tianjin Jinfeng Surveying Instrument Co., Ltd., Китай
71588-18	Навигационная аппаратура потребителей ГНСС	STONEX S4II	Фирма Stonex S.R.L., Италия
70221-18	Аппаратура геодезическая спутниковая (ГНСС-приемник)	ФАЗА 2	ООО РУСНАВГЕОСЕТЬ, г.Москва
68539-17	GNSS-приемники спутниковые геодезические многочастотные	GCX3	Фирма Topcon Positioning Systems, Inc., США
68311-17	GNSS-приемники спутниковые геодезические многочастотные	South Galaxy G6	Фирма South Surveying & Mapping Instrument Co., Ltd., Китай
67152-17	Аппаратура геодезическая спутниковая (ГНСС-приемник)	S-Max GEO	ООО РУСНАВГЕОСЕТЬ, г.Москва

Таблица А.2 – Утвержденные типы электронных тахеометров

Номер в госреестре	Обозначение типа СИ	Изготовитель
82995-21	Leica TS30	Leica Geosystems AG, Швейцария
82993-21	NET05AXII	Фирма TOPCON CORPORATION, Япония
80522-20	GeoMax Zoom10	GeoMax AG, Швейцария
80482-20	Nikon XF HP	Nikon-Trimble Co., Ltd., Япония (Производственная площадка: Zao Operation Center, Япония)
80475-20	Trimble C5 HP	Nikon-Trimble Co., Ltd., Япония (Производственная площадка: Zao Operation Center, Япония)
78500-20	Topcon GTL-1003	Фирма Topcon Corporation, Япония
77919-20	SOUTH N3, SOUTH N4, SOUTH N40, SOUTH N41	Фирма South Surveying & Mapping Instrument Co., Ltd., Китай
76988-19	Leica FlexLine TS07 RUS	АО Экспериментальный оптико-механический завод (ЭОМЗ), г.Москва
76753-19	MS05AXII	Компания Topcon Corporation, Япония
76595-19	GeoMax Zoom70	Фирма GeoMax AG, Швейцария
74307-19	Trimble SX10	Фирма Trimble AB, Швеция
72694-18	RTS 362	ООО Синтэла, г.Новосибирск
71877-18	Trimble C3, Trimble C5	Фирма Nikon-Trimble Co., Ltd., Япония
71875-18	Nikon XS, Nikon XF	Фирма Nikon-Trimble Co., Ltd., Япония
71232-18	GM и iM, CX-60	Фирма Topcon Corporation, Япония
70923-18	Leica TS15 G	Компания Leica Geosystems AG, Швейцария
69401-17	6Ta2	АО ПО Уральский оптико-механический завод им.Э.С.Яламова (УОМЗ), г.Екатеринбург
69004-17	Spectra Precision Focus 2	Фирма Trimble Inc., США
68323-17	R2, RIS	Фирма Ruide Surveying Instrument Co., Ltd., Китай

Таблица А.3 – Утвержденные типы фото- и видеограмметрических средств измерений

Номер в госреестре	Наименование СИ	Обозначение типа СИ	Изготовитель
83114-21	Системы видео- фотограмметрические	PTG-LIN3D	Linearis3D GmbH & Co. KG, Германия
82290-21	Системы оптические координатно-измерительные топометрические	ATOS 5Airfoil и ATOS Q	GOM GmbH, Германия
79832-20	Системы фотограмметрические измерительные	AICON MoveInspect HF4	Фирма AICON 3D Systems GmbH, Германия
77510-20	Приборы оптические координатно-измерительные фотограмметрические	MSCAN	Фирма Hangzhou Sikan Technology Co., Ltd., Китай
74676-19	Системы оптические координатно-измерительные фотограмметрические	AICON MoveInspect	Фирма AICON 3D Systems GmbH, Германия
64253-16	Комплексы измерительные дорожные фотограмметрические	HERE	Фирма HERE GLOBAL B.V., Нидерланды
56543-14	Системы фотограмметрические	V-STARS	Фирма Geodetic Systems Inc., США
53756-13	Комплексы фотограмметрические	Ракурс	ООО Лаборатория цифрового зрения, г. С.-Петербург
53749-13	Системы фотограмметрические однокамерные	СФО 500	Дорожно-Транспортный Фонд, г. Москва

Таблица А.4 – Утвержденные типы средств измерения дальности

Номер в госреестре	Наименование СИ	Обозначение типа СИ	Изготовитель
84786-22	Дальномеры лазерные	Fluke 417D	Fluke Corporation, США (производственная площадка Flextronics, Венгрия)
84222-21	Дальномеры лазерные	GLM 50-27	Robert Bosch Power Tools GmbH, Германия (Производственная площадка: Robert Bosch Power Tools Sdn Bhd, Малайзия)
81896-21	Дальномеры скважинные ультразвуковые	ДСУ	Общество с ограниченной ответственностью САНЭМА (ООО САНЭМА), г. Саратов
79761-20	Дальномеры лазерные	CONDROL Vector	MAGUCHI CO., LIMITED, КНР
75726-19	Дальномеры лазерные	Universal Laser Sensor	Фирма Laser Technology Inc., США
75550-19	Дальномеры лазерные	GLM 500	Фирма Robert Bosch Power Tools GmbH, Германия
75532-19	Дальномеры лазерные	PrinCe Laser 600A, PrinCe Laser 1000A, PrinCe Laser 1500A	Фирма Dongguan Sndway Electronic Co., Ltd., Китай
75442-19	Дальномеры лазерные	RGK, мод. D600, D1000, D1500	Фирма Dongguan Sndway Electronic Co., Ltd., Китай
74357-19	Дальномеры лазерные	Leica DISTO D510, Leica DISTO X310, Leica DISTO X3, Leica DISTO X4	Компания Leica Geosystems AG, Швейцария
72962-18	Дальномеры лазерные	GLM 20	Фирма Robert Bosch Power Tools GmbH, Германия
71254-18	Дальномеры лазерные	GLM 120 C	Фирма Robert Bosch Power Tools GmbH, Германия
70666-18	Дальномеры лазерные	GLM 50 Professional, GLM 80 Professional	Фирма Robert Bosch Power Tools GmbH, Германия
70365-18	Дальномеры лазерные	CONDROL XP	Фирма Maguchi Co., Limited, Китай
69904-17	Дальномеры лазерные	ADA Cosmo MINI, MINI 40, 50, 70, 100, 120 VIDEO, 150 VIDEO	Фирма Ada International Group., Ltd., Китай

Таблица А.5 – Утвержденные типы средств измерения углов

Номер в госреестре	Наименование СИ	Обозначение типа СИ	Изготовитель
70934-18	Энкодеры абсолютные	GM400.Z52	Фирма Baumer IVO GmbH & Co. KG, Германия
63569-16	Энкодеры абсолютные многооборотные программируемые	9081	Фирма Fritz Kubler GmbH, Германия
45240-10	Преобразователи угла измерительные (энкодеры)	GEUX (GAUX), SEUX (SAUX)	Фирма BEI IDEACOD SAS, Франция
85008-22	Угломеры с нониусом	тип 1	Общество с ограниченной ответственностью Вятский Инструмент (ООО ВИНС), г. Москва
84161-21	Угломеры с нониусом	Обозначение отсутствует	Общество с ограниченной ответственностью Линкс-Раша (ООО Линкс-Раша), г. Киров
83810-21	Угломеры торговой марки Калиброн	Обозначение отсутствует	Shanghai Shengling Measuring Tools Co., Ltd., КНР
81958-21	Установка угломерная	КО-2	ПО Завод Арсенал имени В. И. Ленина, Украина
81507-21	Угломеры универсальные	Marui-Keiki	Компания Marui Techno Co., Ltd., Япония
81506-21	Угломеры универсальные	Marui-Keiki HG-36	Компания Marui Techno Co., Ltd., Япония
79631-20	Угломеры цифровые	Horex серии 45	Компания Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge, Германия
78907-20	Угломеры	187	Фирма Mitutoyo Corporation, Япония
77685-20	Угломеры цифровые	Pro 360 (мод. 950-317) и Pro 3600 (мод. 950- 318)	Фирма Mitutoyo Corporation, Япония
74341-19	Угломеры	Horex серии 45	Компания Hoffmann GmbH Qualitätswerkzeuge, Германия
73290-18	Угломеры с нониусом	Нет данных	ООО Южно-Уральский Инструментальный Завод КАЛИБР, г. Челябинск
72501-18	Угломеры с нониусом	4	ООО НПО КировИнструмент, г. Киров
72501-18	Угломеры с нониусом	4	ООО НПО Кировский завод Красный инструментальщик (КРИН), г. Киров
72318-18	Установки угломерные на основе столов поворотных	СТ-9	ООО Автопрогресс-М, г. Москва

Номер в госреестре	Наименование СИ	Обозначение типа СИ	Изготовитель
72143-18	Приборы электронные угломерные	ЭУ-1	АО ЦКБ морской техники Рубин, г.С.- Петербург
71714-18	Угломеры маятниковые	ЗУРИ	ООО НПО КировИнструмент, г.Киров
71714-18	Угломеры маятниковые	ЗУРИ	ООО НПО Кировский завод Красный инструментальщик (КРИН), г.Киров
71604-18	Угломеры торговой марки INSIZE	Нет данных	Фирма Insize Co., Ltd., Китай
71563-18	Угломеры с нониусом	Нет данных	Фирма WOGHEEL OU, Эстония
67115-17	Угломеры с нониусом	1	ООО НПО КировИнструмент, г.Киров

Приложение Б

Метрологические характеристики средств измерений

Таблица Б.1 – Контролируемые параметры и характеристики КВЛ-П2.1

№ п.	Наименование параметра	Диапазон измерения	Допускаемая погрешность измерения
1	Взаимное положение обеих рельсовых нитей по высоте (уровень), мм	+ 155	± 1,0
2	Ширина рельсовой колеи (шаблон), мм	От 1500 до 1560	± 1,0
3	Стрела изгиба каждой рельсовой нити в горизонтальной плоскости относительно хорды 21,5 м при измерении в точке на расстоянии 4,1 м от конца хорды (рихтовки), мм	±225	± 1,0
4	Стрела изгиба каждой рельсовой нити в вертикальной плоскости относительно хорды 17 м при измерении в точке на расстоянии 2,7 м от конца хорды (просадка), мм	±50	± 1,0
5	Пройденный путь, м	От 1 до 10 000 000	±2 м на 1 км пройденного пути

Таблица Б.2 – Метрологические характеристики ШП-01

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений ширины рельсовой колеи, мм	от 1505 до 1560
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ширины рельсовой колеи, мм	± 1
Диапазон измерений взаимного расположения обеих рельсовых нитей по высоте (уровень), мм	от -160 до +160

Таблица Б.3 – Метрологические характеристики ПТ-12-01

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений ширины рельсовой колеи, мм	от 1505 до 1560
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ширины рельсовой колеи, мм	±1
Диапазон измерений взаимного положения обеих рельсовых нитей по высоте (уровень), мм	от -160 до +160
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений взаимного расположения обеих рельсовых нитей по высоте (уровень), мм	±1
Диапазон измерений углового перемещения в горизонтальной плоскости, °	от -360 до +360
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений углового перемещения в горизонтальной плоскости (курс), °	±0,03
Диапазон измерений угла наклона в продольной рельсовой колее плоскости, °	от -5 до +5
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений угла наклона в продольной рельсовой колее плоскости (тангаж), °	±0,03
Диапазон измерений угла поворота боковины относительно рамы тележки, °	от -3 до +3
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений угла поворота боковины относительно рамы тележки, °	±0,03

Таблица Б.4 – Метрологические характеристики TRIUMPH-3

Наименование характеристики	Значение
<i>Режим «Статика» и «Быстрая статика»¹⁾</i> Доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности измерений длины базиса (при доверительной вероятности 0,997), мм: в плане, мм по высоте, мм	$\pm 3 \cdot (2 + 1,0 \cdot 10^{-7} \cdot D)^2$ $\pm 3 \cdot (4 + 3,0 \cdot 10^{-7} \cdot D)^2$
<i>Режим «Кинематика с постобработкой» и «Кинематика в реальном времени (RTK)»¹⁾</i> Доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности измерений длины базиса (при доверительной вероятности 0,997): в плане, мм по высоте, мм	$\pm 3 \cdot (10 + 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot D)^2$ $\pm 3 \cdot (15 + 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot D)^2$
¹⁾ Диапазон длин базисов от 0,07 до 30 км	
²⁾ D – измеренная длина базиса в миллиметрах	

Таблица Б.5 – Метрологические характеристики тахеометров

Наименование характеристики	Leica TS60 I	NET05AXII
Диапазон измерений углов, градус ¹⁾ горизонтальных вертикальных	от 0 до 360 от -50 до +90	от 0 до 360 от -41 до +90
Диапазон измерений расстояний, м стандартная призма плёночный отражатель без отражателя	от 1,5 до 3500 от 1,5 до 2500 ²⁾ от 1,5 до 1200 ³⁾	от 1,3 до 3500 от 1,3 до 2500 ²⁾ от 1,3 до 1200 ³⁾
Доверительные границы допускаемой абсолютной погрешности измерений углов (при доверительной вероятности 0,997), секунда	±0,5	±0,5
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений расстояний, мм стандартная призма плёночный отражатель без отражателя для расстояний от 1,5 до 500 включ., м для расстояний св. 500 до 1200 включ., м	$\pm(0,2+0,5 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ ⁴⁾ $\pm(1+1,0 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ $\pm(2+2 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ $\pm(4+2 \cdot 10^{-6} \cdot L)$	$\pm(0,2+0,5 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ ⁴⁾ $\pm(0,8+1,0 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ $\pm(0,5+2 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ $\pm(1+2 \cdot 10^{-6} \cdot L)$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности лазерного центрира, мм	±1,5	±1,5
¹⁾ Градус, секунда и минута – единицы измерений плоского угла. ²⁾ Измерения на отражающую плёнку (60 мм × 60 мм) с коэффициентом отражения не менее 90 % по ГОСТ 8.557-2007. ³⁾ Измерения на поверхность соответствующей белой поверхности пластины с коэффициентом отражения не менее 90 % по ГОСТ 8.557-2007. ⁴⁾ Где L – измеряемое расстояние, мм.		

Таблица Б.6 – Метрологические характеристики датчиков Polaris и Antaris

Наименование характеристики	Значение	
Модификация	Polaris 400	Antaris S 1500
Диапазон измерений расстояния, мм	от 0 до 400	от 0 до 1500
Пределы допускаемой приведенной к полному диапазону измерений погрешности измерений расстояния, %	±0,01	±0,04

Таблица Б.7 – Основные характеристики DISTOMAT WILD D12002

Наименование	Значение
Диапазон измеряемых расстояний, м, не менее:	1 .. 2500 (на 1 призмный отражатель)
Дискретность измерения расстояний, мм:	0,1
Допускаемое СКО измерения расстояний, мм, не более:	$1+1 \times 10^{-6} \times D$, где D измеряемое расстояние, мм
Диапазон рабочих температур, °C:	от -20 до +50
Габаритные размеры, Д x Ш x В, мм:	180x58x 160
Масса, кг:	1,1

Таблица Б.8 – Метрологические характеристики лазерных дальномеров LDM

Характеристики	Значение характеристики				
Модель	LDM51	LDM41 LDM42	LDM301	LDM302	LDS30
Диапазон измерений расстояний, м	0,15-50,00 ¹⁾ 0,15- 100,00 ²⁾ 50 - 500 ³⁾	0,2-30,0 ¹⁾	0,5-300,0 ¹⁾	0,5-200,0 ¹⁾	0,2 - 30,0 ¹⁾ 0,2 - 250,0 ²⁾ 0,2 - 750,0 ³⁾
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений, мм	± 1,0 ⁴⁾ ±2,5 ⁵⁾	± 3,0 ⁶⁾ ± 5,0 ⁷⁾	±20 ⁸⁾	± 14 ⁹⁾	±50
Дискретность измерений измерения, мм	0,1	0,1	1		10
Длина волны излучения, нм	635	650	905		905
Класс лазера	2	2	1		1
Напряжение источника электропитания, постоянного тока 10-30 В					
Диапазон рабочих температур, °C	от минус 40 до плюс 60	от минус 10 до плюс 50	от минус 40 до плюс 60		от 0 до плюс 50
Габаритные размеры (Д x Ш x В), мм, не более	120,0 x 76,5 x 40,0	187x96x50	136x57x 104		86 x 45 x 45
Масса, кг, не более	0,7	0,85	0,8		0,125
1) - измерения на поверхность соответствующей серой поверхности пластины Кодак с коэффициентом отражения не более 10% по ГОСТ 8.557-2007; 2) - измерения на отражающую плёнку с коэффициентом отражения не менее 90% по ГОСТ 8.557-2007; 3) - измерения на светоотражающую призму; 4) - при частоте лазерного излучения до 20 Гц; 5) - при частоте лазерного излучения от 20 до 100 Гц; 6) - при температуре окружающей среды от плюс 15 до плюс 30°C; 7) - при температуре окружающей среды от минус 20 до плюс 15°C и от плюс 30 до плюс 50°C; 8) - при частоте лазерного излучения 2 кГц; 9) - при частоте лазерного излучения 100 Гц;					

Таблица Б.9 – Метрологические и технические характеристики энкодера GM400.Z52

Наименование характеристики и единицы величин	Значение характеристики
Диапазон преобразования угловых перемещений, градус	от 0 до 360
Пределы допускаемой абсолютной погрешности, градус	$\pm 0,025$
Число положений вала за один оборот	4096
Число оборотов вала	4096

Таблица Б.10 – Метрологические характеристики системы AICON

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерений системы AICON DPA, <i>м</i> по оси X по оси Y по оси Z	от 1,0 до 100 от 1,0 до 100 от 1,0 до 100
Пределы допускаемой абсолютной погрешности, <i>мм</i> , где L - расстояние между измеренными точками в <i>мм</i>	$\pm (0,005 + 0,02L/1000)$
Диапазон измерений линейных скоростей, <i>м/с</i>	от 0,02 до 30
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений линейных скоростей, <i>м/с</i>	$\pm (0,001 + 0,001 \cdot v)$ где <i>v</i> - скорость, <i>м/с</i>
Диапазон измерений линейных перемещений, <i>м</i>	± 2
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений линейных перемещений, <i>мм</i>	$\pm (0,05 + 0,00095 \cdot s)$ где <i>s</i> - перемещение, <i>мм</i>
Диапазон измерений угловых скоростей, <i>рад/с</i>	от 0,02 до 20
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений угловых скоростей, <i>рад/с</i>	$\pm 0,001$

Таблица Б.11 – Технические и метрологические характеристики лазерного сканера АГМ-МС

Наименование характеристики	Значение	
Модель	АГМ-МС 1.100	АГМ-МС 3.200
Частота сканирования	300 <i>кГц</i>	не менее 600 <i>кГц</i>
Максимальная дальность	до 100 <i>м</i>	до 300 <i>м</i>
Рабочая высота	до 70 <i>м</i>	до 200 <i>м</i>
Угол поля зрения	до 360°	до 360°
Скорость вращения сканирующего зеркала	до 20 об/сек	до 20 об/сек
GNSS приемник	U-blox	NovAtel
Точность определения дальности	3 <i>см</i>	3 <i>см</i>
Точность определения координат	3-5 <i>см</i>	3-5 <i>см</i>
Вес сенсорного блока	1.1 <i>кг</i>	1 <i>кг</i>
Температура использования	-20...+50°C	-20...+50°C
Дискретность GNSS приемника	20 <i>Гц</i>	20 <i>Гц</i>

Приложение В
Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2655467

**СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ НА ЦИФРОВОЙ
ВИДЕОКАМЕРЕ С ПОМОЩЬЮ МИШЕНИ**

Патентообладатель: **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**

Автор: **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**

Заявка № 2017110518

Приоритет изобретения 29 марта 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 28 мая 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 марта 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2686341

**Способ определения параметров геометрии рельсовой колес
и система для его осуществления**

Патентообладатель: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Автор: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2018119378

Приоритет изобретения 27 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 25 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 мая 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2685761

**Фотограмметрический способ измерения расстояний
вращением цифрового фотоаппарата**

Патентообладатель: *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Автор: *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2018132133

Приоритет изобретения 09 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 апреля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 сентября 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2689848

ИЗМЕРИТЕЛЬ РАССТОЯНИЙ НА ЦИФРОВОЙ
ВИДЕОКАМЕРЕ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение "3 Центральный научно-исследовательский институт" Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Авторы: *Адволоткин Дмитрий Иванович (RU),
Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2018119763

Приоритет изобретения 29 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 мая 2019 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 29 мая 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2726256

**Способ построения трехмерной модели местности вдоль
полотна железнодорожного пути**

Патентообладатель: **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**

Автор: **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**

Заявка № 2020109110

Приоритет изобретения 01 марта 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 10 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 01 марта 2040 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2752687

**Способ определения дальности с помощью цифровой
видеокамеры и трех источников света**

Патентообладатель: **Роцин Дмитрий Александрович (RU)**

Автор(ы): **Роцин Дмитрий Александрович (RU)**

Заявка № **2021100018**

Приоритет изобретения **06 января 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **29 июля 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **06 января 2041 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2769637

**Способ определения собственных координат по трем
визирным целям и видеограмметрическая система для
его осуществления**

Патентообладатель: **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**

Автор(ы): **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**

Заявка № **2021106692**

Приоритет изобретения **15 марта 2021 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **04 апреля 2022 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **15 марта 2041 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077c14e40f0a94e8bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779703

**Видеограмметрическая система для определения
собственных координат по трем источникам света**

Патентообладатель: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Автор(ы): *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2022100033

Приоритет изобретения 09 января 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 12 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 09 января 2042 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e6bd24145d5c7
Владелец *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 2.09.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2804376

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПАНОРАМНОЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОТОСЪЕМКИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение "Научно-исследовательский
испытательный центр Железнодорожных войск"
Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор(ы): *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2023105044

Приоритет изобретения **06 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **28 сентября 2023 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **06 марта 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2808213**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЗКИ
ГУСЕНИЧНОЙ ТЕХНИКИ СВОИМ ХОДОМ С
ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО
ЗРЕНИЯ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение "Научно-исследовательский
испытательный центр Железнодорожных войск"
Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор(ы): *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № **2023116786**

Приоритет изобретения **27 июня 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **27 ноября 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **27 июня 2043 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2809177

**СПОСОБ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО
ТАХЕОМЕТРА И БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
КООРДИНАТ НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение "Научно-исследовательский
испытательный центр Железнодорожных войск"
Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор(ы): *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2023113978

Приоритет изобретения 29 мая 2023 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 07 декабря 2023 г.

Срок действия исключительного права на
изобретение истекает 29 мая 2043 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2823551**СПОСОБ КАЛИБРОВКИ
ВИДЕОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С
ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение "Научно-исследовательский
испытательный центр Железнодорожных войск"
Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор(ы): *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2023131769

Приоритет изобретения **04 декабря 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **24 июля 2024 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **04 декабря 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



Приложение Г

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017618224

ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИДЕОКАМЕРЫ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение «3 Центральный научно-исследовательский
институт» Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*



Заявка № 2017613765

Дата поступления 19 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 июля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017661249

ПРОГРАММА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ШКАЛЫ
ВРЕМЕНИ ГРУППОВОГО ХРАНИТЕЛЯ ЧАСТОТЫПравообладатель: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*Автор: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2017618373

Дата поступления 12 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 октября 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017661435

**Программа для сравнения шкал времени по сигналам
глобальных навигационных спутниковых систем**

Правообладатель: *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Автор: *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № **2017618348**

Дата поступления **12 августа 2017 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 октября 2017 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018617252

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ УКЛАДКИ
ТРАКТОРНЫМ ПУТЕУКЛАДЧИКОМ
РЕЛЬСОШПАЛЬНОЙ РЕШЕТКИ ЗВЕНЬЯМИ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение «3 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Авторы: *Рощин Дмитрий Александрович (RU), Горюхов Владимир Анатольевич (RU), Поляков Дмитрий Иванович (RU)*

Заявка № 2018614439

Дата поступления 03 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 июня 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018661921

ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ОБНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ С FTP-СЕРВЕРОВ ПО
РАСПИСАНИЮ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение «3 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор: *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2018619128

Дата поступления 24 августа 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019616210

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ
ГЕОМЕТРИИ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ С ПОМОЩЬЮ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение «3 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2019614875

Дата поступления 29 апреля 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 мая 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021613583

ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОЦЕНКИ
ОБЪЕМОВ ГРУНТА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение «3 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации (RU)*

Автор(ы): *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2021612757

Дата поступления 04 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 марта 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661237

Программа для идентификации источника света по
визуальным признакам

Правообладатель: *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*Автор(ы): *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2022660320

Дата поступления 04 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661446

**Программа для определения характеристик
гармонических колебаний маятника**

Правообладатель: **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**

Автор(ы): **Рощин Дмитрий Александрович (RU)**



Заявка № **2022660797**

Дата поступления **05 июня 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **21 июня 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661474

**Программа для вычисления координат точки съемки по
изображению трех опорных пунктов с известными
координатами**

Правообладатель: *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*Автор(ы): *Роцин Дмитрий Александрович (RU)*Заявка № **2022660743**Дата поступления **05 июня 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **22 июня 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c4010a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661514

**Программа для контроля параметров погрузки
транспортируемой техники своим ходом на полуприцеп**

Правообладатель: **Роцин Дмитрий Александрович (RU)**

Автор(ы): **Роцин Дмитрий Александрович (RU)**



Заявка № **2022660663**

Дата поступления **05 июня 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **22 июня 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022663547

Программа для создания панорамных
пространственных изображенийПравообладатель: *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*Автор(ы): *Рощин Дмитрий Александрович (RU)*

Заявка № 2022662757

Дата поступления 04 июля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 июля 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственностиДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c40f0a94edbd24145d5c7
Владелец *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023*Ю.С. Зубов*