Институт проблем информатики

Федерального исследовательского центра

«Информатика и управление»

Российской академии наук

На правах рукописи

Якушев Дмитрий Алексеевич

Автоматизация мониторинга состояния инфраструктуры ж/д транспорта в высокоточном координатном пространстве по данным мобильного лазерного сканирования

Специальность 05.13.17 – Теоретические основы информатики.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Дулин С.К.

Москва - 2016

Оглавление

Введение **3**

Глава 1. Объекты исследования и их характеристики **13**

ВКС – высокоточная координатная сеть 13

Зарубежные аналоги, методы использования 16

Специфика создания ВКС на территории России (протяженность, законодательство). 20

Цифровая модель пути и объектов железнодорожного транспорта 24

Анализ зарубежного опыта использования цифровой модели пути на примере департамента трассировки негабаритных грузов DBahn (Германия) 41

DBahn (Германия) 41

TechNet (Германия) 45

Выводы по первой главе 50

Глава 2. Анализ условий использования мобильного лазерного сканирования (МЛС) – принцип, аппаратура, точности. Обоснование выбора. 51

Производители оборудования МЛС 53

Обзор МЛС основных компаний производящих сканеры 53

Основные компоненты системы 56

Особенности использовании МЛС на ж/д 57

Организационные работы 57

Организация движения по маршруту съемки 61

Особые условия работ и меры безопасности 63

Результаты мобильного лазерного сканирования на ж.д. (точность позиционирования, точность уравнивания данных, полученных в разный период времени) между собой 70

Определение ошибки позиционирования на примере данных Курск-Белгород 71

Пример неоднородности данных, получаемых в результате сканирования мобильной лазерной системой 76

Факторы, влияющие на точность данных мобильного лазерного сканирования 79

Траекторное решение и факторы, влияющие на абсолютную точность данных МЛС 86

Условия получения качественных результатов лазерного сканирования 96

Описание программного обеспечения, позволяющего оценивать точность данных МЛС .97

Типовые требования к проверке трехмерных измерений инфраструктуры железнодорожного транспорта (ИЖТ) 98

Основные положения экспресс-анализа 100

Методика оценка погрешностей проецирования точек лазерного отражения (ТЛО) на опорную геодезическую с помощью программного обеспечения компании Terrasolid 101

Планирование оптимального времени проведения съемки методом МЛС 108

Описание технологии GPS-планирования 108

Анализ информации и составление прогноза 113

Выводы по второй главе 115

Глава 3. Автоматизация обработки данных МЛС и текущего мониторинга состояния инфраструктуры ж.д. 117

Разработка сквозной технологии съемки, обработки и создания атрибутированной пространственной базы данных ИЖТ 117

Программные и алгоритмические средства обработки данных МЛС, построения трехмерных моделей и создания ЦМП. 123

Алгоритм детектирования и идентификации опор контактной сети 124

Алгоритм автоматического определения параметров земляного полотна 134

Описание разработанных программных инструментов, автоматизирующих процесс создания ЦМП 146

Библиотека типовых элементов ИЖТ 146

Методика векторизации рельсовых нитей и построения оси пути 152

Программная реализация оценки точности вписывания рельс в ТЛО 159

Описание процедуры актуализации информации по переезду по лазерным данным от ДКИ ЭРА (ИНФОТРАНС) 167

Формализация семантического атрибутивного описания объектов инфраструктуры. 171

Структура классификационного кода 172

Выводы по третьей главе 173

Заключение 174

Литература 175

Приложения 177

Приложение А. Классификатор пространственных данных ИЖТ 178

Введение

Актуальность темы.

Обусловлена следующими обстоятельствами:

- Необходимостью перехода к описанию железнодорожного пути как трехмерного пространственного объекта («цифровая ж.д.»).
- Необходимостью автоматизации процесса создания цифровой модели пространства и перевод в цифровой вид массива точечных измерений (интеллектуальная обработка информации).

Железнодорожный путь представляет собой сложное инженерное сооружение.

Правилами технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (ПТЭ) [54] и нормативными техническими документами по текущему содержанию пути установлен систематический мониторинг путевых устройств, содержание их в технически исправном состоянии, обеспечивающем гарантированную безопасность и надежность перевозочного процесса. Сюда входят не только безопасность и надежность эксплуатации инфраструктуры, но и безопасность от других угроз: чрезвычайных ситуаций, террористических актов и т.д. как на перегонах железной дороги, так и на остановочных пунктах и вокзалах.

Основной формой проведения мониторинга инфраструктуры железнодорожного транспорта являются периодические съемки и наблюдения. Периодичность, состав и содержание работ определяются в соответствии со стандартами организации ОАО «РЖД» и устанавливаются в проектной документации [16].

В настоящее время внедряются технологии текущего содержания пути, проектирования и строительства на основе описания железнодорожного пути как трехмерного пространственного объекта. Для этого созданы и поддерживаются на уровне современных требований цифровые модели пути (ЦМП), используемые для сбора, хранения и оценки пространственных данных о текущем состоянии пути и выработки рекомендаций по предупреждению и устранению выявленных неисправностей.

Цифровая модель пути (ЦМП) – это формализованное математическое и семантическое описание геометрических характеристик и пространственного положения железнодорожного пути и объектов инфраструктуры железной дороги, получаемое в результате обработки данных геодезических измерений. Она является «твердой копией» пространства на текущий момент, которая может быть

трансформирована в документы, предписанные к использованию на дорогах и в то же время – накапливаемой пространственной базой знаний об объектах инфраструктуры которую можно использовать для последующего анализа.

Методы сбора пространственных данных различны и зависят от точности, предъявляемой к железнодорожному пути, которая напрямую зависит от установленной скорости.

Наиболее проработанными с точки зрения технологии являются измерения координат железнодорожного пути, осуществляемые традиционными геодезическими способами с применением электронных тахеометров и цифровых нивелиров. Решение проверенное временем, обеспечивает миллиметровую точность, но требует существенных затрат на создание высокоточного координатного пространства в области где проводятся измерения, а также весьма квалифицированного персонала.

Другим перспективным инструментом получения координатных данных по объектам железнодорожной инфраструктуры с точностями близкими к требуемым, являются технологии дифференциальной коррекции первичных данных GPS и ГЛОНАСС на основе развертываемых наземных сетей базовых спутниковых референсных станций [37].

Технология выполнения съемки с помощью МЛС является инновационной в области выполнения измерений для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния протяженных инфраструктурных объектов. В отличие от автодорог, съемка и последующая обработка собранной информации на ж.д. является нетривиальной задачей ввиду значительных ограничений по передвижению сканирующей системы и, как результат, возникающих при этом погрешностей измерений.

Зарубежный опыт (применяемый, в частности, на ж.д. Германии и Франции) основан на использовании данных преимущественно исходного точечного (не векторизованного) вида. В России реализуется несколько иной подход - первый (и пока единственный) масштабный проект был запущен 2011 году в интересах компании ОАО «РЖД» с упором на создание трехмерной векторной пространственной базы данных, охватывающей все видимые объекты инфраструктуры. Привлечение на начальных этапах субподрядных геодезических организаций, обладающим оборудованием МЛС для проведения полного цикла работ, показало неэффективность данного решения в связи со спецификой ж.д. и уникальностью данного проекта. Поэтому, начиная с 2012 года, в рамках проекта создания Интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ), разрабатываемой ОАО НИИАС, велись собственные активные технологические разработки, позволяющие автоматизировать процесс формирования трехмерной пространственной базы данных ИЖТ в которых автор принимал активное участие.

Анализ текущего состояния использования пространственных данных объектов инфраструктуры ж.д. транспорта в ОАО «РЖД»

В процессе работ было выявлено что сбор, обработка и доступ к пространственным данным об объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта (ИЖТ) характеризуется в настоящий момент следующим образом:

- сбор пространственных данных осуществляется, без четких планов и без привязки к единой системе координат;
- отсутствуют единые требования к составу и формам представления пространственных данных;
- отсутствует единый классификатор пространственных данных;

- данные, получаемые из разных источников, дублируются, не соответствуют друг другу, меют низкую точность и часто утрачиваются после однократного использования;
- недостаточность средств контроля и верификации отрицательно сказывается на актуализации информации – зачастую паспорт объекта переписывается из года в год..
- службы, обслуживающие ж.д. действуют разобщенно, используя различные методы для определения пространственной привязки объектов.

Строго говоря, пространственных данных инфраструктуры ж.д. не существует, так же как и системы, которая позволяла бы анализировать их.

В результате отсутствует возможность:

- осуществления комплексного анализа технического состояния объектов ИЖТ;
- реализации единой для служб ОАО «РЖД» системы хранения и предоставления пространственных данных об объектах инфраструктуры
- построения единой информационной модели ИЖТ;
- обеспечения эффективного проектного содержания пути и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Все это приводит к низкой эффективности использования пространственных данных.

Цель данного диссертационного исследования - разработка эффективной технологии обработки данных мобильного лазерного сканирования (МЛС) железных дорог и создания цифровой модели пути (ЦМП) в условиях неоднородности исходных данных или их частичного отсутствия.

Решение поставленной цели было найдено в не стандартном использовании инновационной технологии мобильного лазерного

сканирования в части ее применения на железной дороге. В процессе диссертационной работы, были проанализированы практические материалы лазерного сканирования полученные в результате работ на более 8000км ж.д. и сформулированы рекомендации по получению исходных данных, пригодных для дальнейшей обработки; проведен поиск и апробация аналогичных (или похожих) решений ; адаптированы алгоритмы по распознаванию типовых объектов инфраструктуры на основе непрерывно поступающей информации; формализовано описание ЦМП и отработана технология по ее формированию.

В качестве прототипа метода вычисления оси пути (базовый элемент инфраструктуры, лежащий в основе ЦМП), было использовано программное обеспечение немецкой компании TechNet Rail 2010, адаптированное под российские условия и что самое важное – под абсолютно другое (худшее) качество исходных данных. Сама технология создания ЦМП по данным МЛС уникальна.

Определены и решены несколько основных **задач**, влияющих на достижение указанной цели:

- определен полный и минимально необходимый объектовый состав ЦМП для решения задач выправки пути в координатном пространстве.
- проанализирована реальная абсолютная и относительная точность данных, полученных с помощью МЛС.
- разработана технология создания ЦМП и проработана пути автоматизации этого процесса.

Методы исследования. Теоретические и практические исследования базируются на методах распознавания образов (алгоритмы классификации, вероятностный генетический алгоритм), системного

программирования, локальном методе выделения краев изображений и дискриминантной функции.

Научная новизна. В диссертационной работе разработана новая технология обработки данных мобильного лазерного сканирования с целью получения высокоточной трехмерной цифровой модели пути и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, а также математические алгоритмы распознавания (идентификации) отдельных ее элементов.

Автором получены следующие результаты:

- Разработана уникальная технология создания высокоточной трехмерной ЦМП, обеспечивающая единый формат описания положения пути и других объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта и позволяющая проводить широкий спектр работ:
    - проведение проектно-изыскательских работ с привязкой к высокоточной системе координат;
    - постановку пути в проектное положение в высокоточной системе координат;
    - позиционирование подвижного рельсового транспортного средства на железнодорожном пути в реальном режиме времени.
- На основе дискриминантной функции разработан и апробирован на реальных данных (полученных в результате МЛС) метод определения фактической геометрической формы земляного полотна и сравнения с проектной формой профиля.
- Алгоритм Хафа (обнаружение прямых линий на бинарном изображении) адаптирован под задачи автоматического определения местоположения и идентификацию опор контактной сети в облаке точек лазерного отражения, что

позволяет проводить автоматическую оценку критических параметров ПТЭ.

- Разработан метод автоматического вписывания трехмерной фигуры рельсы в облако точек лазерного отражения с последующей проверкой качества векторизации, позволивший создавать точную параметрическую модель оси пути и заменить используемое ранее коммерческое программное обеспечение.
- Разработана методика и протестирована возможность использования данных вагонов-путеизмерителей для актуализации трехмерной цифровой модели инфраструктуры пространственных данных ж.д.
- Разработан классификатор пространственных объектов железных дорог ОАО «РЖД».

Практическая значимость работы заключается:

- Разработанная технология создания трехмерной цифровой модели инфраструктуры пространственных данных железных дорог и методы автоматизации построения отдельных объектов используются в технологической цепочке работ для анализа и сравнения проектных и фактических данных.
- Метод автоматического вписывания шаблона рельсы определенного формата (R65) в облако точек лазерного отражения с последующей автоматической проверкой качества векторизации рельсовой нити.
- Дискриминантная функция (поиск краевых точек) реализована в алгоритмах идентификации опор контактной сети и восстановления геометрической формы земляного полотна.
- Данные, получаемые на основе трехмерных цифровых моделей инфраструктуры железнодорожного транспорта используются автоматизированной системой формирования и актуализации

единой электронной карты РЖД для бортовых устройств подвижного состава (ЕГИС ТПС), являющейся основой формирования данных для бортовых устройств безопасности и систем расшифровки результатов поездок.

- Классификатор пространственных объектов железных дорог ОАО «РЖД», используется во внедряемой в АО «РЖД» комплексной системе пространственных данных (КСПД ИЖТ).
- Разработанная технология внедрена в комплекс высокоточных съемочных работах, проводимых в интересах АО «РЖД», по ней в частности сформированы и загружены в комплексную систему пространственных данных (КСПД ИЖТ) модели инфраструктуры на более чем 8000км трассы. ЦМП используется при проведении работ по обеспечению безопасности движения ж.д. транспорта, в частности для расчета негабаритных объектов на участках Московской, Октябрьской, Горьковской, Северо-Кавказской, Юго-Восточной железных дорог (всего 16000 км), составления электронных карт безопасности движения локомотивов на участке Москва-Рязань I, формирования ведомостей расстояний до объектов инфраструктуры

На защиту выносятся следующие результаты:

- Методики и алгоритмы автоматического и полуавтоматического распознавания и моделирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, нивелирующие ошибки, возникающие в процессе сбора исходных данных;
- Состав объектов ЦМП в виде классификатора пространственных данных железных дорог ОАО «РЖД»;
- Технология обработки данных мобильного лазерного сканирования и создания трехмерной цифровой модели

инфраструктуры пространственных данных железных дорог с заданной точностью;

Апробация. Основные положения диссертации докладывались на семинарах ИПИ РАН, а также на международных конференциях в период с 2012 по 2016 годы. По результатам, полученным в ходе выполнения данной работы, был оформлен патент № ____. Разработанная технология используется в высокоточных съемочных работах, проводимых в интересах АО «РЖД», по ней в частности сформированы модели инфраструктуры на более чем 7000км трассы, загруженные к Комплексную систему пространственных данных (КСПД ИЖТ). Результаты использованы для работ по обеспечению безопасности движения ж.д. транспорта, в частности для расчета негабаритных объектов и составления электронных карт безопасности движения локомотивов.

- на II Межотраслевой научно-практической конференции «Трехмерное проектирование жизненного цикла объектов инфраструктуры. Строительство. Эксплуатация». Санкт-Петербург, 2013.
- на первой конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2012), Москва, 2012.
- на второй конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2013), Москва, 2013.
- На 5-й международной конференции «Pattern Recognitionand Machine Intelligence» (PReMI 2013), Калькутта, Индия, 2013.
- на научной сессии НИЯУ МИФИ, Москва 2013.
- на конференции «Машинное зрение», выставка All-over-IP. Москва 2013.

- на третьей ежегодной конференции пользователей Bentley Systems: "Инфраструктура будущего. Расширяем горизонты" Москва, 2014
- на конференции Bentley CONNECTION. Москва, 2015.
- на пятой конференции Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ-2016), Москва, 2016.

По результатам, полученным в ходе выполнения данной работы 30.01.2015г был получен патент на изобретение № 2579606 «Способ позиционирования подвижного рельсового транспортного средства на железнодорожном пути».

Результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, вошли в ежегодные отчеты по успешно завершенному проекту Российского фонда фундаментальных исследований № 11-07-00225 «Интеллектуализация методов описания геоинформационных объектов и технологических процессов», а также в ежегодные отчеты по выполняющемуся проекту Российского фонда фундаментальных исследований № 14-07-00040 «Разработка методов обеспечения семантической геоинтероперабельности при решении задач концептуального поиска геоданных».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 11 печатных работ, 4 из них в изданиях по перечню ВАК.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (наименований) и приложения. Работа изложена на 191 странице, включая 78 рисунков и 11 таблиц.

Глава 1. Объекты исследования и их характеристики

ВКС – высокоточная координатная сеть

В ОАО «РЖД» используется несколько систем координат: общеземная, государственная референцная, местная и пикетажная (железнодорожная линейная система координат). Пикетажная система

наиболее активно используется при выполнении работ по содержанию железнодорожного пути и не соответствует современным требованиям по точности и обеспечению единого координатного пространства.

Стратегические Направления Научно-Технического Развития ОАО "Российские железные дороги" ("Белая книга" ОАО "РЖД") предусматривают развитие высокоскоростного движения и автоведение поездов на базе использования спутниковых технологий и координатного управления движением. Для этого в рамках ОАО "РЖД" создается единая высокоточная координатная система (ВКС).

Применение ВКС значительно снижает временные и материальные затраты на организацию и выполнение любых геодезических работ, повысить их точность, поскольку используется единая пространственно-временная основа [16].

Основные цели создания высокоточной координатной системы:

- обеспечение единой пространственно-временной основы геодезических измерений;
- обеспечение безопасности движения;
- обеспечение работ с применением путеизмерительной и выправочной техники;
- сокращение материальных затрат и времени на инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатацию ж.д. пути;
- создание основы для формирования системы интервального регулирования движения поездов, в которых спутниковые навигационные данные ГЛОНАСС/GPS о местоположении, скорости движения и длине состава позволят перейти к реализации безопасных методов обеспечения попутного сближения поездов без путевых светофоров;

- обеспечение полноценной обработки материалов мобильного лазерного сканирования с целью получения точных цифровых моделей пути и цифровых карт в полосе съемки в принятой системе координат, в том числе, с использованием реперных объектов, размещенных в фундаментах оттяжек опор контактной сети;
- научное, техническое и технологическое обеспечение создания, ведения и предоставления в пользование местоположения пунктов опорной геодезической сети;
- обеспечение работ, выполняемых с применением ГЛОНАСС/GPS приемников;

ВКС состоит из следующих взаимосвязанных компонентов:

- глобальные навигационные спутниковые системы;
- дифференциальная подсистема ГНСС;
- опорная геодезическая сеть;
- коммуникационный сегмент;
- пользовательский сегмент.

Основной компонентой ВКС являются пункты опорной геодезической сети (ОГС), которые геодезически привязываются к пунктам ФАГС и ВГС из состава ГГС, а также к пунктам международной ГНСС службы для целей геодинамики (IGS).

Нормальные высоты на пункты ОГС передаются от пунктов государственной нивелирной сети I и II классов по программе геометрического нивелирования III класса.

<u>Состав и функции ОГС:</u>

- постоянно действующие спутниковые базовые станции, расположенные на расстоянии до 50 км;

- пункты заполняющей сети могут отстоять друг от друга на 250-750м. Пункты заполняющей сети условно делятся на: главные, закладываемые через 4-5км, и промежуточные, закладываемые со средним шагом 500м. Главные и промежуточные пункты предназначены для обеспечения работ при отсутствии сигналов от спутников и/или базовых станций. Главные пункты предназначены для размещения временных БС;
- средняя квадратическая погрешность (СКО) взаимного положения смежных пунктов ОГС не должна превышать 8 мм в плане и 5 мм по высоте;
- при необходимости, может выполняться закладка рабочих реперов, предусмотренных Техническими требованиями «Специальная реперная система контроля состояния железнодорожного пути в профиле и плане», утверждёнными МПС России 26 марта 1998 г.

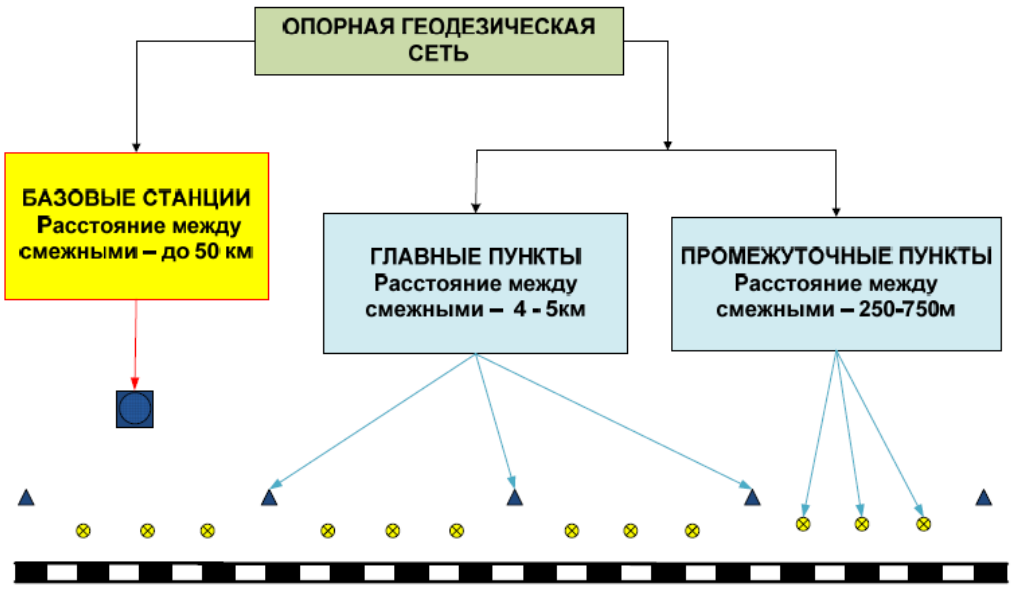


Рисунок 1.1 Схема опорной геодезической сети (ОГС)

Зарубежные аналоги, методы использования

Необходимость создания единой системы координат в Европе возникла в результате сотрудничества входящих в ее состав стран в

экономической и военной сферах. Интегрирование экономической деятельности стран ЕС подтолкнуло к организации единой геодезической основы систем пространственной информации. Единые системы координат стали востребованными при проектировании и реализации различных международных экономических программ, в частности, в области железнодорожного транспорта.

Концепция введения унифицированной системы координат EUREF для всех стран Западной Европы возникла в 1987г.

EUREF должна отвечать следующим требованиям:

- представлять геоцентрическую систему отсчета для любых высокоточных геодезических и геодинамических проектов на территории Европы;
- быть точной системой отсчета, очень близкой к WGS-84, и использоваться как для решения задач геодезии, так и задач всех типов навигации (на земле, на море, в воздухе) на территории Европы;
- быть единой на территории всей Европы современной системой отсчета для создания многонациональных цифровых картографических баз данных, которые не могут больше основываться на очень большом количестве разных национальных систем координат (геодезических координат), применяемых в Европе.

Международный железнодорожный союз в 2008 году ввел в действие документ с рекомендациями по применению геоцентрической системы координат при инженерных путевых работах в странах ЕС. Данный документ предназначен в первую очередь для проектировщиков, изыскателей, строителей и специалистов по обслуживанию путей, а также специалистов, занимающихся разработкой технических средств ведения путевых работ.

Основная цель внедрения унифицированной геоцентрической системы координат на территории стран ЕС - повышение качества пути и снижение затрат на его строительство и содержание.

В качестве основных ожидаемых результатов называется:

- неизменное положение пути в течение срока службы;
- стабильные геодезические путевые отметки;
- простота осмотра и реконструкции положения пути;
- отсутствие длинноволновых ошибок геометрии пути.

При геодезическом обеспечении работ по строительству и содержанию железнодорожного пути во всех странах ЕС рекомендуется использование Европейской системы наземных координат 1989 (ETRS89) совместно с подходящими картографическими проекциями. Соответственно, практически все европейские страны планируют обязательную трансформацию их национальных координатных систем в ETRS89, и наоборот[53].

Это позволит обеспечить:

- плавную привязку между различными (национальными) геодезическими системами координат;
- единое, единообразное и централизованное хранение данных о геометрии пути и реперной сети на уровне железнодорожной компании;
- стандартизированный обмен геодезическими путевыми данными с официальными кадастровыми службами и третьими сторонами;
- интеграцию местных сетей при сохранении их единообразия и привязки к ETRS89.

Принципиальным моментом геодезического применения комплексов точной съемки железнодорожных путей является наличие инфраструктуры дифференциальной подсистемы ГНСС, используемой в

режиме RTK. Такая инфраструктура может быть сравнительно легко создана на локальном уровне, охватывая участки дороги в 10-50 км. Для этого достаточно отдельных базовых станций (БС). В качестве оптимальных средств доставки информации возможно использование радиомодемов УКВ диапазона и средств сотовой связи.

Более сложной представляется задача создания инфраструктуры RTK на протяженных участках дороги (более 50 км), выходящих за пределы крупных населенных пунктов, поскольку в этом случае потребуется более сложное техническое решение по доставке информации потребителям. С 1993 по 1995 г. Технический университет г. Грац (Австрия) и научно-исследовательское отделение фирмы Plasser&Theurer совместно изучали возможности использования системы GPS для измерений на железных дорогах [16,19].

Установлено, что:

- точность измерений с помощью системы GPS ограничивается ионосферной и тропосферной рефракцией, фазовыми шумами и другими факторами. Кроме того, она зависит от числа спутников и их расположения;
- влияние ионосферной рефракции может быть ослаблено применением двухчастотных приемников, тропосферной — соответствующими расчетами на моделях и методикой наблюдений;
- фазовые шумы определяются качеством аппаратуры на спутниках;
- число наблюдаемых спутников во многом зависит от наличия препятствий. Оно может быть увеличено при использовании многосистемных приемников, обеспечивающих одновременный прием сигналов со спутников, относящихся к нескольким системам (например, GPS и ГЛОНАСС).

- неблагоприятная геометрия расположения спутников может быть компенсирована выбором оптимального времени суток для проведения измерений и увеличением времени наблюдений;
- значительное влияние на точность измерений оказывает эффект многолучевого распространения: принимается не только сигнал, идущий непосредственно с наблюдаемого спутника, но и отраженный (от крыш, движущихся поездов и т. п.).
- отраженный сигнал накладывается на прямой, что снижает точность измерений. Влияние многолучевого распространения можно снизить, применив специальные антенны и кинематические методы измерений, но совсем его исключить невозможно. К проблемным областям GPS относятся имеющиеся ограничения в приеме радиосигналов с навигационных спутников, обусловленные наличием строений, мостов, тоннелей и т. п., а также многолучевое распространение сигнала.

Специфика создания ВКС на территории России (протяженность, законодательство).

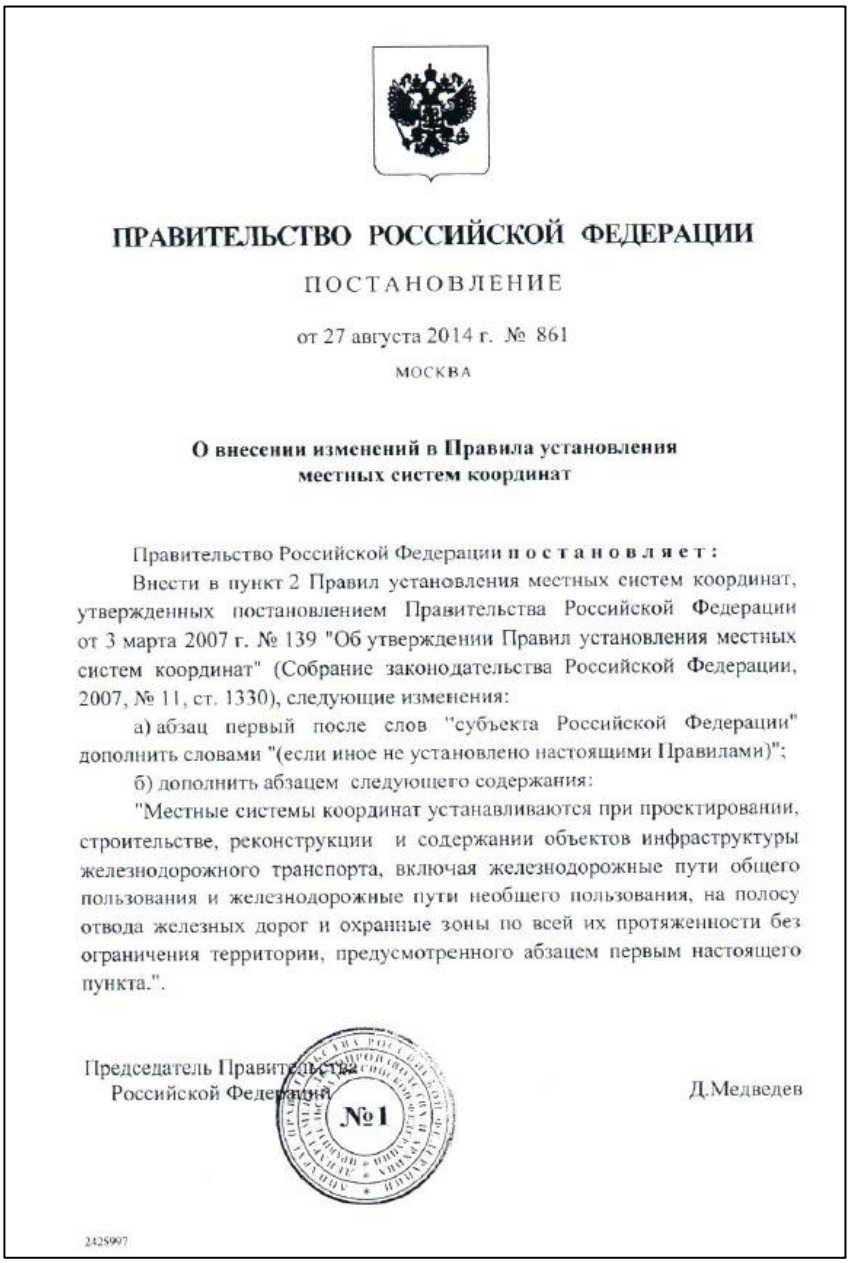
Значительная протяженность и расположение железных дорог России, а также имеющаяся необходимость установления связи с железными дорогами стран СНГ и ближнего зарубежья заставляет положить в основу создаваемых местных систем координат существующую, достаточно широко распространенную международную геоцентрическую систему координат ITRF (International Terestrial Reference Frame). Данная система координат реализована по всему миру, закреплена высокостабильными центрами пунктов, на которых ведутся непрерывные наблюдения космических объектов. В частности, на

пунктах международной сети IGS (International GNSS Service). Часть таких пунктов находится и на территории России. Координаты пунктов сети IGS характеризуются средней квадратической погрешностью взаимного положения пунктов на уровне 1 см при среднем удалении смежных пунктов на 1-2 тысячи километров.

Принятие системы координат ITRF за основу при создании в ОАО «РЖД» местных систем координат имеет ряд достоинств:

- жесткость высокоточной спутниковой сети пунктов IGS, координаты которых реализуют систему координат ITRF, позволяет надежно стыковать координатные построения и независимо строящиеся участки железных дорог во времени и пространстве;
- облегчается процесс интеграции железнодорожного транспорта России с международными программами в области железнодорожных перевозок;
- система координат ITRF может стать объединяющей всю сеть железных дорог России и ближнего зарубежья;
- координаты пунктов сети IGS на территории России открыты.

Совсем недавно это было невозможно, т.к. попадало под действие закона о государственной тайне в области геодезии и картографии, но в 2014 году было принято постановление, согласно которому местные системы координат не ограничены территориально, если используются для целей проектирования, строительства, реконструкции и содержания железных дорог по всей их протяженности (ранее это было возможно только в пределах одной области).



ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПОСТАНОВЛЕНИЕ

от 27 августа 2014 г. № 861

МОСКВА

О внесении изменений в Правила установления местных систем координат

Правительство Российской Федерации **п о с т а н о в л я е т :**

Внести в пункт 2 Правил установления местных систем координат, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 3 марта 2007 г. № 139 "Об утверждении Правил установления местных систем координат" (Собрание законодательства Российской Федерации, 2007, № 11, ст. 1330), следующие изменения:

а) абзац первый после слов "субъекта Российской Федерации" дополнить словами "(если иное не установлено настоящими Правилами)";

б) дополнить абзацем следующего содержания:

"Местные системы координат устанавливаются при проектировании, строительстве, реконструкции и содержании объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, включая железнодорожные пути общего пользования и железнодорожные пути необщего пользования, на полосу отвода железных дорог и охранные зоны по всей их протяженности без ограничения территории, предусмотренного абзацем первым настоящего пункта.".

Председатель Правительства Российской Федерации Д.Медведев

№1

2425997

Рисунок 1.2. Постановление №861 от 27.08.2014 «О внесении изменений в правила установления местных систем координат».

В применении к железным дорогам ОАО «РЖД», алгоритм построения местных железнодорожных систем координат будет иметь следующий вид [18]:

- В качестве исходной системы координат выбирается геоцентрическая международная система координат ITRF2008 (International Terestrial Reference Frame) на эпоху 1 октября 2011

года, реализованная открытыми координатами пунктов международной ГНСС службы IGS (International GNSS Service).

- Для передачи системы координат ITRF на опорную геодезическую сеть (ОГС) выполняется МНК-уравнивание векторной пространственной сети в системе пространственных прямоугольных координат, объединяющей пункты – носители координат ITRF и базовые станции сети ОГС с использованием выполненных на них ГЛОНАСС/GPS измерений. Координаты исходных пунктов берутся из каталога международной сети IGS (это должна быть международная пространственная система координат ITRF2008 на эпоху 1 октября 2011 года). Доступ к измерительной спутниковой информации с исходных пунктов осуществляется через Internet, например, по адресу: http://igscb.jpl.nasa.gov, а к координатам исходных пунктов также через Internet, например, с сайта международного аналитического центра в Институте географии Франции по адресу: (http://itrf.ensg.ign.ru).
- Создаются пространственные местные железнодорожные системы координат (ПМСК) в виде (XYZ) путем смещения начала геоцентрической системы координат ITRF2008 на эпоху 1.10.2011г. на заданные отдельно для каждой железной дороги (как варианты: для каждого направления дороги, для каждого субъекта Федерации) величины (ΔX,ΔY,ΔZ) (ключ).
- Осуществляется преобразование координат пунктов ОГС, определенных в ПМСК из пространственных прямоугольных координат (XYZ) в геодезические координаты (BLH) условной референцной системы координат (УРСК) на эллипсоиде Красовского по формулам (4-19) [1].

При этом принимается:

- начало системы координат УРСК совмещено с началом системы координат ПМСК; направление осей систем координат и масштаб построений совпадают, то есть параметры перехода от системы координат ПМСК к системе координат УРСК: $\Delta X = 0$; $\Delta Y = 0$; $\Delta Z = 0$; wx = 0; wy= 0; wz = 0; $\Delta m*106 = 0$;
- система координат УРСК реализована на эллипсоиде Красовского;
- эллипсоид GRS-80, относящийся к системе геодезических координат ITRF, имеет следующие параметры: большая полуось a = 6 378 137м, сжатие α = 1/298.257 222 101, квадрат эксцентриситета e2 = 0.0066943800229;
- эллипсоид Красовского, относящийся к системе координат УРСК, имеет следующие параметры: большая полуось a = 6 378 245м, сжатие α = 1/298.3, квадрат эксцентриситета e2 = 0.00669342162.
- Геодезические координаты пунктов (широта – B и долгота – L) в системе координат УРСК преобразовываются в проекцию Гаусса-Крюгера на эллипсоиде Красовского по формулам (25-27) [1]. При этом ширина зон принимается равной 6 градусам. Для осевого меридиана зоны № 1 принимается долгота 30. Совокупность полученных плоских прямоугольных координат (xy) реализует местные плоские железнодорожные системы координат (МЖСК).
- Система нормальных высот для пунктов ОГС получается по результатам выполнения геометрического нивелирования с опорой на пункты государственной нивелирной сети.

Цифровая модель пути и объектов железнодорожного транспорта

ЦМП - Цифровая модель пути и объектов железнодорожного транспорта - многослойная информационная структура, содержащая в себе геометрические параметры железнодорожного пути, а также геометрические параметры и характеристики объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, определенные в единой системе координат ВКС, а при ее отсутствии - в принятой системе координат.

ЦМП является составной частью инфраструктуры пространственных данных железных дорог, обеспечивающая единый формат для описания положения пути и других объектов ИЖТ, для дальнейшего анализа и сравнения проектных и фактических данных. Продолжительность жизненного цикла ЦМП определяется актуальностью данных о ее компонентах и периодичностью их обновления, как посредством инженерно-геодезической съемки, так и с помощью средств мобильной диагностики, для решения той или иной задачи [21].

Основной областью применения ЦМП является:

- Приведение фактических геометрических параметров пути и других объектов инфраструктуры к их проектным значениям. Постановка пути в проектное положение имеет одно важное преимущество: поставив путь один раз в это положение, в последующем будут исправляться только отступления от этого положения, что потребует значительно меньших затрат на содержание пути, причем на всех этапах - во время ремонтов и в промежутке между ними легко организовать контроль за ходом работ, что будет способствовать повышению качества ремонтов.
- Определение местоположения объектов инфраструктуры, подвижных и стационарных единиц техники в системе координат ЦМП.

- Определение в системе координат ЦМП участков, где возникла необходимость производства тех или иных работ. Установление границ этих участков.

Использование ЦМП и автоматизированный анализ происходящих изменений уменьшает влияние человеческого фактора, часто приводящего к непредсказуемым негативным процессам, для устранения которых требуются значительные денежные средства

Инструкция 372р [22] определяет следующий состав цифровой модели пути:

1) Путь

Характеристика	Описание
Уровень головки левого рельса по счету километров в прямых или внутреннего рельса в кривых участках пути	Высотная отметка уровня головки рельса
Плановое положение	Характеристики участка, описывающие плановое положение пути
Бровка земляного полотна	Высотная отметка бровки земляного полотна
Разделительный слой	Тип разделительного слоя и глубина его залегания
Толщина слоя щебня под шпалой	Толщина слоя щебня под шпалой
Толщина песчаной подушки	Толщина песчаной подушки
Междупутное расстояние	Расстояние между осями смежных путей
Разность уровней путей	Разность уровней головок рельсов смежных путей
Номер пути	Номер пути согласно направлению (четный/нечетный) на перегоне или техническо-распорядительному акту железнодорожной станции

	(далее - ТРА)
Тип пути	Главный, станционный, подъездной и т.д. (согласно ТРА)
Тип рельса	Тип рельса (например, Р65)
Границы начала и конца пути	Координаты начала и конца пути
Местоположение примыкающих стрелочных переводов (для станционных путей)	Координаты точек центров примыкающих стрелочных переводов

2) Станция

Характеристика	Описание
Наименование	Название станции
Сторона расположения пассажирского здания (далее - ПЗ)	Сторона расположения ПЗ по ходу возрастания пикетажа
Класс	Класс станции
Границы	Координаты точек границы станции
Местоположение оси ПЗ	Координаты точки пересечения оси ПЗ с осью железнодорожного пути

3) Разъезд

Характеристика	Описание
Наименование	Название разъезда
Сторона расположения ПЗ	Сторона расположения ПЗ по ходу возрастания пикетажа
Местоположение	Координатное местоположение центра разъезда
Местоположение оси ПЗ	Координаты точки пересечения оси ПЗ с осью железнодорожного пути

4) Остановочный пункт

Характеристика	Описание
Наименование	Название остановочного пункта
Местоположение	Координатное местоположение

5) Стрелочный перевод

Характеристика	Описание
Номер	Номер стрелочного перевода
Тип	Тип стрелочного перевода (Одиночный, двойной, перекрестный, сбрасывающий)
Направление	Направление относительно возрастания пикетажа (прямой обратный)
Сторонность	Нет (для перекрестных) Обыкновенный левый Обыкновенный правый Симметричный Разносторонний несимметричный левый Разносторонний не симметричный правый Несимметричный односторонней кривизны левый Несимметричный односторонней кривизны правый
Признак горочности	Характеризует принадлежность стрелочного перевода к сортировочной горке
Тип остряка	Обычный или сбрасывающий
Способ управления	Ручное или электрическая централизация
Марка	Марка стрелочного перевода - тангенс острого угла крестовины
Местоположение	Координатное местоположение центра стрелочного перевода
Число остряков	Число остряков (1 и 2)

сбрасывающей стрелки	сбрасывающей стрелки
Наименование примыкающих путей и стрелочных переводов	Номер и тип примыкающих путей и стрелочных переводов по каждому направлению
Сторона установки электрического или ручного привода	Сторона установки электрического или ручного привода на стрелочном переводе по ходу возрастания пикетажа
Наличие пневмообдувки	Наличие пневмообдувки на стрелочном переводе
Наличие электрообогрева	Наличие электрообогрева на стрелочном переводе

6) Глухое пересечение

Характеристика	Описание
Марка	Марка глухого пересечения - тангенс острого угла крестовины
Местоположение	Координатное местоположение

7) Крестовина поворотного круга локомотивного депо

Характеристика	Описание
Марка	Марка поворотного круга
Местоположение	Координатное местоположение

8) Поворотный круг

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

9) Сбрасывающий башмак

Характеристика	Описание
Автоматизация	Ручное или автоматизированное управление

Местоположение	Координатное местоположение
Сторона установки электропривода	Сторона установки электрического или ручного привода на стрелочном переводе по ходу возрастания пикетажа
Тип электропривода	Тип электропривода сбрасывающего башмака

10) Светофор

Характеристика	Описание
Наименование	Наименование светофора
Тип	Тип светофора
Направление	Направление установки светофора по ходу роста пикетажа
Количество сигнальных огней	Количество сигнальных огней светофора
Местоположение	Координатное местоположение
Габарит	Габарит относительно оси пути
Назначение	Назначение светофора (входной, выходной...)
Тип мачты	Тип мачты светофора (железобетонная, металлическая, консоль, мостик...)
Наличие маршрутного указателя	Наличие маршрутного указателя на светофоре
Идентификатор изолирующего стыка	Идентификатор изолирующего стыка

11) Будка

Характеристика	Описание
Сторонность	Сторона расположения сооружения относительно оси пути по ходу возрастания пикетажа
Местоположение	Координатное местоположение
Обмеры	Наружные обмеры

Габарит	Габарит относительно оси пути

12) Блок пост

Характеристика	Описание
Сторонность	Сторона расположения сооружения относительно оси пути по ходу возрастания пикетажа
Местоположение	Координатное местоположение

13) Строение

Характеристика	Описание
Наименование	Наименование строения
Тип	Жилой дом/казарма
Сторонность	Сторона расположения сооружения относительно оси пути по ходу возрастания пикетажа
Местоположение	Координатное местоположение
Обмеры	Наружные обмеры
Габарит	Габарит относительно оси пути

14) Изолирующий стык

Характеристика	Описание
Наименование	Наименование
Негабаритность	Отклонение от габарита установки
Местоположение	Координатное местоположение
Идентификатор привязки к пути или стрелочному переводу	Идентификатор привязки изолирующего стыка к пути или стрелочному переводу

15) Предельный столбик

Характеристика	Описание

Наличие	Признак наличия предельного столбика на местности
Местоположение	Координатное местоположение
Номер стрелочного перевода	Номер стрелочного перевода, где установлен предельный столбик

16) Мост

Характеристика	Описание
Тип	Тип моста
Длинна	Длина моста
Местоположение	Координатное местоположение точки пересечения оси моста с осью железнодорожного пути

17) Тормозное устройство

Характеристика	Описание
Начало	Координатное местоположение начала тормозного устройства
Конец	Координатное местоположение конца тормозного устройства
Тип	Тип тормозного устройства

18) Железнодорожный переезд

Характеристика	Описание
Тип	Тип переезда
Охраняемый/неохраняемый	Признак охраняемости переезда
Сторонность	Сторона расположения будки на охраняемых переездах относительно оси пути по ходу возрастания пикетажа
Местоположение	Координатное местоположение точки пересечения оси переезда с осью железнодорожного пути

Угол	Угол пересечения оси переезда с осью железнодорожного пути

19) Пешеходный переход

Характеристика	Описание
Регулируемый/нерегулируемый	Признак регулируемости перехода
Местоположение	Координатное местоположение точки пересечения оси пешеходного перехода и оси железнодорожного пути

20) Трубопровод

Характеристика	Описание
Наименование	Наименование трубопровода
Отметка пересечения	Высотное (глубинное) значение пересечения относительно оси железнодорожного пути
Угол пересечения	Угол пересечения оси трубопровода с осью железнодорожного пути
Местоположение	Координатное местоположение точки пересечения оси трубопровода с осью железнодорожного пути

21) Кабель связи

Характеристика	Описание
Наименование	Наименование кабеля
Тип	Тип кабеля
Отметка пересечения	Высотное (глубинное) значение пересечения относительно оси железнодорожного пути
Угол пересечения	Угол пересечения кабеля с осью железнодорожного пути
Местоположение	Координатное местоположение точки

	пересечения

22) Мост пешеходный

Характеристика	Описание
Наименование	Наименование пешеходного моста
Отметка пересечения	Высотное значение пересечения относительно оси железнодорожного пути
Местоположение	Координатное местоположение точки пересечения оси пешеходного моста и оси пути

23) Путепровод

Характеристика	Описание
Наименование	Наименование путепровода
Тип	Тип путепровода
Отметка пересечения	Высотное значение пересечения относительно оси железнодорожного пути
Местоположение	Координатное местоположение точки пересечения оси путепровода и оси пути

24) Водопропускная труба

Характеристика	Описание
Тип	Тип трубы
Материал	Материал трубы
Отверстие	Размер пропускного отверстия
Глубина залегания	Глубина залегания трубы
Местоположение	Координатное местоположение точки пересечения оси трубы и оси пути

25) Подкрановые пути

Характеристика	Описание
Начало	Координатное местоположение начала подкрановых путей
Конец	Координатное местоположение конца подкрановых путей

26) Эстакада

Характеристика	Описание
Начало	Координатное местоположение начала эстакады
Конец	Координатное местоположение конца эстакады

27) Стена подпорная

Характеристика	Описание
Начало	Координатное местоположение начала подпорной стены
Конец	Координатное местоположение конца подпорной стены
Габарит	Габарит относительно оси пути
Высота	Разность высотных отметок низа и верха подпорной стены

28) Лестница

Характеристика	Описание
Начало	Координатное местоположение начала лестницы
Конец	Координатное местоположение конца лестницы
Ширина	Ширина лестницы

29) Ограждение

Характеристика	Описание
Начало	Координатное местоположение начала ограждения
Конец	Координатное местоположение конца ограждения
Тип	Тип ограждения

30)Конкорс

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

31) Галерея

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

32) Платформа

Характеристика	Описание
Начало	Координатное местоположение начала платформы
Конец	Координатное местоположение конца платформы
Тип	Тип платформы
Ширина	Ширина платформы
Высота	Высота платформы
Габарит	Габарит относительно оси пути
Тип покрытия	Асфальт, бетон, брусчатка, дерево

33) Сбрасыватель башмаков

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

Идентификатор привязки к пути или стрелочному переводу	Идентификатор привязки к пути или стрелочному переводу

34) Упор тормозной станционный

Характеристика	Описание
Автоматизация	Ручное или автоматизированное управление
Местоположение	Координатное местоположение

35)Горка

Характеристика	Описание
Тип	Тип горки
Местоположение	Координатное местоположение

36) Габаритные ворота

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

37) Весы вагонные

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение
Модификация	Модификация весов вагонных

38) Весы путевые

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение
Модификация	Модификация весов путевых

39) Вагонный замедлитель

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

40) Маневровая колонка

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

41) Указатель

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

42) Граница пути необщего пользования (подъездного пути)

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

43) Указатель роспуска вагонов

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

44) Электронный счетчик осей вагонов

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

45) Устройство переговорное парковое

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

46) Гидроколонка

Характеристика	Описание

Местоположение	Координатное местоположение

47) Пункт раздачи горюче-смазочных материалов

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

48) Рельсовый стык

Характеристика	Описание
Тип	Тип стыкового соединения
Местоположение	Координатное местоположение

49) Эстакада мостового крана

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение

50) Опора контактной сети

Характеристика	Описание
Номер	Номер опоры
Наименование	Наименование перегона (станции)
Тип	Тип опоры
Анкер	Наличие и сторона расположения анкера
Местоположение	Координатное местоположение
Габарит	Габарит относительно оси пути

51) Отметка земли

Характеристика	Описание
Местоположение	Координатное местоположение
Значение	Значение отметки земли

Таблица 1.1. Состав цифровой модели пути

Прототипом ЦМП явилась система CNTD (Continuous Numerical Track Description) разрабатываемая международным союзом железных дорог (МСЖД) которая использует непрерывное координатно-цифровое описание пути с применением общеевропейской системы координат ETRS, стандартов Международной организации по стандартизации ISO и методов спутникового позиционирования.

CNTD описывает 3D-модель железнодорожного пути с использованием непрерывных математически точных элементов, позволяющих определить плановые координаты, высоты и возвышение любой точки пути.

Структурно CNTD представляет собой иерархическую сферическую модель пространственных данных состоящей из 4 элементов:

- ядро модели составляют пространственные данные о железнодорожных направлениях и узловых эксплуатационных точках;
- первый слой содержит пространственные данные о сети рельсовых путей, используемые всеми специализированными службами железной дороги;
- второй слой – пространственные данные, представляющие интерес для других областей применений;
- третий слой – пространственные данные, используемые с ограничениями.

Такой метод структурирования позволяет получить доступ к пространственным данным через один параметр – пикето-километр.

При использовании CNTD путевые машины для каждой точки пути определяют фактическое положение пути, вычисляют отклонения пути от теоретического значения и приводят его в заданное (проектное) положение в режиме реального времени [21].

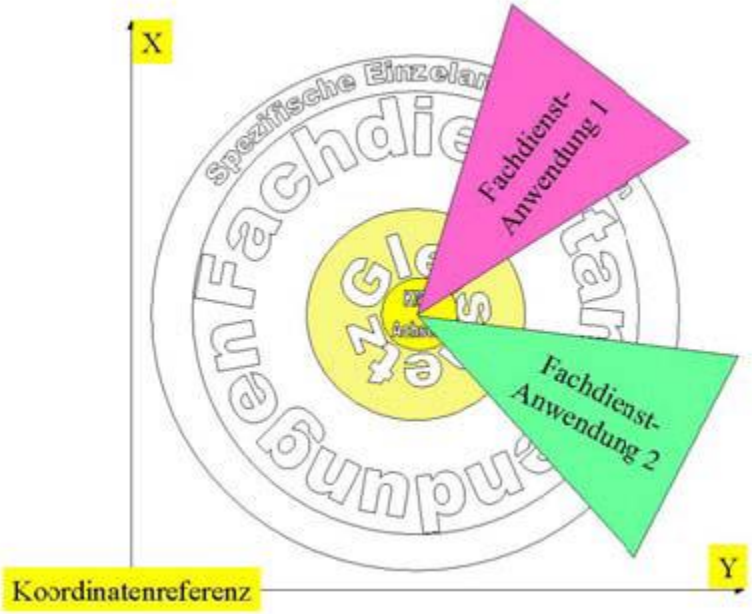


Рисунок 1.3. Иерархическая сферическая модель пространственных данных

Анализ зарубежного опыта использования цифровой модели пути на примере департамента трассировки негабаритных грузов DBahn (Германия)

DBahn (Германия)

Развитие лазерной съемки на железных дорогах Германии происходило следующим образом:

- В 2001 году DBahn запустил разработку путеизмерительного вагона LIMEZ, оснащенного лазерными приборами.
- В 2006 был принят в эксплуатацию, с 2008 собирает данные о фактическом состоянии инфраструктуры ж.д..

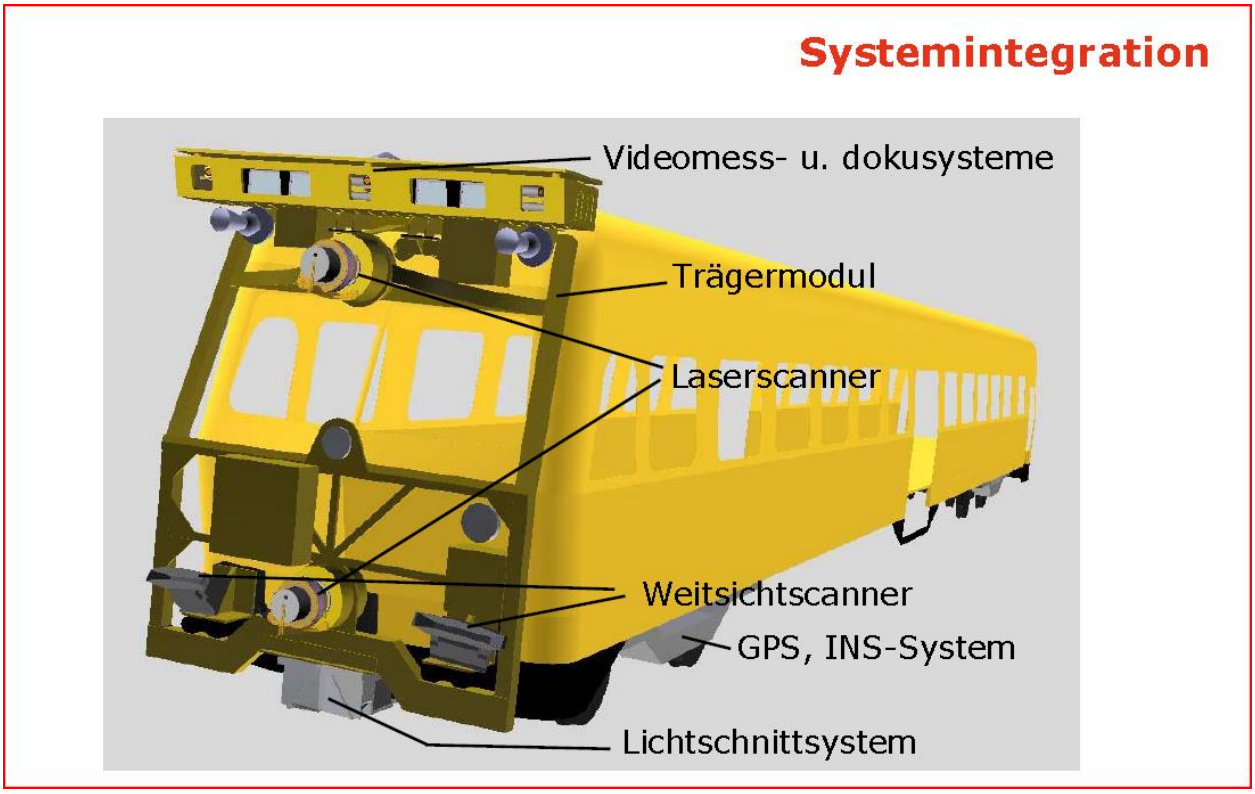


Рисунок 1.4. Внешний вид вагона-путеизмерителя LIMEZ-III и основные используемые приборы.

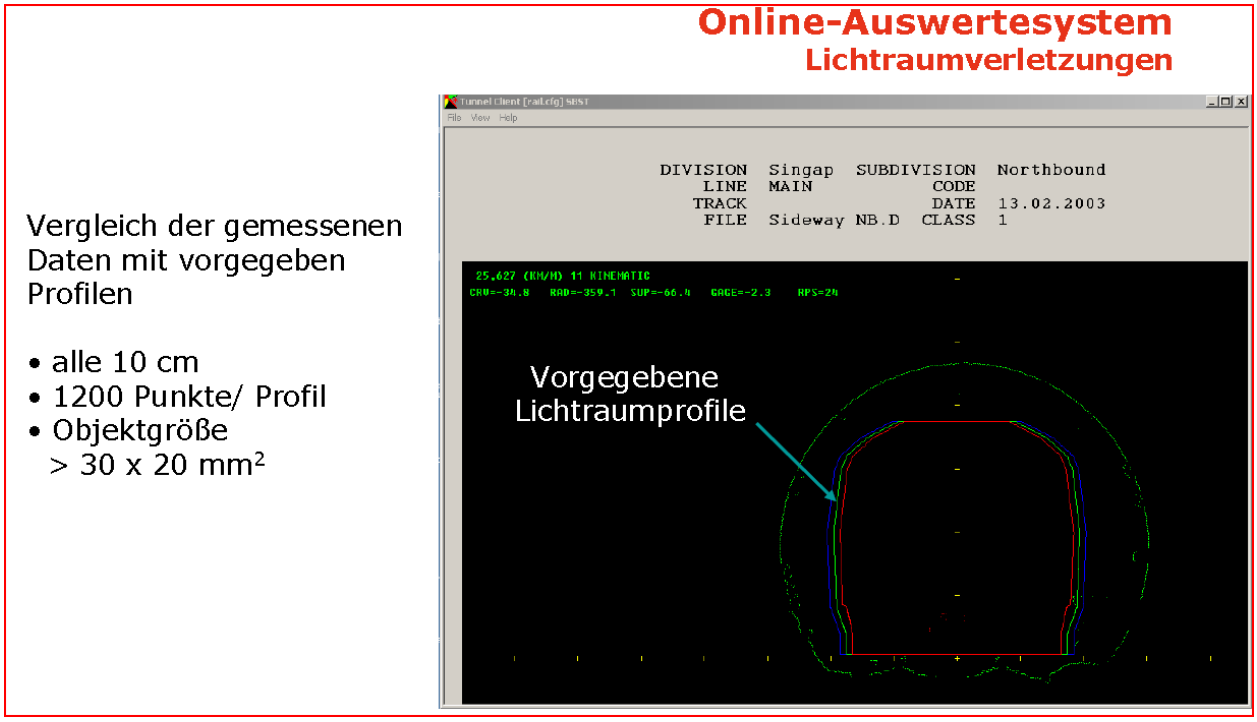


Рисунок 1.5. Результаты съемки совмещенные с габаритными рамками (с разной степенью допуска)

- Основная цель – параметрическая модель пути и выходные результаты: профили, уклоны, планы.
- Все смонтировано на жесткой промеренной станине, которая не меняет свою геометрию во время движения. Снизу смонтированы датчики рельс, измеряющие их положение с точностью 1-2мм. Все измерения синхронизированы. Система распознает объекты размером 3х2см. Стоимость системы и программного обеспечения – 5млн евро.
- Измерение проходит на расстояниях 6м по горизонтали (в обе стороны от оси) и 5м по вертикали).
- Реальная точность измерения габаритов в пределах 2.5м от оси пути – 15мм, в пределах 5м от оси пути – 5см.
- Все данные, собираемые вагонами имеют один унифицированный формат.
- Все заносится в единую ГИС систему, каждое измерение в ГИС пересчитывается в пикетажную систему.

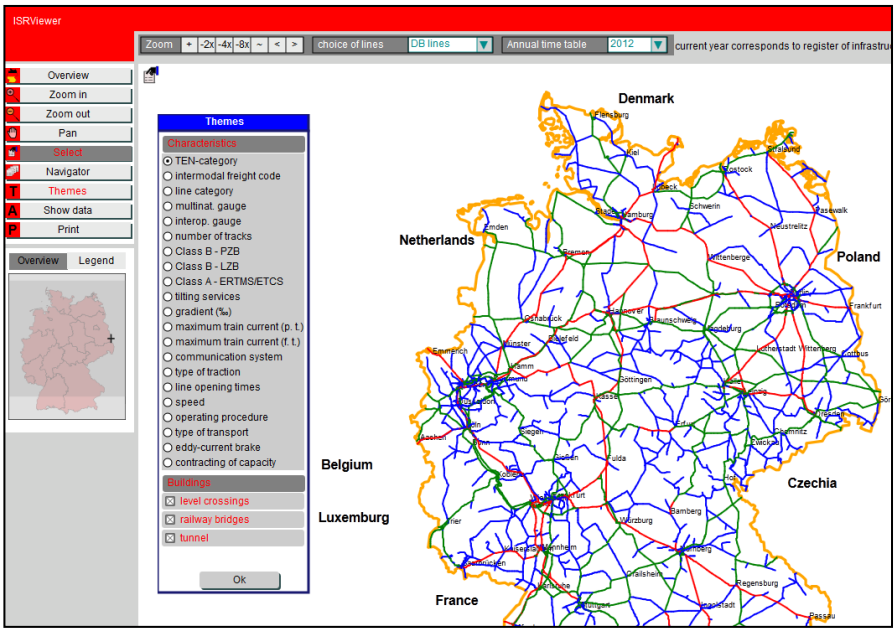


Рисунок 1.6. Веб клиент системы ISR,позволяющей отслеживать состав (вагон) на протяжении всего маршрута на территории Европы

- Исходные (сырые) данные не хранятся - только результаты измерений (профиля, планы) в определенном формате.
- Измерения проводят DBahn, обработкой и выдачей результатов занимаются частные компании (риск до 5 млн евро за недостоверный результат), проверкой данных и пропуском негабаритных грузов – специалисты компании DBahn.
- Основной интерес с точки зрения габаритов представляют пассажирские платформы и тоннели.
- Путеизмерительный вагон может снимать 50 000км в год, реально снимает от 2000 – до10 000км.
- Протяженность дорог DBahn – около 90000км или 34000 км осей. Из них 30 000 км – второстепенные пути, 60 000 км – основные.
- Стоимость обработки данных соизмерима со стоимостью съемки методом МЛС.
- МЛС используется в сложных (для путеизмерительного вагона) случаях.
- Планируется переоснастить существующий вагон новыми сканерами (Riegl) но это дорого (аутсорсинг).
- Новые объекты инфраструктуры ж.д. по данным вагона-путеизмерителя автоматически не детектируются (только в результате ручной обработки).
- DBahn с 1990г разработала алгоритм вычисления параметрической модели пути, которую специалисты компании TechNet адаптировали под систему Windows.

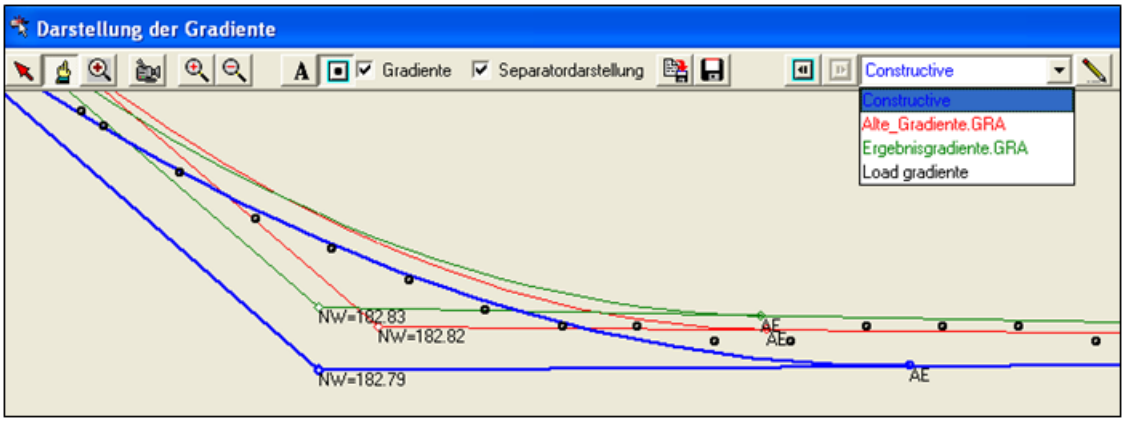


Рисунок 1.7. Вариант использования параметрической модели пути для оптимизации выправки

Специалисты DBahn отмечают три источника ошибок в выходных результатах: пропущенные объекты при съемке, недостаточная точность измерений, пропуск объектов при обработке.

TechNet (Германия)

TechNet – небольшая компания (штат насчитывает 10-15 человек), сформированная на базе берлинского технологического института, имеет 20-ти летний опыт работы в области обработки данных измерений геометрии пути и составления его математической модели. С 2010 года работает в основном по заказу DBahn (Германия), а также швейцарских и австрийских ж/д.

TechNet в первую очередь разрабатывает технологию и программные модули математического описания пути для решения следующих задач:

- Определение оси пути;
- Оптимизация оси под требования DBahn: увеличение скорости и безопасности движения;
- Вычисление межпутевых расстояний;
- Определение расхождения между проектом и реальностью;

- Сглаживание профиля для более плавного движения вагонов;
- Пропуск негабаритных грузов;
- Расстановка систем сигнализации;
- Интеграция систем управления движением и визуализация.

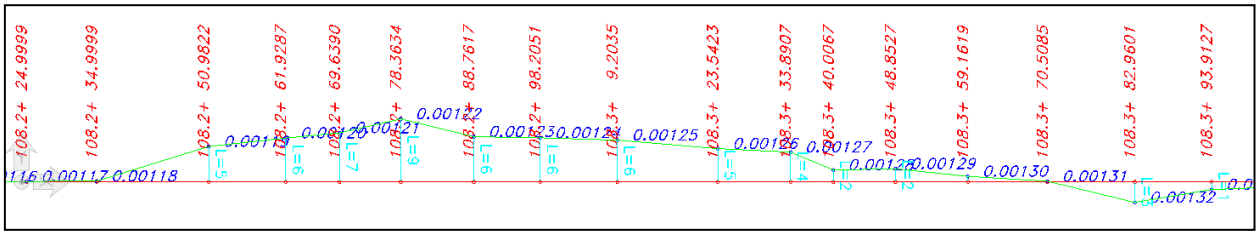


Рисунок 1.8. Результаты расчета выправки пути в графическом виде (план)

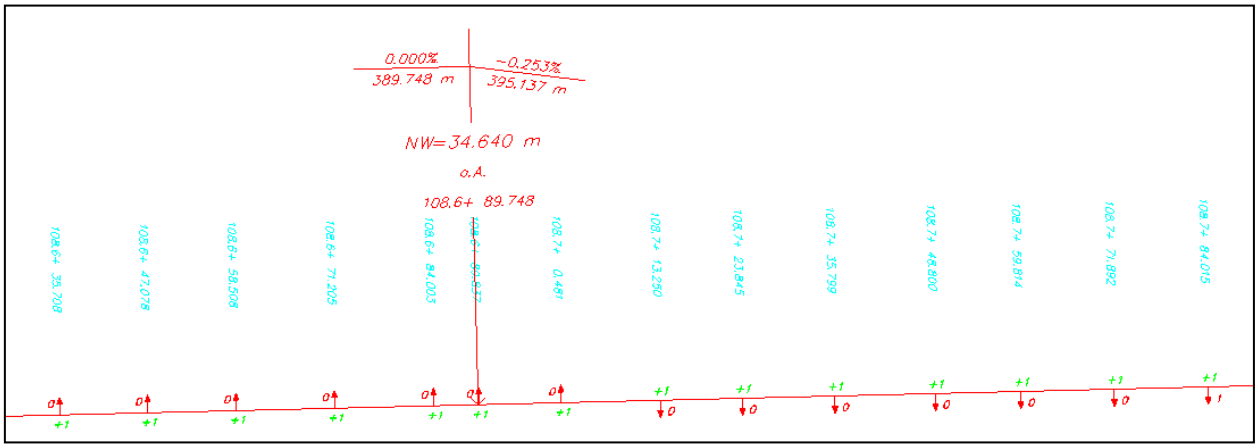


Рисунок 1.9. Результаты градиентов наклона пути в развернутом графическом виде (профиль)

	<--------- Pfeilhoehe --------->			<------ Ueberhoehung ------->		
Ort	Pf.Geom.Form	Radius	Laenge	Ueh.Geom.Form	Ue	Laenge
31564.41	Radius	407.00		überh"hung	50	
31588.12	linear		30.00	linear		30.00
31617.94	Radius	294.00		überh"hung	65	
31675.80	linear		102.00	linear		102.00
31777.45	Gerade			überh"hung	0	
32117.81	Knickpunkt			überh"hung	0	
32117.81	linear		20.00	linear		20.00
32137.83	Radius	-944.00		überh"hung	-20	
32167.85	linear		20.00	linear		20.00
32187.87	Gerade			überh"hung	0	
32260.68	linear		30.00	linear		30.00
32290.63	Radius	580.00		überh"hung	35	
32467.34	linear		30.00	linear		30.00
32497.28	Gerade			überh"hung	0	
32561.89	linear		40.00	linear		40.00
32601.95	Radius	-600.00		überh"hung	-25	
32647.99	linear		20.00	linear		20.00
32668.03	Radius	-2000.00		überh"hung	-25	
32701.38	linear		20.00	linear		20.00
32721.42	Radius	-554.00		überh"hung	-25	
32785.31	linear		35.00	linear		35.00
32820.37	Gerade			überh"hung	0	
32845.22	linear		24.00	linear		24.00
32869.18	Radius	760.00		überh"hung	25	
32922.54	linear		25.00	linear		25.00
32947.50	Gerade			überh"hung	0	
32983.15	Radius	500.00		überh"hung	0	
33021.06	Radius	250.00		überh"hung	0	
33037.36	Radius	250.00		überh"hung	0	
33077.74	Radius	250.00		überh"hung	0	

Externe Verschiebungen/Hoehenkorrekturen

Ort [km]	Verschiebung [mm]	Hoehenkorr. [mm]	Zaehl-Nr.
31.56602	21.3		1
31.57549	26.1	-25.7	2
31.58566	30.1	-16.9	3
31.59524	31.2	-11.9	4
31.60534	18.6	-11.7	5
31.61553	-7.5	-1.9	6
31.62510	-23.8	2.8	7
31.63522	-17.2	8.4	8
31.64537	-15.4	6.7	9
31.65496	-8.4	16.9	10
31.66510	5.7	21.0	11
31.67519	15.6	27.2	12
31.68478	21.3	25.4	13
31.69009	26.5	22.5	14
31.69483	24.0	20.2	15
31.70493	26.5	14.0	16
31.71502	20.6	16.2	17
31.72463	4.4	22.8	18
31.73629	-11.3	15.1	19
31.73709	-11.2		20
31.74692	-3.6	14.2	21
31.75734	0.3	11.0	22

Рисунок 1.10. Результаты расчета кривых в табличном виде и параметры, закладываемые в выправочную машину

Основные результаты, получаемые при работе с программным комплексомTEchNet:

- Достижимые точности вычисления оси пути – 5мм.
- Для построения математической модели в основном используются данные вагона путеизмерителя, сейчас ведется разработка (модуль SiRailScan) по использованию для расчетов данных МЛС.
- Результаты обработки интегрируются в ГИС систему (SiRailView), разработанную по заказу департамента провоза негабаритных грузов и предназначенную для расчета негабаритных мест и их визуализации. ГИС система – автономна, для частного применения (один департамент), но интегрирована с базой данных ГИС DBahn, в которую загружены все проектные оси пути (~60 000км).
- Для оптимизации работы с данными МЛС, последние привязываются к оси пути и при визуализации

пересчитываются в пикетажную систему и представляются в виде «сгущенных» точек , расположенных вдоль оси с шагом 10см.

- Все вычисления габаритов производятся по ТЛО (при этом вычисляется среднее значение по ближайшим соседям).
- Математическая модель пути строится по рабочей поверхности рельс.
- Программное обеспечение имеет реализацию под мобильные устройства.
- По заказу департамента управления движением создана система SiRailLayer для визуализации маршрутов ж/д. Это ГИС система с веб-клиентом, имеющая географическую подложку, оси пути (и рельсы), ИССО, сопутствующую информацию. Все привязано к географическим координатам (мировым, DB и пикетажной системе) с точностью ~ 5см.

Рисунок 1.11. Внешний вид системы SiRailLayer

Рисунок 1.12 Мобильный вариант системы SiRailLayer

Основные модули математического описания пути:

- ATrack-R – автоматический модуль вычисления геометрии пути по данным МЛС (с точностью 5 знаков после запятой). Вычисляет по ТЛО (с шагом 50см) точки искривления пути и вычисляет где находятся: прямые, переходные кривые и кривые. Сравнивает полученную кривую с точками лазерных отражений (ТЛО), выдает статистику (точность вписывания). Процесс интерактивен. Результаты экспортируются в модуль verm.esn.

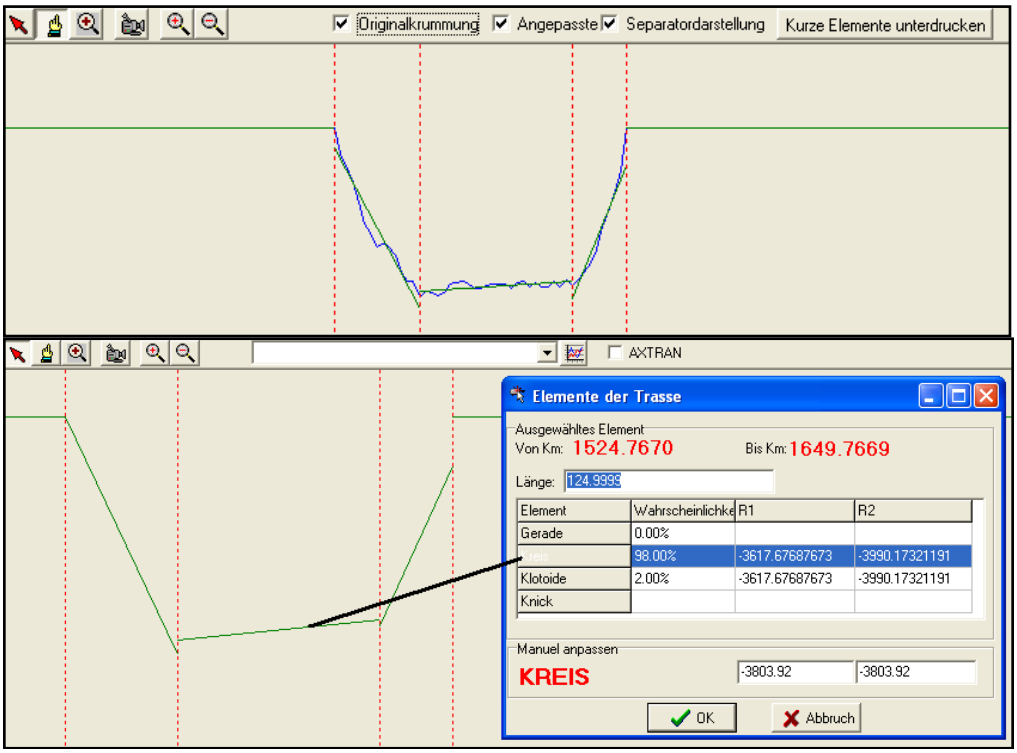


Рисунок 1.13. Автоматическое определение радиусов кривых, и мест их расположения

- Verm.esn – модуль планирования и построения математической модели пути. Рассчитывает график скоростей. Оптимизирует старые кривые под новые скорости (для анализа берут участки по 10км). Рассчитывает кривые по

высоте с указанием мест продавливания и выдавливания. Данные можно экспортировать в выправочные машины.

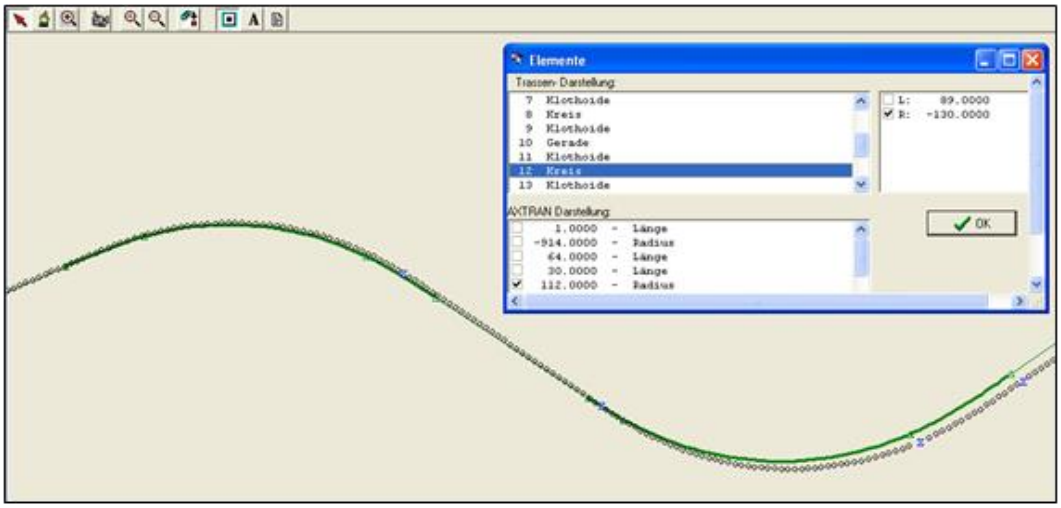


Рисунок 1.14. Полуавтоматическая оптимизация кривых под заданную точность

Создание параметрической модели занимает 10 дней на 100 км.

Выводы по первой главе

- Предложен последовательный, 2-х стадийный метод формирования ЦМП, позволяющий с одной стороны достаточно быстро проводить сравнения проектных и фактических данных по состоянию пути, с другой стороны - обеспечивающий единый формат описания положения пути и других объектов ИЖТ для дальнейшего камерального анализа.
- Установлено что мониторинг инфраструктуры ж.д. транспорта (ИЖТ) невозможно проводить без привязки к высокоточной координатной сети (ВКС), которая должна охватывать все направление целиком, без деления по административным границам. Примечание - это нашло отражение в постановлении Правительства №861 от 27.08.2014 о внесении изменений в Правила установления местных систем координат.

- Доказано, что имея высокоточную координатную сеть (ВКС) вдоль трасс железных дорог, можно производить инженерные изыскания с уверенностью, что результаты повторных измерений будут лежать в одном координатном пространстве и поколения данных, собранных в разное время на одном участке можно будет сравнить между собой.
- Определено, что в качестве элементов высокоточной координатной сети, наиболее пригодных для точной идентификации объектов ИЖТ могут быть использованы анкера и фундаменты опор контактной сети

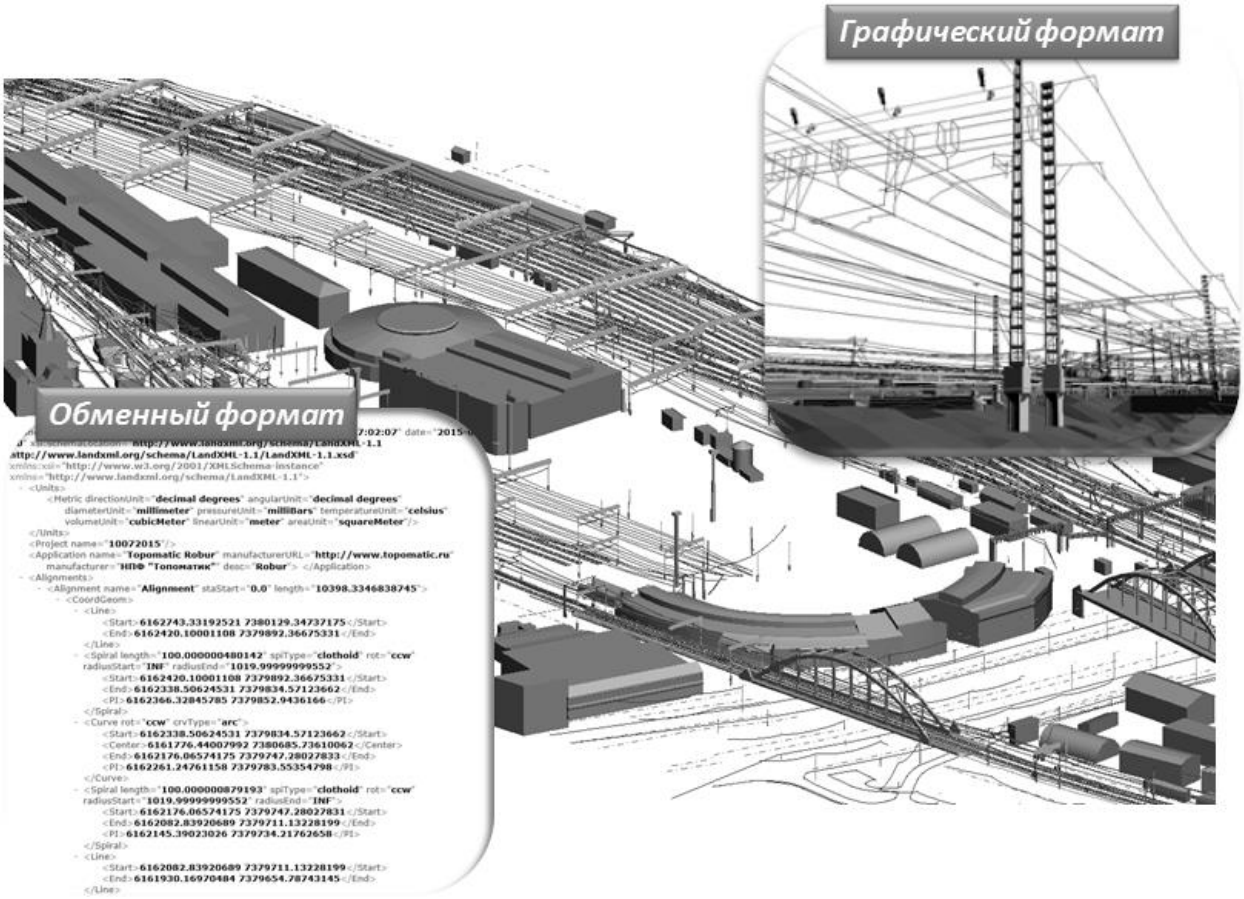


Рисунок 1.15 Полный состав ЦМП

Глава 2. Анализ условий использования мобильного лазерного сканирования (МЛС) – принцип, аппаратура, точности. Обоснование выбора.

Имея высокоточную координатную сеть (ВКС) вдоль трасс железных дорог, можно производить инженерные изыскания с уверенностью, что результаты повторных измерений будут лежать в одном координатном пространстве и поколения данных, собранных в разное время на одном участке можно будет сравнить между собой. Как уже говорилось, мобильное лазерное сканирование имеет огромный потенциал для уменьшения суммарной стоимости изыскательских и проектировочных работ на железной дороге.

Мобильное лазерное сканирование реализует технологическую возможность получения геопространственных данных с движущихся платформ. Сканер монтируется на автомобилях, судах, железнодорожных платформах и интегрируется с фото и видеокамерами, спутниковыми приемниками позиционирования ГЛОНАСС/GPS, таким образом, получается единая система сбора геопространственной информации. Система собирает большой массив данных лазерного сканирования и видеоизображения в сжатые сроки с высокой точностью.

Технология мобильного лазерного сканирования объединяет в себе скорость получения и объемы данных от воздушного сканирования, а детальность и точность - от наземного. В плане конструктивного решения, данная технология является аналогичной лазерной аэрофотосъемке (то есть речь идет о воздушном лазерном сканировании).

Технология выполнения съемки в движении является инновационной в области выполнения измерений для создания картографических материалов, паспортизации, мониторинга и фиксации состояния протяженных инфраструктурных объектов.

Мобильная сканирующая система – является сложным техническим комплексом, позволяющим на движущихся транспортных средствах в любое время суток и при независимо от любых погодных условий собирать данные о том, каково пространственное расположение зданий и сооружений на какой-либо местности. Получение трехмерного изображения может происходить с условием привязки к единой системе координат.

Производители оборудования МЛС

В настоящее время насчитывается с десяток производителей мобильных лазерных сканирующих систем, законодателями в этой области традиционно являются:

- Optech – канадский производитель лазерных измерительных систем
- Riegl – австрийский производитель лазерных измерительных систем
- Topcon – японский производитель геодезического оборудования

Обзор МЛС основных компаний производящих сканеры

Основываясь на таких критичных для съемки ж.д.характеристик, как:

- Точность лазерного дальномера
- Частота излучения лазера
- Максимальная дальность измерений

можно понять, что для обследования ж.д. наиболее подходят сканеры компаний Riegl и Optech.

Характеристика	Optech LYNX M1	TOPCON IP-S2 HD	RIEGL VMX-450
Точность лазерного дальномера	8 мм	до 20 мм	8 мм (на расстоянии 100 м)
Максимальная дальность измерений	200 м, при коэффициенте отражения 20%	50 м, при коэффициенте отражения 10%	300 м, при коэффициенте отражения 10%
Частота сканирования	200 Гц, программируется	300 Гц	200 Гц, программируется
Частота излучения лазера	500 кГц	1300 кГц	550кГц.
Температура эксплуатации	От -10°С до +40°С	От -10°С до +40°С	От -10°С до +40°С
Число сенсоров	1-2	64	1-2
Число цифровых камер	До 4(2МРх)	1	До 6 (5МРх)
Угол обзора камер	73°х59°	360°	80°х65°
Абсолютная пространственная погрешность	+/- 5 см	+/- 1-1.5 см	+/- 2-5 см
Точность по облаку точек (повторяемость)	8 мм	5 мм	5 мм
Класс лазера	1	1	1
Количество отраженных импульсов от одного исходящего	до 4-х	не ограничено	не ограничено (классификация по номеру отражения – первый, единственный, промежуточные,

			последний)
Напряжение питания	12 В	9-28 В	11-15 В
Поле зрения сканирования	360°	360°	360°
Вес системы	78 кг	82 кг	43 кг
Разрешение видеокамер	2MPx доступны также другие камеры	Нет информации	5MPx доступны также камеры (по запросу): 1.4; 2.0; 10; 16 Mpix
Время появления системы на рынке	2007г.	2012 г.	2012 г.
Программное обеспечение			
Расчет траекторий	ApplanixPOSPAC MMS	Velodyne Software	ApplanixPOSPAC MMS
Развертывание облака точек	Optech LMS	Velodyne Software	RiWORD, RiProcess
Получение LAS файлов	Optech LMS	Velodyne Software	RiPROCESS
Уравнивание данных	Optech LMS	Velodyne Software	RiPRECISION
Обработка ТЛО с привязкой к контрольным точкам	Optech LMS	Velodyne Software	RiPROCESS, RiPRECISION, RiSCAN PRO
Преимущества			
Разрешающая способность	+	++	+++
Вписывание головки рельса	+	Нет информации	+++ (более четкий абрис)
Калибровка	нужна	Не нужна	Не нужна

Всепогодность (дождь)	-	-	-
Пакетная обработка данных	Не известно	Не известно	+
Сведение данных разных проездов	Не известно	Не известно	+
Стоимость (включая ПО)	~850т евро	~350т евро	~1200т евро
Сертификация нового МЛС	требуется	не требуется	не требуется
Предпочтение	**++**	**+**	**+++**

Таблица 2.1. Сравнительные технические характеристики мобильных сканирующих систем Optech LYNX M1, TOPCON, RIEGL VMX-450

Основные компоненты системы

Мобильная сканирующая система предполагает наличие:

- подвижной платформы, поглощающей удары и тряску;
- одометра – прибора для измерения пути, который пройден транспортным средством;
- блока управления, интерфейса пользователя и специального ПО для того, чтобы управлять процессом съемки;
- лазерного сканирующего блока (одного или нескольких – в зависимости от поставленной задачи);
- интегральной навигационной системы GPS/IMU - инерциальной навигационной системы IMU;
- цифровых камер высокого разрешения;
- базовой станции или сети базовых станций GPS и приемных устройств глобальной навигационной спутниковой системы.

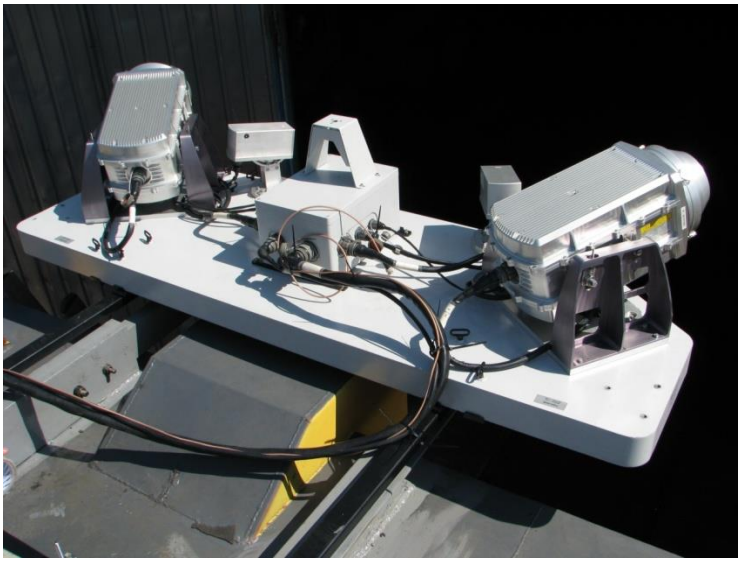


Рисунок 2.1. Внешний вид системы мобильного лазерного сканирования компании Optech

Особенности использовании МЛС на ж/д.

Организационные работы

При мобильной лазерной съемке объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта решается ряд важных вопросов организации работ, одним из которых является выбор транспортного средства, с помощью которого будет осуществляться перемещение сканирующей системы по железнодорожным путям. Иная технология нереализуема, поскольку, чаще всего, отсутствуют параллельные (альтернативные рельсовым) транспортные магистрали, а ограниченная дальность съемки не позволяет с должным качеством выполнить МЛС с позиций вне полосы отвода железных дорог и обеспечить требуемые точности определения фактических значений геометрических параметров ИЖТ.

Ниже приводится перечень основных этапов организационной работы на уровне филиалов ОАО «РЖД», реализованных в 2011 году [15]:

- проведение служебных совещаний с представителями всех взаимодействующих подразделений дороги;
- проработка процедур выделения технических транспортных средств от дороги, определение перечня ответственных ПЧ (ШЧ, ЭЧ, ДС);
- разработка общего и детального плана-графика движения автомотрисы;
- разработка и передача на подписание контрагентам договоров на оказание услуг по аренде автомотрисы;
- согласование мест стоянки и обслуживания техники и личного состава съемочной экспедиции на весь период работ;
- согласование и утверждение «ниток» движения автомотрисы;
- разработка и согласование специальных технических условий крепления сканера на выделенных транспортных средствах;
- разработка и рассылка телеграфного распоряжения руководителя железной дороги;
- организация сдачи зачетов руководителями экспедиционных бригад;
- получение разрешений на производство геодезических работ в полосе отвода железной дороги;
- получение пропусков на выполнение съемочных работ на территории особо охраняемых искусственных сооружений (ИССО);
- разработка, подписание и рассылка телеграфного распоряжения руководителя работ по региону;
- разработка Программы работ, как дополнение к ТЗ на съемку;
- согласование и утверждение Программы работ.

а также перечень необходимой разрешительной документации и состав основных мероприятий, реализуемых на уровне подрядной

компании (и головной, и субподрядных организаций), как набор основных условий проведения работ на российских железных дорогах:

а) Для юридического лица:

- Учредительные, налоговые и регистрационные документы;
- Подтверждения права собственности (аренды, лизинга) на используемое высокоточное геодезическое оборудование и вычислительную технику;
- Копии лицензий на работу со сведениями, составляющими государственную тайну;
- Копии лицензий на проведение работ по геодезии и картографии;
- Копия свидетельства СРО с допуском к «видам работ, которые оказывают влияние на безопасность особо опасных технически сложных и уникальных объектов»;
- Подписанный и зарегистрированный договор (ТЗ, ЧТЗ) на выполнение высокоточных съемочных работ (с ОАО «Росжелдорпроект»);
- Договор на аренду автомотрисы (с Дирекцией инфраструктуры железной дороги – филиала ОАО «РЖД»)

б) По используемому высокоточному измерительному геодезическому оборудованию:

- Свидетельство о подтверждении типа измерений на лазерный сканер, геодезические приемники ГЛОНАСС/GPS и иное оборудование (внесение в единый государственный реестр);
- Аттестат соответствия по результатам специальной проверки вычислительной техники иностранного производства;
- Технический паспорт;
- Поверочные сертификаты;
- Калибровочные сертификаты;
- Сертификат соответствия ГОСТ Р;

- Сертификат о происхождении товара (СТ-1);
- Сертификат соответствия требованиям «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности».

в) Для непосредственных исполнителей работ в полосе отвода железной дороги:

- Личные документы;
- Право на выполнение работы на территории Российской Федерации (трудовой договор, договор подряда, разрешение для граждан иностранных государств и др.);
- Допуск на объекты железнодорожного транспорта (включение в согласованные списки исполнителей геодезических работ на дороге);
- Пропуск Центра безопасности железной дороги (при работах на ИССО);
- сдача зачетов на допуск к работам на железной дороге;
- командировочное предписание.

Сканеры класса Riegl VMX-250 или Lynx Mobile Mapper монтируются на транспортном средстве и готовятся к работам одномоментно на весь период съемки, а демонтаж системы осуществляется после проведения всех полевых работ совместно специалистами - железнодорожниками и представителями компании - эксплуатанта системы.

Как указывалось ранее, рабочий измерительный блок сканера Riegl VMX или Lynx Mobile Mapper устанавливается на крыше железнодорожного транспортного средства без выхода за габариты автомотрисы АСГ-30П по высоте, а также продольный и боковой габариты. Конкретное положение сканера определяется возможностью проведения съемки без затенения сектора сканирования крышей и боковыми стенками мотрисы.

Блок управления сканера размещается в кабине на стороне помощника машиниста, на полу, без дополнительной механической

фиксацию. При этом силовой и управляющий кабели длиной 5 м вводятся в кабину с крыши через сдвижное боковое окно автомотрисы со стороны, противоположной месту нахождения машиниста данного транспортного средства. Ввод стандартного кабеля меньшей длины (3м) может, при необходимости, быть выполнен через нишу прожектора. При этом следует учитывать, что включение прожектора во время работы в данном случае исключается, а, следовательно, планирование съемки (движения автомотрисы) должно осуществляться только рабочей кабиной вперед.

Подсистема электропитания, формируемая на основе аккумуляторных батарей 12V большой емкости, размещается, как правило, в кабине рядом с блоком управления сканера или в пассажирском отсеке.

Далее перечислены основные характерные особенности проведения мобильного лазерного сканирования железных дорог, полученные на основе съемки 2011-2013гг.

Организация движения по маршруту съемки.

Движение автомотрисы по заданному железнодорожному пути в направлении, где развернуты наземные бригады геодезического базового ГЛОНАСС/GPS-обеспечения осуществляется в строгом соответствии с графиком следования, определяемым согласованной «ниткой» (выделенным «окном»).

При расчете «ниток» движения мобильного комплекса по рабочему маршруту следует учитывать среднюю скорость перемещения. Она, как правило, ограничивается заданными параметрами сканирования и необходимостью получения необходимой плотности точек лазерных отражений. Та, в свою очередь, определяет требуемые ТЗ показатели детальности и точности геодезической съемки. Среднестатистические показатели средней скорости автомотрисы АСГ-30П при работах в 2011

году для условий МЛС со сканером VMX-250 Riegl и Lynx Mobile Mapper составляют величину в 55 км/ч. Это значение параметра средней скорости прохождения «нитки» позволяет выполнять работы в диапазонах максимальной скорости движения, ограниченной условиями получения требуемого качества съемки (не более 68…70 км/ч). Снижение фактической скорости перемещения комплекса на участках сканирования (до полной его остановки, в отдельных случаях) возможно из-за необходимости взятия на борт машинистов сопровождения, различных диспетчерских запретов на движение, кратковременных (до 40 секунд) рабочих остановок через каждые 30…50 минут съемки, требующихся для списания навигационных ошибок системы МЛС и пр.

Необходимо учитывать, что предельная скорость автомотрисы АСГ-30П, определяемая конструктивными особенностями данного транспортного средства равна 80 км/ч и в случае длительных вынужденных остановок, движение даже на этой скорости не позволит осуществлять следование по маршруту съемки в строгом соответствии с «ниткой». Это, в свою очередь, может привести к:

- выходу за границы предельной нормы рабочего времени машинистов;
- еще большему срыву графика движения из-за наслаивания противоречий с иными участниками железнодорожного движения;
- попаданию в темное время суток (ограничение по фотосъемке);
- отключению электропитания сканера из-за разрядки аккумуляторов;
- отключению базовых GPS-станций из-за разрядки аккумуляторов;
- необходимости согласования новых сроков привлечения машинистов сопровождения от взаимодействующих ПЧ;

- вынужденной остановке на нерасчетных участках маршрута и последующему перепланированию графика движения и т. д.

Особые условия работ и меры безопасности.

На этапе организации МЛС и в ходе полевых съемочных экспедиций был выявлен ряд важных факторов, критически влияющий на качество, надежность и безопасность реализации отдельных этапов и всей программы работ в целом. Своевременный учет этих факторов и правильная оперативная реакция на возникающие проблемы является залогом получения заданных результатов сканирования и высокого качества исходных цифровых материалов полевой съемки.

- *Наличие снежного покрова.*

Выполнение мобильного лазерного сканирования объектов инфраструктуры железных дорог является, по сути, коридорной съемкой полосы отвода с заданной шириной влево-вправо относительно осей главных путей (как правило, ± 50м). При организации съемочных работ в северной части Центрального региона в апреле-мае месяце необходимо учитывать наличие значительных остатков снежного покрова, существенно искажающих рельеф и влияющий на возможности перемещения автотранспортной техники экспедиционного сопровождения. Данный факт может потребовать либо сдвига начального этапа полевых работ, либо согласования указанных особенностей (по срокам, качеству моделирования и продолжительности этапов съемки) в техническом задании проекта.

- *Учет погодных условий по маршруту съемки.*

Проведение полевой съемки, помимо организационных и технических факторов, может принципиально ограничиваться погодной (климатической) обстановкой. Так, объективно существует ряд условий по температуре наружного воздуха, наличию атмосферных осадков, продолжительности светлого времени суток и др., которые требуют обязательного учета при анализе фактической погоды, прогнозе ее

развития, организации метеорологического обеспечения работ, а также разработки различных резервных вариантов действий.

- *Сварочные и монтажные работы.*

Установка оборудования на автомотрисе может существенно ограничиваться отсутствием требуемых материалов и комплектующих, приобретаемых, как правило, на этапе подготовки монтажа (совместными усилиями исполнителя работ и ПЧ, за наличный расчет). Одновременно требуется участие квалифицированного сварщика, обеспечивающего крепление стационарной части рамы-платформы и иных специалистов дистанции пути, производящих подготовку легкосъемной части платформы (сверление, обрезка металла, изготовление крепежа и пр.) при условии строгого соблюдения технологических особенностей и специальных мер безопасности для такого вида работ.

- *Нормы рабочего времени машинистов.*

Важным фактором работ, выявленным в ходе подготовки и проведения съемочных экспедиций в 2011 году стали жесткие требования по нормированию рабочего времени машиниста автомотрисы и его помощника. Существуют несколько вариантов учета хронологических особенностей деятельности экипажа, а именно: а) если рабочий период (цикл наработки силовой установки, фиксируемый аппаратурой бортового контроля) составляет 8 часов, то затем должно следовать не менее 8 часов отдыха экипажа после выключения двигателя автомотрисы. При этом необходимо учитывать, что, как правило, не менее 3 часов из данного срока требуется выделить на запуск силовых агрегатов автомотрисы, опробование тормозов, а также других систем, выдвижения ПЖС к месту старта и его маневрирование после окончания работ. Таким образом, при средней скорости движения поезда в 55 км/ч, протяженность планируемого рационального участка работ каждого съемочного дня может быть не более 275 км; б) если

рабочий период составляет 12 часов, то затем также должно следовать не менее 8 часов отдыха экипажа после выключения двигателя автомотрисы. Работы продолжительностью 12 часов разрешается выполнять в течение 2 последовательных дней, затем должен быть организован отдых экипажа (перерыв в съемке) не менее одних суток. С учетом особенностей, указанных выше, протяженность рационального дневного участка съемочного маршрута при этом, может достигать 500 км. Одновременно с перечисленными условиями, на общий объем планируемой (выполняемой) съемки в ходе продолжительной экспедиции влияют общие требования по нормированию рабочего времени КЗОТ, необходимость проведения регламентного обслуживания автомотрисы, оперативно вводимые диспетчерские ограничения в движении, темп расстановки базовых спутниковых станций наземного геодезического обеспечения, отказы техники, человеческий и многие другие факторы.

- *Взаимодействие с машинистами сопровождения.*

Поскольку, из-за особенностей организации работы в ПЧ, выделенный экипаж (машинист) автомотрисы, как правило, не имеет обкатки (допуска) на всем планируемом маршруте съемки, его работа должна обеспечиваться наличием на борту представителя той или иной железнодорожной администрации. Поскольку, отсутствие на борту автомотрисы (неприбытие, несвоевременная явка) машиниста сопровождения является технологическим запретом на дальнейшее движение поезда по маршруту съемки (срывом работ), организация этого вида обеспечения требует личного участия и особого внимания руководителя работ Заказчика

- *Обеспечение сохранности оборудования и техники.*

Поскольку съемочное оборудование, размещаемое на автомотрисе, имеет большую материальную ценность, а также является уязвимым и легкоповреждаемым высокоточным геодезическим измерительным

устройством, требуется предпринимать особые меры по соблюдению его целостности и сохранности.

Опыт организации и производства высокоточных съемочных работ показывает, что определение конкретных видов (форм) ответственности сторон за сохранность оборудования при проведении МЛС, является сложной юридической процедурой, не имеющей однозначного решения и должно быть установлено на основании договора между всеми участниками проекта.

- *Расстановка временных базовых станций; спутниковая обстановка.*

Своевременная расстановка временных наземных базовых ГЛОНАСС/GPS-станций в строгом соответствии с планом геодезического обеспечения на участках МЛС является залогом качественного и точного определения требуемых пространственно - технических параметров объектов железнодорожной инфраструктуры. Руководитель экспедиции обязан четко знать общий план базового обеспечения. Он дает команду на включение и выключение сети спутниковых приемников, принимает решение о вариантах работы автомотрисы при невозможности использования (по техническим причинам или из-за организационных проблем) части базовых станций, а также периодически оценивает спутниковую обстановку по маршруту съемки. Малое количество видимых навигационных спутников, неудовлетворительное их взаимное расположение (особенно в высоких широтах), плохие условия приема сигнала GPS-антенной (наземных станций или РИК) под контактным проводом и другие обстоятельства могут стать существенным фактором снижения точности сканирования и даже привести к невыполнению работ.

- *Возможные нарушения работы инерциально-навигационной системы.*

По опыту полевой съемки 2011 года были выявлены два объективных фактора, которые приводили к существенному снижению качества сканирования на отдельных этапах работ: 1 - пропадание спутниковых сигналов и сбой аппаратуры МЛС при движении в тоннелях или под широкими мостами; 2 – невозможность получения точной выставки инерциально-навигационной системы (ИНС) перед стартом без проведения специального маневрирования. Первый фактор однозначно требует внеплановой остановки движения транспортного средства и перезапуска системы. Второй - определяет необходимость, как можно более раннего рабочего запуска аппаратуры (еще на месте стоянки), чтобы на этапе выдвижении комплекса к месту старта было проведено маневрирование автомотрисы по скорости и направлению с целью списания навигационных ошибок ИНС. Особенности данных работ определяются техническими ограничениями той или иной сканирующей системы (Riegl или Lynx) и требуют тесного взаимодействия оператора системы, машиниста поезда и станционных диспетчерских служб.

- *Особенности заправки автомотрисы.*

Как указывалось ранее, заправка автомотрисы вне базы приписки и, особенно, на другой железной дороге требует тщательной предварительной проработки данного мероприятия, возможно с выездом организатора экспедиции на место будущей стоянки и снабжения ГСМ. Это определяется недостаточной урегулированностью таких вопросов между администрациями филиалов ОАО «РЖД» (поскольку ранее данные эксклюзивные задачи на дорогах не решались), а также отсутствием единых формализованных процедур отпуска и учета топлива.

- *Телеграфное оповещение.*

Важным вопросом, требующим непосредственного персонального контроля со стороны руководителя полевой экспедиции, является

организация телеграфного оповещения заинтересованных железнодорожных подразделений информацией о планах работы комплекса МЛС, сроках его перемещения по съемочным маршрутам и времени утвержденных «ниток» («окон») движения, допуске специалистов на объекты работ и пр.

- *Обеспечение съемочного перекрытия.*

Стратегия достижения заданной ТЗ плотности точек МЛС и обеспечения максимального съемочного покрытия состоит в проведении лазерного сканирования одного и того же участка железной дороги по первому и второму главному пути (по маршруту «туда и обратно»). В подавляющем большинстве случаев такой метод обеспечивает и закрытие «мертвых» зон (особенности рельефа, железнодорожные составы, станционные здания и сооружения), и устранение локальных ошибок сканирования, возникающих при съемке по одному из направлений, и нивелирование возможного сбоя аппаратуры ГЛОНАСС/GPS по причинам, указанным в 5. 6. 9. Однако, существуют отдельные участки железных дорог (менее 5% общей протяженности съемочных маршрутов), для которых требуется особой учет их особенностей, состоящих в значительном (более 200м) боковом удалении главных железнодорожных путей друг относительно друга. В случае получения неудовлетворительных результатов сканирования объектов железнодорожной инфраструктуры на одном из главных маршрутов, проезд по второму не обеспечит выполнение поставленной задачи. В таких ситуациях, в связи с высокой затратностью выполнения повторной мобильной съемки, рациональным для данного локального участка является использование наземного лазерного сканирования.

- *Медицинский осмотр. Выдача предупреждений.*

Экипаж автомотрисы должен проходить регулярное ежегодное плановое медицинское обследование. Дополнительно, накануне (и после) каждого очередного выезда (в соответствии с регламентом

железной дороги) требуется личное прохождение машинистом и его помощником специального медицинского контроля и получение предупреждений по маршруту съемки в диспетчерских подразделениях станции отправления поезда.

- *Работа в пределах зоны ответственности разных дорог.*

При выполнении МЛС в пределах зон административной ответственности нескольких железных дорог появляется необходимость дополнительного согласования всех элементов программы съемки у нескольких контрагентов с различными требованиями по организации работы, оформлению документов и порядку взаимодействия:

- согласование «ниток» в диспетчерских службах обеих железных дорог происходит последовательно в несколько этапов относительно точки «входа - выхода» на другую территорию;
- требуется заблаговременное решение вопроса наличия и использования различных сменных «накопителей» системы бортовой регистрации «КЛУБ», количество которых должно соответствовать числу отдельных (дневных) этапов съемочного маршрута;
- экипаж автомотрисы, как правило, не имеет обкатки в пределах «чужой» дороги и требуется заблаговременная организация выделения подготовленных машинистов сопровождения в соответствии с правилами и порядками, действующими на территории другой железнодорожной администрации;
- требуется оперативное решение административно-технических вопросов стоянки, охраны и обслуживания железнодорожных транспортных средств, имеющих иную «юрисдикцию»;
- требуется наличие технического ресурса у всех экспедиционных железнодорожных транспортных средств, а также обязательное

присутствие на борту автомотрисы необходимой разрешительной документации и т. д.

- *Экипировка личного состава.*

Организатору геодезической съемки необходимо знать требования, введенные руководством российских железных дорог в 2011 году об обязательном нахождении работников в полосе отвода, на транспортном железнодорожном средстве или при осуществлении профессиональной деятельности на территории железнодорожных станций в специальном сигнальном жилете (в любое время года и суток).

Результаты мобильного лазерного сканирования на ж.д. (точность позиционирования, точность уравнивания данных, полученных в разный период времени) между собой.

Результатом работы системы мобильного лазерного сканирования является набор файлов бинарного формата в которых в сжатом виде содержится информация о параметрах инерциальной навигационной системы, данных спутниковых наблюдений, данные измерений, данные фотофиксации. Это так называемые «сырые» данные (raw data). Вся информация синхронизована между собой временными отметками.

Целью *базовой (preliminary)* обработки является преобразование первоначальных собранных данных (raw data) в массив точек, имеющих точные географические координаты и первоначальная классификация этих точек на точки, принадлежащие земной поверхности и не принадлежащие.

Базовая обработка – очень важная процедура, включающая в себя вычисление траектории, декодирование и уравнивание данных. Качество базовой обработки напрямую влияет на точность позиционирования.

Точность позиционирования определяются путем сравнения данных МЛС с координатами реперных объектов, полученных наземными средствами измерений.

Определение ошибки позиционирования на примере данных Курск-Белгород

1. Точки лазерного отражения (ТЛО) предварительно были разделены по проходам (отдельно по направлениям на Курск и на Белгород), каждый из них был проанализирован и составлен суммарный уравненный файл точек лазерного отражения.
2. Уравненные данные ТЛО были трансформированы в местную систему координат в соответствии с инструкцией:
3. Плановые координаты ТЛО (WGS84/UTM37) были преобразованы: +500 000 +№зоны + №дороги + поправка.
4. ТЛО (WGS84/UTM37) по высоте были приведены к геоиду EGM 2008, определено точное положение по высоте, убрана систематическая ошибка по высоте.
5. В результате, анкеры (и другие объекты инфраструктуры жд) на которых размещены пункты опорной геодезической сети (ОГС) опознаются по результатам лазерного сканирования в 95% случаев, а реперные объекты - в 90%. Оставшиеся 5% и 10% соответственно определены как «недостоверные». При этом нужно учитывать, что ОГС можно использовать только для верификации высотного положения.
6. Для вычисления отклонения ТЛО от реперов и пунктов ОГС по высоте, предварительно были отобраны точки, попадающие на твердую плоскую поверхность (анкер, платформа, пикетный столбик), как на рисунке 2.2.

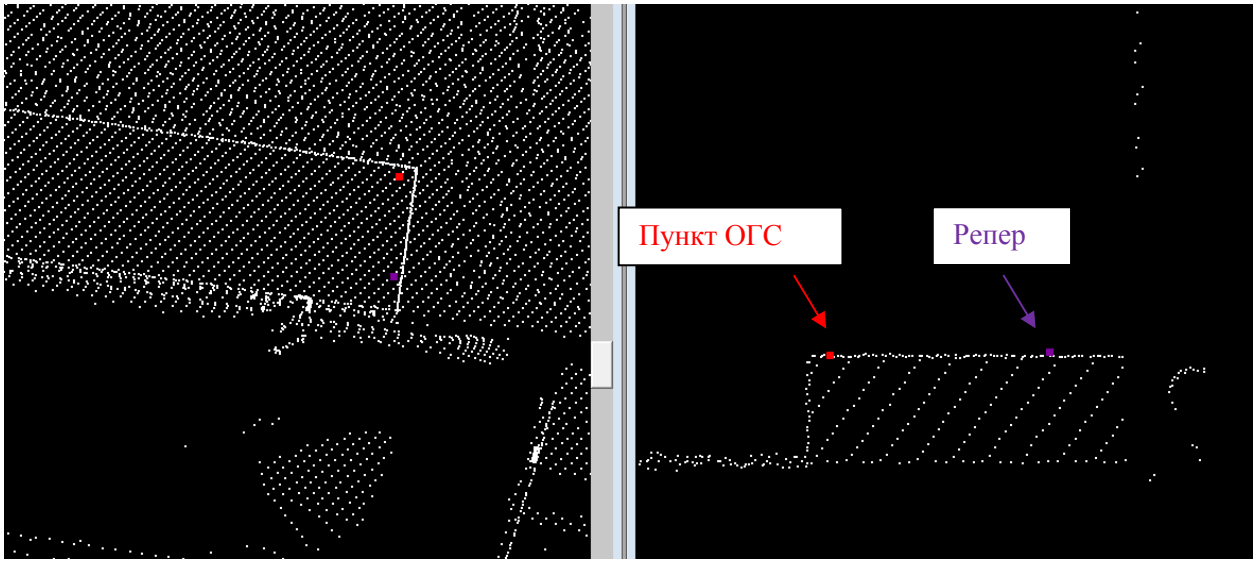


Рисунок 2.2. Платформа ж.д. в точках лазерного отражения

Из анализа также были исключены:

- реперные измерения, сильно отличающиеся (более чем на 30 см) от значений пунктов ОГС, находящихся в непосредственной близости друг от друга (на расстоянии до 3м).
- реперные измерения, имеющие значительную разбежку по высоте, как на рисунке 2.3.
- реперные измерения и значения пунктов ОГС, лежащие на оттяжках и других не «плоских» объектах, как на рисунке 2.4.

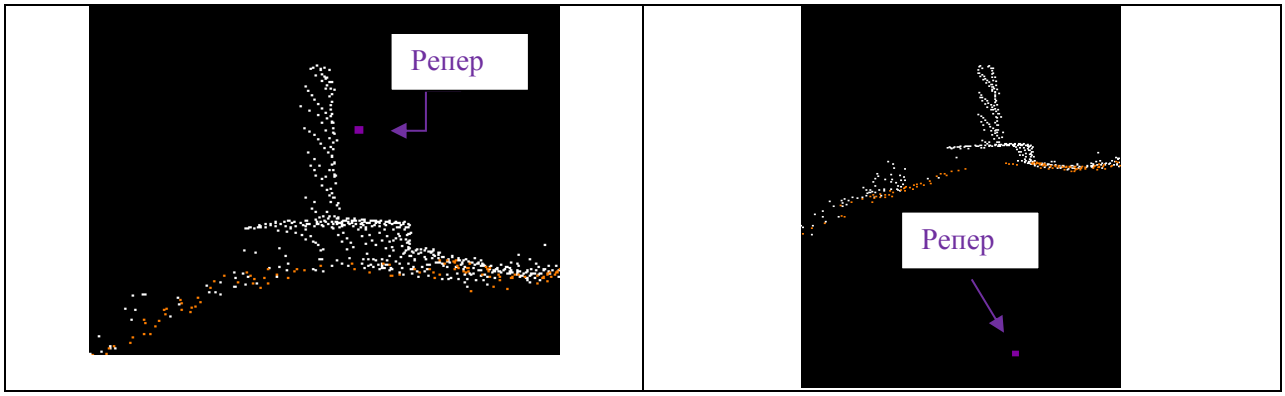


Рисунок 2.3. Репера на пикетных столбиках (расстояние между ними ~400м, разница по высоте ~1.5м)

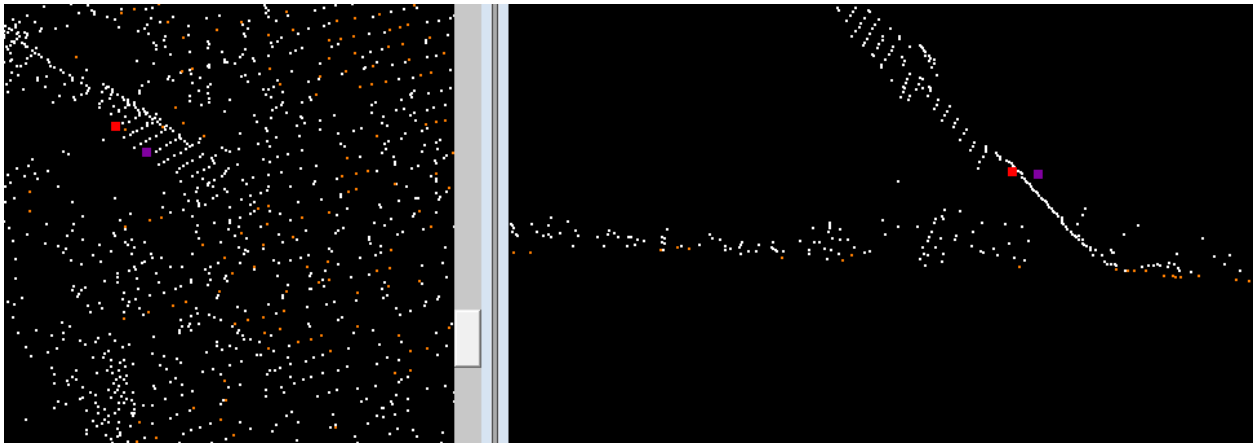


Рисунок 2.4. Репера на оттяжках контактной сети

В результате, на 160 км трассы было отобрано 98 реперных объектов и 101 пункт ОГС, расположенных равномерно на протяжении участка Курск-Белгород, однозначно идентифицируемых на ТЛО и пригодных для проведения сравнения по высоте.

Вокруг определенных таким образом эталонных объектов были отобраны точки лазерных отражений в радиусе 0.5м и вычислено среднее квадратичное отклонение. Результаты расчетов приведены в таблицах 2.2 и 2.3. Обобщая результат, среднее отклонение ТЛО от реперов по высоте составляет 2.5см, от пунктов ОГС – 3.7см.

G:\Курск-Belgorod\репер_new.txt					
Number	Easting	Northing	KnownZ	Laser Z	Dz

1	7308535	5738620	170.469	170.483	0.014
3	7308505	5737673	170.616	170.649	0.033
5	7308866	5736841	168.68	168.719	0.039
15	7312818	5733122	184.96	184.898	-0.062
...	...	...	...	...	...
270	7332347	5614376	119.583	119.581	-0.002
Average	dz		0.025		
Minimum	dz		-0.139		
Maximum	dz		0.152		

Average	magnitude		0.049		
Root	mean	square	0.061		
Std	deviation		0.056		

Таблица 2.2. Сравнение ТЛО и реперных объектов

G:\Msk-Belgorod\ОГС.xyz					
Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz

1	7308535	5738620	170.484	170.475	-0.009
2	7308549	5738142	172.209	172.219	0.01
3	7308505	5737672	170.631	170.638	0.007
4	7308675	5737065	166.904	166.922	0.018
...	...	...	...	...	...
242	7330910	5610140	119.752	119.779	0.027
Average	dz		0.037		
Minimum	dz		-0.052		
Maximum	dz		0.098		
Average	magnitude		0.041		
Root	mean	square	0.051		
Std	deviation		0.035		

Таблица 2.3. Сравнение ТЛО и пунктов ОГС

Подобная проверка позволяет определить качество самих реперных объектов, которые, к сожалению, не всегда соответствуют заявленным параметрам точности и это ключевой момент, влияющий на точность всех дальнейших вычислений

При анализе, было выявлено несоответствие по высоте между реперами и пунктами ОГС, измеренными на одних и тех же объектах (см. рисунок 2.5.).

Кроме реперов, важное значение для проверки данных играют электронные метки (ЭМ), географические координаты которых также измеряются наземными инструментальными средствами. Проверка взаимного расположения данных МЛС и ЭМ позволяют исключить

ошибочные измерения последних и выявить уход траектории (и данных) за счет накапливаемых ошибок инерциальной системы.

Далее приведены поясняющие рисунки, которые встречались на практике при обработке данных МЛС 2012г.

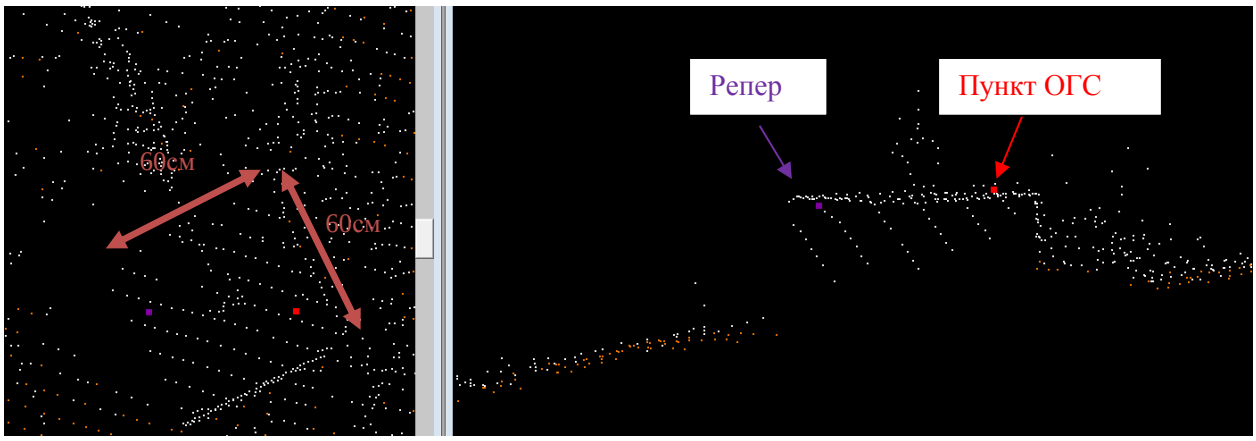


Рисунок 2.5. Расхождение по высоте на анкере ~13 см

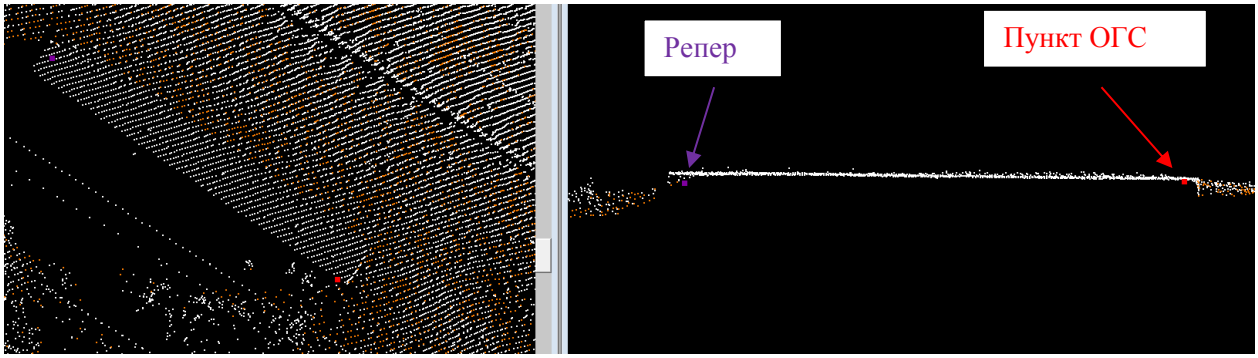


Рисунок 2.6. Расхождение по высоте на железобетонном блоке~17 см

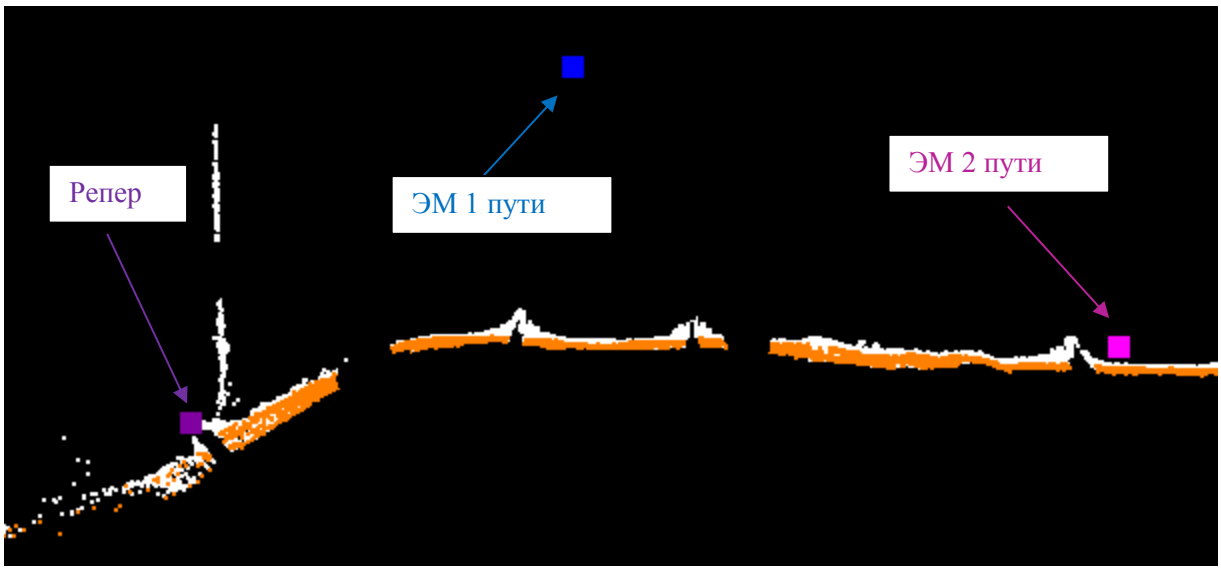


Рисунок 2.7. Расхождение между репером и электронными метками (ЭМ). ЭМ по высоте не бьются на ~2.2 м

Анализ данных (около 3000км съемки) полученных методом МЛС в целях определения параметров инфраструктуры ж.д. позволяет сделать следующие выводы по использованию реперных объектов:

1. Реперные объекты должны обязательно быть и располагаться равномерно вдоль ж.д., если целью сбора данных является их последующая верификация (сверка с данными наземных измерений и последующих измерений МЛС).

2. Реперные объекты должны однозначно идентифицироваться в ТЛО в плане и по высоте с точностью не хуже 1см. Это означает что существующие реперные объекты в виде анкеров опор КС обеспечивают точность совмещения данных с точностью не лучше 5 см.

Пример неоднородности данных, получаемых в результате сканирования мобильной лазерной системой

Рассогласование между сканерами

Сама система МЛС устроена таким образом, что съемка осуществляется одновременно двумя лазерными головками, развернутыми друг относительно друга на 100 градусов.

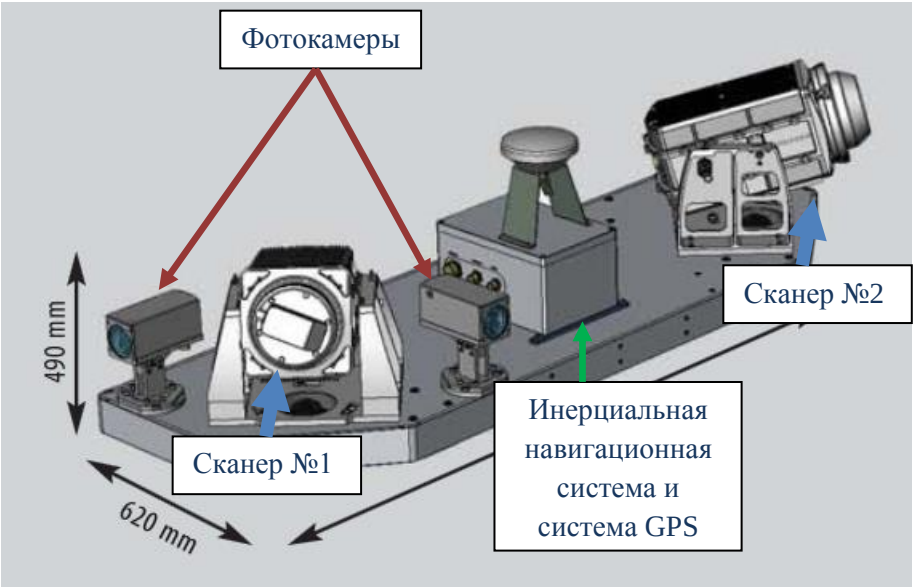


Рисунок 2.8. Компоновка элементов мобильной лазерной системы Optech

Это означает получение измерений до одного объекта от двух приборов, что является потенциальной причиной рассогласования данных. Обычно система калибруется на заводе-изготовителе и расхождение между данными (параметр «повторяемость измерений») составляет по паспорту не более 8мм, что является достаточным для выполнения изыскательских работ на ж.д. Но на практике это, к сожалению, не так.

Пример №1: Система МЛС Trimble MX8.

Плотность ТЛО в пределах земляного полотна ЖД - 1430 точек на кв. метр

В ходе анализа качества полученного облака точек лазерных отражений, было выявлены расхождения в данных между сканерам в пределах одного прохода в плане 3,95 см; по высоте 3,76 см.:

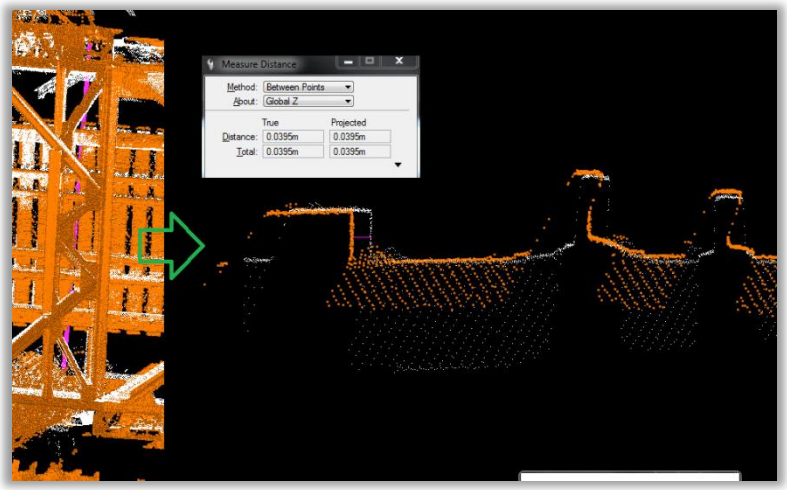


Рисунок 2.9. Расхождение между сканерами (по рельсам)

в) Плановые расхождения на опорах ЛЭП моста 8см:

Рис__. Расхождение сканеров на опорах ЛЭП.

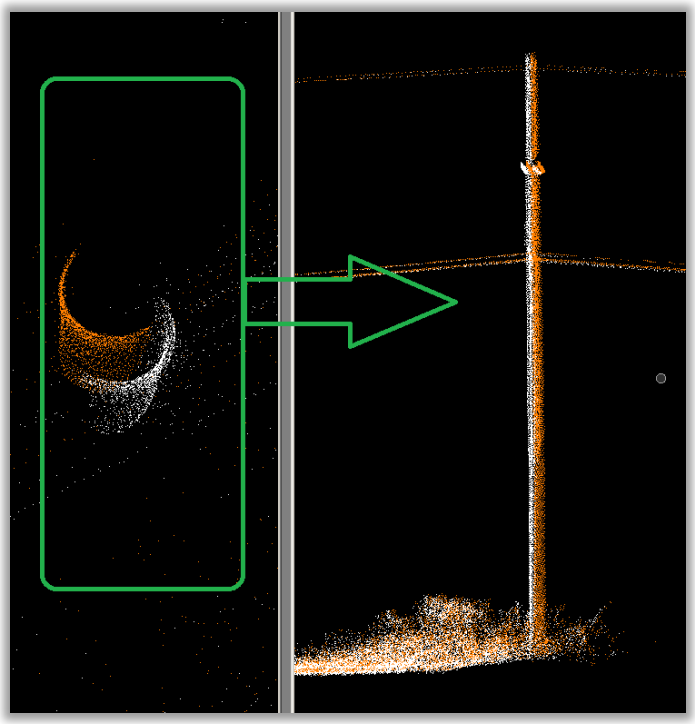


Рисунок 2.10. Расхождение между сканерами (по рельсам)

Здесь приведен один из худших вариантов, но даже на последних модификациях сканера Riegl VMX-450 (специально адаптированных под съемку ж.д.) встречаются рассогласования до 2 см.

Теоретически причина возникновения данной погрешности состоит в том, что измерение до конкретного объекта сканером №1 и сканером №2 происходят в разные моменты времени (сменились угловые координаты носителя, «ушла» GPS-обстановка).

Дополнительные угловые погрешности в измерения вносит тот факт, что платформа, на которой располагается сканирующая система, имеет базу около 25 метров, лазерный сканер установлен впереди. В кривых участках траектории, происходит рассогласование векторов движения носителя и движения сканерной системы, которое не компенсируется стандартными программными средствами обработки первичных данных.

Факторы, влияющие на точность данных мобильного лазерного сканирования

Важность вопроса точности лазерных данных не нуждается в дополнительных комментариях, поскольку лазерный сканер есть, по определению, средство геодезических измерений. Однако большое внимание должно быть уделено правильной трактовке такого понятия, как точность [12].

Как известно из общей метрологии: проблема точности любого средства измерения сводится к исследованию источника и характера ошибок между истинным и замеренным значением измеряемого параметра. Применительно к лазерным измерениям можно предложить несколько аспектов рассмотрения этого вопроса. Возможные способы классификации погрешностей:

- паспортные и реальные;
- приборные и методические;
- по источнику происхождения.

Как и для других средств дистанционного зондирования и измерения вообще, следует различать абсолютную и относительную точность

измерения, а также такие категории, как точность и чувствительность (или разрешающая способность).

Методические погрешности, по определению, возникают от того, что для получения результата измерений в конечные сроки и с «разумными» затратами всегда приходится игнорировать некоторые неглавные факторы, которые, тем не менее, оказывают негативное воздействие на результат. В мобильном лазерном сканировании главными источниками методических погрешностей оказываются бортовой GPS приемник, а также средства геодезического обеспечения [33].

По практическим результатам съемки и обработки пространственных данных методом мобильного лазерного сканирования на железной дороге (преимущественно) определены следующие основные факторы, влияющие на точность получаемых данных:

а) Не откалиброваны сканеры

Мобильная лазерная система в общем случае состоит из двух отдельных лазеров, GPS приемника, антенны, инерциальной навигационной системы и нескольких камер фотофиксации. Все устройства смонтированы на виброгасящей платформе, и установлены на задней стенке последнего вагона.

В процессе движения вагона каждый лазер сканирует свою часть полупространства – соответственно, слева и справа относительно движения поезда, формируя совокупность замеров. В результате работы системы получается 2 облака лазерных точек, которые в идеале (при правильной калибровке) дают миллиметровые расхождения при отражении от одного объекта.

Если мобильная система жестко скомпонована на единой платформе, то процесс калибровки обычно выполняется на заводе - изготовителе на

специальных стендах и достаточно осуществлять поверку системы раз в год.

Оптимальным является вариант, когда система постоянно закреплена на носителе (автомобиле или вагоне) и не демонтируется (инсталлируется заново) под каждый проект.

Если система инсталлируется под каждый проект на новый носитель и лазерные головки монтируются отдельно, необходимо выполнять достаточно сложную процедуру калибровки самостоятельно.

b) Не корректный перевод данных в местную систему координат.

Нелинейные искажения, показанные на рис ниже, возникают, когда в процедуру уравнивания данных или при пересчете в местную систему координат (МСК) жестко закладываются неправильные координаты реперов. В этом случае программное обеспечение пытается «подогнать/натянуть» данные мобильного сканирования на жесткий каркас, заданный реперами. В случае, если координаты хоть одного репера определены неправильны или оператор некорректно сопоставил репер с соответствующей координатой МЛС (составляя так называемую таблицу связей, spatial join table) – результат пересчета плачевный, т.к. приводит к искажению изначально достоверной (т.к. относительные расстояния между точками) пространственной информации.

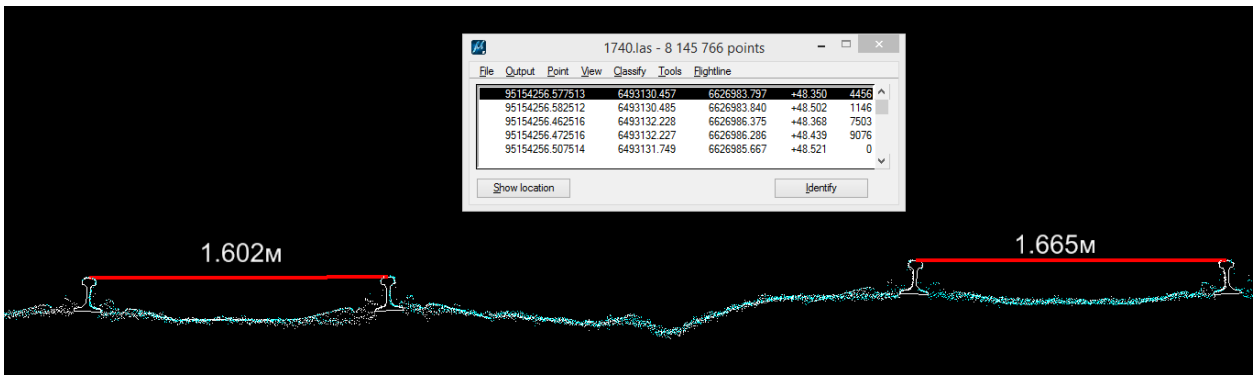


Рисунок 2.11. Нелинейное искажение точек лазерного отражения из-за использования при пересчете в МСК не проверенных координат реперов.

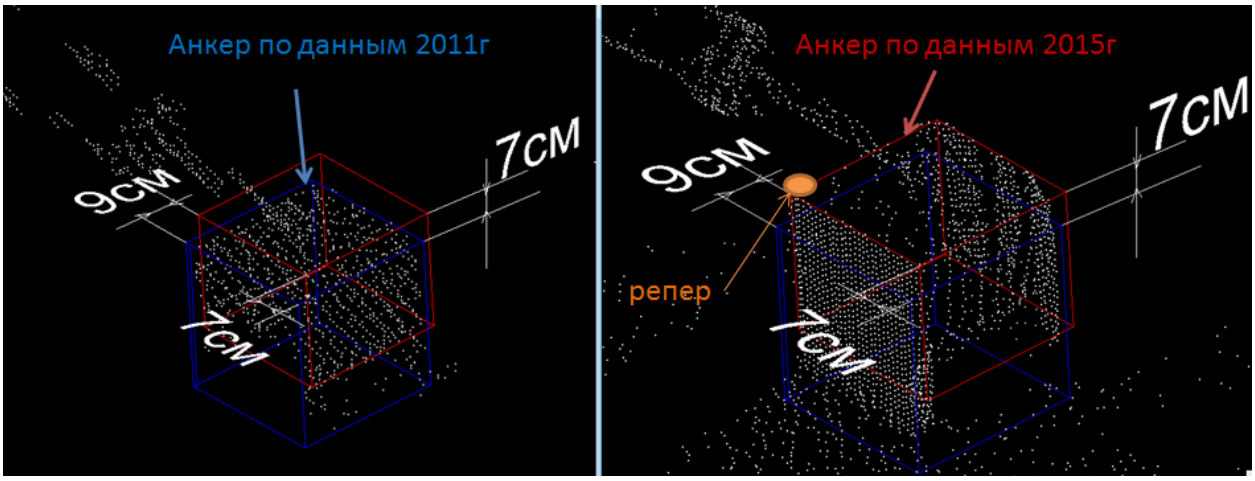


Рисунок 2.12. Положение репера в точках лазерного сканирования.

c) Не уравнены проходы.

Под уравниванием проходов понимается совмещение точек лазерного сканирования полученных в результате измерений, произведенных мобильной лазерной системой проехавшей по одному и тому же маршруту (туда и обратно), как правило, во встречных направлениях.

Проезд «туда и обратно» делается по нескольким причинам:

- Наиболее точные данные (по которым происходит векторизация рельсовых нитей) лежат по центру сканирования (соседний путь отстоит, как правило, на 4100мм);
- Трасса состоит, как правило, из 2-х главных путей, один из которых может быть «затенен» другими объектами, такими как платформа или встречный поезд;

- Если трасса находится на насыпи, то одно прохода обычно недостаточно для идентификации дальней бровки земляного полотна и водоотводного лотка.

К сожалению это приводит к достаточно трудоемкой процедуре «подстройки» данных друг под друга, в результате которого часто возникают ситуации, как на рис. ниже.

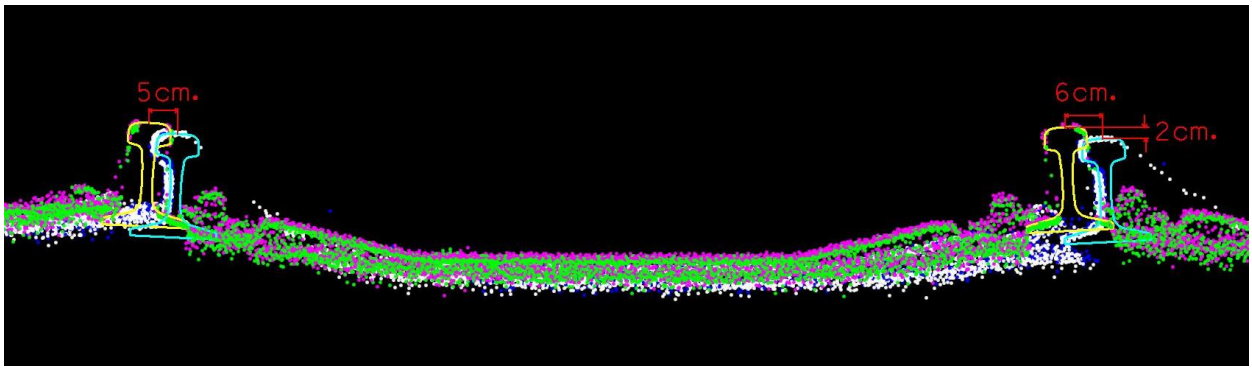


Рисунок 2.13. Не уравнены проходы: нелинейное рассогласование данных

Процесс уравнивания может быть относительным, когда точки измерения двух проходов притягиваются друг другу. За основу при этом берутся измерения с лучшим траекторным решением, или уравнивание может быть абсолютным, когда в процесс включены опорные точки наземных измерений хорошо идентифицируемых по ТЛО [24].

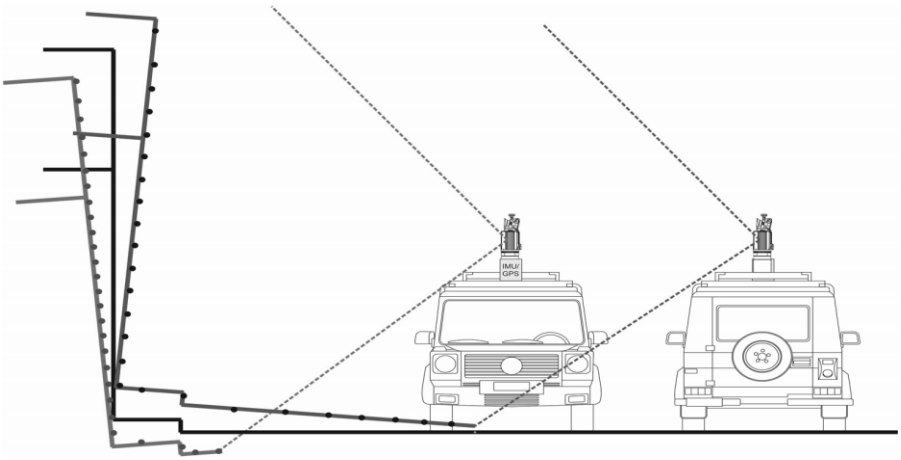
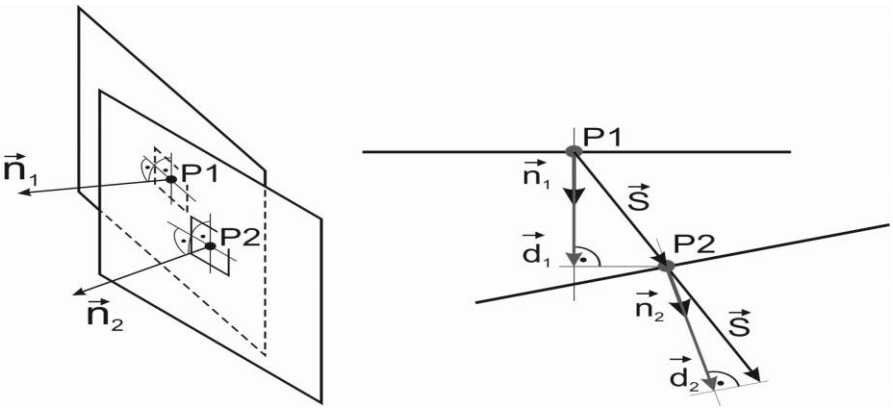


Рисунок 2.14. Появление отклонений между ТЛО в прямом и обратном измерении



$$\vec{d}_1 = (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \cdot \vec{n}_1$$
$$\vec{d}_2 = (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \cdot \vec{n}_2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)^2}{n}}$$

Рисунок 2.15. Поверхности, проведенные через ТЛО и задающие вектор отклонения от оригинала.

d) Остановки носителя.

В случае незапланированных остановок носителя возникает ситуация когда прибор не выключен и продолжает собирать данные измерений. Поскольку в этот интервал времени (даже кратковременный) группировка GPS/GLONASs спутников продолжает движение, GPS обстановка немного меняется и это привносит погрешности в измерения.

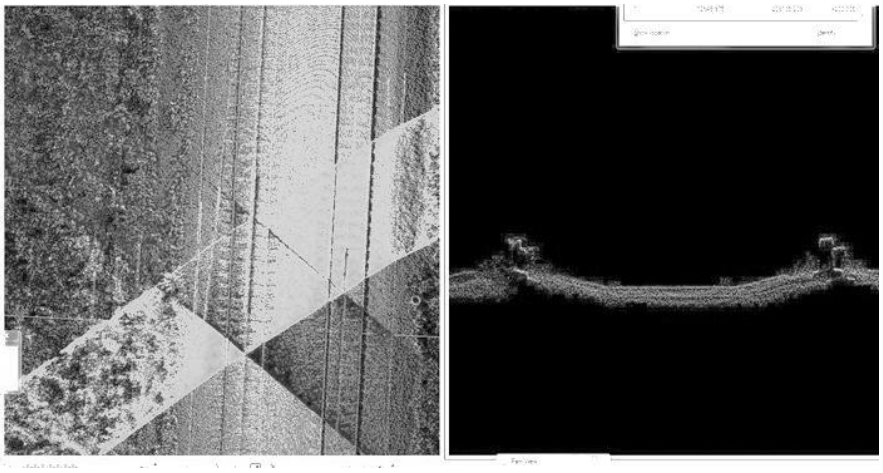


Рисунок 2.16. Остановки носителя: локальная потеря точности

e) Проблема теневого эффекта

Одной из «традиционных» проблем лазерного сканирования является так называемый теневой эффект. Работа лидара (лазерного сканера) основана на принципе прямой видимости, поэтому при проведении лазерного сканирования может быть трудно или даже невозможно измерить расстояния до всех поверхностей сложного трехмерного объекта. Оператор должен понимать, как прибор «видит» исследуемый объект.

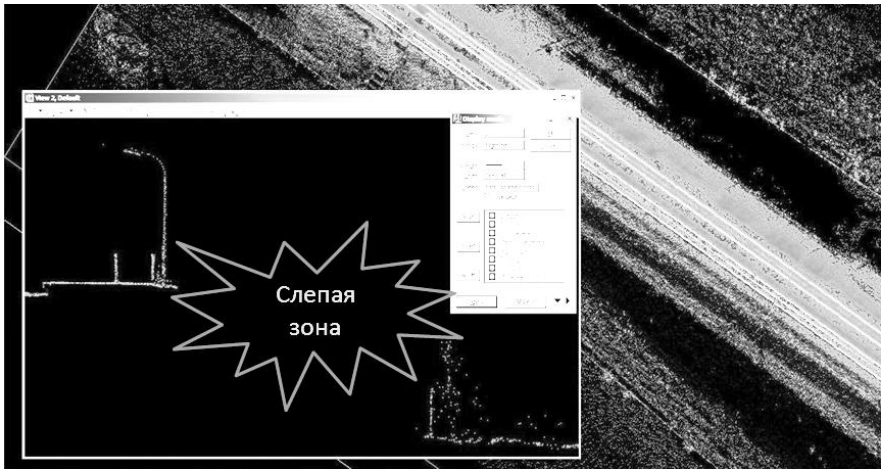


Рисунок 2.17. Затенение измерений искусственными объектами: пропуск данных

f) Инструментальные ошибки декодирования данных измерений

Эти ошибки возникают при рассогласовании синхронизации отсчетов времени фиксируемых лазерной системой и GPS приемником. Данные измерений, собранные в течение некоторого интервала времени оказываются «сжатыми» до одной временной единицы.

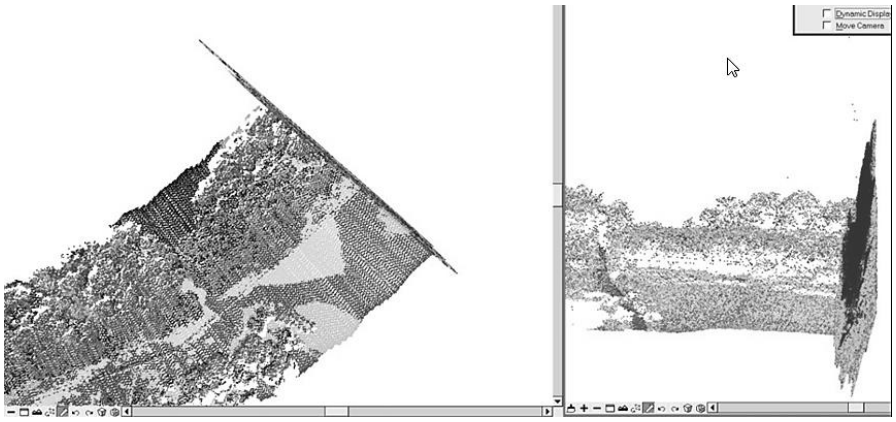


Рисунок 2.18. Ошибка декодирования данных системы лазерного сканирования

Траекторное решение и факторы, влияющие на абсолютную точность данных МЛС

А. Геометрический фактор в спутниковом методе

Точность определения разностей координат пунктов геодезической сети, создаваемой спутниковым методом, не зависит от взаимного расположения этих пунктов, но она зависит от расположения спутников на небосклоне пунктов, на которых установлены геодезические спутниковые приёмники, на эпоху наблюдений. Другими словами, на точность определяемых координат пунктов влияет не геометрия сети, но геометрия спутниковых наблюдений. Влияние геометрического фактора учитывают, используя понятие DOP [11]:

$$m_{опр} = (DOP)\, m_{изм}. \qquad (2.1)$$

В этой формуле $m_{опр}$ - погрешность определения разности координат пунктов; $m_{изм}$ - погрешность измерения вторых разностей результатов

фазовых измерений в фазовом режиме [5,11], имеющая смысл погрешности Ц единицы веса.

DOP - Dilution Of Precision - падение точности, «размывание» точности из-за геометрии наблюдений.

При работе в кодовом навигационном и в фазовом геодезическом режимах используют несколько видов геометрического фактора DOP: HDOP, VDOP, PDOP, TDOP и GDOP. HDOP - Horizontal DOP - это геометрический фактор, характеризующий погрешность определения планового местоположения. VDOP - Vertical DOP - это геометрический фактор, характеризующий погрешность определения высоты; PDOP - Position DOP - это геометрический фактор, характеризующий погрешность определения полного местоположения. Эти три разновидности геометрического фактора связаны соотношением:

$$HDOP2 + VDOP2 = PDOP2. \qquad (2.2)$$

TDOP - Time DOP- это геометрический фактор, характеризующий погрешность определения поправки часов приёмника (приёмников) относительно времени спутниковой системы. GDOP - Geometrical DOP - это геометрический фактор, характеризующий погрешность определения полного пространственно - временного положения. Три последних разновидности геометрического фактора связаны соотношением:

$$PDOP2 + TDOP2 = GDOP2. \qquad (2.3)$$

В практике выполнения спутниковых наблюдений для оценки геометрии наблюдений чаще всего используют PDOP. Чем меньше значение этого геометрического фактора, тем лучше геометрия наблюдений. Практика показывает, что при открытом небосклоне, то есть, при отсутствии препятствий вблизи спутниковых приёмников, PDOP имеет значения порядка 1,2 - 1,3. Это очень хорошо, но ситуация ухудшается, если приходится по необходимости всё-таки устанавливать спутниковый приёмник на пункте, вблизи которого имеется препятствие, например, здание. Если речь идёт о вновь создаваемом пункте геодезической сети, то в таком случае стремятся закладывать

пункт на юг от препятствия, то есть так, чтобы препятствие располагалось с северной стороны. Геометрия спутниковых орбит такова, что над полюсами спутники не летают. Поэтому препятствие в таком случае загораживает наименьшее из возможных количество спутников и PDOP увеличивается ненамного. Самым неудачным, в смысле невозможности соблюсти наивыгоднейшие условия наблюдений является следующий, к счастью, редко встречающийся случай. Команда геодезистов, создающих геодезическую сеть, вынуждена, например, по требованию заказчика работ, выполнять наблюдения на уже существующем пункте, расположенном в нескольких метрах от высокого здания. Закрыта половина небосклона. Единственным выходом является выполнять длительные наблюдения на этом пункте в течение нескольких часов, например, весь световой день, в надежде, что на этапе постобработки удастся «вытянуть требуемую точность». Исходя из опыта работы можно сделать вывод, что при создании опорной геодезической сети значение геометрического фактора PDOP не должно превышать трёх [17,42].

Траекторное (навигационное) решение является ключевым этапом предварительной обработки данных измерений МЛС, от которых зависит абсолютная точность позиционирования.

Существует шесть классов ошибок при вычислении траекторного решения [37, 40, 50]:

1)**Ephemeris data**- ошибки в передаче координат спутника .
2)**Satellite clock**- ошибки в передаче отметок времени.
3)**Ionosphere**- ошибки при вычислении коррекционных поправок расстояния, вызванных ионосферными помехами .
4)**Troposphere**- ошибки при вычислении коррекционных поправок расстояния, вызванных тропосферными помехами.
5)**Multipath-** ошибки, вызванные переотраженным сигналом, поступающим на вход антенны.
6)**Receiver-** ошибки измерения дальности, вызванные термальным

шумом, программной точностью и межканальными отклонениями.

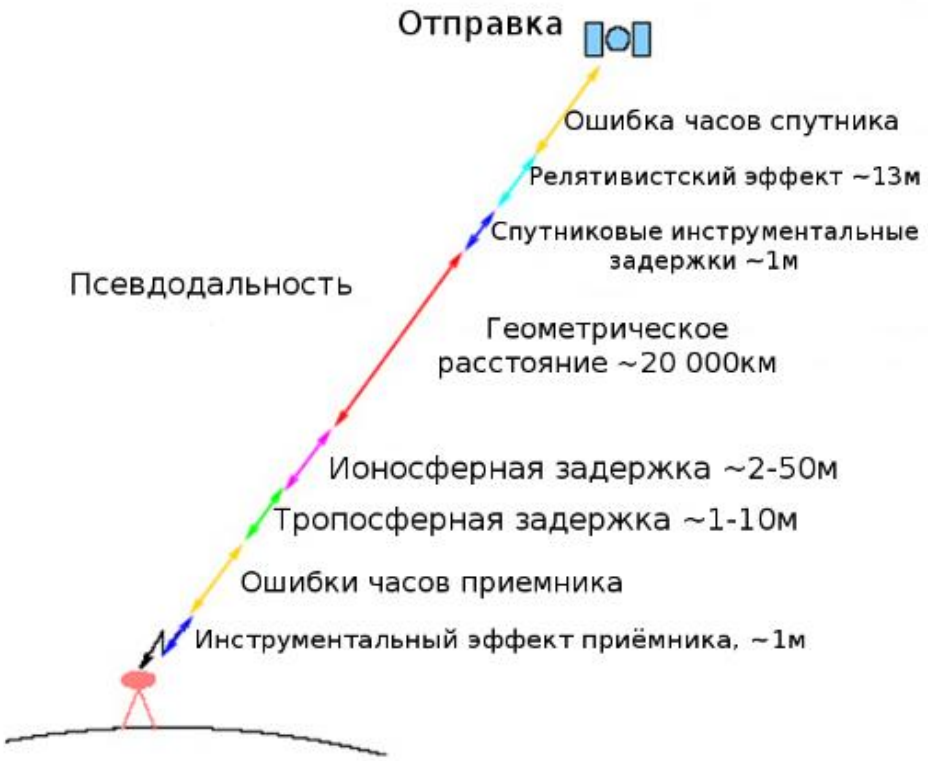


Рисунок 2.19. Ошибки, влияющие на вычислении траекторного решения

Б. Эфемеридные ошибки

Механизм неточного знания эфемерид связан, прежде всего, с наблюдаемыми на практике расхождениями между предсказываемой и реальной (подверженной влиянию возмущающих сил) орбитами. К возмущающим силам относят различные факторы как гравитационного, так и не гравитационного происхождения.

Наиболее существенное влияние на неточность знания эфемерид спутников, входящих к состав систем GPS и ГЛОНАСС, оказывает солнечное радиационное давление и атмосферное торможение. Как показывают пред расчеты, уклонения спутников от расчетной траектории из-за воздействия прямого солнечного радиационного давления лежат в пределах от 5-6 м (для трехчасовых дуг) до 100-800 м

(для двухсуточных дуг). Отмеченные пред расчеты характеризуются невысокой надежностью по следующим причинам:

- интенсивность солнечного излучения не остается постоянной с течением времени;
- модель влияния данного фактора существенно изменяется при переходе спутника в зону тени и полутени;
- эффективная поверхность спутника плохо поддается пред расчету как из-за сложной конфигурации такой поверхности, так и из-за вариаций положения спутника в пространстве.

При использовании апостериорного метода определения эфемерид, сущность которого состоит в том, что при окончательной обработке спутниковых измерений используют не те значения эфемерид, которые сбрасываются со спутника по радиоканалу, а от специально организуемых служб, которые накапливают реальные (а не прогнозируемые) значения эфемерид в банке данных на основе использования результатов измерений точность определения эфемерид составляет 1-2 м.

В. Ошибки часов приемника

Встроенные часы GPS-приемника не настолько точны как атомные часы, находящиеся на борту спутников. Это может быть причиной систематической ошибки несущественного характера в определении времени, когда проходит сигнал.

Г. Ионосферные ошибки

Из-за того, что присутствуют свободные электроны в ионосфере, GPS сигнал не может распространяться со скоростью света как в вакууме. Факт задержки модулированного сигнала прямо пропорционален числу свободных электронов и обратно пропорционален частоте несущей в квадрате. Для того, чтобы компенсировать возникающую при этом ошибку определения псевдодальности, может быть использован метод двухчастотных измерений на частотах L1 и L2 (в двухчастотном

приемнике). В линейных комбинациях двухчастотных измерений не содержатся ионосферные погрешности первого порядка. Кроме того, для того, чтобы частично компенсировать эту погрешность, может быть использована модель коррекции, которая может аналитически рассчитываться с использованием информации, которая содержится в навигационном сообщении. При этом величина остаточной не моделируемой ионосферной задержки может вызвать погрешность определения псевдодальности около 1-2 м.

Д. Тропосферные ошибки

Данные ошибки предполагают факт задержки радиосигналов в нейтральных слоях атмосферы стратосфере и тропосфере, где показатели, связанные с преломлением радиоволн с частотами до 15 ГГц от частоты радиосигнала, не зависят и потому одинаковы для обеих несущих частот L1, L2 и каждого кодового сигнала. Величина задержки зависима от метеопараметров (давление, температура, влажность), а также от того, какова высота спутника над горизонтом. Компенсация тропосферных задержек может производиться с помощью расчета математической модели данного слоя атмосферы. В общем случае указанные ошибки привносят погрешность до 1м.

Е. Ошибки, связанные с переотражением сигнала

Эти ошибки происходят, когда сигнал GPS может отражаться от объектов, например, это может быть высокое здание или скала и попадает в GPS-приемник. Увеличение времени, когда проходит отраженный сигнал, приводит к возникновению ошибок.

Это может происходить, когда сигнал GPS отражается от крупного препятствия, расположенного в значительной близости от приемника. При этом возникает такое явление как интерференция, и расстояние, которое измерено, оказывается больше, чем действительное. Аналитически данная погрешность может быть оценена достаточно затруднительно, а лучшим способом борьбы с нею считают комбинацию рационального размещения антенны приемника относительно

препятствия и маскирования приема сигнала от спутника, который расположен близко к горизонту.

В результате воздействия данного фактора ошибка определения псевдодальности может быть сведенной до 1.0 м.

Ж. Ошибка приемника

Она является обусловленной, прежде всего, наличием шума в электронном тракте приемника. Отношение «сигнал-шум» приемника определяет особенности точности процедуры сравнения принятого от спутника и опорного сигнала, т.е. речь идет о погрешности вычисления псевдодальности. Наличие этой погрешности может приводить к возникновению координатной ошибки порядка 0.2м. [41].

3. Таблицы ошибок определения геометрии движения спутников

Далее проанализированы источник и величина ошибок определения геометрии движения спутников, результаты представлены в таблице. Каждая ошибка описана как смещение (persistence of minutes or more) и случайный эффект такой как "белый шум", и показана небольшая корреляция между выборками. Общая ошибка каждой категории представлена как квадратный корень (rss) из суммы этих двух компонент.

Предполагается что каждый компонент ошибки статистически не коррелирован с другими, и приемник фильтрует измерения около 16 выборок.

В таблице 2.4. приведены результаты, когда режим селективного доступа SA выключен. Следовательно, средняя ошибка синхронизации часов , составляет 2.1м, что не является преобладающей ошибкой, по сравнению с ионосферной достигающей 4.0м. Таким образом, ошибка позиционирования GPS потенциально может составлять 10 m (в плане), как показано в таблице 2.4.

Второй пример показывает влияние режима SA. В случае преднамеренного загрубления синхронизации часов приемника и спутника, ошибка по времени становится доминирующей, все остальные

ошибки можно игнорировать. Результаты Table 3 постоянно подтверждаются реальными измерениями. Заметим что SA указанное в столбце как bias не может быть усреднено в 0 с помощью односекундного фильтра. В принципе это значение можно свести к нулю, но при усреднении очень длинных выборок в течение многих часов и даже дней. Такое усреднение невозможно осуществить на практике, когда спутники наблюдаются на в определенной точке небольшими порциями (в течение нескольких часов). Если использовать дифференциальную коррекцию, влияние ошибки SA можно свести к нулю.

One-sigma error, m Error source	Bias	Random		Total	DGPS
Ephemeris data		2.1	0.0	2.1	0.0
Satellite clock	2.0	0.7	2.1	0.0	
Ionosphere	4.0	0.5	4.0	0.4	
Troposphere		0.5	0.5	0.7	0.2
Multipath	1.0	1.0	1.4	1.4	
Receiver measurement		0.5	0.2	0.5	0.5
User equivalent range error (UERE), rms*	5.1	1.4	5.3	1.6	
Filtered UERE, rms	5.1	0.4	5.1	1.5	
Vertical one-sigma errors--VDOP= 2.5				**12.8**	**3.9**
Horizontal one-sigma errors--HDOP= 2.0				**10.2**	**3.1**

Таблица 2.4. Стандартная модель распределения ошибок с одной несущей частотой (L1) при выключенном режиме селективного доступа (SA)

One-sigma error, m Error source	Bias	Random		Total	DGPS
Ephemeris data	2.1	0.0	2.1	0.0	

Satellite clock (dither)	20.0	0.7	20.0	0.0	
Ionosphere	4.0	0.5	4.0	0.4	
Troposphere		0.5	0.5	0.7	0.2
Multipath	1.0	1.0	1.4	1.4	
Receiver measurement	0.5	0.2	0.5	0.5	
User equivalent range error (UERE), rms*	20.5	1.4	20.6	1.6	
Filtered UERE, rms	20.5	0.4	20.5	1.5	
Vertical one-sigma errors--VDOP= 2.5			**51.4**	**3.9**	
Horizontal one-sigma errors--HDOP= 2.0			**41.1**	**3.1**	

Таблица 2.5. Стандартная модель распределения ошибок с одной несущей частотой (L1) при включенном режиме селективного доступа (SA)

Ошибки двухчастотного PN-кода аналогичны тем, которые мы описали выше. Ожидаемая горизонтальная ошибка может составлять менее 10м. Ионосферная ошибка может быть уменьшенной до 0.7м при условии двухчастотного измерения. Основные ошибки в этих случаях - ошибка эфемерид (речь идет о точности позиционирования спутника)и точность синхронизации часов (таблица 2.6.).

Table 4 Precise error model, dual-frequency, P(Y) code

One-sigma error, m

Error source	Bias	Random		Total	DGPS
Ephemeris data	2.1	0.0	2.1	0.0	
Satellite clock	2.0	0.7	2.1	0.0	
Ionosphere	1.0	0.5	1.2	0.1	
Troposphere		0.5	0.5	0.7	0.1
Multipath	1.0	1.0	1.4	1.4	
Receiver measurement	0.5	0.2	0.5	0.5	
User equivalent range error (UERE), rms*	3.3	1.5	3.6	1.5	

Filtered UERE, rms	3.3	0.4	3.3	1.4

Vertical one-sigma errors--VDOP= 2.5			**8.3**	**3.7**
Horizontal one-sigma errors--HDOP= 2.0			**6.6**	**3.0**

Таблица 2.6. Стандартная модель распределения ошибок с двумя несущими частотами с P/Y- кодом.

Примерные суммарные ошибки GPS системы приведены в следующей таблице.

Эффект Ионосферы	± 5 метров
Изменение орбиты спутника	± 2.5 метра
Ошибка часов спутника	± 2 метра
Влияние отражения сигналов	± 1метр
Эффект Тропосферы	± 0.5 метра
Погрешности вычисления и округления	± 1 метр

Таблица 2.7. Суммарные ошибки GPS системы

В общем, суммарная ошибка составляет ± 15 метров. Корректировки таких систем, как WAAS (мы говорим об американской глобальной системе распространения дифференциальных поправок) и EGNOS (европейской геостационарной службе навигационного покрытия), которые в основном могут уменьшать влияние эффекта ионосферы, а также влияние ошибок изменения орбиты спутника и часов спутника, позволяют уменьшать погрешность до ± 3 - 5 метров.

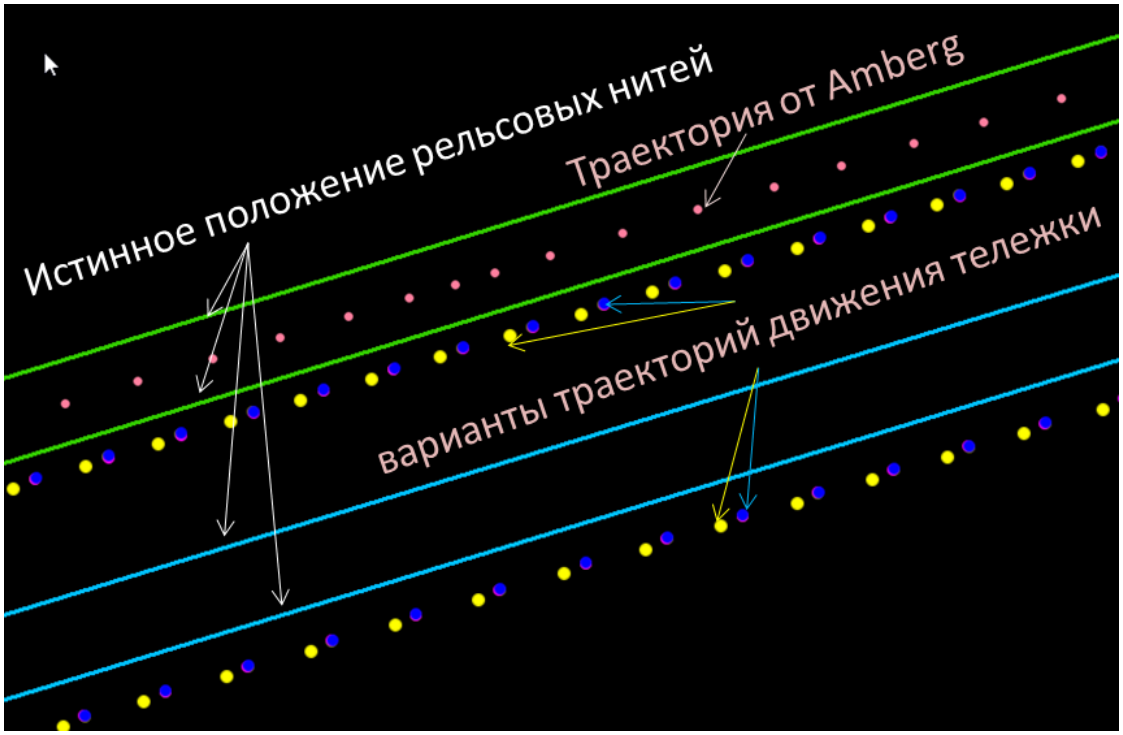


Рисунок 2.20. Пример расчета траектория движения МЛС, установленной на путеизмерительную тележку, полученную разными способами (с учетом и без учета координат базовых станций из каталога, в режимах InFusion MultiSingleBase (с одной и несколькими станциями), InFusion PPP, InFusion Autonomous.

Условия получения качественных результатов лазерного сканирования

Необходимыми мероприятиями проведения съемки являются:

a) Детальное планирование съемки
   - Расчет благоприятной GPS обстановки, уровня солнечной активности;
   - Разработка маршрута и действий оператора при незапланированных остановках;

b) Проведение съемочных работ с полноценной наземной поддержкой
   - Выбор мест установки базовых станций;
   - Установка реперных объектов, идентифицируемых по ТЛО;

c) Экспресс-анализ результатов съемки

- Проводится сразу после съемки;
- Проверяются пропуски данных, места с плохим траекторным решением и отклонением от точек контрольных измерений (точность);
- Результатом является решение о качестве съемочных работ и выявление участков для пересъемки;

Пренебрежительное отношение к перечисленным ниже моментам приводит к ошибкам, требующим значительных трудозатрат на их исправление.

Описание программного обеспечения, позволяющего оценивать точность данных МЛС

Для полноценного использования данных измерений необходимо выполнение следующих условий:

- Данные должны быть актуальны и своевременны;
- Данные должны находиться в пределах допустимых погрешностей;
- Поколения данных должны находиться в одной системе координат;
- Доступ к данным должен осуществляться настолько быстро, насколько этого требуют функциональные приложения.

Организация лазерной съемки и подготовительные мероприятия занимают достаточно длительный промежуток времени, часто связанный с получением специальных разрешений на съемку. Что означает подчас невозможность проведения повторной съемки для исправления ошибок. Особенно это касается мобильного сканирования на железной дороге. В связи с этим на передний план выступает задача

оперативной проверки качества проведения съемочных работ и принятия решения о пересъемке пока «не ушел паровоз».

Типовые требования к проверке трехмерных измерений инфраструктуры железнодорожного транспорта (ИЖТ)

Для своевременного обнаружения и исправления сбойных/проблемных участков трассы и последующего высокоточного 3-D моделирования ИЖТ, а также полноценного использования результатов съемки в аналитических и расчетных задачах необходимо выполнить следующие требования:

- Проверке подлежит:
  - Целостность и полнота покрытия трассы точками лазерных отражений.
  - Точность привязки ТЛО к реперной сети ж/д (в местной системе координат и ITRF).
  - Траекторное решение.
  - Точность уравнивания данных от разных проходов.
  - Сравнение ТЛО и данных наземных измерений характерных объектов ИЖТ в полосе съемки.
  - Качество данных фотофиксации.
  - Качество привязки файлов фотофиксации к ТЛО.
  - Состав и формат отчетной продукции.
- Требования к составу исходных данных (используемых для проверки):
  - Точки реперной сети в МСК и WGS84 (ITRF).
  - Результаты измерений электронных меток в МСК и WGS84 (ITRF);
  - Результаты измерений реперных объектов в МСК и WGS84 (ITRF);
- Требования к составу данных, передаваемых съемочной бригадой:

- Оперативный журнал (с отметками оператора о времени прохода определенных участков трассы и ее особенностях);
- Range файлы (“сырые” данные);
- Файлы с базовых станций GPS, обеспечивающих точное позиционирование во время проведения съемки;
- Координаты местоположения базовых станций;
- Файлы со станции GPS на носителе;
- Файлы фото фиксации.
- Файл регистрации фотоснимков с параметрами внутренней ориентации (номер снимка, время снимка, углы);
- Результаты полевых наземных измерений (если проводились, в МСК и WGS84 (ITRF);
- Калибровочные параметры прибора лазерного сканирования (для всех проектов);
- Монтажная схема установки (взаиморасположения контрольных точек) прибора лазерного сканирования, GPS антенны и фокального центра камеры (для всех проектов).
- Данные лазерного сканирования, полученные после проведения предварительной обработки:
  - Уравненные ТЛО (в виде LAS файлов), система координат – UTM/WGS84;
  - Траектория носителя в формате sbet и текстовом (время, координаты, углы);

- Требования к точкам наземного обследования GroundThrustingSite (GTS).

Чтобы быть уверенным в достижении необходимой точности, когда мы сводим точки лазерного обследования (ТЛО) от нескольких проходов, необходимо иметь данные наземных измерений. Лучше, если по всем обследуемым трассам будут проведены наземные измерения -

5-10 характерных точек через каждый километр. Измерять их следует в тех местах, где есть покрытие лазерными данными. И это должна быть «твердая» поверхность, например – платформа, железнодорожные сооружения. Особенно это актуально в районе смены географических зон.

- Требования качеству файлов фотофиксации

Качество снимков должно позволять увидеть номер каждой опоры. Файл привязки должен быть в системе координат заказчика, содержать координаты снимка, номер камеры, дату, время и ссылку на фотографию.

Основные положения экспресс-анализа

Практические результаты обработки данных съемки методом МЛС привели к выводу о необходимости проведения экспресс-анализа сразу после выполнения съемочных работ.

Экспресс-анализ означает:

1. Проводить проверку качества СРАЗУ после проведения съемочных работ. Центр обработки данных должен быть мобильным.
2. Результатом должно быть решение о целесообразности проведения повторной съемки.
3. Основные усилия должны быть направлены на:
   - Мониторинг результатов непосредственно во время съемки и подробное протоколирование событий;
   - Оценка траекторного решения с помощью специального программного обеспечения (POSPac, GrafNav);
   - Выявление ошибок при тотальном декодировании «сырых» (RAW) данных лазерного сканирования методом анализа покрытия области интереса прореженными данными

	Участок	1																
	Проверил																	
Отклонение	Рассогласование проходов (см)				Рассогласование сканеров (см)				Отклонение в плане(см)		Отклонение по высоте(см)		Отклонение ТЛО и 3D (гл.пути)(см)				Пропуски данных по гл.путям (м)	
	км	в плане	км	по высоте	км	в плане	км	по высоте	км	ОГС	км	ОГС	км	в плане	км	по высоте	км	размер
МАКС	530, 558,	3	558	5	618, 627	737	514-527	6	484	69	625	125	633	14	541	13	618, 627	8
СРЕДНЕЕ		2,33		1,67		5,25		4,88		18,80		20,09		0,85		0,19		7,33
	Участок	2																
	Проверил																	
Отклонение	Рассогласование проходов (см)				Рассогласование сканеров (см)				Отклонение в плане(см)		Отклонение по высоте(см)		Отклонение ТЛО и 3D (гл.пути)(см)				Пропуски данных по гл.путям (м)	
	км	в плане	км	по высоте	км	в плане	км	по высоте	км	ОГС	км	ОГС	км	в плане	км	по высоте	км	размер
МАКС	232	8	216	5	204	14	216	9	ОГС не идентифицируются по данным ТЛО				243	3		2		
СРЕДНЕЕ		3,72		3,01		4,21		3,99										
	Участок	3																
	Проверил																	
Отклонение	Рассогласование проходов (см)				Рассогласование сканеров (см)				Отклонение в плане(см)		Отклонение по высоте(см)		Отклонение ТЛО и 3D (гл.пути)(см)				Пропуски данных по гл.путям (м)	
	км	в плане	км	по высоте	км	в плане	км	по высоте	км	ОГС	км	ОГС	км	в плане	км	по высоте	км	размер
МАКС	322	32	322	37	272	4		5	367	108	297	146	324	45	324	98	269	520
СРЕДНЕЕ		12		14		2		4		11,17		13,7		2		2		120
	Участок	4																
	Проверил																	
Отклонение	Рассогласование проходов (см)				Рассогласование сканеров (см)				Отклонение в плане(см)		Отклонение по высоте(см)		Отклонение ТЛО и 3D (гл.пути)(см)				Пропуски данных по гл.путям (м)	
	км	в плане	км	по высоте	км	в плане	км	по высоте	км	ОГС	км	ОГС	км	в плане	км	по высоте	км	размер
МАКС	482	3		0	482	10	464	7	383	76	388	32	419	13	418	50		
СРЕДНЕЕ		3		0		2,43		3,23		39		4,44		2,44		1,57		
	Участок	5																
	Проверил																	
Отклонение	Рассогласование проходов (см)				Рассогласование сканеров (см)				Отклонение в плане(см)		Отклонение по высоте(см)		Отклонение ТЛО и 3D (гл.пути)(см)				Пропуски данных по гл.путям (м)	
	км	в плане	км	по высоте	км	в плане	км	по высоте	км	ОГС	км	ОГС	км	в плане	км	по высоте	км	размер
МАКС	29	45	27	10	35;38	12	0	100	0	146	91	396	40	11	0	100		
СРЕДНЕЕ		5,79		2,91		2,42		4,73		18,34		41,88		1,08		0,38		

Таблица 2.8 Сводные результаты экспресс-анализа

Самым главным результатом приведенной таблицы является определение степени доверия к полученным данным. То есть (в случае сканирования инфраструктуры ЖД), насколько точно можно оцифровать рельсовую нить, построить по ней параметрическую модель пути и просчитать взаимоположение объектов, влияющих на расчет габаритов приближения строений.

Методика оценка погрешностей проецирования точек лазерного отражения (ТЛО) на опорную геодезическую с помощью программного обеспечения компании Terrasolid

Для осуществления данной задачи мы пользуемся встроенным инструментом ПО Terrascan “Dxyz”. Чтобы воспользоваться данным переходом, нам необходимо иметь пары точек в исходной системе координат и конечной. Важно, чтобы результат был наиболее точным, нужно выбирать используемые точки по периметру

трансформируемого объекта. Так же особенностью данного инструмента является то, что применить его можно только к ТЛО, загруженным в программное обеспечение [46].

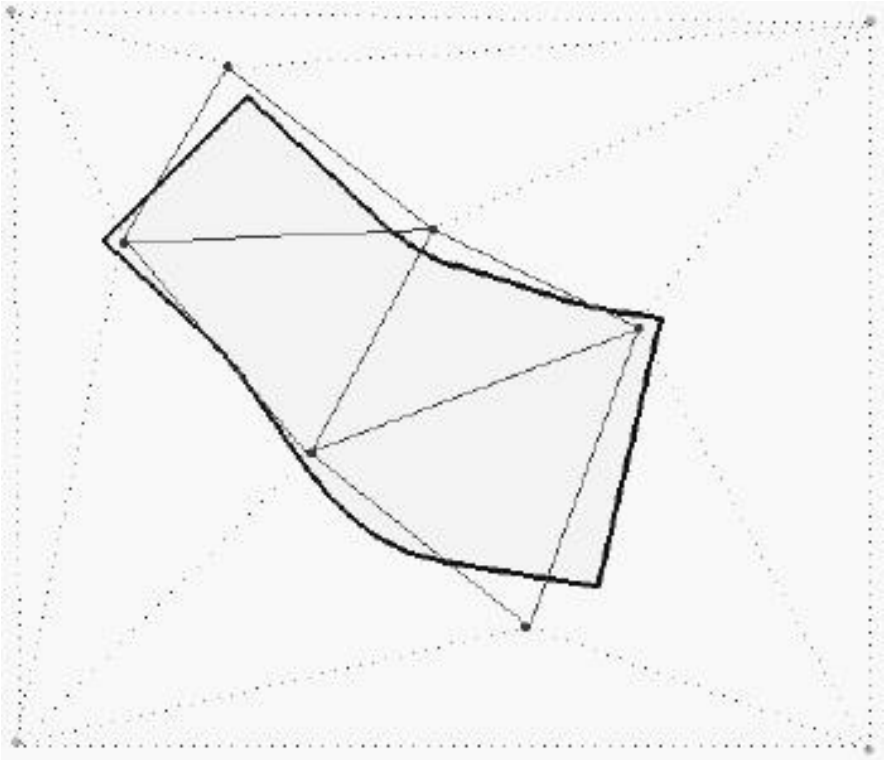


Рисунок 2.21. Схема трансформации лазерных точек по опорной геодезической сети

На рисунке представлены:

- Пространство, ограниченное жирной линией – исходное, нетрансформированное облако точек;
- Шесть узловых точек внутри прямоугольника – это опорные точки, координаты которых известны в исходной и конечной системе координат;
- Четыре точки, задающие внешний прямоугольник -их создаёт программа выполняя интерполирование между нетрансформированными точками.

При использовании данной трансформации необходимо заранее создать текстовый файл, который будет содержать 5 столбцов данных:

1. Координаты точек X в исходной системе
2. Координаты точек Y в исходной системе
3. Разность координат Xконечн.-Xисх.
4. Разность координат Yконечн.-Yисх.
5. Разность координат Zконечн.-Zисх.

Пример файла:

12844.5553	239318.8381	0.1556	0.0026	0.0175
12850.5616	239318.6172	0.0865	0.005	-0.0058
12811.5078	238668.1738	0.3338	-0.0144	-0.3181
12817.5712	238667.85	0.1718	-0.0093	-0.4178

Этот текстовый файл будет в дальнейшем использоваться для осуществления пересчёта.

В нашей ситуации, имея исходными данными рельсовые нити, на них выбирались опорные точки, определялись их координаты, а затем определялось положение и координаты данных точек в облаке (см. рис. ниже)

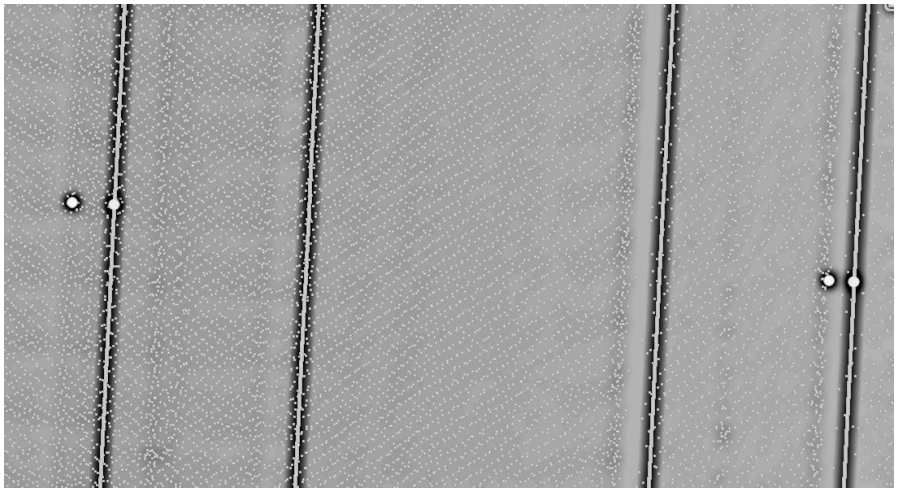


Рисунок 2.22. Взаимоположение опорных точек (выбранных по рельсовой нити) ТЛО до трансформации.

Левые точки принадлежат рельсовым нитям (являющиеся в данном случае опорными),справа, те же самые точки, только расположенные в ТЛО.

Всего было определено 70 точек. Все они были равномерно распределены по периметру нашего пересчитываемого объекта. Среднее расстояние между парами точек составило около 85 м .

Затем при использовании этих точек был создан текстовый файл (XYdXdYdZ), который использовался при пересчёте.

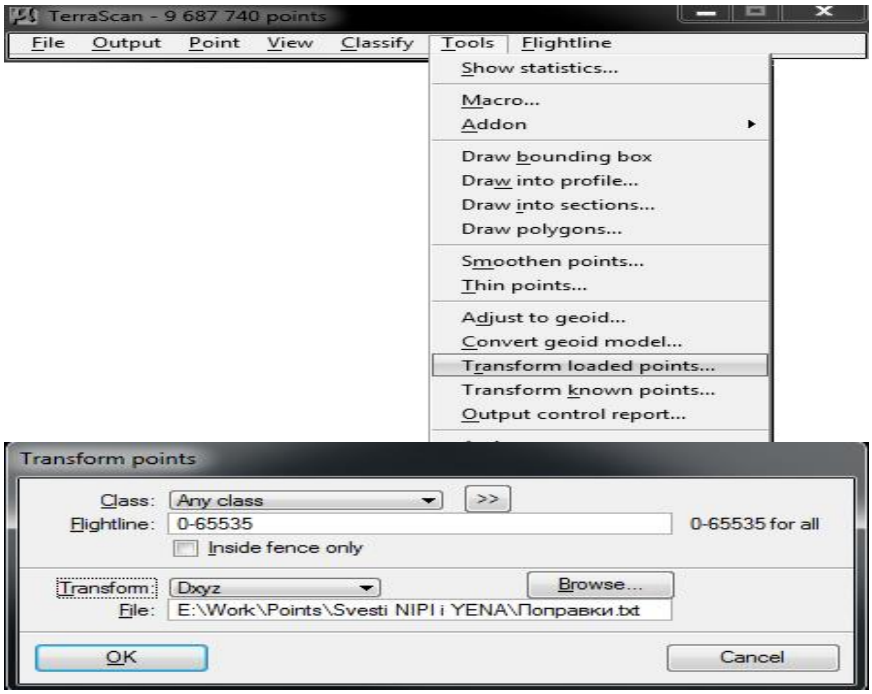


Рисунок 2.23. Настройки программы проецирования ТЛО по опорным точкам

В результате проделанной операции данные приняли следующий вид:

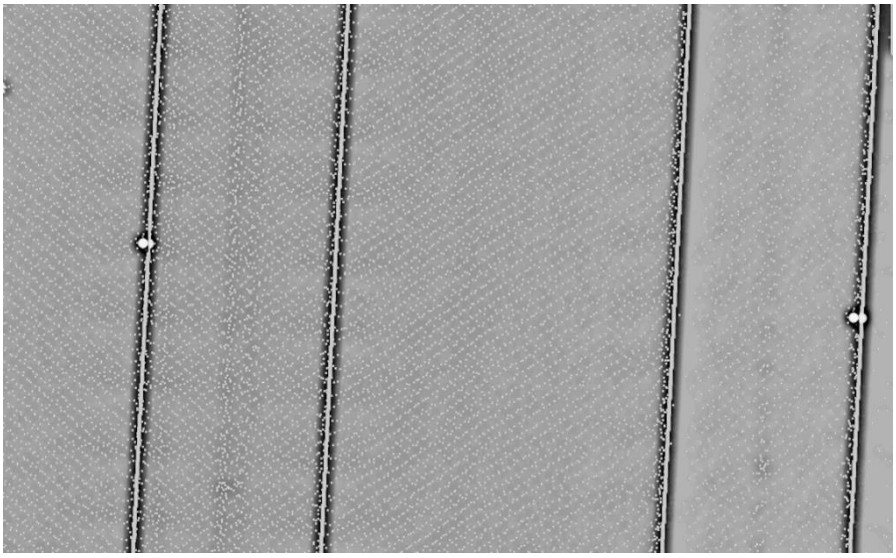


Рисунок 2.24. Взаимоположение опорных точек (по рельсовой нити) и точек лазерного отражения (ТЛО) после трансформации.

Координаты опорных точек в ТЛО			Расхождения координат опорных точек в ТЛО и на рельсовых нитях.			Расхождения после трансформации.		
	X	Y	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ
1	12844.5553	239318.8381	0.1556	0.0026	0.0175	0	0	0
2	12850.5616	239318.6172	0.0865	0.005	-0.0058	0	0	0
3	12811.5078	238668.1738	0.3338	-0.0144	-0.3181	0	0	0
4	12817.5712	238667.85	0.1718	-0.0093	-0.4178	0	0	0
5	12774.9333	237934.6324	0	0	0	0	0	0
6	12780.7295	237934.3434	0	0	0	0	0	0
7	12785.2028	238140.3439	0	0	0	0	0	0
8	12793.1559	238300.7189	0.1405	-0.0103	-0.1445	0	0	0
9	12799.0391	238300.5152	0.091	-0.0056	-0.1755	0	0	0

10	12817.5547	238667.8329	0.188	0.0021	-0.418	0	0	0
11	12857.873	239332.1081	0.1099	-0.0002	0.0381	0	0	0
12	12790.9995	238140.0517	0	0	0	0	0	0
13	12827.5528	238983.6437	0.2105	-0.0155	-0.2267	0	0	0
14	12833.6375	238983.0183	0.0756	-0.004	-0.27	0	0	0
15	12803.2944	238503.664	0.2445	-0.0119	-0.1754	0	0	0
16	12809.271	238503.3372	0.1363	-0.0034	-0.2942	0	0	0
17	12819.6619	238829.2202	0.3072	-0.0247	-0.3744	0	0	0
18	12825.7481	238828.8285	0.1519	-0.0083	-0.4236	0	0	0
19	12845.2564	239332.9246	0.1689	0	0.0207	0	0	0
20	12840.4663	239238.6566	0.1728	-0.01	0.0561	0	0	0
21	12853.0479	239237.3246	0.1098	-0.0084	0.0618	0	0	0
22	12834.1498	239114.0777	0.1967	-0.011	0.025	0	0	0
23	12840.2487	239113.6289	0.0825	-0.0051	0.0136	0	0	0
24	12789.2313	238221.1221	0.0488	0.0092	-0.0537	0	0	0
25	12794.89	238217.8435	0.0512	-0.0013	-0.088	0	0	0
26	12798.4862	238407.6087	0.2049	-0.01	-0.0847	0	0	0
27	12804.4267	238407.4632	0.1225	-0.0055	-0.2318	0	0	0
28	12807.3167	238583.9855	0.2764	-0.0056	-0.284	0	0	0
29	12813.3263	238583.7354	0.1545	-0.0109	-0.3726	0	0	0
30	12815.5273	238747.8923	0.3375	-0.0173	-0.3882	0	0	0
31	12821.5628	238747.2705	0.2043	-0.0126	-0.5009	0	0	0

32	12823.4016	238902.6876	0.2759	-0.0154	-0.3547	0	0	0
33	12829.5018	238902.373	0.1247	-0.0091	-0.3714	0	0	0
34	12836.8517	239167.4085	0.1848	-0.0008	0.0706	0	0	0
35	12848.3675	239167.0001	0.1242	-0.0006	0.073	0	0	0

Таблица 2.9. Итоговая таблица расхождения координат опорных точек и ТЛО на рельсовых нитях.

Как видно из приведенной методики качество оценки погрешностей зависит от точности привязки реперного объекта, представленного координатой одного из углов анкера опоры контактной сети к точкам лазерного сканирования. Проблема заключается в том, что физически анкер – железобетонный блок 60х60см, как правило с чуть скошенным углом. Кроме этого плотность точек лазерного сканирования не позволяет определить координату угла лучше, чем 2-3см. В результате пара координат трансформации имеет погрешность в несколько сантиметров. Решением данной проблемы является определение угла анкера путем вычисления точки пересечения 3-х его граней, восстановленных по точкам лазерного отражения (см. рисунок 2.25.).

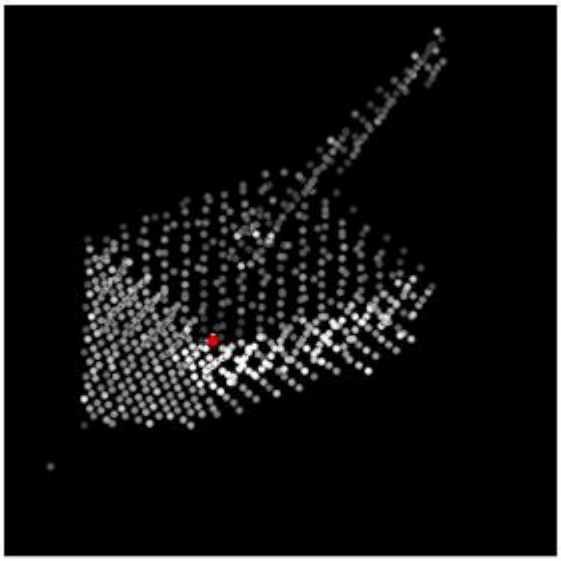


Рисунок 2.25. Анкер опоры контактной сети, используемый в качестве реперного объекта для географической привязки результатов измерений методом МЛС.

Планирование оптимального времени проведения съемки методом МЛС.

Описание технологии GPS-планирования

GPS планирование необходимо для определения оптимального времени проведения мобильной (воздушной) лазерной съемки. Соблюдение полученного в результате планирования графика позволит существенно уменьшить риск потери данных из-за некачественной съемки.

Для GPS-планирования используются следующие данные:

Альманахи

В альманахе содержатся параметры орбит спутников группировки и состояние каждого спутника.

GPS-планирование (GPSF) выполняется с использованием наиболее свежего альманаха. Обычно достаточно использовать альманах недельной давности для точного краткосрочного планирования на период от 1 до 3 дней. Долгосрочное планирование выполняется на период до 60 дней со дня получения альманаха.

Лучше всего использовать альманах из последнего скачанного с бортового/базового GPS-приёмника набора данных. Либо использовать FTP-сайта компании Ashtech. Альманахи обновляются там примерно раз в две недели.

Оперативная информация о состоянии группировки GPS-спутников.

A) NANU – Navigational Advisory for Navstar Users

Самая оперативная информация о состоянии группировки, планируемых отключениях и сбоях распространяется в NANU. Самый простой способ получать NANU – подписаться на их рассылку, которая рассылаются пользователям как только появляется оперативная информация о изменении в состоянии группировки.

Каждое сообщение NANU имеет свой уникальный номер: YYYYNNN, где YYYY – год выхода NANU, NNN – порядковый номер NANU в году. С помощью этого номера легко отследить историю NANU, анализ которой поможет в дальнейшем при принятии решения о работоспособности какого-либо конкретного спутника. В каждом сообщении NANU содержится информация об одном спутнике.

Некоторые важные информационные поля в NANU:

- SVN, SpaceVehicleNumber, уникальный номер спутника в группировке. Этот номер присваивается спутнику при запуске и не используется в навигационных сообщениях для гражданских пользователей. С его помощью можно отследить историю работы спутника.
- PRN, PseudoRandomNumber, случайно выбранный порядковый номер спутника в группировке. Порядковый номер присваивается спутнику с момента его включения и сохраняется за ним в течение всего срока его службы. Именно этот номер высвечивается в списке спутников в программах GPS-планирования.
- START JDAY – день начала события, описанного в NANU
- START TIME ZULU – время начала события
- START CALENDAR DATE – дата начала события
- STOP JDAY – окончание события
- STOP TIME ZULU - ---//---//---
- STOP CALENDAR DATE - ---//---//---
- CONDITION – сообщение о состоянии спутника.

Б) STATUS – состояние группировки.

Сообщение о статусе группировки кратко резюмирует все NANU за день.

Расшифровка информационных полей сообщения о статусе:

FCSTDV – предупреждение о запланированной операции Delta-V по перемещению спутника на его исходную орбиту

FCSTMX – предупреждение о предстоящем обслуживании спутника. Чаще всего это перевод передатчика на резервный эталон частоты, накачка эмиссионной трубки или обновление ПО.

FCSTEXTD – продление периода неработоспособности спутника на неопределённое время.

FCSTSUMM – сообщение о вводе спутника снова в эксплуатацию, содержит точные времена, когда спутник был недоступен.

FCSTCANC – сообщение об отмене запланированной ранее недоступности спутника.

FCSTRESCD – сообщение о переносе ранее запланированной недоступности спутника, обычно связанной с его обслуживанием.

UNUSUFN – уведомление о том, что спутник недоступен на неопределённое время.

UNUSABLE – сообщение, которое «закрывает» период недоступности спутника, «открытый» сообщением UNUSUFN

UNUNOREF – сообщение о кратковременной недоступности спутника, которая была устранена менее чем за 1 час.

USABINIT – сообщение о вводе в группировку нового спутника

LEAPSEC – сообщение о точном времени «скачкообразного» введения 1-секундной поправки во время системы GPS для компенсации рассогласования UTCи GPSвремён со временем UT1 превышающем 0.9 секунды [3].

Сообщения NANU и STATUS – оперативные источники информации о состоянии группировки. Состояние спутников в альманахе отражается с

существенной задержкой, особенно это касается смены состояния из нерабочего в рабочее.

В конце каждого сообщения NANUи STATUSпубликуется строка POC (PointOfContact), где можно найти дополнительную контактную информацию.

В) YUMA-альманахи.

В YUMA-альманахах раз в неделю публикуется информация о прогнозируемых параметрах орбит и о состоянии спутников. Наиболее важная информация о состоянии спутников содержится в строке SatelliteHealth. Состояние спутника кодируется двумя цифрами. Расшифровка кодов состояния:

00 ALLSIGNALSOK
01 ALLSIGNALSWEAK, 3 - 6DBBELOWSPECS
02 ALL SIGNALS DEAD
03 ALL SIGNALS HAVE NO DATA MODULATION
04 L1-P SIGNAL WEAK
05 L1-P SIGNAL DEAD
06 L1-P SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION
07 L2-P SIGNAL WEAK
08 L2-P SIGNAL DEAD
09 L2-P SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION
10 L1-C SIGNAL WEAK
11 L1-C SIGNAL DEAD
12 L1-C SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION
13 L2-C SIGNAL WEAK
14 L2-C SIGNAL DEAD
15 L2-C SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION
16 L1 & L2-P SIGNAL WEAK
17 L1 & L2-P SIGNAL DEAD
18 L1 & L2-P SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION
19 L1 & L2-C SIGNAL WEAK
20 L1 & L2-C SIGNAL DEAD
21 L1 & L2-C SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION
22 L1 SIGNAL WEAK
23 L1 SIGNAL DEAD

24 L1 SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION
25 L2 SIGNAL WEAK
26 L2 SIGNAL DEAD
27 L2 SIGNAL HAS NO DATA DEMODULATION

Код 0 указывает на нормальную работу спутника. Коды 7, 8, 9, 13, 14, 15, 25, 26, 27 соответствуют состоянию спутника, позволяющему принимать навигационные сигналы и проводить обработку данных лазерного сканирования. Сравнение NANU и YUMA-альманаха помогает принять решения о возможности использования спутника.

Оперативная информация о прогнозируемых аномалиях в атмосфере и ионосфере, солнечная активность

Каждый час и по мере поступления информации, на сайте http://www.swpc.noaa.gov в разделе CurrentAlertsAndWarnings обновляется информация о солнечной активности, состоянии тропосферы и ионосферы. В этом разделе печатаются предупреждения пользователям навигационной системы GPS о возможных сбоях.

Стандартный вид публикуемого предупреждения:

:ALERTS:
Magnetic A-Index >=50 Watch for 15 Sep 2000 UT
Comment: None

The following Alert was CONTINUED at 0100 UT on 15 Sep 2000
Protons Event >10 MeV @ >=10pfu BEG 12 Sep 2000 1555 UT
Comment: The current flux level is 19 pfu's.

A maximum flux of 321pfu's was reached at 0340 UT on 13 Sept.Sudden Impulse observed at Boulder 15 Sep 2000 0510 UT 36 nT
Comment: None

Magnetic K-Index of 4 Warning valid from 15 Sep 2000 0545 to 1500 UT
Comment: None
Magnetic K-Index of 4 Observed 15 Sep 2000 from 0300 to 0600 UT
Comment: None

На что в этих сообщениях стоит обращать внимание:

а) Присутствие в сообщении информации о ProtonEvent> 10 MeV @ >=10pfu. (выброс тяжёлых протонов с Солнца). Выброс тяжёлых протонов с большой вероятностью может привести кразличного рода сбоям в работе GPS-спутников [1].

б) Magnetic K-Index of XX Warning. Сообщение о «магнитной буре», оказывающей влияние на систему GPS.Значения XX более 5 соответствуют «геомагнитным штормам», приводящим к существенным изменениям орбит спутников GPS.

Анализ информации и составление прогноза.

Прогнозирование GPSобстановки можно производить с помощью программы MissionPlanning, входящей в состав пакета Reliance, выпускаемого компанией Ashtech.

На основе полученных данных о состоянии спутников, принимается решение о включении или выключении соответствующих спутников в «таблице доступности спутников». Выключение спутника в этой таблице будет транслироваться программой как его отсутствие, что фактически будет отражать реальную ситуацию. Если прогнозируется, что какой-либо спутник будет недоступен (выключен) не в течение всего дня, то планирование с выключением этого спутника выполняется только в период его недоступности.

Во время рассмотрения периодов времени с количеством доступных спутников не более шести, стоит обращать внимание на прогнозы SEC Alerts&Warnings. Если в прогнозе SEC указано, что в это время ожидается SSEU (SatelliteSingleEventUpset), то существует вероятность того, что GPS-покрытие может стать недостаточным из-за сбоя хотя бы одного спутника. Прогноз SSEU обычно появляется за несколько дней до события и имеет неплохую (20 – 30 мин) точность.

В процессе работы программы MissionPlanning необходимо указать координаты планируемого базирования GPSприёмника и указать затенения небосвода (маскирование).

После соответствующих вычислений программой могут быть выведены на экран зависимости (рис. 15) количества доступных спутников от времени (Availability) и дифференциального параметра точности от времени (PDOP).

В процессе анализа полученных зависимостей GPS обстановка считается приемлемой для следующих полученных условий:

а) Количество спутников (Availability) не менее 6.

б) График PDOP не должен иметь явно выраженных максимумов и значение PDOP должно быть равным или менее 5.

Обычно приемлемое время «наступает» сразу после появления 6-го по счёту спутника в зоне видимости, однако стараются иметь некоторый запас (5 – 10 мин) перед его выходом из зоны видимости.

Резкое увеличение PDOP говорит о выходе из зоны видимости одного или сразу нескольких спутников. Если увеличить область графика, на которой наблюдается всплеск PDOP (путём сужения границ шкалы времени), то можно оценить скорость увеличения PDOP (PDOPAugmentationSpeed, PAS) во времени. Если PAS превышает ~ 0.25 1/мин, то необходимо провести более детальный анализ ситуации, в результате которого принимается решение о возможности проведения полётов в соответствующий промежуток времени. Если известно, что лазерное сканирование будет проводиться в каком-то определённом направлении, и известно, какое маскирование имеет бортовая GPS антенна, то легко оценить, будет ли достаточно спутников на небосводе. Здесь удобно ввести дополнительное, к круговому 15-ти градусному, маскирование антенны, отражающее реальное затенение.

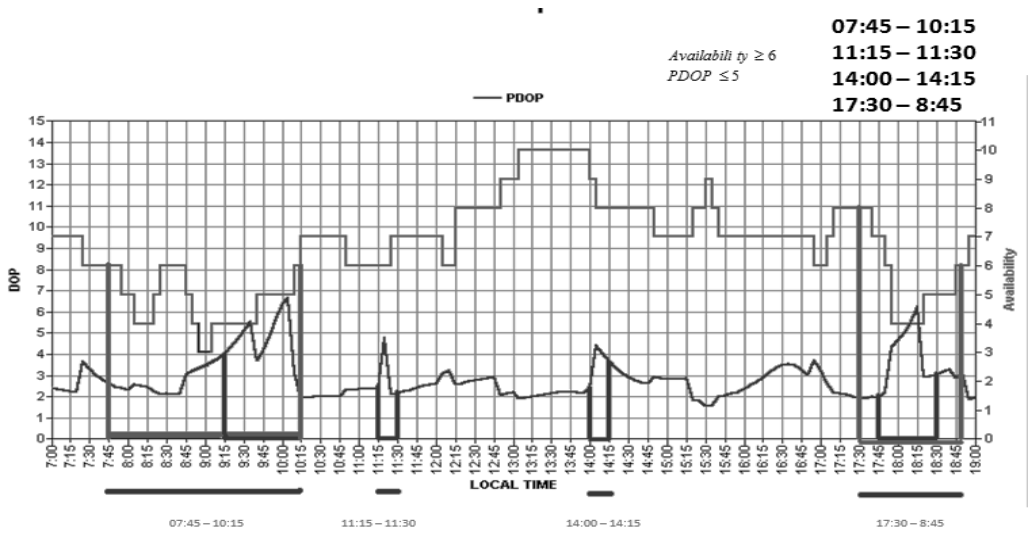


Рисунок 2.26. Прогноз GPS обстановки. Маскирование 150 круговое. Под шкалой времени показаны отрезки времени с неблагоприятной GPS обстановкой

PDOP вычисляется для оптимального, из числа обозреваемых, расположения спутников. Однако, с учётом реального маскирования антенны оптимальное расположение спутников может оказаться недоступным. В этом случае можно либо исключить затенённые спутники из рассмотрения либо ввести дополнительное маскирование. Если всё же оказалось, что для выбранного периода времени GPS покрытие недостаточно, можно указать, что в соответствующий промежуток времени проводить съёмку можно только в определённом направлении.

Круговое маскирование 150 принято наиболее оптимальным для бортового GPS приёмника.

Выводы по второй главе

В результате:

- Была проделана большая работа по анализу практического опыта проведения съемки методом МЛС на 8000 км ж.д., обозначены все потенциальные проблемы организационного характера и даны рекомендации по их преодолению. Выявлены

ограничения обусловленные спецификой использования технологии мобильного лазерного сканирования на ж.д., препятствующие получению качественного результата и разработаны практические рекомендации по их устранению (обходу).

- Разработаны основные положения экспресс-анализа результатов первичной обработки данных съемки методом МЛС. Поскольку процесс последующей камеральной обработки занимает гораздо большее время по отношению к процессу получения исходных данных, предложена методика оперативной оценки качества съемки. Главным результатом экспресс-анализа является определение степени доверия к полученным данным (пригодны данные для камеральной обработки или нет). По существу сформулировано предложение по организации обратной связи между 2-мя разнесенными в организационном, временном пространстве процессами.
- Полученные в результате практических работ данные проанализированы с точки зрения происхождения ошибок измерений вызванных спецификой использования МЛС на железной дороге. Определены условия минимизации как абсолютных (влияющих на пространственное расположение измеренного объекта на местности), так и относительных (влияющих на взаимное положение объектов) ошибок измерений.
- Определены требования к качеству репера - ключевого объекта, используемого для сведения (уравнивания) данных разных проходов между собой. В частности установлено, что для исключения геометрических искажений, репера должны располагаться не попарно (как это практиковалось в начале работ), а последовательно и равномерно вдоль ж.д. пути. Кроме

этого экспериментально подтверждена недостаточная точность координирования существующих реперных объектов для точного позиционирования данных МЛС. Автором предложены альтернативные методы координирования (по трем плоскостям, проведенным по поверхности репера и однозначно задающих угловую точку).

Глава 3. Автоматизация обработки данных МЛС и текущего мониторинга состояния инфраструктуры ж.д.

Разработка сквозной технологии съемки, обработки и создания атрибутированной пространственной базы данных ИЖТ

В процессе реализации проектов по проверке фактического положения объектов инфраструктуры ж.д. была разработана и апробирована уникальная сквозная технология съемки и обработки пространственных данных, позволяющая с одной стороны минимизировать затраты обработку, а с другой - повысить контролируемость процесса и точность создания ЦМП. Общая блок-схема показана на рисунке.

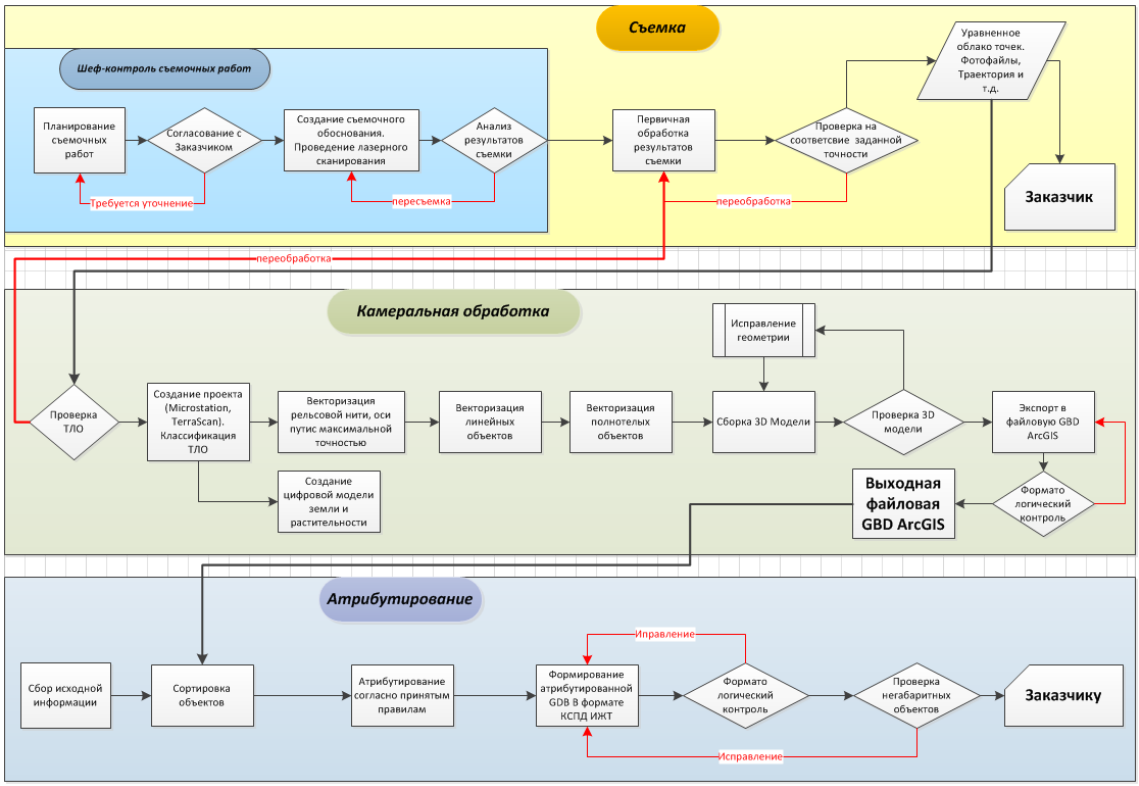


Рисунок 3.1. Общая блок- схема сквозной технологии съемки и обработки пространственных данных

Вся технологическая цепочка разбита на 6 отдельных этапов, которые достаточно независимы, операции могут быть распараллелены между отдельными исполнителями. Результат выполнения каждого этапа формализован. Далее описан каждый этап с точки зрения организации работ по формированию высокоточной пространственной базы данных с семантическим описанием для определения фактического состояния главных путей РЖД в интересах служб П, Э, Ш.

Этап №1 Выполнение изыскательских работ методом мобильного лазерного сканирования:

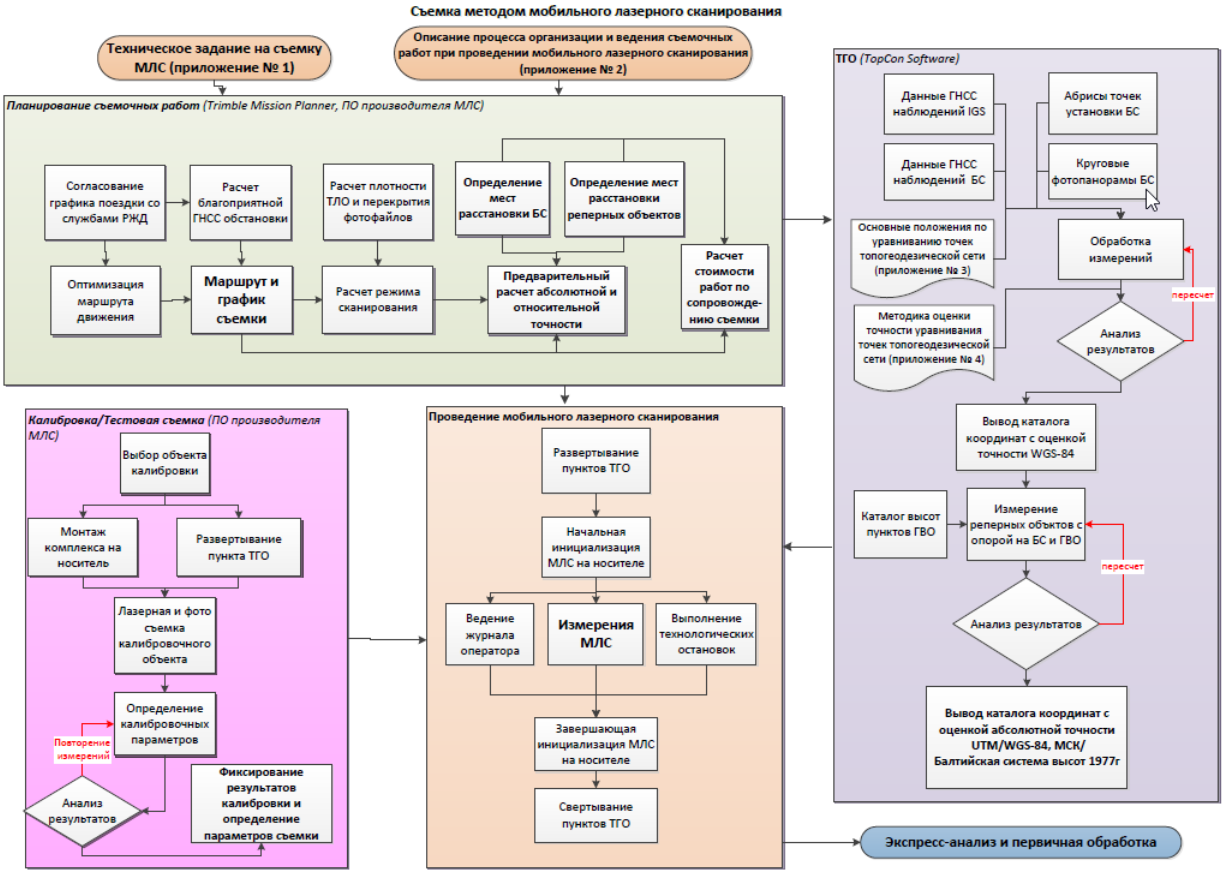


Рисунок 3.2. Блок- схема выполнение изыскательских работ методом мобильного лазерного сканирования

На данном этапе решаются организационные и технические вопросы призванные в первую очередь устранить описанные выше ошибки сканирования и искажения пространственных данных.

Этап №2 Анализ результатов съемки и первичная обработка данных МЛС:

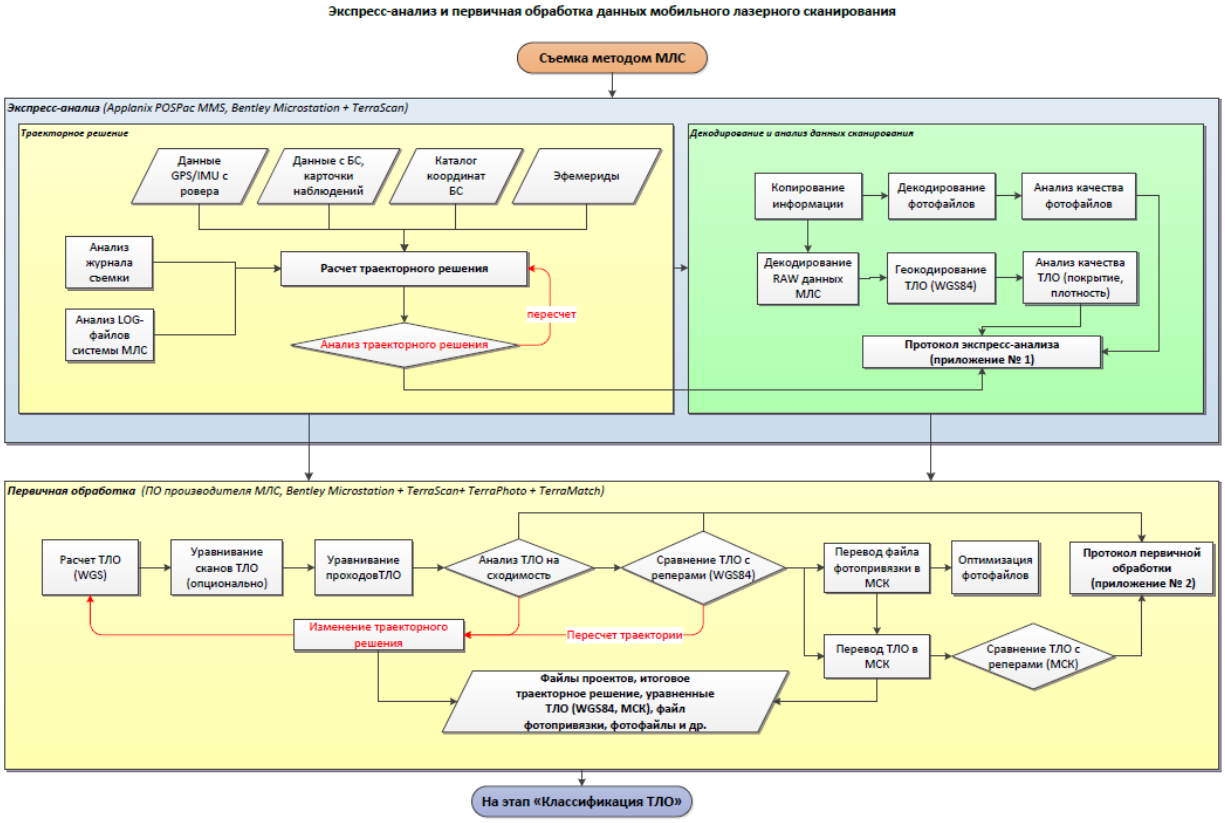


Рисунок 3.3. Блок- схема анализа результатов съемки и первичной обработки данных МЛС

Этап №3 Классификация точек лазерного отражения, формирование цифровой модели земли:

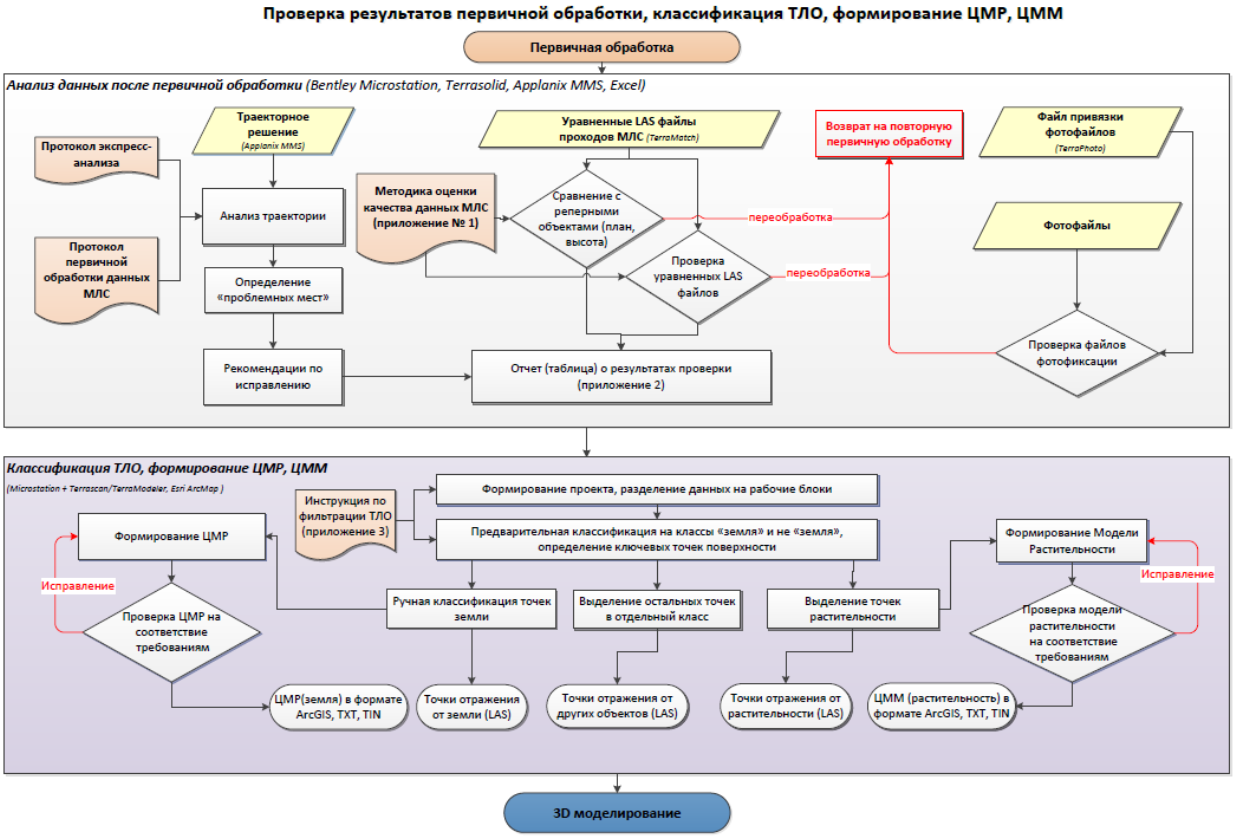


Рисунок 3.4. Блок- схема классификации точек лазерного отражения и формирования цифровой модели земли

Этап №4 Формирование трехмерных пространственных моделей

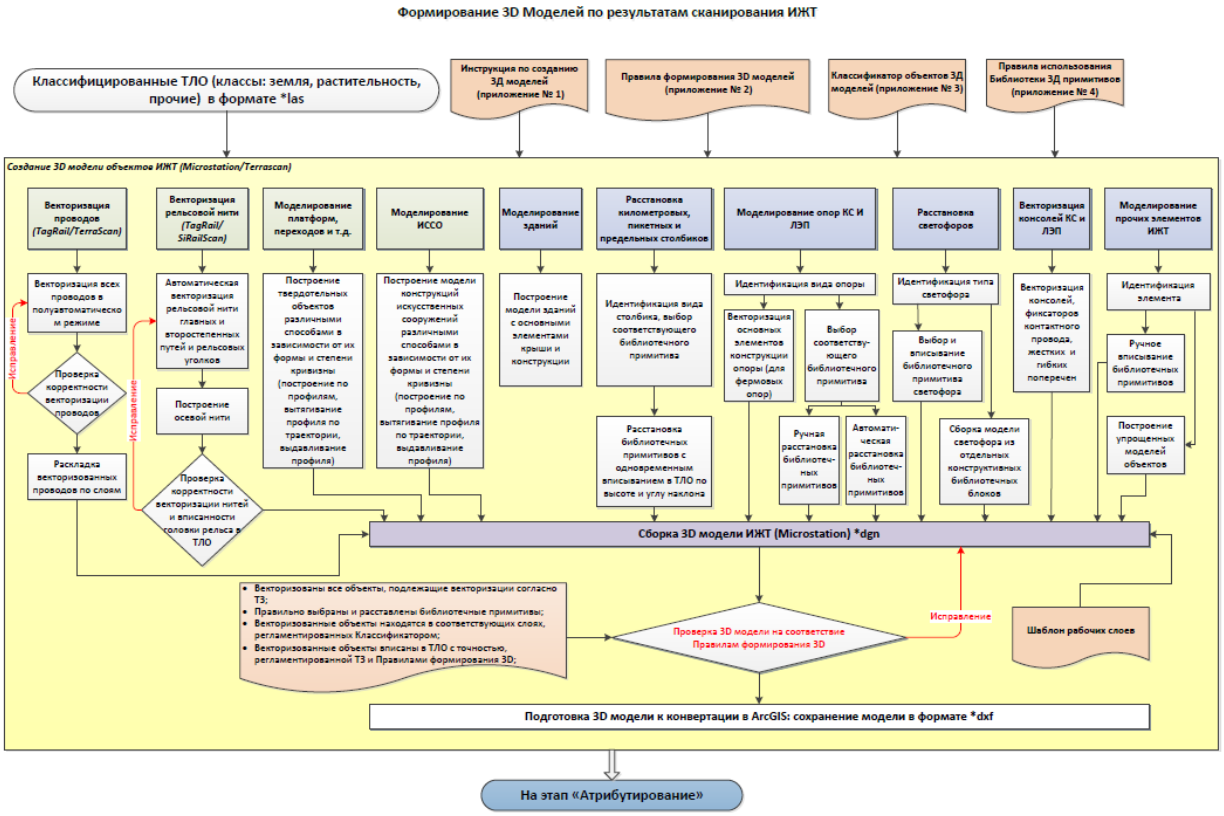


Рисунок 3.5. Блок- схема формирования трехмерных пространственных моделей

Этап №5 Добавление семантической информации (атрибутирование):

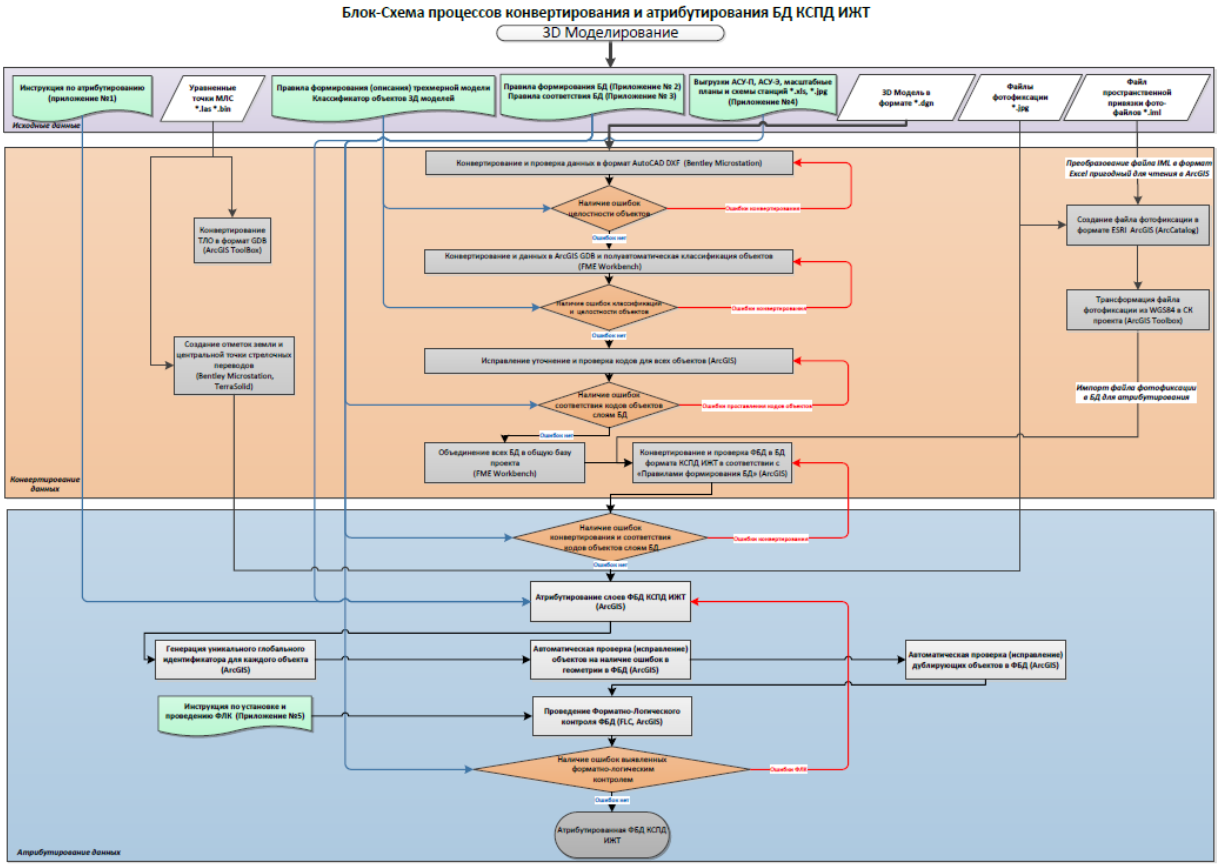


Рисунок 3.6. Блок- схема атрибутирования трехмерных пространственных моделей

Этап №6 Подготовка данных для работы функциональных приложений:

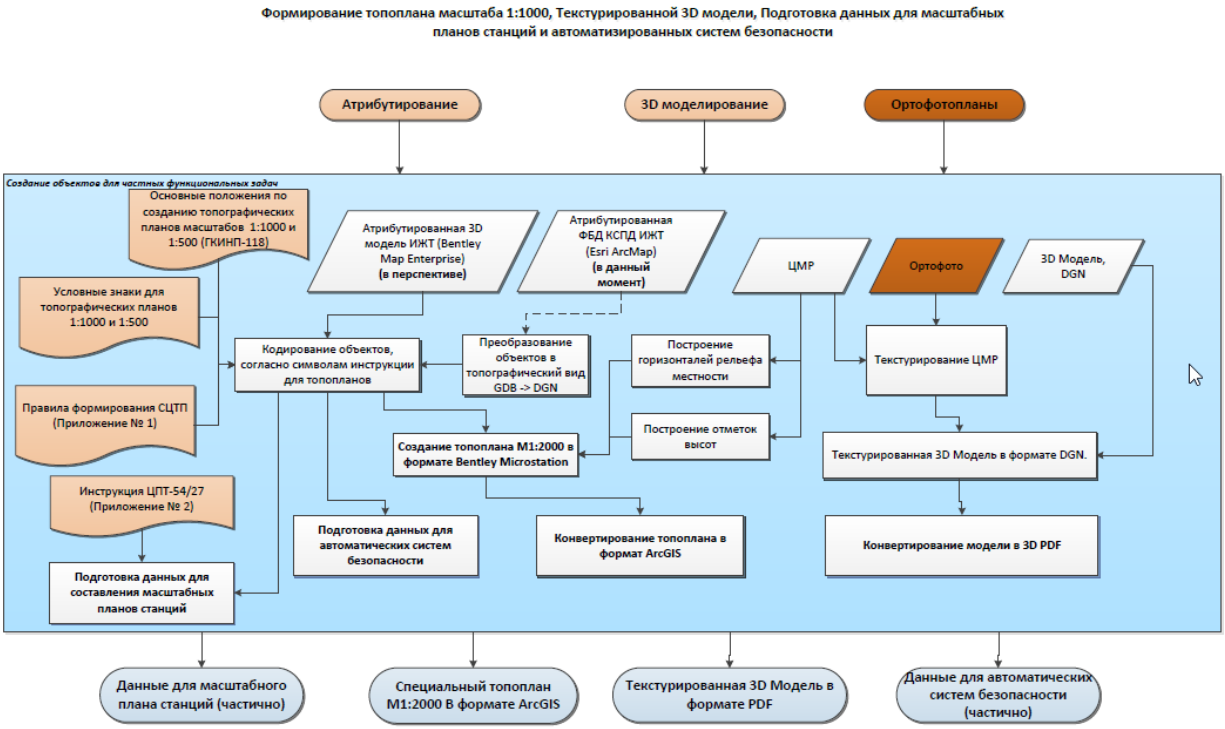


Рисунок 3.7. Блок- схема подготовки данных для работы функциональных приложений

Программные и алгоритмические средства обработки данных МЛС, построения трехмерных моделей и создания ЦМП.

Одним из ключевых моментов обработки данных МЛС является преобразование входной информации (представленной в виде точек лазерного сканирования, фотофайлов) в векторный вид (3D модель) для проведения высокоточных вычислений в местной железнодорожной системе координат. Векторная модель в данном случае выступает в роли «носителя» смысловой и пространственной информации о каждом конкретном объекте ИЖТ. Применяемое геодезическое оборудование постоянно совершенствуется и это приводит к валообразному увеличению входной информации. В связи с этим, предложенная технология обработки пространственных данных становится все более актуальной, поскольку предусматривает распараллеливание операций и возможность автоматизации каждой конкретной операции по

моделированию, что минимизирует время от съемки до получения конечного результата, в виде пространственной базы данных элементов ИЖТ.

В части автоматизации моделирования объектов инфраструктуры ИЖТ были разработаны алгоритмы автоматического распознавания опор контактной сети и характерных точек земляного полотна (бровки/подошвы балластной призмы и земляного полотна) по точкам лазерного сканирования[1,2].

Алгоритм детектирования и идентификации опор контактной сети

В настоящее время актуальной проблемой является развитие методов автоматического мониторинга инфраструктуры РЖД, основанного на обработке статистических данных, полученных с помощью лазерного сканирования. Технологически данная задача решается путем установки двух лазеров на задней стенке последнего вагона. В процессе движения вагона каждый лазер сканирует свою часть полупространства – соответственно, слева и справа относительно движения поезда, формируя совокупность замеров. В результате получается облако точек (см. рис. 3.8.), из которого следует выделить полезную информацию, касающуюся положения объектов и их технического состояния. Так, например, при мониторинге контактной сети требуется оценка параметров, описывающих пространственное положение опор контактной сети, провисание проводов и др. Другой важной задачей является также автоматизация построения комплексной трехмерной модели инфраструктуры РЖД. В настоящее время данные работы уже ведутся на основе полученных сканированных данных в полуавтоматическом режиме с помощью специального программного обеспечения.

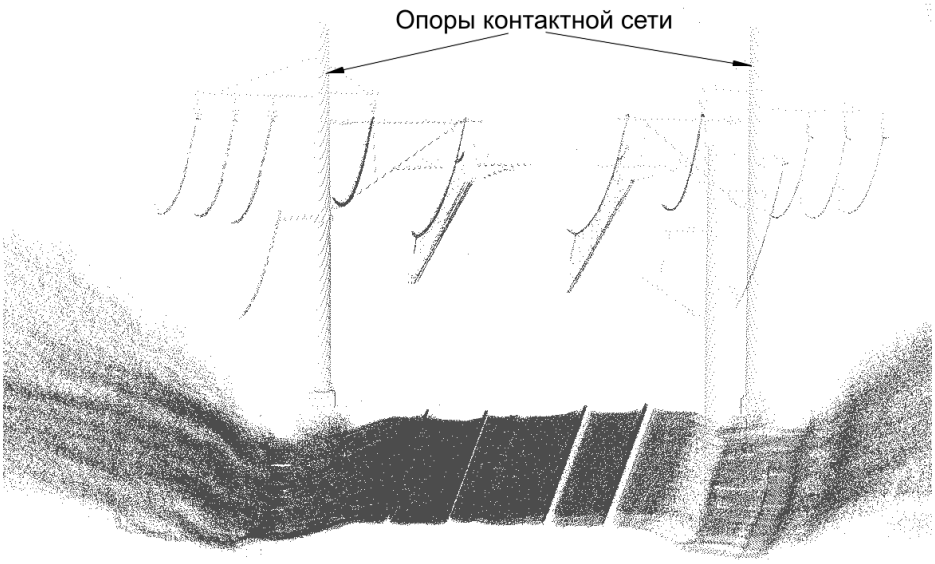


Рисунок 3.8. Точки отражения лазерного сканирования

В данной работе предлагается решение 3 задач. Первая задача состоит в автоматическом поиске опор контактной сети внутри облака точек или в обнаружении точек, которые являются откликами от опор контактной сети. Вторая задача состоит в выборе подходящих 3D моделей опор контактной сети, позволяющих осуществлять их автоматическую детекцию и идентификацию. Третья задача состоит в нахождении оценок параметров положения объектов типа «опора контактной сети» и связана с применением алгоритмов оптимизации. Для решения указанных задач авторы статьи предлагают использовать обобщенное преобразование Хафа для предварительного обнаружения опор контактной сети, а в качестве 3D-моделей использовать аналитические функции расстояния. Задачу оценки параметров пространственного положения опоры контактной сети предлагается решать с помощью вероятностных генетических алгоритмов.

Обобщенное преобразование Хафа для обнаружения опор контактной сети

Напомним, что классическое преобразование Хафа связано с обнаружением прямых линий на бинарном изображении и состоит в отображении информативных пикселей, соответствующих контурам на

исходном изображении, в пространство параметров прямых линий [6, 7]. Далее в пространстве параметров строится гистограмма и пики гистограммы соответствуют параметрам найденных прямых линий. Данный подход можно также использовать и для обнаружения опор контактной сети (см. рис. 3.8.). Действительно, большинство точек, располагающихся на поверхности типичной опоре контактной сети лежат достаточно близко от прямой, являющейся ее остовом. Следовательно, можно свести задачу обнаружения данных объектов к задаче обнаружения прямых линий в облаке точек. Поскольку данные прямые должны быть перпендикулярными к поверхности земли, то их можно считать в идеале параллельными. Будем считать, что точки, полученные в результате сканирования, заданы в декартовой системе координат и ось Oz выбрана перпендикулярно поверхности земли, тогда точки, лежащие на одной прямой, перпендикулярной поверхности земли, будут иметь одинаковые координаты по оси Ox и оси Oy. Очевидно, что каждая такая прямая однозначно определяется координатами x и y и данное преобразование можно рассматривать как обобщение преобразования Хафа для обнаружения прямых одной направленности в облаке трехмерных точек. С учетом этого, имеем множество точек $\left(x_i, y_i, z_i\right)_{i=1}^{N}$ и поиск точек, расположенных на прямых параллельных оси Oz можно осуществлять с помощью следующей процедуры:

1. Построение гистограммы в плоскости Oxy:

$x_{\min} = \min\limits_{i=1,\dots,N} x_i$, $x_{\max} = \max\limits_{i=1,\dots,N} x_i$, $y_{\min} = \min\limits_{i=1,\dots,N} y_i$, $y_{\max} = \max\limits_{i=1,\dots,N} y_i$;

выбор N_x - числа ячеек гистограммы вдоль оси Ox;

выбор N_y - числа ячеек гистограммы вдоль оси Oy;

построение гистограммы, которая описывается с помощью целочисленного массива чисел $\left(q_{ij}\right)_{N_x \times N_y}$:

$q_{ij} := 0$, $i = 1,\dots,N_x$, $j = 1,\dots,N_y$;

for $k := 1,\dots,N$

$$i := floor\left(\frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} N_x\right),$$

$$j := floor\left(\frac{y_k - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} N_y\right),$$

$$q_{ij} := q_{ij} + 1.$$

2. Нахождение локальных максимумов в гистограмме q.

3. Пусть q_{ij} - это локальный максимум гистограммы, тогда соответствующие координаты точки в плоскости Oxy можно найти по формулам:

$$x_{line} = \frac{i(x_{\max} - x_{\min})}{N_x} + x_{\min}, \quad y_{line} = \frac{j(y_{\max} - y_{\min})}{N_y} + y_{\min}.$$

По найденным прямым можно выделить точки, относящиеся к опорам контактной сети. Для этого вводится параметр h, с помощью которого выделяются все точки, которые расположены расстоянии не большем, чем h от найденной прямой:

$$\left\{(x_i, y_i, z_i) \middle| (x_i - x_{line})^2 + (y_i - y_{line})^2 \le h^2\right\}.$$

На рис. 3.9 (правое окно) показана полученная гистограмма. Темные точки на ней соответствуют положению опор контактной сети. Видно, что по гистограмме явно выделяются 2 опоры контактной сети.

После рассмотренной процедуры обнаружения опор контактной сети требуется провести их идентификацию и уточнить параметры их пространственного положения. Это делается с помощью трехмерных моделей, базирующихся на аналитических функциях расстояния, а также метода глобальной оптимизации, основанного на принципах построения генетических вероятностных алгоритмов. Данные конструкции будут рассмотрены в следующих разделах данной статьи.

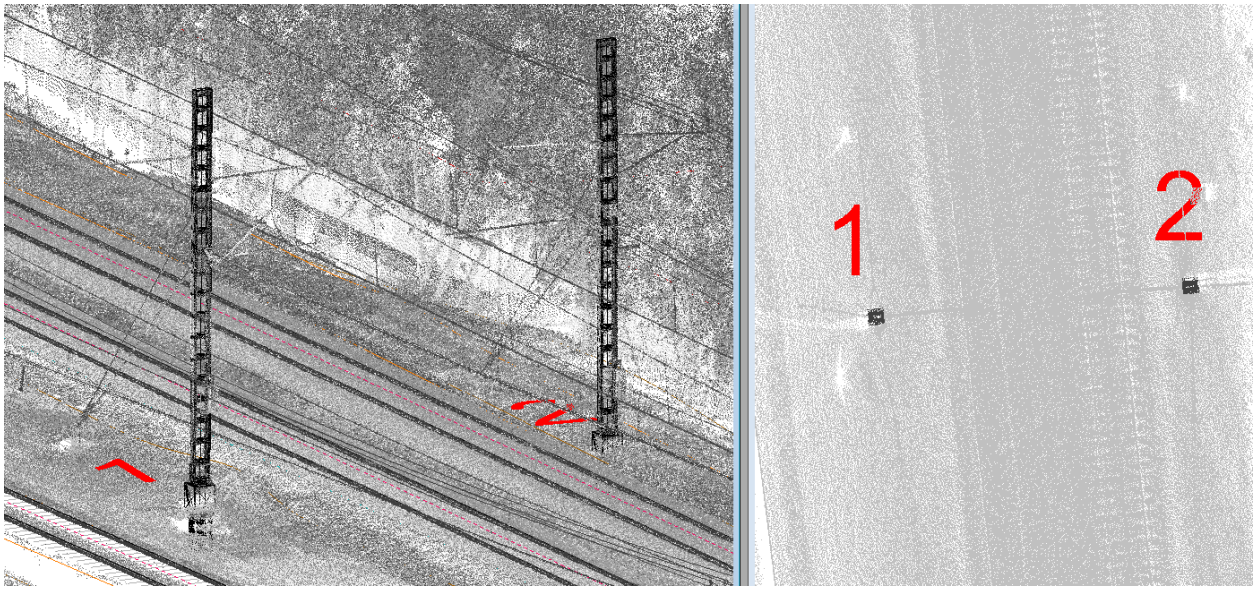


Рисунок 3.9. Построенная гистограмма для выделения опор контактной сети.

Аналитические функции расстояния

Аналитические функции расстояния могут использоваться для анализа трехмерных моделей объектов при решении задач распознавания. В данном разделе рассматриваются аналитические функции расстояния для объектов, которые могут быть построены, как объединение примитивов, представляющих собой тела вращения. Функция расстояния представляет собой расстояние до поверхности объекта и для рассмотренного класса объектов вычисление расстояния до поверхности может быть сведено к задаче нахождения расстояния до плоских объектов. Для этого нужно провести плоскость, проходящую через ось вращения и интересующую нас точку, от которой и ищется интересующее нас расстояние. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать вычисление функции расстояния на плоскости. Функция расстояния называется аналитической, если ее можно представить в качестве суперпозиции элементарных функций. Хорошо известно, что на плоскости класс аналитических функций расстояния ограничивается объектами, граничные точки которых можно описать с помощью конечного множества отрезков прямых и дуг окружностей. Несмотря на

то, что класс рассматриваемых трехмерных объектов достаточно узок, с помощью него можно с достаточной точностью описать трехмерные объекты типа «столб» и не иметь не очень трудоемкие вычисления, связанные с идентификацией объектов.

Рассмотрим, как строятся функции расстояния для основных примитивов на плоскости. Расстояние от точки до отрезка. Будем считать, что имеется точка $\mathbf{x} \in \square^2$ и требуется найти расстояние до отрезка $[\mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_i]$, заданного точками как показано на рис. __.

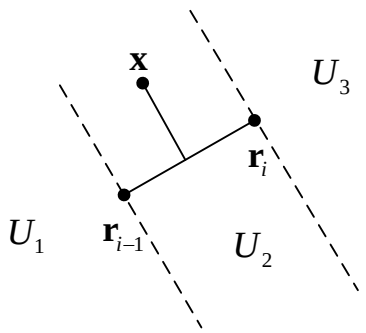


Рисунок 3.10. Иллюстрация к расчету расстояния $d(\mathbf{x}, [\mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_i])$.

При поиске данного расстояния возможно два случая. В первом случае ближайшей точкой $\mathbf{y}$ до точки $\mathbf{x}$ является внутренняя точка отрезка $[\mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_i]$ (область U_2 на рис. 1), во втором случае ближайшей точкой является одна из точек $\mathbf{r}_{i-1}$ или $\mathbf{r}_i$ (области U_1 и U_3 на рис. 3.10). Обозначим через $\mathbf{n} = \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}|}(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{i-1}) = (a_{\mathbf{n}}, b_{\mathbf{n}})$. Тогда расстояние $d(\mathbf{x}, [\mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_i])$, где $\mathbf{x} = (a_{\mathbf{x}}, b_{\mathbf{x}})$, $\mathbf{r}_i = (a_{\mathbf{r}_i}, b_{\mathbf{r}_i})$, может быть вычислено по формуле:

$$d(\mathbf{x}, [\mathbf{r}_{i-1}, \mathbf{r}_i]) = \begin{cases} |\mathbf{x} - \mathbf{r}_{i-1}|, & (\mathbf{x} - \mathbf{r}_{i-1})\mathbf{n} \le 0, \\ |\mathbf{x} - \mathbf{r}_i|, & (\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)\mathbf{n} \ge 0, \\ \left| a_{\mathbf{n}}(b_{\mathbf{x}} - b_{\mathbf{r}_{i-1}}) - b_{\mathbf{n}}(a_{\mathbf{x}} - a_{\mathbf{r}_{i-1}}) \right|, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Аналогично находится расстояние и до дуги окружности. Полученную функцию расстояния можно использовать, например, для вычисления

расстояния до ломаной, заданной в виде последовательности точек $C = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, ..., \mathbf{r}_n)$, как показано на рис. 3.11.

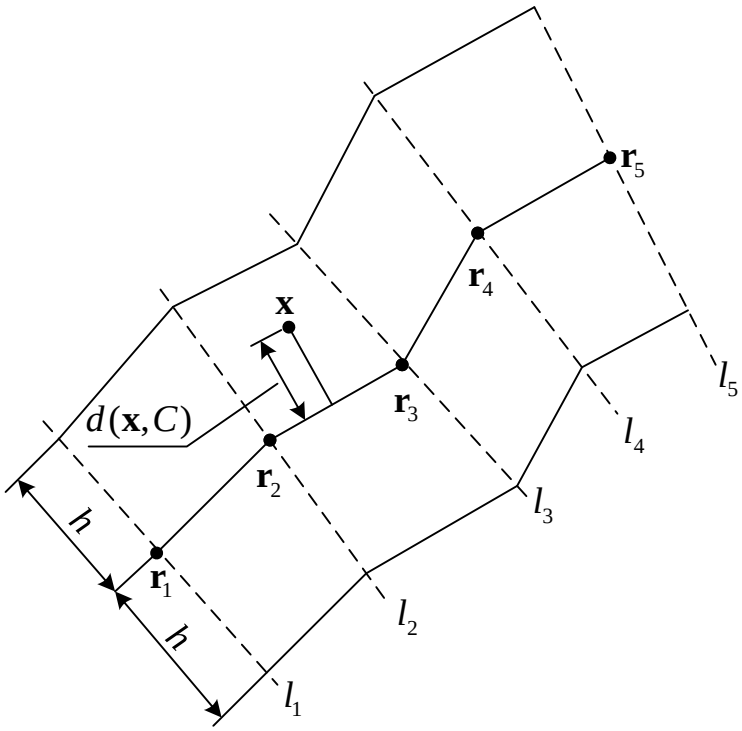


Рисунок 3.11. Иллюстрация к расчету расстояния $d(\mathbf{x},C)$.

В этом случае, очевидно, что

$$d(\mathbf{x},C) = \min_{i \in \{2,...,n\}} d(\mathbf{x},[\mathbf{r}_{i-1},\mathbf{r}_i]).$$

Оценка параметров положения опор контактной сети с помощью вероятностного генетического алгоритма

Будем считать, что у нас есть трехмерная модель опоры контактной сети, заданная функцией расстояния $f(\mathbf{x},\mathbf{a})$, которая дает расстояние от точки $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ до объекта, пространственное положение которого, а также другие характеристики определяет вектор параметров $\mathbf{a}$. Тогда оценивание вектора параметров по множеству точек $X = \{\mathbf{x}_i\}$ может быть получено как решение следующей оптимизационной задачи:

$$F(X,\mathbf{a}) = \sum_{\mathbf{x}_i \in X} f^2(\mathbf{x}_i,\mathbf{a}) \to \min$$

относительно вектора параметров $\mathbf{a}$. Поскольку функционал $F(X,\mathbf{a})$, как правило, имеет неважные дифференциальные свойства, которые желательны для применения классических методов оптимизации, например. градиентных методов, в работе предлагается метод оптимизации, основанный на идее, используемой при построении вероятностных генетических алгоритмов [8]. Данная идея заключается в следующем. Предположим, что имеется вероятностное распределение вектора параметров $\mathbf{a}$,отражающее информацию о возможных уклонениях $\mathbf{a}$ от нормативных показателей. По этому распределению генерируется выборка (популяция) решений. Далее проводится селекция выборки, заключающаяся в том, что из нее удаляются менее оптимальные решения. После этого по усеченной выборке оценивается новое вероятностное распределение решений и рассмотренные выше этапы повторяются. Теоретически получаемая последовательность вероятностных распределений должна сходиться к точечному вероятностному распределению Дирака, которое и определяет искомый глобальный экстремум. При реализации данного подхода требуется выбрать класс вероятностных распределений, в рамках которого можно с достаточной точностью описывать анализируемые последовательности распределений. Очевидно, что выбор оптимального класса вероятностных распределений существенно зависит для решения нашей задачи от идентифицируемых объектов и связанных с ними функциями расстояния. При этом рассматриваемая задача значительно упрощается, если предположить независимость параметров в генерируемых выборках. Такое предположение является достаточно правдоподобным, если считать, что искомые параметры незначительно отклоняются от нормативных. В этом случае, можно предположить, что вероятностное распределение каждого параметра можно аппроксимировать нормальным распределением. Пользуясь

предположениями, описанными выше, можно формализовать предлагаемую схему вычислений с помощью следующей процедуры.

0. Входные данные: функция расстояния $f(\mathbf{x},\mathbf{a})$, $\mathbf{a}^{(0)}$ - начальное значение вектора параметров, $\boldsymbol{\sigma}^{(0)}$ - начальный вектор среднеквадратических отклонений параметра $\mathbf{a}$, $i := 0$.

1. Генерация выборки возможных решений $\{\mathbf{a}_1,\ldots,\mathbf{a}_N\}$ и ее упорядочивание таким образом, чтобы $F(X,\mathbf{a}_1) \le F(X,\mathbf{a}_2) \le \ldots \le F(X,\mathbf{a}_N)$.

2. Усечение выборки, которое заключается в том, что мы в ней оставляем наиболее оптимальные решения до некоторого индекса N_1 (N_1 - это параметр алгоритма и выбирается приблизительно равным $0.3N$).

3. Нахождение оценок математического ожидания и среднеквадратических отклонений по усеченной выборке $\{\mathbf{a}_1,\ldots,\mathbf{a}_{N_1}\}$:

$$\mathbf{a}^{(i+1)} = \frac{1}{N_1}\sum_{k=1}^{N_1}\mathbf{a}_k, \quad \boldsymbol{\sigma}^{(i+1)} = \sqrt{\frac{1}{N_1-1}\sum_{k=1}^{N_1}\left(\mathbf{a}_k - \mathbf{a}^{(i+1)}\right)^2},$$

причем в последней формуле операции возведения в степень и извлечения корня предполагаются покоординатными.

4. $i := i+1$. Если $\left|\boldsymbol{\sigma}^{(i)}\right| \le \varepsilon$, то в качестве решения выбирается $\mathbf{a}^{(i)}$, иначе переход к шагу 1.

Рассмотрим реализацию данного алгоритма на примере. Для простоты будем рассматривать модельную задачу, в которой требуется оценить положение «опоры контактной сети» на плоскости. При этом в качестве модели возьмем функцию расстояния

$$f(\mathbf{x}) = \min\left\{d(\mathbf{x},[\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2]), d(\mathbf{x},[\mathbf{r}_3,\mathbf{r}_4])\right\},$$

где $\mathbf{r}_1 = (0,0)$, $\mathbf{r}_2 = (0,3.5)$, $\mathbf{r}_3 = (-1,3)$, $\mathbf{r}_4 = (2,3)$. Будем считать, что опора контактной сети описывается множеством точек

$\left\{\mathbf{x} \in \square^2 \mid f(\mathbf{x}) \le 0.1\right\}$. В результате моделирования было получено множество сканированных точек, изображенных на рис. 3.12.

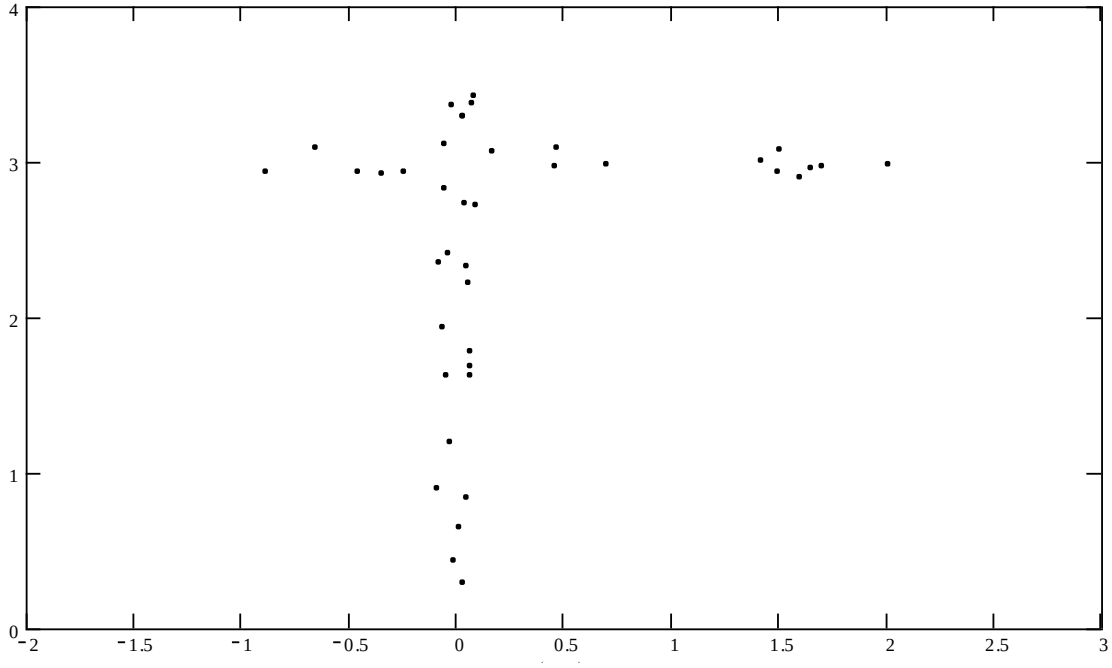


Рисунок 3.12. Множество данных, соответствующих модельному объекту «опора контактной сети».

Рассмотрим, как оценивается положение опоры контактной сети по точкам сканирования. Пусть $\mathbf{x} = (x, y)$ поворот и параллельное перемещение столба можно описать с помощью следующего преобразования функции расстояния:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{a}) = f(x\cos\alpha + y\sin\alpha + a, -x\sin\alpha + y\cos\alpha + b),$$

где $\mathbf{a} = (a, b, \alpha)$ - это вектор параметров. Будем считать, что начальное приближение положения столба описывается вектором $\mathbf{a}^{(0)} = (-0.1, 0.1, 0.01)$. При этом возможные отклонения от данного положения описываются вектором среднеквадратических отклонений $\boldsymbol{\sigma}^{(0)} = (0.2, 0.2, 0.02)$. По данным изображенным на рис. была проверена работа предложенного алгоритма. После 20 итераций была получена следующая оценка пространственного положения опоры контактной

сети $\mathbf{a}^{(20)} = (-0.011, 0.024, -0.0033)$. Отметим, что истинное пространственное положение, которое было выбрано при моделирование, описывается вектором $\mathbf{a} = (0,0,0)$. Отметим, что $F(X, \mathbf{a}^{(20)}) \le F(X, \mathbf{a})$, т.е. решение $\mathbf{a}^{(20)}$ является более оптимальным, чем $\mathbf{a}$. Точность полученного оптимального решения дает вычисленный вектор $\boldsymbol{\sigma}^{(20)} = (0.000010, 0.000045, 0.000013)$.

Алгоритм автоматического определения параметров земляного полотна

В настоящее время развиваются методы автоматического мониторинга профиля земляного полотна и верхнего строения железнодорожного пути на протяженных участках дороги. Профиль (точнее, поперечный профиль) включает полосу отвода или территорию до защитных лесонасаждений. Земляное полотно должно удовлетворять требованиям установленной нормативной документации. Но под воздействием динамических поездных нагрузок и влиянием природно-климатических факторов происходит его деформация и со временем оно может не удовлетворять условиям дальнейшей эксплуатации. В этом случае предпринимаются меры по поддержке земляного полотна – от обычных регламентных работ до срочного восстановления. В связи с этим возникает необходимость постоянной диагностики (или мониторинга) земляного полотна. Учитывая протяженность существующих железнодорожных линий, мониторинг становится чрезвычайно трудоемкой, требующей постоянного внимания процедурой [1, 2].

К числу наиболее простых и широко используемых методов мониторинга относятся так называемые традиционные и геодезические методы диагностики. Традиционные методы включают в себя

эксплуатационные наблюдения – визуальный осмотр, учет выправок пути, замеры смещений масс грунта, проверка положения и роста трещин, а геодезические – нивелирование по точкам створов и головкам рельсов, проверка сдвижки пути, съемка поперечных и продольных профилей земляного полотна.

Развитие методов анализа и обработки результатов диагностики земляного полотна позволяют на основе оценки его фактического состояния обосновать очередность и установить сроки ремонта и усиления полотна, повысить безопасность движения поездов за счет своевременного выявления поврежденных участков. При этом не нарушается график движения поездов и не требуется предоставление технологических «окон». Экономический эффект от применения автоматизированных систем диагностики обусловлен тем, что быстрее снимаются ограничения на скорость движения поездов при прохождении деформированных участков (ограничения снимаются после выполнения работ по усилению полотна), устраняются перерывы в движении поездов вследствие своевременного ремонта насыпей вблизи пути и др.

Эффективность диагностики земляного полотна во многом определяется такими свойствами как объективность, достоверность, простота проведения, оперативность, дешевизна. При этом требуется мониторинг целых участков и направлений, применяющийся для деформаций массового характера на большом протяжении. Учитывая протяженность, особую ценность приобретают методы мониторинга, главными свойствами которых являются быстрота проведения и дешевизна. Наиболее простыми, но важными являются наблюдения за соответствием сложившихся профилей земляного полотна с типовыми нормативными профилями для заданных грунтов, слагающих насыпи или выемки. На основании таких наблюдений и их сравнительного анализа требуется фиксировать такие параметры как:

- ненормативная ширина плеча балластной призмы;

- ненормативная ширина обочины земляного полотна;

- места с завышенной крутизной откосов;

- нарушение структурных линий полотна, представляющих собой продольные линии излома поверхности земли в полосе отвода, и др.

В связи с этим возникает необходимость разработки методов автоматического или автоматизированного сравнения поперечных профилей на основе использования специальных технических средств получения информации о поверхностном рельефе земли, отведенной под железнодорожный путь.

Для решения этой задачи перспективным является использование современных лазерных сканеров, которые, по сути, представляют собой лазерные дальномеры. Технически это сводится к тому, что посредством геометрических преобразований оказывается возможным восстановить в некоторой координатной системе координаты большого количества точек (облака точек) поверхности.

Для обработки и анализа полученных в результате сканирования данных требуется решение ряда математических и алгоритмических задач. В частности, необходимо разработать методы координатной привязки данных и эффективную систему визуализации точек сканирования. Требуется создать алгоритмы двумерной аппроксимации поверхности на основе лазерных измерений, анализа возникающих в результате сканирования шумов, выделения семантически важных объектов и др. Сложность решения этих задач связана с необходимостью хранения большого объема получаемых данных, а также требованием быстрого их анализа и последующей обработки [3, 4]. Поэтому направление исследований, связанное с построением методов и алгоритмов обработки данных лазерного сканирования является актуальным.

В работе использовались реальные данные сканирования, полученные с помощью технических комплексов наземного лазерного сканирования, устанавливаемых на специально оборудованном поезде [5]. Технологически это реализуется путем установки двух лазеров на задней стенке последнего вагона. В процессе движения вагона каждый лазер сканирует свою часть полупространства – соответственно, слева и справа относительно движения, формируя совокупность замеров (рис. 3.13).

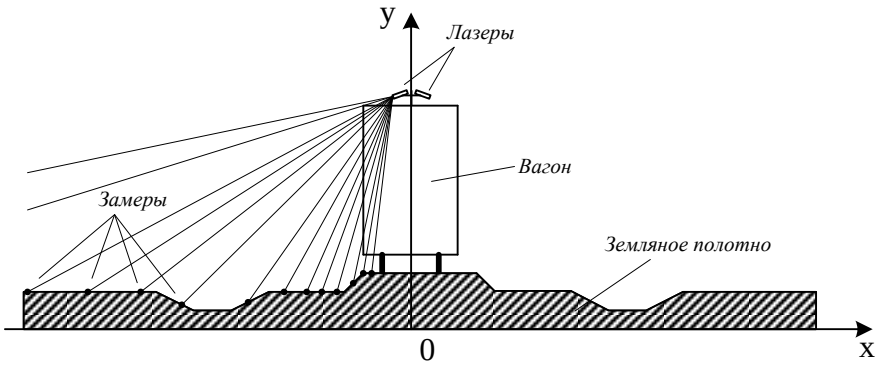


Рисунок 3.13. Схема измерений земляного полотна.

Описание и общая постановка задачи

При организации лазерного сканирования можно выделить ряд особенностей, которые состоят в следующем:

- совокупность измерений, называемых в дальнейшем замерами, представляет собой конечное множество точек, количество которых определяется частотой излучения лазера и может варьироваться в зависимости от его технических возможностей;

- за один проход лазеров получается совокупность замеров по общему углу охвата в 360 градусов (по 180 градусов на каждый лазер);

- распределение точек замеров существенно зависит от высоты расположения лазера над поверхностью земли. Поскольку лазеры устанавливаются на задней стенке последнего вагона, то считается, что высота подвеса лазеров равна $4 \div 5$ м над рельсами;

- характер и совокупность данных зависят от того, перемещается ли поезд на открытом пространстве (насыпь), на полуоткрытом (выемка) или в закрытом пространстве (например, тоннель);

- точки замеров расположены относительно равномерно по угловой мере, так как сканирующий луч перемещается дискретно во времени, а значит, и в пространстве, через равный угловой шаг;

- точки замеров располагаются крайне неравномерно в линейном измерении, поскольку происходит отражение от поверхностей, расположенных под разным углом по отношению к лучу лазера, и находящихся на разном расстоянии от источника лазерного излучения. При этом общая тенденция расположения точек-замеров состоит в их сгущении при приближении к балластной призме, так как расстояние до лазеров в этом случае уменьшается, и линейная мера угла становится меньше;

- данные реальных измерений оказываются сильно зашумленными. Ошибки измерений возникают из-за погрешностей собственно лазерного дальномера, а также в большей степени ввиду естественной неровности отражающей поверхности земляного полотна, наличия на нем посторонних предметов, растительности и пр.

Далее будем считать, что выполняются следующие предположения:

1) ошибка каждого измерения в одном цикле является суммой большого количества независимых или слабо зависимых факторов (случайных величин). Поэтому ошибка измерения может быть достаточно точно описана случайной величиной, подчиненной нормальному закону распределения;

2) случайные величины имеют короткий «промежуток зависимости». Иными словами, случайные возмущения слабо связаны с их предысторией, и поэтому статистическая зависимость двух измерений быстро уменьшается с ростом расстояния между ними. Перечисленные выше факторы, влияющие на возникновение ошибок в измерениях,

позволяют считать данное предположение вполне реалистичным. Это условие гарантирует, что получаемые на основе таких измерений стандартные статистические оценки являются асимптотически гауссовскими в смысле центральной предельной теоремы [6].

Таким образом, в результате одного цикла измерений получается случайная последовательность точек-замеров, которая примерно отражает рельеф земляного полотна слева и справа от железнодорожного пути. Задача обработки полученных данных состоит в том, чтобы по последовательности измерений восстановить исходную форму профиля полотна.

Модель края

Локальный метод выделения краев изображений [7] основан на проверке статистических гипотез о характере случайной последовательности, в качестве которой можно рассматривать строки и столбцы матрицы трехмерного изображения земляного полотна. Форма идеального края представляет собой кусочно-линейную функцию, состоящую из линейных участков, показанную на рис. 3.13. В том случае, если «остроконечность» краев сглажена за счет изменений с течением времени, указанное сглаживание можно получить из идеальной модели края с помощью оператора свертки, ядро которого описывается гауссовой функцией $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta}e^{-\frac{x^2}{2\Delta^2}}$.

Пусть идеальный край описывается кусочно-линейной функцией

$$g(x\,|\,a_1,a_2)=\begin{cases} a_1x, & x<0,\\ (a_2+a_1)x, & x\geq 0.\end{cases}$$

Тогда сглаженную модель края можно получить с помощью интеграла свертки

$$f(x\,|\,a_1,a_2)=\int_{-\infty}^{+\infty} g(x-t)\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta}e^{-\frac{t^2}{2\Delta^2}}dt=$$

$$\int_{-\infty}^{x}(a_2+a_1)(x-t)\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta}e^{-\frac{t^2}{2\Delta^2}}dt+\int_{x}^{+\infty}a_1(x-t)\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta}e^{-\frac{t^2}{2\Delta^2}}dt=$$

$$a_1x+a_2x\Phi\left(x/\Delta\right)+\frac{a_2\Delta}{\sqrt{2\pi}}e^{-x^2/2\Delta^2},$$

где Φ – это функция Лапласа. Отметим, что, если в последней формуле $a_2=0$, то $f(x|a_1,a_2)=g(x|a_1,a_2)=a_1x$. Кроме того, если $\Delta\to 0$, т.е. сглаживание края отсутствует, то также $f(x|a_1,a_2)=g(x|a_1,a_2)$. Мы получим общую модель края, если с помощью функции $f(x)$ будем описывать различные положения краевой точки x_0 вдоль координаты x, и высоты точки c. Тогда

$$f(x|a_1,a_2,c,x_0)=c+a_1(x-x_0)+a_2\varphi(x-x_0),$$

где $\varphi(x)=x\Phi\left(x/\Delta\right)+\frac{\Delta}{\sqrt{2\pi}}e^{-x^2/2\Delta^2}$. Сглаженная модель края для $c=1$, $x_0=1$, $a_1=1$, $a_2=-1$ и $\Delta=0.1$ изображена на рис. 3.14.

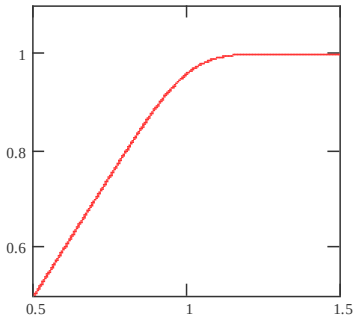


Рисунок 3.14. Сглаженная модель края.

Вероятностная модель края. Дискриминантная функция

Вероятностную модель края можно получить, если добавить к функции $f(x)$ случайную составляющую ε, т.е. $\tilde{f}(x)=f(x)+\varepsilon$. Во многих случаях составляющую ε можно достаточно точно описать, используя модель белого шума. Последнее предположение позволяет записать функцию плотности вероятности случайной функции $\tilde{f}(x)$ в точке x:

$$h(y|x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(y-f(x))^2}{2\sigma^2}},$$

где $f(x)$ – это модель края. Далее дискретные значения высот в поперечном сечении профиля будем описывать с помощью случайной последовательности вида $(Y_1(x_1),Y_2(x_2),...,Y_N(x_N))$, в которой последовательно записаны значения высот, определенные в точках

$x_1, x_2, ..., x_N$. С учетом этого, с помощью функции $h_i(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-f(x_i))^2}{2\sigma^2}}$ будем описывать плотность вероятности случайной величины Y_i. При анализе конечных участков профиля, возможна ситуация, когда этот участок описывается линейной функцией, т.е. на нем нет краевых точек. В этом случае значения высот можно описать случайной функцией $\tilde{f}(x) = b + ax + \varepsilon$, и на этом участке случайные величины можно охарактеризовать плотностью $h_i(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-b-ax_i)^2}{2\sigma^2}}$.

Рассмотрим идею локального обнаружения краевых точек в последовательности $(Y_1(x_1), Y_2(x_2), ..., Y_N(x_N))$. Внутри отрезка $[x_{i-m}, ..., x_{i+m}]$ строится функция правдоподобия гипотезы «точка x_i является точкой края», против альтернативной гипотезы «внутри указанного отрезка нет краевых точек». Следует отметить, что это один из подходов выбора дискриминантной функции, которая по определению должна принимать большие значения вблизи краевых точек и относительно небольшие значения на участках, где нет краевых точек.

Найдем аналитическое выражение для дискриминантной функции, основанной на модели края (1). Будем считать, что поперечный профиль задан последовательностью точек $\{(x_1, y_1), ..., (x_N, y_N)\}$. В этом функция правдоподобия первой гипотезы определяется равенством

$$R_1(x_i \mid x_{i-m}, ..., x_{i+m}, y_{i-m}, ..., y_{i+m}) = \max_{a_1, a_2, c} \prod_{k=i-m}^{i+m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[y_k - c - a_1(x_k - x_i) - a_2\varphi(x_k - x_i)]^2}{2\sigma^2}}.$$

Также нетрудно получить функцию правдоподобия для второй гипотезы

$$R_2(x_i \mid x_{i-m}, ..., x_{i+m}, y_{i-m}, ..., y_{i+m}) = \max_{b,a} \prod_{k=i-m}^{i+m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{[y_k - b - ax_k]^2}{2\sigma^2}}.$$

Далее дискриминантная функция строится как логарифм отношения функций правдоподобия гипотез:

$$L(x_i) = \ln\left(\frac{R_1(x_i \mid x_{i-m}, ..., x_{i+m}, y_{i-m}, ..., y_{i+m})}{R_2(x_i \mid x_{i-m}, ..., x_{i+m}, y_{i-m}, ..., y_{i+m})}\right) =$$

$$-\min_{a_1, a_2, c} \sum_{k=i-m}^{i+m} \frac{[y_k - c - a_1(x_k - x_i) - a_2\varphi(x_k - x_i)]^2}{2\sigma^2} +$$

$$\min_{a,b} \sum_{k=i-m}^{i+m} \frac{[y_k - b - a(x_k - x_i)]^2}{2\sigma^2}.$$

Можно показать [8], что выше рассмотренная функция, основанная на отношении правдоподобия гипотез, обладает всеми требуемыми свойствами, необходимыми для дискриминантных функций. Минимизационные задачи в правой части последнего равенства имеют явное решение, которое можно получить, решая линейные системы алгебраических уравнений:

1) относительно a_1, a_2, c:

$$\begin{cases} c(2m+1) + a_1 \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i) + a_2 \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} \varphi(x_k - x_i) = \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} y_k, \\ c \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i) + a_1 \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i)^2 + a_2 \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i)\varphi(x_k - x_i) = \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i) y_k, \\ c \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} \varphi(x_k - x_i) + a_1 \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i)\varphi(x_k - x_i) + a_2 \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} \varphi^2(x_k - x_i) = \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} \varphi(x_k - x_i) y_k; \end{cases}$$

2) относительно a и b:

$$\begin{cases} b(2m+1) + a \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i) = \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} y_k, \\ b \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i) + a \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i)^2 = \sum\limits_{k=i-m}^{i+m} (x_k - x_i) y_k. \end{cases}$$

Оценивание положений краевых точек. Транзитивное замыкание дискриминантной функции

Положение краевых точек можно оценить, анализируя локальные максимумы дискриминантной функции. При этом более достоверные оценки получаются, если использовать функцию, которая называется транзитивным замыканием дискриминантной функции. Эту функцию можно вычислить, используя формулу

$$\rho(x_i) = \max_{x_i \in [x_k, x_m]} E[x_k, x_m], \qquad (1)$$

где $E[x_1, x_2]$ - среднее значение дискриминантной функции на отрезке $[x_k, x_m]$, а максимум в формуле берется по всем отрезкам $[x_k, x_m]$, содержащим точку x_i. Таким образом, по определению

$$E[x_k, x_m] = \frac{1}{x_m - x_k} \int_{x_k}^{x_m} L(x)dx \quad . (2)$$

Отметим, что поскольку значение L известно, только в дискретных точках $x_{m+1}, \ldots, x_{N-m}$, вычисление последнего интеграла производится по приближенным формулам из вычислительной математики. В частности, если точки x_i расположены равномерно с

шагом Δh, т.е. $x_i = x_{i-1} + \Delta h$, то приближенный расчет $E[x_k, x_m]$ можно произвести по формуле:

$$E[x_k, x_m] = \frac{1}{m-k+1} \sum_{i=k}^{m} L(x_i) \quad . (3)$$

При практической реализации этого метода вычисление формулы (3) можно упростить. Для этого находят максимум по всем отрезкам, длина которых не превышает некоторого числа m. Далее в качестве краевых точек выбираются точки, в которых функция ρ имеет локальные максимумы, причем значение функции в этих точках должно быть больше некоторого фиксируемого порога h.

Реализация метода для профиля, заданного аналитически

Ранее уже отмечалось, что профиль в результате предварительной обработки может быть задан в виде кусочно-линейной аппроксимации, которая получается, если мы используем триангуляцию. В этом случае анализируемый профиль f можно задать последовательностью значений $f(x_k)$ в точках x_k, $k = 1,...,N$, причем следует выбрать равномерное распределение точек x_k на оси x, т.е. $x_i = x_{i-1} + \Delta h$, $i = 2,...,N$. Другой альтернативой является обобщение дискриминантной функции для непрерывного случая. Пусть f - это наблюдаемый профиль. Тогда дискриминантная функция может быть выбрана следующим образом:

$$L(x) = -\min_{a_1, a_2, c} \int_{x-s}^{x+s} \left(f(u) - c - a_1(u-x) - a_2\varphi(u-x) \right)^2 du +$$

$$\min_{a,b} \int_{x-s}^{x+s} \left(f(u) - b - a(u-x) \right)^2 du \quad . (4)$$

Отметим. что здесь в качестве окрестности точки x, по которой вычисляется дискриминантная функция выбирается отрезок $[x-s, x+s]$. Данная дискриминантная функция является обобщением дискриминантной функции, рассмотренной в предыдущем разделе, так как фактически при расчете дискриминантной функции мы аппроксимируем анализируемый профиль на участке $[x_{i-m}, x_{i+m}]$ по методу наименьших квадратов, подбирая параметры функций $f(x \mid a_1, a_2, c, x_i) = c + a_1(x - x_i) + a_2\varphi(x - x_i)$ и $f(x \mid a, b) = b + ax$, т.е. формула (4) является интегральным аналогом формулы (2). При расчете дискриминантной функции (4) решение оптимизационных задач также связано с решением систем линейных уравнений. В данном случае значения a_1, a_2, c находятся из системы:

$$\begin{cases} c\int\limits_{x-s}^{x+s} du + a_1\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)du + a_2\int\limits_{x-s}^{x+s}\varphi(u-x)du = \int\limits_{x-s}^{x+s} f(u)du, \\ c\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)du + a_1\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)^2du + a_2\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)\varphi(u-x)du = \int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)f(u)du, \\ c\int\limits_{x-s}^{x+s}\varphi(u-x)du + a_1\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)\varphi(u-x)du + a_2\int\limits_{x-s}^{x+s}\varphi^2(u-x)du = \int\limits_{x-s}^{x+s}\varphi(u-x)f(u)du. \end{cases}$$

Данная система, после несложных преобразований приводится к виду:

$$\begin{cases} c2s + a_2\int\limits_{-s}^{s}\varphi(u)du = \int\limits_{-s}^{s} f(u+x)du, \\ a_1(2/3)s^3 + a_2\int\limits_{-s}^{s}u\varphi(u)du = \int\limits_{-s}^{s} uf(u+x)du, \\ c\int\limits_{-s}^{s}\varphi(u)du + a_1\int\limits_{-s}^{s}u\varphi(u)du + a_2\int\limits_{-s}^{s}\varphi^2(u)du = \int\limits_{-s}^{+s}\varphi(u)f(u+x)du. \end{cases}$$

Отметим, что, поскольку функция

$$\varphi(x) - 0.5x = x\left(\Phi\left(x/\Delta\right) - 0.5\right) + \frac{\Delta}{\sqrt{2\pi}}e^{-x^2/2\Delta^2}$$

является четной, то $\int\limits_{-s}^{s} u\left(\varphi(u) - 0.5u\right)du = 0$. С учетом этого,

$$\int\limits_{-s}^{s} u\varphi(u)du = 0.5\int\limits_{-s}^{s} u^2du = (1/3)s^3.$$

Аналогичным образом находим a, b из системы:

$$\begin{cases} b\int\limits_{x-s}^{x+s} du + a\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)du = \int\limits_{x-s}^{x+s} f(u)du, \\ b\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)du + a\int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)^2du = \int\limits_{x-s}^{x+s}(u-x)f(u)du. \end{cases}$$

Откуда находим, что $b = \frac{1}{2s}\int\limits_{-s}^{s} f(u-x)du$ и $a = \frac{3}{2s^3}\int\limits_{-s}^{s} uf(u+x)du$.

Восстановление профиля земляного полотна

После оценивания положений всех точек переключения $\{x_1, ..., x_k\}$ идеальная функция, определяющая геометрию земляного полотна, может быть задана в виде:

$$g(x \mid c, a_1, ..., a_k, x_1, ..., x_k) = c + a_0x + \sum_{i=1}^{k} a_i(x - x_i)\chi(x - x_i),$$

где $\chi(x) = \begin{cases} 0, & x \le 0, \\ 1, & x > 0. \end{cases}$

Сглаженный профиль земляного полотна можно получить с помощью оператора свертки с ядром $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta}e^{-\frac{x^2}{2\Delta^2}}$:

$$\bar{g}(x\,|\,c,a_1,...,a_k,x_1,...,x_k)=\int_{-\infty}^{+\infty} g(x-t\,|\,c,a_1,...,a_k,x_1,...,x_k)\frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta}e^{-\frac{t^2}{2\Delta^2}}dt=$$

$$c+a_0x+\sum_{i=1}^{k}a_i\varphi(x-x_i).$$

Будем считать положения точек переключения известными, а для оценки параметров $c,a_1,...,a_k$ воспользуемся методом наименьших квадратов в интегральной форме. Пусть f - это наблюдаемый профиль на отрезке $[x_0,x_{k+1}]$. Тогда нахождение оценок параметров $c,a_1,...,a_k$ сводится к решению следующей оптимизационной задачи:

$$Q=\min_{c,a_1,...,a_k}\int_{x_0}^{x_{k+1}}\left(f(x)-\bar{g}(x\,|\,c,a_1,...,a_k,x_1,...,x_k)\right)^2dx.$$

Нетрудно определить, что нахождение точки минимума связано с решением следующей системы линейных уравнений:

$$c(x_{k+1}-x_0)+a_0 0.5(x_{k+1}^2-x_0^2)+\sum_{i=1}^{k}a_i\int_{x_0}^{x_{k+1}}\varphi\left(x-x_i\right)dx=\int_{x_0}^{x_{k+1}}f\left(x\right)dx,$$

$$c0.5(x_{k+1}^2-x_0^2)+a_0\frac{1}{3}(x_{k+1}^3-x_0^3)+\sum_{i=1}^{k}a_i\int_{x_0}^{x_{k+1}}x\varphi\left(x-x_i\right)dx=\int_{x_0}^{x_{k+1}}xf\left(x\right)dx,$$

$$c\int_{x_0}^{x_{k+1}}\varphi\left(x-x_j\right)dx+a_0\int_{x_0}^{x_{k+1}}x\varphi\left(x-x_j\right)dx+\sum_{i=1}^{k}a_i\int_{x_0}^{x_{k+1}}\varphi\left(x-x_j\right)\varphi\left(x-x_i\right)dx=$$

$$\int_{x_0}^{x_{k+1}}\varphi\left(x-x_j\right)f\left(x\right)dx,\quad j=1,...,k.$$

Экспериментальные результаты

Проверка работоспособности метода восстановления профиля земляного полотна проводилась на модельных и экспериментальных данных. Для генерации модельных данных был выбраны профили земляного полотна, отвечающие всем нормативным характеристикам в масштабе 1:1, высота подвеса лазерных сканирующих устройств варьировалась от 4 до 6 метров. Статистические данные представляли последовательность замеров $\{(\varphi_i,\rho_i)\}$ в полярной системе координат с полюсом в точке подвеса сканера, причем предполагалось равномерное изменение угла, т.е. $\varphi_i=\varphi_{i-1}+\Delta\varphi$, а шумовая составляющая, распределенная по нормальному закону с среднеквадратическим отклонением σ

добавлялась к значению полярного радиуса. Было установлено, что метод дает достаточно устойчивые результаты при $\sigma = 0.1$ и $\Delta\varphi = 0.001$ (радиан). Значение $\Delta\varphi = 0.001$ соответствует тому, что на анализируемых профилях получается порядка 1000 точек. Следует подчеркнуть, что метод начинает плохо работать, если часть профиля попадает в тень, т.е. высота подвеса оказывается недостаточной. В этом случае можно восстановить работоспособность метода, выявляя затененные участки. Результаты моделирования представлены на рис. ниже.

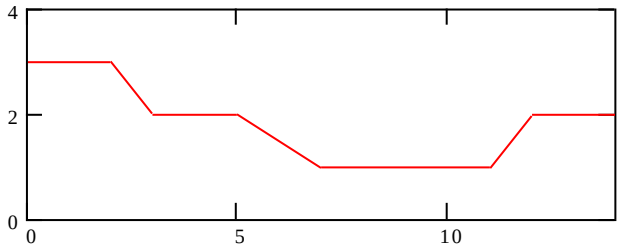


Рисунок 3.15. Идеальный профиль.

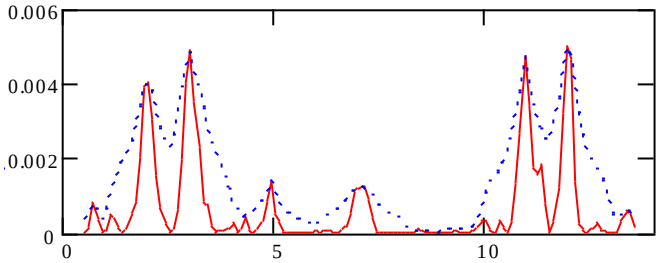


Рисунок 3.16. Дискриминантная функция и ее транзитивное замыкание.

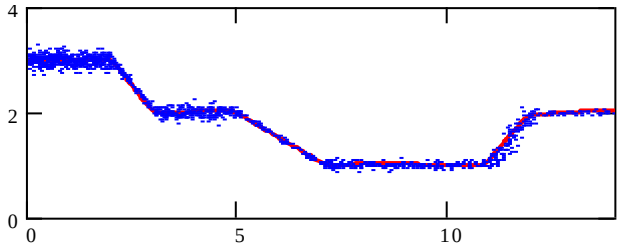


Рисунок 3.17. Статистические данные и восстановленный профиль.

Описание разработанных программных инструментов, автоматизирующих процесс создания ЦМП

Библиотека типовых элементов ИЖТ

К сожалению не все объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта поддаются автоматизации при создании их трехмерных моделей по данным МЛС. Это в первую очередь связано с большим разнообразием модификаций объектов, применяемых на ж.д.

Для унификации моделируемых объектов по конструкторским чертежам в среде Bentley MicroStation была создана библиотека типовых объектов ж.д., насчитывающая более 400 объектов; конструктор, позволяющий создавать нетиповые элементы и утилиты для автоматического и полуавтоматического «вписывания» объектов в облако лазерных точек.

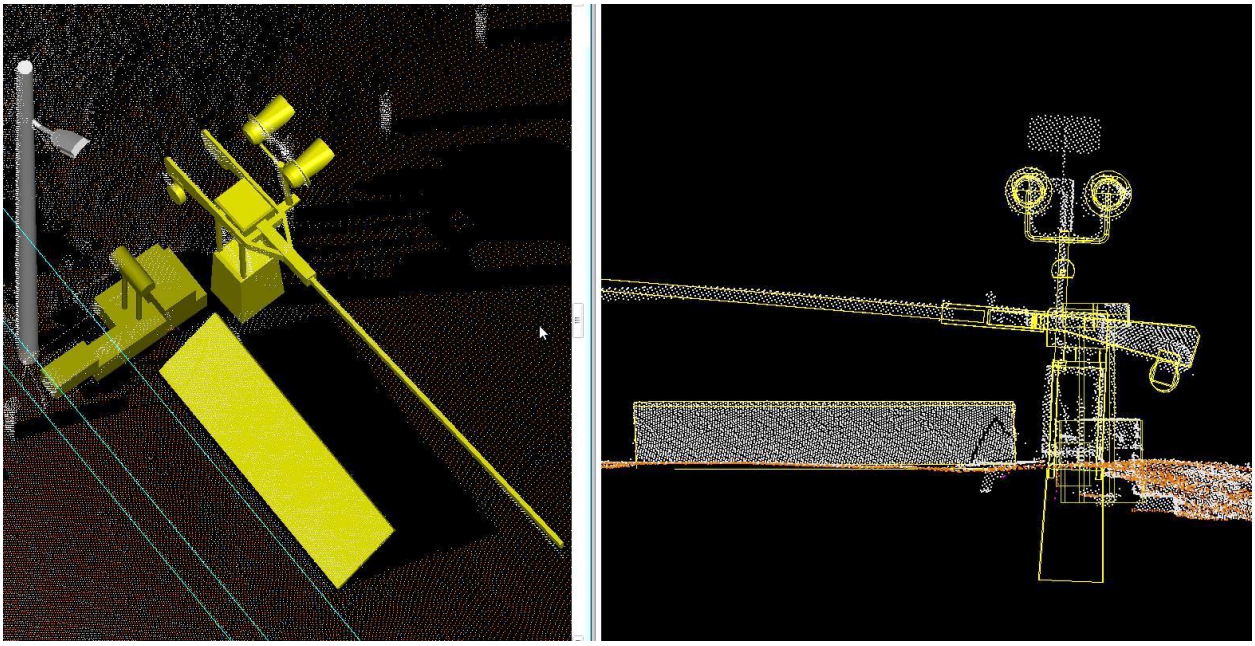


Рисунок 3.18. Пример библиотечного элемента устройств железнодорожного переезда, вписанного в облако точек лазерного сканирования.

1. *Программный модуль автоматического вписывания библиотечных элементов (опор контактной сети) в ТЛО*

Основные шаги алгоритма

- Поиск уровня земли;
- Определение высоты опоры;
- Разбиение точек на сечения; выбор двух лучших сечений (верхнего и нижнего);

- Вписывание окружностей в двух лучших сечениях (нахождение оси опоры);
- Поворот опоры на нужный угол;
- Переход к следующей опоре;

Описание некоторых основных переменных

Примечание:

- все значения длин\высот\расстояний даны в Master Units – по умолчанию это всегда метр;
- курсивом выделены переменные, вводимые в окно программы;

Переменная (значение по умолчанию)	**Описание**
middleGround trueHeight	Средний уровень земли внутри области поиска «Истинная» высота опоры
sectionCount	Кол-во сечений
sectionHeight = 0.30 sectionStep=0.15	Высота\глубина сечения по Z Промежуток между сечениями
stdReduceTolerance=2.5	Коэффициент фильтрации при вычислении стандартного отклонения, 2.5 - отбросить все что в 2.5 раза больше среднего
RmaxL = 0.45 *RmaxH = 0.32*	Ограничения на радиусы столбов, если алгоритм определения радиуса сработает неверно. RmaxL – нижний радиус, RmaxH – верхний радиус
deltaR =0.01, stepR =0.003, limX =0.15, limY =0.15 badPointsCount	Разница между внешней и внутренней окружностями вписывания Шаг, с которым происходит вписывание (точность вписывания) Пределы вписывания по X и Y, образуют прямоугольник [-0.15.. 0.15; -0.15.. 0,15] Кол-во «плохих» точек – за пределами окружностей

Таблица 3.1. Некоторые основные переменные и их значения по умолчанию

Подробное описание шагов алгоритма

Поиск уровня земли

Нахождение всех точек класса 2 (2 – Ground). Произведя деление суммы высот найденных точек на их количество – получаем средний уровень земли (***middleGround***).

Если внутри радиуса поиска нет точек класса 2, то за уровень земли принимается самая нижняя точка.

Определение высоты опоры

За высоту опоры (***trueHeight***) принимается высота предварительно поставленного CELL'а. Если включена опция поиска высоты, то за высоту принимается самая верхняя точка, попавшая в радиус поиска.

Разбиение точек на сечения; выбор двух лучших сечений (верхнего и нижнего)

Вычисляется количество сечений (**sectionCount**):

sectionCount = (trueHeigh-middleGround)/(sectionStep+sectionHeight)

В цикле по всем сечениям вычисляется:

1) центр масс всех точек, попавших в сечение;
2) стандартное отклонение точек от центра масс;

Далее происходит фильтрация сечений по значению стандартного отклонения. Задаваемый пользователем *Коэффициент фильтрации (**stdReduceTolerance***) отбрасывает все «плохие» сечения, которые не удовлетворили условию:

Стандартное отклонение <=(Среднее стандартное отклонение)*(Коэффициент фильтрации)

Самое первое сечение сверху, удовлетворившее условию фильтрации – лучшее сечение сверху;

Самое первое сечение снизу, удовлетворившее условию фильтрации – лучшее сечение снизу.

Вписывание окружностей в двух лучших сечениях (нахождение оси опоры)

Для каждого из двух «лучших сечений» необходимо произвести нахождение радиуса и центра окружности, наилучшим образом вписанной в облако точек [43, 45].

Первоначально вычисляется приблизительный радиус окружности (***R***), которая будет вписываться в точки сечения. Этот радиус равен максимальному расстоянию между любыми двумя точками сечения. В случае, если сечение зашумлено, радиус будет определяться

некорректно. Для этого вводятся максимальные значения радиусов столбов в верхнем и нижнем сечениях (***RmaxL, RmaxH***).
На следующем этапе определяется область поиска центра окружности. Она задается пределами– ***limX*** и ***limY***, которые образуют прямоугольник [***-limX.. limX; -limY.. limY***]

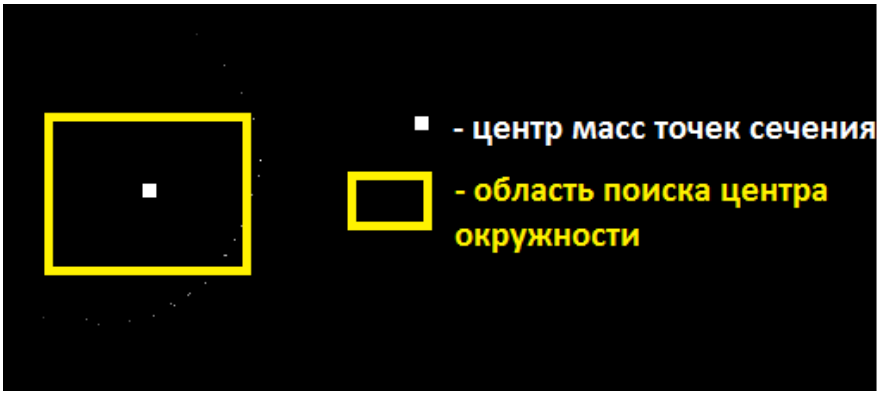


Рисунок 3.19. Центр масс точек сечения и область поиска центра окружности

Далее, проходя всю область поиска с определенным шагом (***stepR***), для каждого шага подсчитывается количество «плохих» точек (***badPointsCount***), находящихся снаружи окружности радиусом ***R*** и внутри окружности радиусом ***R-deltaR.*** Наилучшим образом вписанной считается та окружность, в которой значение ***badPointsCount*** минимально (см. рис. ниже)

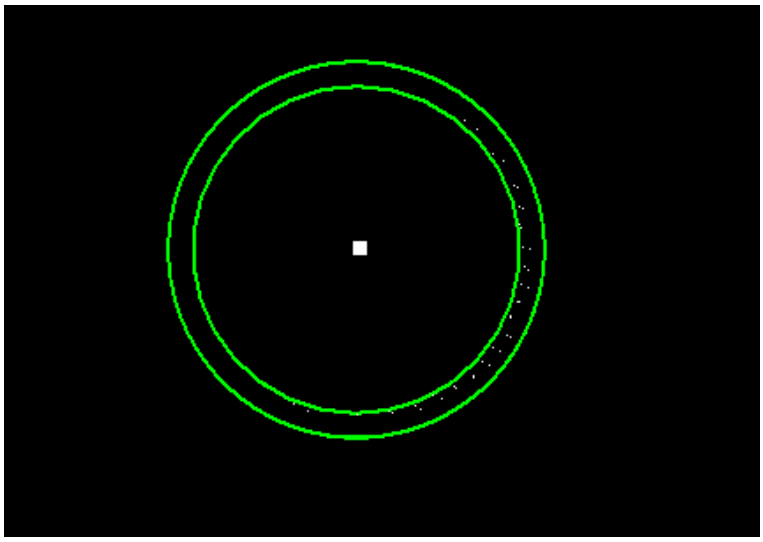


Рисунок 3.20. *Наилучшим образом вписанная окружность*

Прямая, проходящая через центры двух наилучшим образом вписанных в точки окружностей является осью опоры. Далее происходит совмещение предварительно поставленного CELL'а с найденной осью и переход к следующей опоре.

Для проверки корректности работы утилиты, было взято несколько тестовых участков железнодорожной трассы на которых расположены разные типы опор контактной сети и прочие объекты ИЖТ. В ходе исследования были выявлены следующие особенности работы программы:

1. Опоры КС.
   - Приемлимые условия:
     а.) ЖБ опора КС без фундамента, одиночная, с консолью, не искривленная, без многочисленного обвеса электрическими консолями, трансформаторами, размыкателями и проводами, качество точек хорошее. (Рис.3.19, 3.20)
     б.) ЖБ опора КС на фундаменте, одиночная, с консолью, не искривленная, без многочисленного обвеса электрическими консолями, трансформаторами, размыкателями и проводами, фронтальная плоскость фундамента параллельна траектории, вписываемая 3D модель четко совпадает по высоте, от вершины до фундамента , качество точек хорошее. (Рис.3.21)

Полуавтоматическая расстановка опор проводилась на участке протяженностью 1 км. по «инструкции по работе с программой» с использованием функции TerraScan: "Mouse Point Adjustment" и "Travel Path" и параметрами «по умолчанию», которые в данной ситуации и являются оптимальными, высота так же определялась автоматически.

На проведение линии траектории, предварительную расстановку cell'ов, автоматическое вписывание и проверку было затрачено 10 мин. Для сравнения, полностью «ручная» расстановка опор на том же участке заняла 15мин. Однако при автоматическом вписывании 2 опоры из 34 вписались программой не корректно, поэтому проверка после расстановки опор автоматом - обязательна.

- Неприемлемые условия:

а) Фундамент опоры КС не параллелен траектории. (Рис.6-7)

б) Сдвоенные опоры КС держащие жесткие поперечены. (Рис.9-13)

2. Опоры ЛЭП вписываются программой аналогично опорам КС без фундамента, если не имеют много обвеса.
3. Светофоры вписываются не корректно при любых параметрах настроек, так же как и прочие объекты ИЖТ. Но, созданные библиотечные 3D модели ИЖТ идеально вписываются в облако ТЛО ручным методом. По сравнению с векторизацией без использования модели это сокращает время моделирования в 2-3 раза.

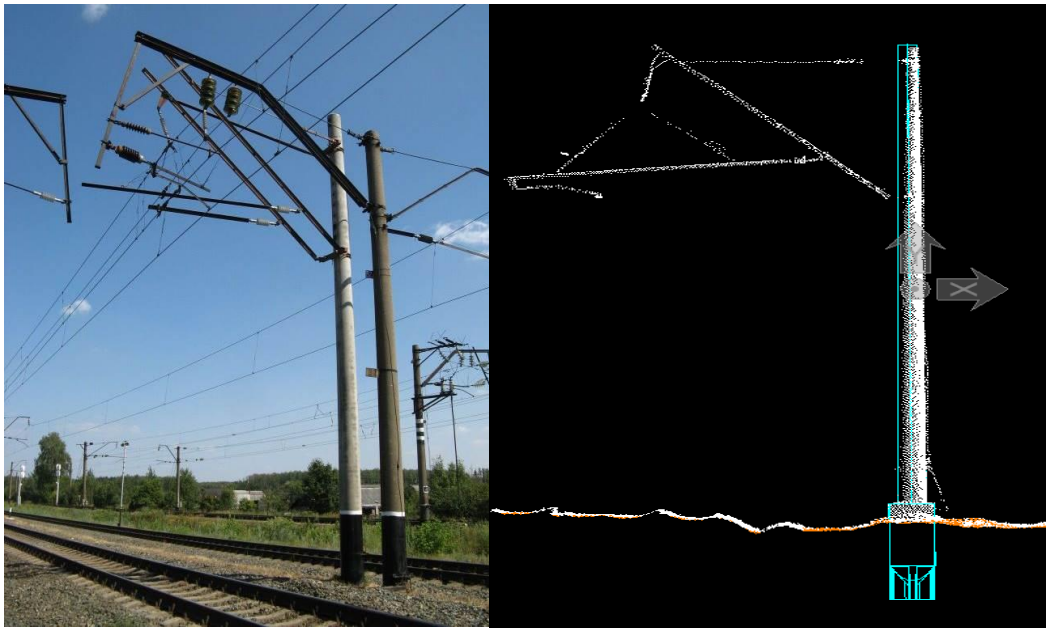


Рисунок 3.21. Результат работы утилиты автоматического вписывания библиотечных элементов опор контактной сети в облако лазерных точек.

Методика векторизации рельсовых нитей и построения оси пути

Автоматическое построение рельсовой нити по точкам лазерного отражения, получаемых описанным ранее способом, весьма трудоемко, ввиду многочисленных ручных исправлений, которые приходится делать в месте расхождения пути (на стрелках).

Разработан метод полуавтоматического вписывания шаблона рельсы определенного формата (R65), позволяющий получать ось пути в координатах с точностью порядка 10мм.

Ниже описана предлагаемая методика:

1) Подгружаем точки лазерного отражения (ТЛО);

2) После того, как мы загрузили ТЛО, необходимо провести линию по рельсам. Делается это либо с помощью утилиты TagRail, либо просто в ручную если участки для векторизации небольшие.

Рассмотрим простой вариант, вручную проводим линию:

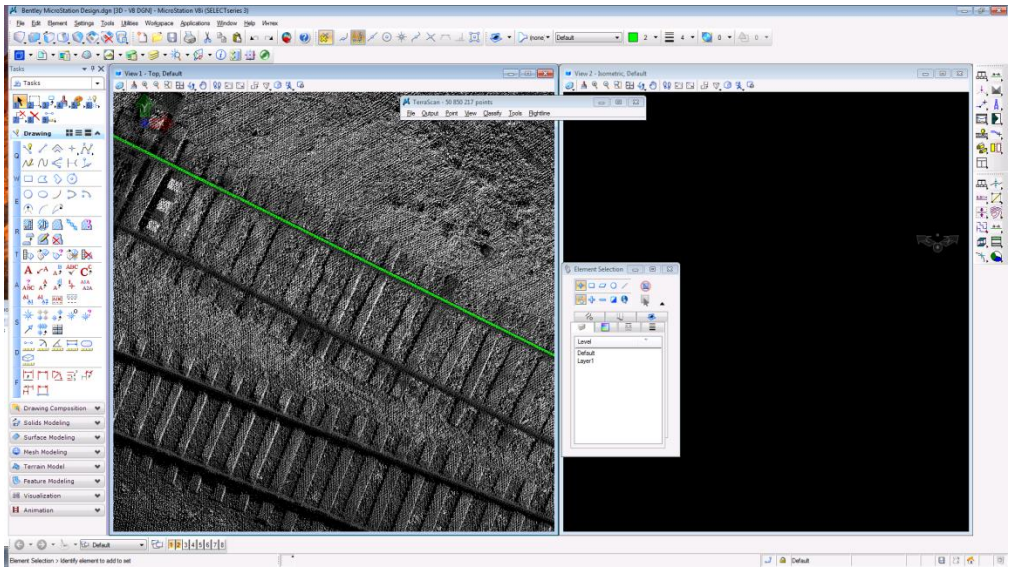


Рисунок 3.22. Построение направляющей

После того, как примерно провели рельсовую нить, вторую просто откладываем на расстоянии 1,595 метра в сторону второго рельса команда «Move parallel».

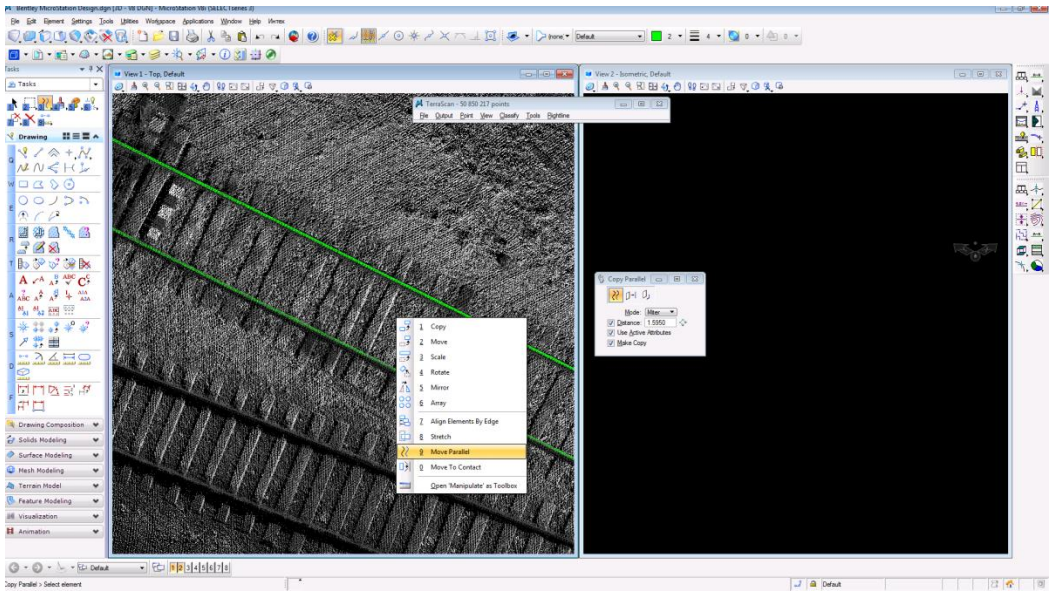
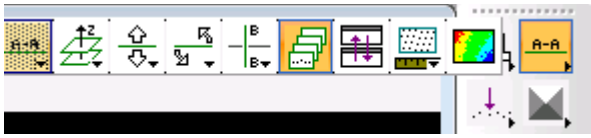


Рисунок 3.23. Построение второй направляющей

После этого необходимо выделить одну рельсовую нить и выбрать команду «Travel Path».



Далее в появившемся окне выставляем параметры в зависимости от плотности ТЛО и индивидуальных настроек оператора:

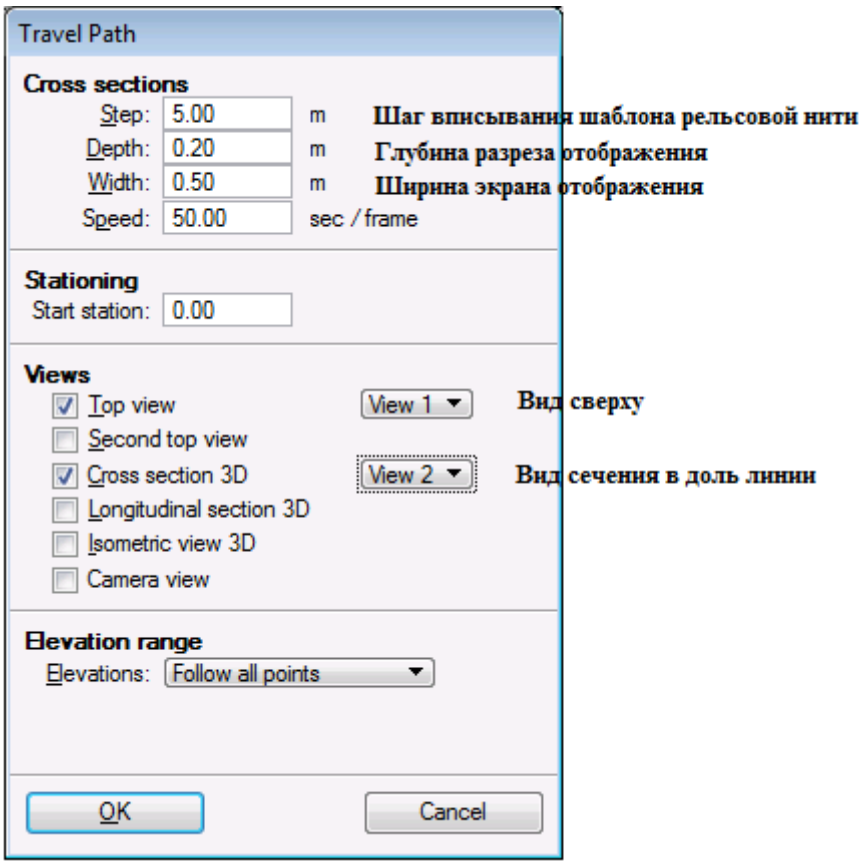


Рисунок 3.24. Меню настройки “TravelPath”

После этих действий нам необходимо выбрать шаблон рельсы. Выбираем его подгрузив файл «R65.cel» в cell library.

Далее выбираем наиболее подходящий шаблон. Выбор шаблона обусловлен параметрами размера шаблона и наклона шаблона.

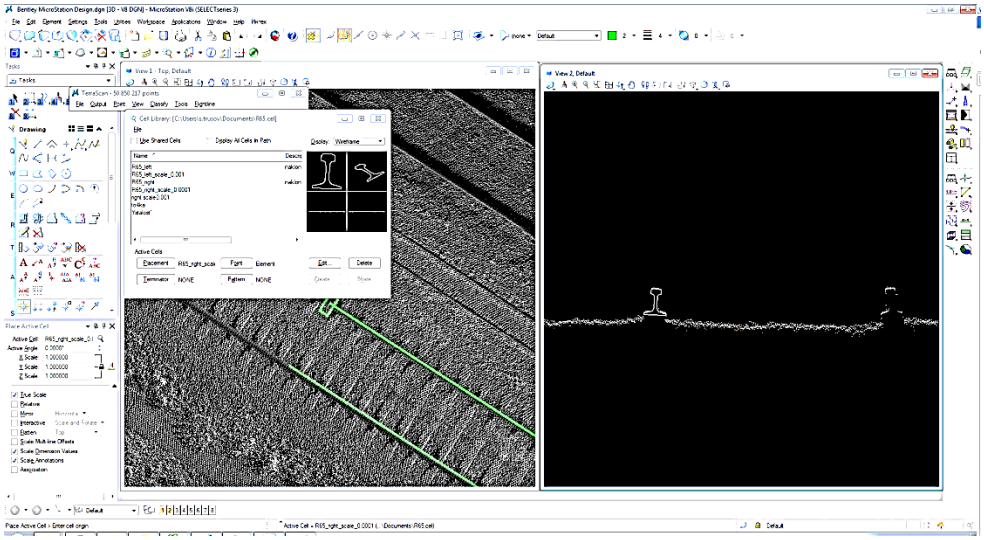


Рисунок 3.25. Выбор шаблона рельсы

Прописываем горячие клавиши для перемещения вдоль линии в обоих направлениях и клавиши вписывания шаблона. Как это сделать и названия команд можно посмотреть в разделе помощь для Bentley Microstation и Terasolid.

После всех наших действий происходит вписывание шаблона рельсовой нити на всю длину линии.

Как видно из рисунка, первоначальную линию необязательно проводить ровно по рельсам, необходимо примерно наметить линию, вдоль которой будут делаться разрезы.

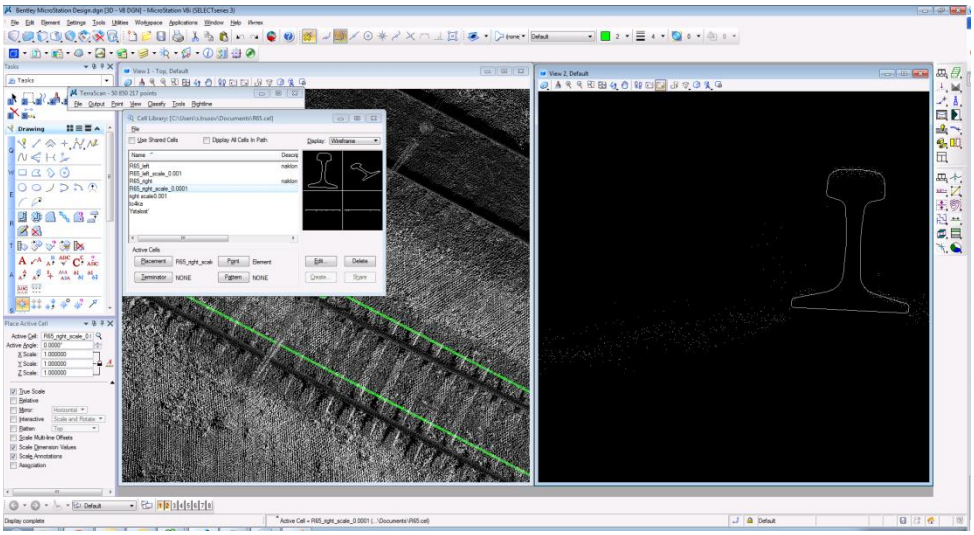
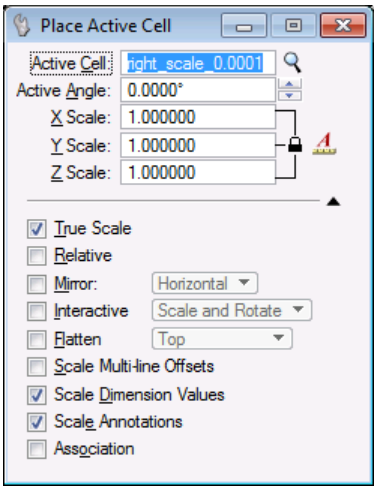


Рисунок 3.26. Вписывание шаблона рельсы в облако лазерных точек

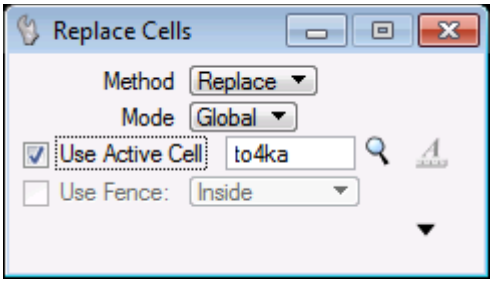
В случае если шаблон не вписывается в точки по причине угла поворота шаблона, то в таком случае довернуть шаблон можно в окне «Place Active Cell» (параметр Active Angle), которое всплывает при вставки cell объекта:



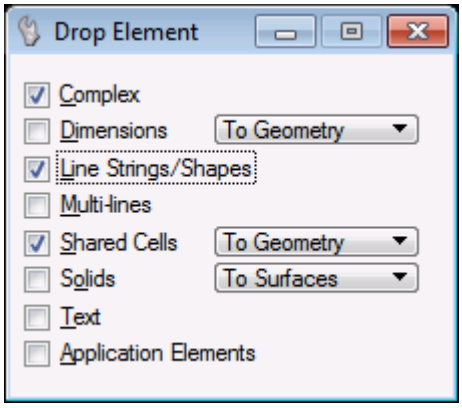
После того как мы закончили вписывать шаблон, необходимо:

- Удалить линию, вдоль которой проводилась операция вписывания шаблона
- Отключить все слои и оставить только слой с вписанными шаблонами
- Выделить все шаблоны
- Выбрать из cell library cell «to4ka»
- Выбрать команду «Replace cells»

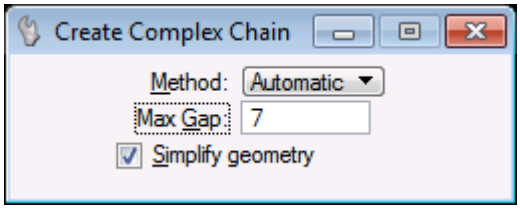
- И установить параметры, как это показано на рисунке ниже:



- Далее согласиться с действиями, которые предлагает Microstation
- И нажать в пространство на поле, пока выделение не снимется
- Снова, выделить все точки
- Выбрать команду «Drop element» (горячие клавиши 6-1)
- Установить значения как показаны на рисунке ниже:



- И нажать в пространство на поле, пока выделение не снимется
- Далее, выбрать команду «Create complex chain» (горячие клавиши 6-2) с параметрами:



Где Max Gap максимальное расстояние между шаблонами

- Выделяем первую точку и щелчок в любое пространство на поле
- Идет автоматическое соединение линии (при разрыве в линии, необходимо соединить максимальное возможное количество отрезков, а потом в ручном режиме соединить оставшиеся).

Таким же образом идет векторизация остальных рельсовых нитей.

3) Есть особенности соединения рельсовых нитей на стрелочных переводах, векторизация пути происходит до момента преломления рельсовой нити одного из пути:

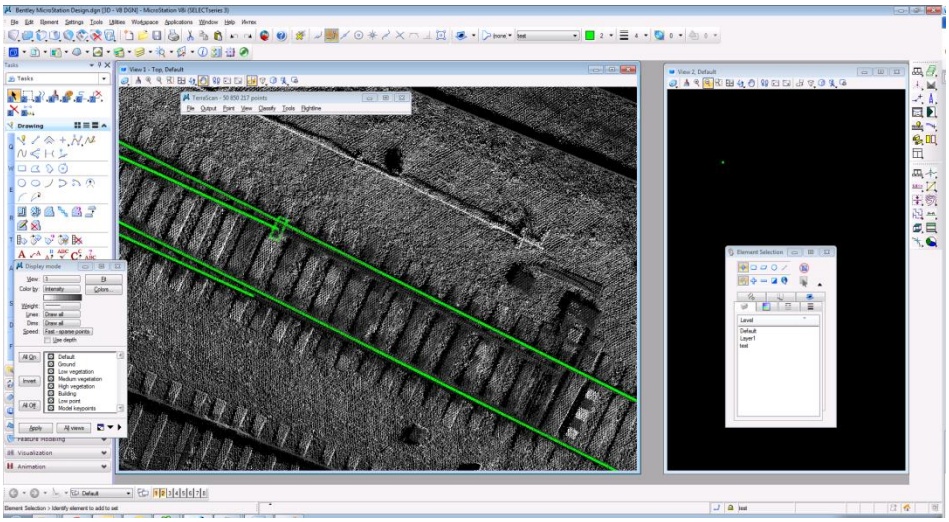


Рисунок 3.27. Векторизация в области расположения стрелочных переводов(начало)

Далее путем добавления 1 узла мы привязываемся к рельсовой нити другого пути

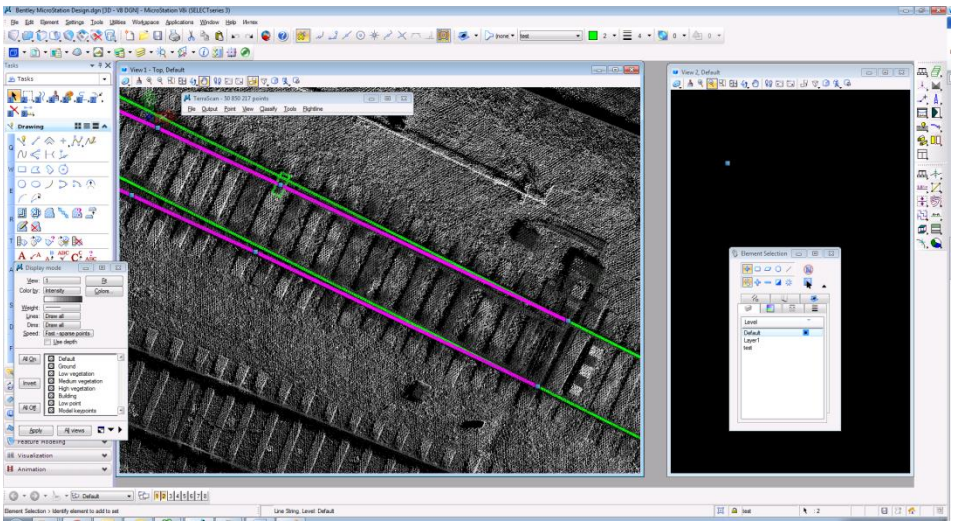
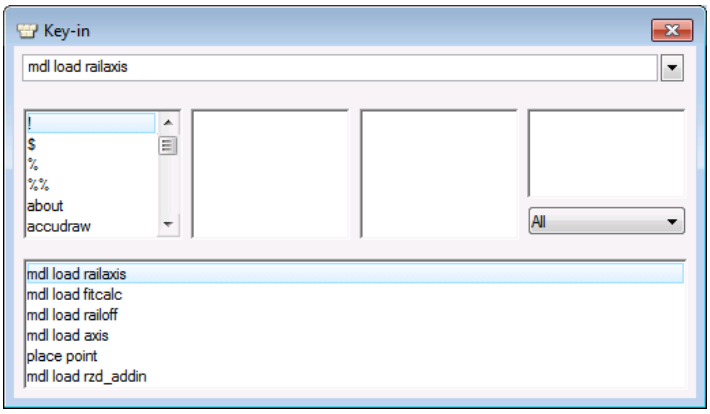


Рисунок 3.28. Векторизация в области расположения стрелочных переводов(продолжение)

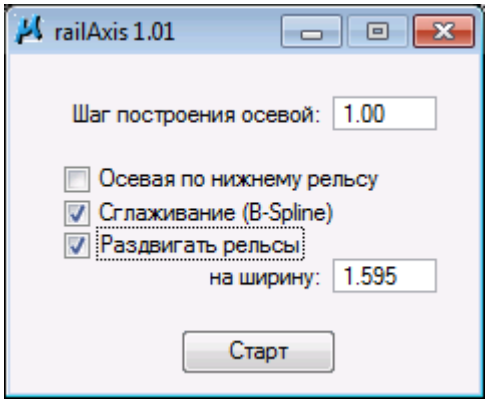
На этом с векторизацией рельсовой нити закончено, теперь необходимо создать осевую линию, и аппроксимировать наши рельсовые нити путем сглаживания линии.

4) Создание оси и рельсовых нитей

- Загружаем модуль построений осевой линии:



Возникает диалоговое окно, в котором необходимо указать следующие парамтры:



- Затем, выделив две рельсовые нити одного пути, нажимаем «Старт».

У нас построилась ось и нужные нам рельсы (узлы идут через каждый метр)

- Удаляем старые рельсовые нити
- То же самое для вторых рельсовых нитей (приходящие рельсы)
- Далее необходимо проверить, чтобы оси были присоединены друг к другу, если это не так, то необходимо в ручном режиме исправить этот недочет.
- После чего необходимо разложить все по своим слоям

  На этом процедура векторизации рельсовой нити и оси пути завершена.

Программная реализация оценки точности вписывания рельс в ТЛО

Сокращения и обозначения переменных:

Имя переменной	**Краткое описание**	**Значение по умолчанию**
defaultClass	Класс, в котором находятся анализируемые точки	1 (Default)
workingClass	Временный класс, в который переносится часть анализируемых точек	99

paramSearchDistance	Шаг вдоль рельсовых нитей, с которым проводится анализ	2,5 (м)
paramSearchRadius	Радиус поиска	0,07 (м)
paramLimitZmax	Высотный предел (по максимуму)	0,015 (м)
paramLimitZmean	Высотный предел (по среднему)	0,015 (м)

Таблица 3.2. Сокращения и обозначения переменных

После выделения рельсовых нитей, установки входных параметров и запуска программы, производится подсчет количества выделенных линий, вычисление их длины, вычисление точек вдоль линий с заданным шагом (*paramSearchDistance*). Далее, для каждой линии производится расчет:

1. Выполнение встроенной в TSCAN функции *FnScanClassifyCtrline* («TerraScan User's Guide», p.242) – классификация вдоль центральной линии. С параметрами:

Параметр	**Значение**
ClsLst	*"1-254"*
ToClass	*workingClass*
Cmp	*0 (any line)*
Side	*0 (either)*
OffMin	*0,0000*
OffMax	*0,0275*
UseDz	*True*
DzMin	*0,0356*
DzMax	*0,0200*
UseDst	*False*
DstMin	*<не используется>*
DstMax	*<не используется>*

Таблица 3.3. Параметры переменных функции *FnScanClassifyCtrline*

2. Получение текущей точки вдоль линии (рельсовой нити)
3. Поиск точек класса *workingClass* в пределах радиуса поиска (*searchRadius*)
   3.а. Если точек не найдено – вывод об ошибке (в DGN и в EXCEL)

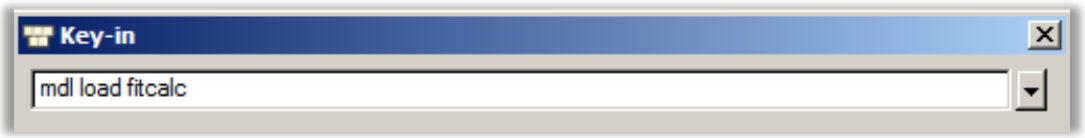
   3.б. Если точки найдены – вычисление параметров Zmax, Zmean, PoinCount, d(Z-Zmax), d(Z-Zmean). Если значения не в допуске – вывод об ошибке (в DGN и в Excel), если в допуске – вывод полученных значений в Excel.

4. После отработки всех точек вдоль текущей рельсовой нити, производятся вычисления для следующей рельсовой нити.
5. После вычислений, создается форма EXCEL. Каждый лист формы соответствует одной рельсовой нити. Название листа – ID текущей рельсовой нити. В каждом листе таблица со следующими столбцами (образец см на рис. 7).
6. Переброс всех точек из класса *workingClass* в *defaultClass.*

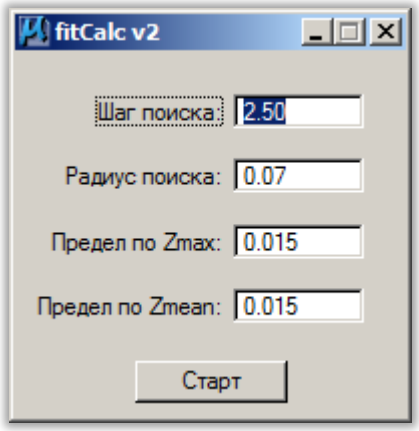
Утилита выполнена в виде mdl-приложения «*fitCALC*».

Работает с выделенными рельсовыми нитями и загруженными в TSCAN точками и выполняет поиск и анализ превышений между *загруженными в TSCAN* точками лазерного отражения и векторами рельсовых нитей.

1. Запуск утилиты через key-in «**mdl load fitcalc»:**



2. Установка необходимых параметров:



Шаг поиска – с таким шагом (в метрах) берутся точки вдоль нитей для расчета

Радиус поиска (в метрах) – в данном радиусе (в плане) ищется ближайшая ТЛО рельсовой нити. Если в данном радиусе ТЛО не найдено – расчет не производится.

Предел по Zmax (в метрах) – вертикальное расстояние между точкой на рельсовой нити и самой верхней найденной точкой ТЛО, принадлежащей рельсу. Если найденное расстояние больше заданного – выводится сообщение об ошибке (кружок в DGN).

Предел по Zmean (в метрах) – вертикальное расстояние между точкой на рельсовой нити и средней найденной точкой ТЛО, принадлежащей рельсу.

Область поиска рельсовой нити по высоте описывается следующим образом:

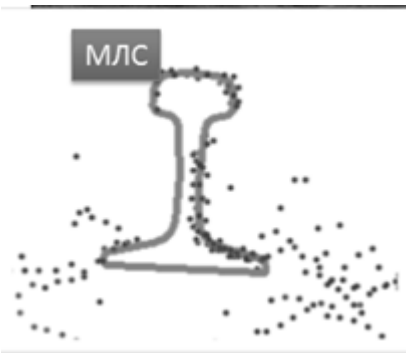


Рисунок 3.29. Профиль рельсовой нити (точки, отобранные для анализа)

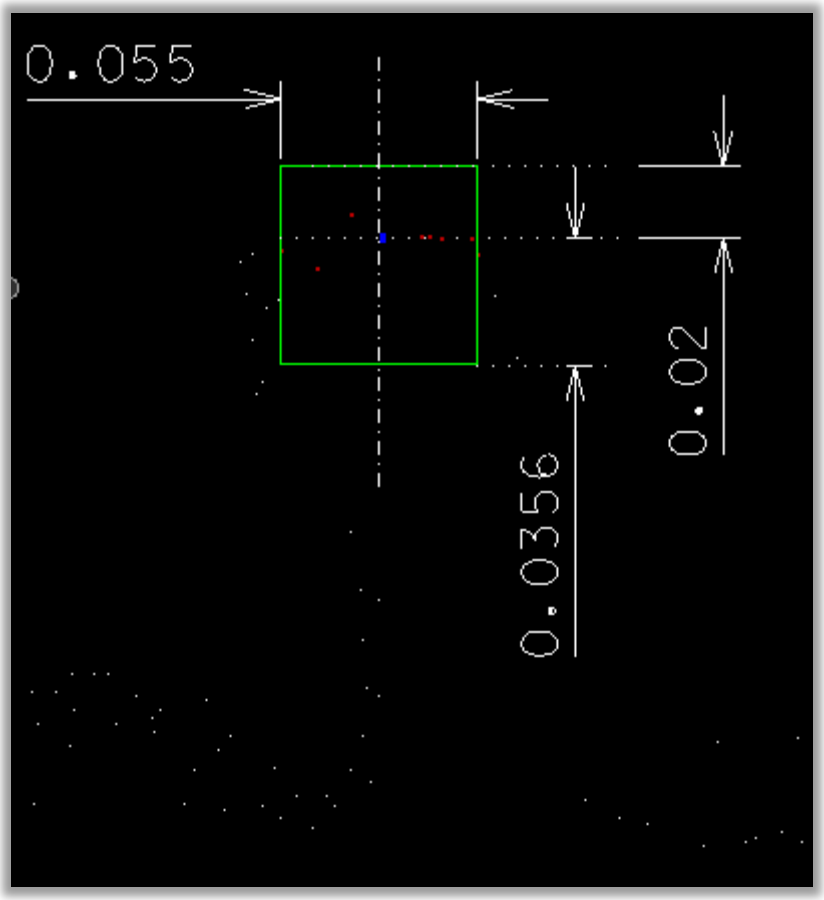


Рисунок 3.30. Параметры области поиска по высоте (синим – вектор рельсовой нити)

Область поиска ТЛО рельсовой нити в плане:

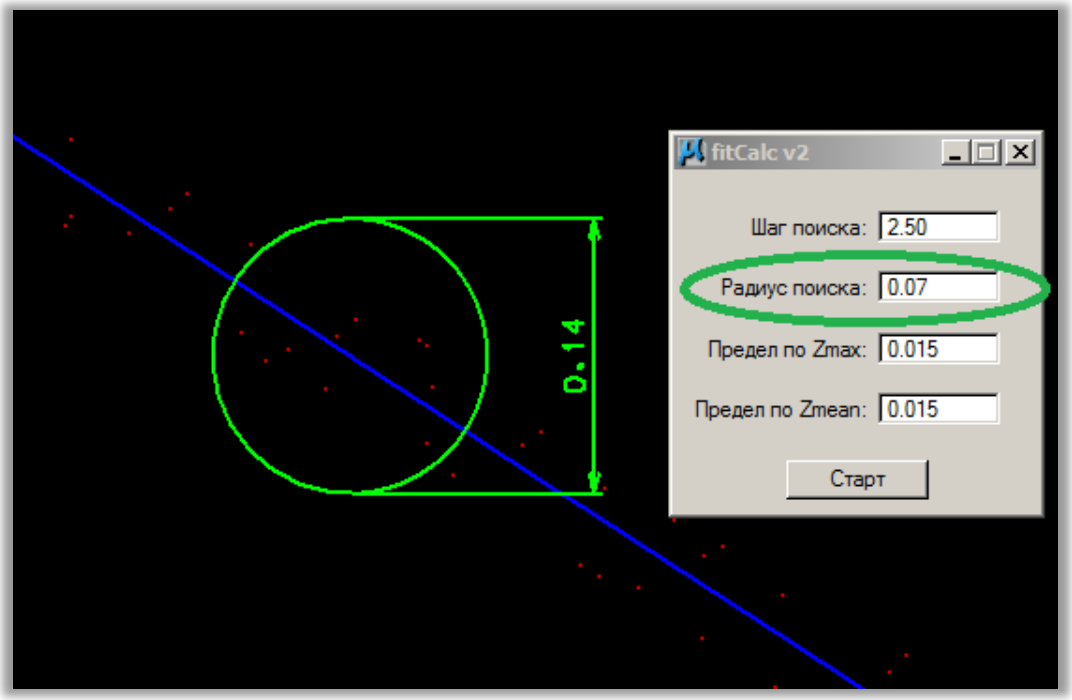


Рисунок 3.31. Параметры области поиска ТЛО рельсовой нити (красным – точки, удовлетворяющие высотной области поиска, синим – вектор рельсовой нити)

3. Выделение необходимых рельсовых нитей и запуск поиска

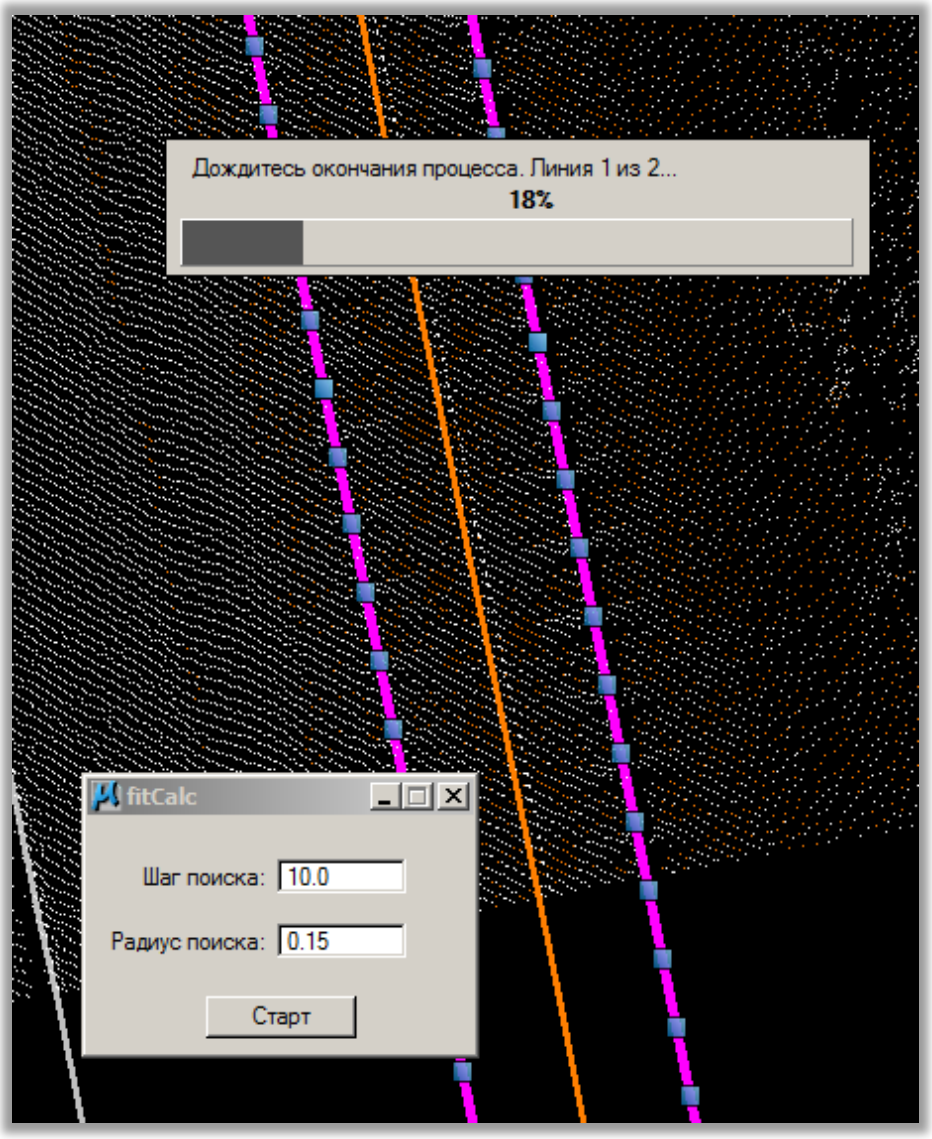


Рисунок 3.32. Выполнения анализа

4. Результат выводится в виде таблицы EXCEL (один лист Excel - одна рельсовая линия, имя листа – идентификатор линии в Microstation) + ошибочные места помечаются в DGN элементами класса “Circle”:

Элемент	Словесное описание	Пояснение к типу ошибки
	Круг; Цвет – 10 (розовый); Толщина линии – 3; Стиль линии – 0 (сплошная линия)	Найдены точки ТЛО в пределах области поиска. Расстояние **d(Z-Zmax)** превышает заданный предел.
	Круг; Цвет – 1 (синий); Толщина линии – 3; Стиль линии – 0 (сплошная линия)	Найдены точки ТЛО в пределах области поиска. Расстояние **d(Z-Zmean)** превышает заданный предел.
	Круг; Цвет – 3 (красный); Толщина линии – 3; Стиль линии – 3 (пунктирная линия)	В пределах области поиска ТЛО не найдено.

Таблица 3.4. Стили элементов, которыми отмечаются ошибки в DGN

Фрагмент таблицы Excel:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	X	Y	Z	PointCount	Zmax	Zmean	d(Z-Zmax)	d(Z-Zmean)
2	6678028,087	6304446,291	137,068	8	137,068	137,059	-0,003	0,005
3	6678030,198	6304444,895	137,067	12	137,067	137,056	-0,009	0,002
4	6678032,28	6304443,584	137,064	10	137,064	137,056	-0,013	-0,005
5	6678034,394	6304442,177	137,062	12	137,062	137,044	-0,017	0,001
6	6678036,409	6304440,875	137,057	11	137,057	137,04	-0,019	-0,002

LineID 1129739

Рисунок 3.33. Форма Excel

где:

X, Y, Z – координаты точки (на рельсовой нити), относительно которой велся поиск ближайшей точки ТЛО;

PointCount – количество участвующих в расчете точек ТЛО;

Zmax – самая верхняя найденная ТЛО рельсовой нити;

Zmean – средняя высота среди найденных ТЛО рельсовой нити;

d(Z-Zmax) – вертикальное расстояние между точкой вектора рельсовой нитей и **верхней** точкой ТЛО;

d(Z-Zmean) - вертикальное расстояние между точкой вектора рельсовой нитей и **средней** точкой ТЛО;

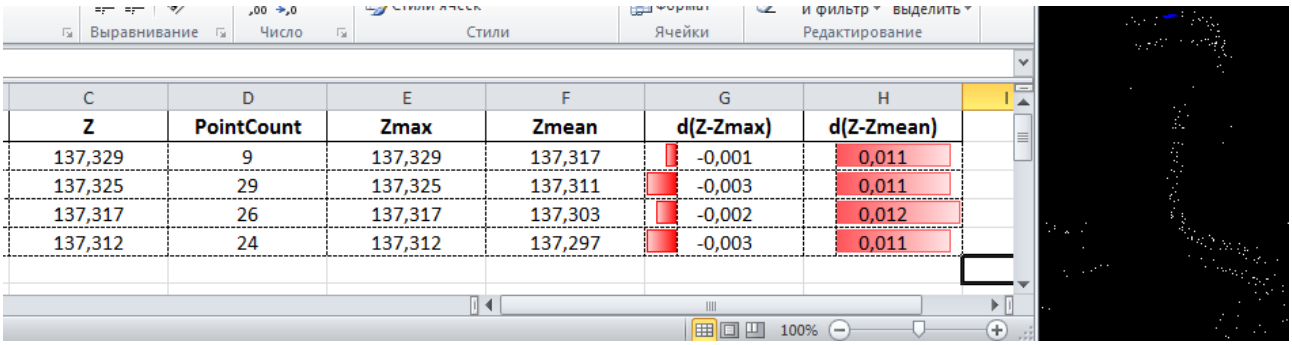
5. При необходимости, таблицу EXCEL можно сохранить на диск. При закрытии окна утилиты - активное окно Excel с результатами также закрывается.

Интерпретация результатов.

d(Z-Zmax): увеличивается по мере отклонения по вертикали вектора рельсовой нити от ТЛО. Если он меньше 0 – то вектор рельсовой нити находится ниже ТЛО. Данный параметр подвержен некоторому влиянию со стороны случайных выбросов, по данной причине введен расчет **d(Z-Zmean)**, оценивающий среднее положение найденных точек ТЛО.

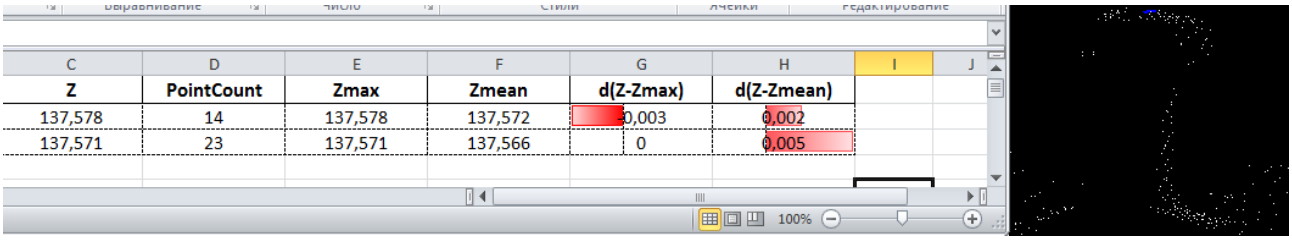
d(Z-Zmean): увеличивается в случае, если средняя высота всех найденных в области поиска точек ТЛО отличается от высоты вектора рельсовой нити. Увеличение данного параметра может сигнализировать о:

- отклонении вектора рельс от точек ТЛО **в плане** – когда в область поиска попадают боковые грани головки рельса
- взаимном несидении сканеров/проездов или общую зашумленность ТЛО в области головки рельса:



Z	PointCount	Zmax	Zmean	d(Z-Zmax)	d(Z-Zmean)
137,329	9	137,329	137,317	-0,001	0,011
137,325	29	137,325	137,311	-0,003	0,011
137,317	26	137,317	137,303	-0,002	0,012
137,312	24	137,312	137,297	-0,003	0,011

Рисунок 3.34. Зависимость параметра d(Z-Zmean) и качества сидения сканеров/проездов. Случай взаимного несидения проездов/сканеров



Z	PointCount	Zmax	Zmean	d(Z-Zmax)	d(Z-Zmean)
137,578	14	137,578	137,572	0,003	0,002
137,571	23	137,571	137,566	0	0,005

Рисунок 3.35. Зависимость параметра d(Z-Zmean) и качества сидения сканеров/проездов. Случай хорошего взаимного сидения проездов/сканеров.

Для получения наилучшего результата по **d(Z-Zmean)** рекомендуется увеличивать значение радиуса поиска до **0.1 – 0.15 м.**

Случай, когда точек ТЛО в области поиска не найдено может сигнализировать о:

- сильном отклонении вектора рельсовой нити как в плане так и по высоте;
- низком качестве исходных данных (низкая плотность ТЛО, маленький радиус поиска, поезда на путях);
- нет загруженного ТЛО на данный участок пути.

Описание процедуры актуализации информации по переезду по лазерным данным от ДКИ ЭРА (ИНФОТРАНС)

<u>Предпосылки:</u>

1. Предполагается, что карточка переезда УЖЕ сформирована по данным мобильного лазерного сканирования в системе КСПД ИЖТ и необходима лишь актуализация зоны видимости ввиду ее изменения (появление новых объектов или растительности) как со стороны водителя а/м, так и со стороны машиниста поезда.
2. Зона расчета составляет +/-1000м вдоль оси пути ж.д. и +/-50м вдоль оси автодороги.

<u>Варианты реализации:</u>

Вариант №1: Привязать точки лазерного отражения ИНФОТРАНС к результатам ВСР с минимальными трудозатратами, обеспечивающими точность 30-50см и использовать

трансформированные точки вместе с уже созданной векторной моделью (хранимой в КСПД ИЖТ) при расчете зоны видимости.

Вариант №2: Заново векторизовать ось пути и автодороги по данным ИНФОРТАНС, ввести эти данные в КСПД ИЖТ и просчитать зону видимости.

Реальная картина, отражающая разницу между точками лазерных отражений (по которым может проводиться анализ зоны видимости) высокоточных съёмочных работ (ВСР) данными ИНФОТРАНС приведена на рисунках ниже.

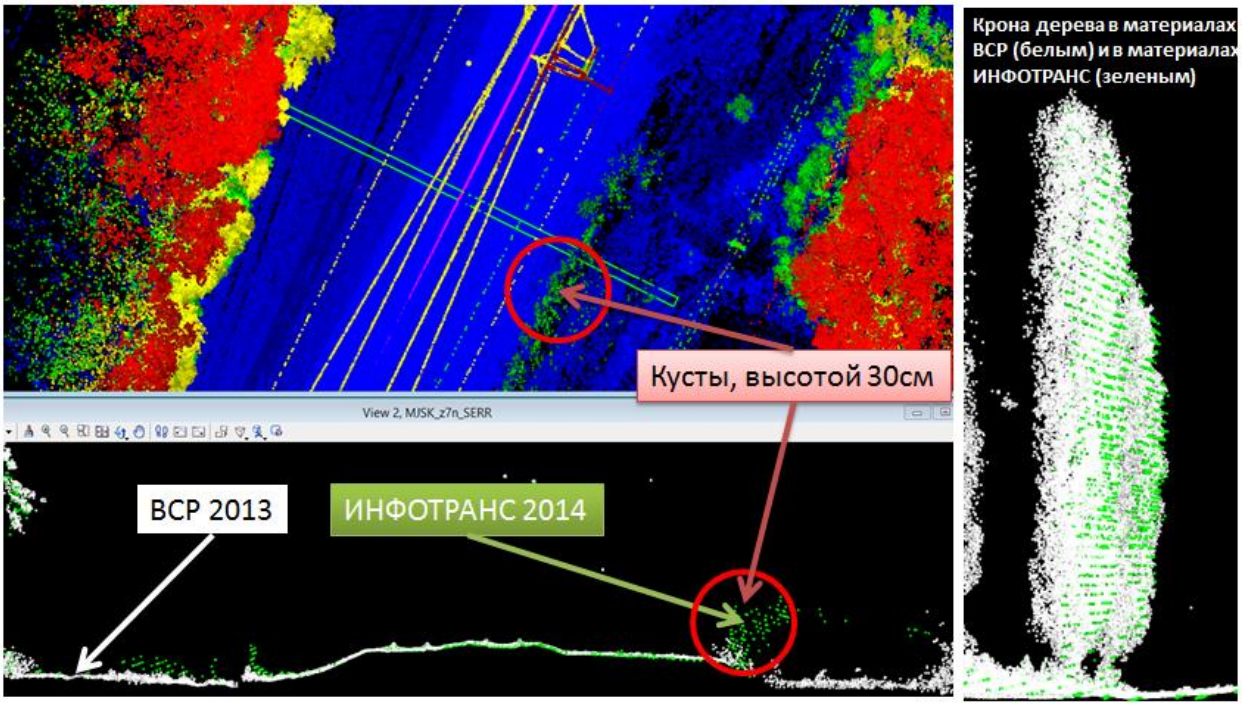


Рисунок 3.36. Изменение растительности по данных лазерного сканирования по материалам ВСР 2013г (белые точки)и материалов с путеизмерительного вагона «ИНФОТРАНС» 2014г(зеленые точки). Направление 10406 (Кочетовка-Воронеж). Путь I, 521км-522км, (длина участка 1.2км). Данные ВСР и ИНФОТРАНС совмещены с точностью 30-50см.

За год данные по растительности на тестовом участке практически не изменились (кустарник не в счет).

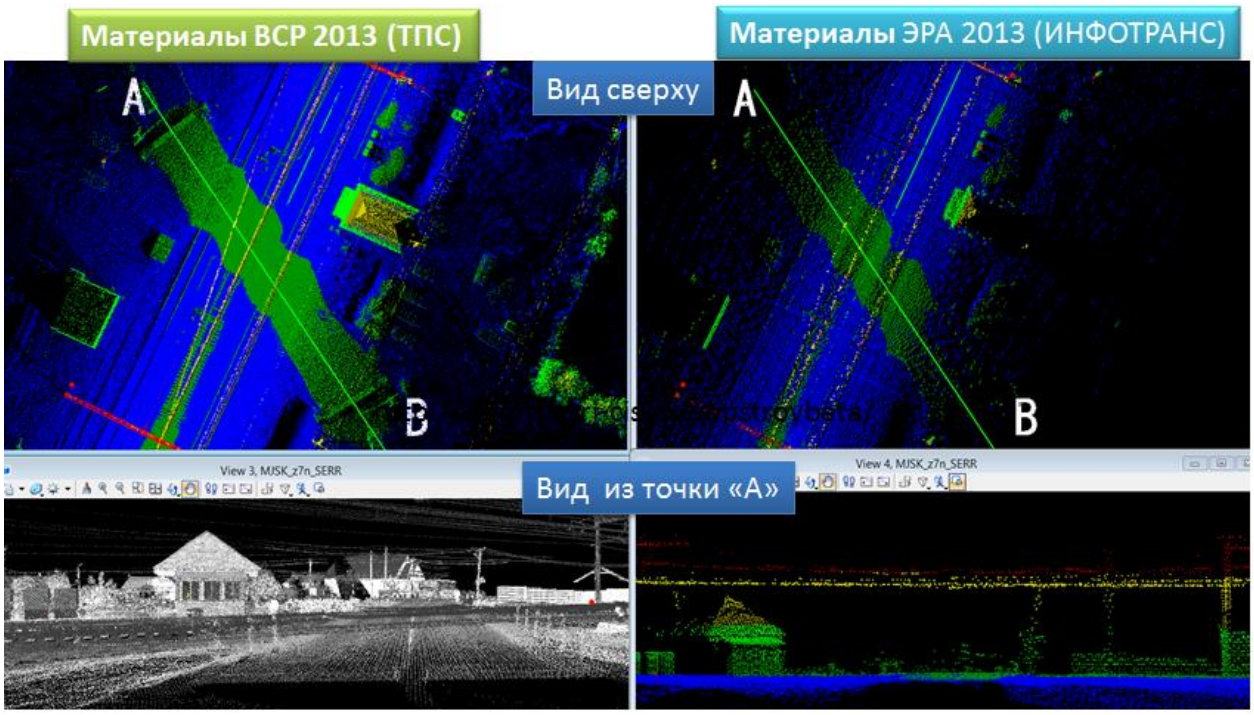


Рисунок 3.38. Вид на переезд со стороны водителя а/м из точки А в направлении прямой А->В по данным ВСР 2013г (слева) и данным ИНФОТРАНС 2014г (справа).

С точки зрения водителя а/м данные ВСР обеспечивают расчет видимости переезда на удалении от оси пути на расстояние до 80м; данные ЭРЫ (ИНФОТРАНС) – до 15м.

С точки зрения машиниста локомотива разницы в общем то нет (имеется ввиду расчет видимости переезда), нужно лишь учитывать тот факт (должно быть заложено в алгоритме расчета), что плотность точек лазерного сканирования, по которым оценивается видимость переезда (растительность/строения по обочине земляного полотна) составляет 30-40 точек на квадратный метр (в 100 раз реже чем по данным ВСР).

Результаты реализации:

Вариант №1

Точность привязки лазерных данных ИНФОТРАНС к результатам ВСР невелика, ввиду достаточно низкой плотности точек лазерного отражения (80 точек на квадратный метр) и составляет 30-50см. Трудоемкость подобной привязки составляет 1-2км/день, с учетом предварительной подготовки (получение данных с веб-сервера и первоначальное преобразование формата). Более точная привязка 20-30см требует большего количества общих точек и соответственно на тот же объем работ будет потрачено ориентировочно в 3 раза больше времени.

Для расчета зоны видимости используется векторная модель, уже загруженная в КСПД ИЖТ и новый набор точек лазерного отражения, полученный в результате трансформации по предложенной (стандартной) методике.

Вариант №2

Векторизация рельсовой нити, собственно как и других объектов ИЖТ в соответствии с принятой методикой (соответствующей определенным требованиям к точности создаваемой векторной модели), не представляется возможным (очень трудозатратно, особенно в на переездах в зоне станций) ввиду небольшой плотности точек лазерного отражения. На тестовом участке 521-522 км ЮВЖД «Кочетовка – Воронеж» векторизация рельсовой нити заняла 2 часа рабочего времени квалифицированного оператора. С учетом предварительной подготовки данных и необходимости дальнейшего атрибутирования векторных данных полный цикл обработки 1-2км составляет 2 дня.

Таким образом определено:

1. Актуализация зоны видимости переезда по лазерным данным ИНФОТРАНС по существующим нормативам возможна только для машиниста поезда (для водителя а/м данных недостаточно – по представленной информации не далее 15-20м).
2. Наиболее технологичным является вариант «приведения» лазерных данных ИНФОТРАНС к системе координат ВСР, что занимает 1 день обработки на 1 переезд по приложенной методике.
3. Судя по рассматриваемым данным, обстановка (и зона видимости) в районе переезда меняется не часто.
4. Для расчета зоны видимости по данным ИНФОТРАНС необходимо учитывать тот факт, что точки лазерного отражения в 50-100 раз реже чем по данным ВСР (модель растительности /ЦММ – более «грубая»).

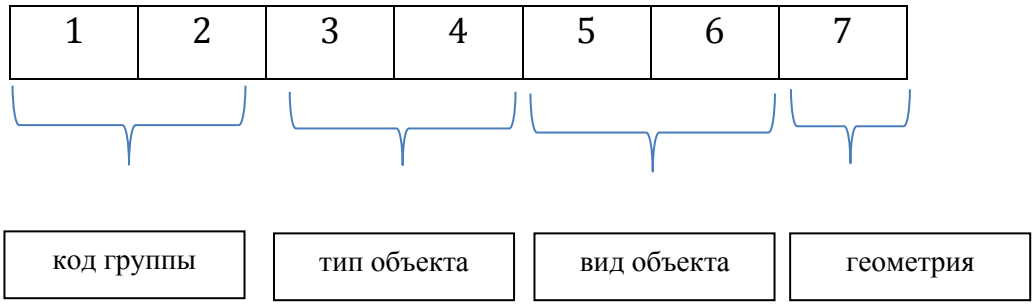
Формализация семантического атрибутивного описания объектов инфраструктуры.

Для установления характеристик и обозначения (кода) пространственных объектов железных дорог ОАО «РЖД» при создании и ведении базы данных КСПД ИЖТ был разработан классификатор.

Код объекта состоит из номера группы (две цифры), номера объекта (две цифры) и номера вариации объекта (три цифры), написанных слитно. Например, "0401001", где "04" – группа «Дорожные сооружения», "01" – объект «Платформа , "001" – тип платформы «Пассажирская высокая».

Номера объектам присваиваются сквозные, в пределах каждой группы.

Структура классификационного кода



Например: 0401003

04 – группа «Дорожные сооружения»

01 – тип объекта «Платформа»

00 – вид объекта - не определен

3 – геометрия объекта «полигон»

Примечание: геометрия объекта может представлять собой:
0 - тело
1 - точка
2 - полилиния
3 – полигон

* - объект может быть представлен в нескольких вариациях (например, опора

контактной сети для различных задач может быть представлена как точка (отображение накарте), так и как тело (расчёт габарита приближения строений на участке железнойдороги))

Все объекты ж.д., влияющие на безопасность движения сгруппированы по геометрическому принципу, требованиям к точности и функциональному использованию. В результате получилось 12 групп объектов, общей численностью 78.

Разработанный классификатор был положен в основу классификатора пространственных объектов железных дорог ОАО

«РЖД», принятого к использованию распоряжением №371р от 13.02.2015, подписанным Вице-президентом ОАО «РЖД» А.В. Целько [23].

Выводы по третьей главе

1. Разработанная технология и алгоритмы обработки данных мобильного лазерного сканирования позволяет существенно сократить время создания высокоточной трехмерной цифровой модели пути и объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта.
2. Предложенный алгоритм идентификации опор контактной сети в облаке точек лазерного отражения, основанный на модификации вероятностных генетических алгоритмов может быть использован для автоматической векторизации элементов ИЖТ.
3. Разработанный метод восстановления геометрической формы земляного полотна является достаточно гибким к форме представляемых данных, поскольку с его помощью можно обрабатывать «хаотические» данные, соответствующие профилю земляного полотна, или же обработанные данные, уже представляющие аппроксимацию поверхности.
4. Разработанный метод полуавтоматического вписывания шаблона рельсы определенного формата (R65) с последующей автоматической проверкой качества векторизациии рельсовой нити, позволяет вычислять ось пути в координатах с точностью порядка 10мм.
5. Для расчета (или актуализации) зоны видимости переезда может быть использована векторная модель, загруженная в КСПД ИЖТ и новый набор точек лазерного отражения, полученный данным ИНФОТРАНС.
6. Разработанный в процессе работы классификатор объектов ИЖТ положен в основу классификатора пространственных объектов

железных дорог ОАО «РЖД», принятого к использованию распоряжением №371р от 13.02.2015, подписанным Вице-президентом ОАО «РЖД» А.В. Целько.

Заключение

Таким образом, разработанная в рамках данной работы технология обработки данных мобильного лазерного сканирования, позволила значительно повысить скорость и качество формирования трехмерных моделей ИЖТ в полосе +/-100м до уровня 80-100 км в месяц против 6 км в месяц до этого. Кроме этого практическое применение данной технологии при выполнении работ по созданию высокоточных цифровых моделей пути по 7000км эксплуатационной длины направлений АО «РЖД» позволил определить следующие перспективы:

- Текущее сокращение геодезических работ при реконструкции ж.д. на 40% за счет использования данных обработки МЛС.
- Перспективное сокращение геодезических работ при реконструкции ж.д. на 80% при легитимизации измерений, проводимых методом МЛС.
- Использование результатов обработки данных МЛС для актуализации карт безопасности, используемых в системах КЛУБ (имеется практический опыт внедрения), а также интеграция с системой ЕГИС ТПС.
- Программная реализация модуля автоматического определения параметров земляного полотна позволила бы сократить трудоемкость формирования ЦМП на 5% и что самое главное – повысила бы точность определения таких параметров как бровка и подошва балластной призмы и

земляного полотна, определяемых в настоящее время «на глаз» с недостаточной точностью.

- Использование результатов обработки для 3D-проектирования, в частности для создания проектов по выправке 2-х путей одновременно.

Литература

1. Сазонов В., Кармалин Б., Лебедев А. и др. Современные направления диагностики и мониторинга земляного полотна. Путь и путевое хозяйство. 2009 г., № 6, с. 34 – 37.

2. Ашпиз Е.С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна: Теоретические основы и практические решения. Диссертация доктора технических наук. Москва, 2002.

3. Дулина Н.Г., Уманский В.И. Структуризация проблемы улучшения пространственной согласованности баз геоданных. Сообщения по прикладной математике ВЦ РАН. М., 2009, с. 3 – 22.

4. Дулин С.К., Розенберг И.Н., Уманский В.И. Методы кластеризации в исследовании массивов геоданных. "Системы и средства информатики". Дополнительный выпуск. М.: ИПИ РАН, 2009, с. 86 – 114.

5. Уманский В.И. Технология построения трехмерных моделей железнодорожного полотна в высокоточном координатном пространстве. Сборник докладов 6-ой Международной научно-практической конференции "Геопространственные технологии и сферы их применения". Москва, 2010, с. 66 – 67.

6. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. Москва: Мир, 1980.

7. Bronevich A.G., Itenberg I.I., Karkishchenko A.N. The application of a local method for edge detection. Proc. of the 6th International Conference on Control, Robotics and Vision, Singapore, 2000, 8 pp.

8. Броневич А.Г., Каркищенко А.Н. Вероятностные и возможностные модели классификации случайных последовательностей. Таганрог: ТРТУ, 1996.

9. Hough P.V.C. Method and means for recognizing complex patterns // U.S. Patent 3,069,654, 1962.

10. Семерий О.С. Распознавание геометрических объектов с помощью функций расстояния // Сб. трудов Международной конференции Распознавание образов и анализ изображений» (РОАИ-6-2002). – В.Новгород, 2002. – С.486-490.

11. Рвачёв В.Л. Теория R-функций и некоторые её приложения. – Киев: Наук. думка, 1982.

12. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса. Москва-Красноярск, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007

13.Броневич А.Г., Каркищенко А.Н., Уманский В.И., Якушев Д.А. Применение локального метода для восстановления земляного полотна, 2012

*14.Броневич А.Г., Иванов Ю.А., Уманский В.И., Якушев Д.А.*Детекция и идентификация опор контактной сети по данным лазерного сканирования

15. Куликов И.Н., Зубрицкий В.А., Антонов А.П., Соловьев А.К МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ «Организация и проведение работ по мобильному лазерному сканированию объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта ОАО «РЖД». Росжелдоризыскания.

16. Концепция создания и развития высокоточной координатнойсистемы ОАО «РЖД»

17. ГОСТ Р 51794-2008 Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.

18. Базлов Ю.А. Методические указания по определению местной системы координат для РЖД.

19. СТО РЖД 1.14.002 – 2009 «Строительство железнодорожного пути и капитальных сооружений. Порядок инженерных изысканий»

20. Положение о проведении реконструкции (модернизации) железнодорожного пути. Утверждено ОАО РЖД 22.05.2009 г.

21. Проблемы создания ЦМП. Самратов У.Д. АГП «Меридиан+»,

22. РАСПОРЯЖЕНИЕ от 13 февраля 2015 г. N 372р"Об утверждении и введении в действие технологической инструкции по проведению инженерно-геодезических работ по созданию цифровых моделей пути и путевого развития железнодорожных станций"

23. Распоряжение от 13 февраля 2015 г. N 371р «Об утверждении и введении в действие классификатора пространственных объектов железных дорог ОАО «РЖД».

24. Аникин И.В., Аджели М.А., Онегов В.Л. Метод нечеткого выделения контуров изображений. Казань: Казанский гос. техн. ун-т, 2003.

25.Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н. Васильев А.П. Радиогеодезические и электрон-нооптические измерения. М.: Недра, 1985. 303 с.

26. Бруевич П.Н. Фотограмметрия: Учеб. для вузов. М.: Недра, 1990. 285 с.

27. Данилин И.М., Медведев Е.М., Абэ Н.И. и др. Высокие технологии XXI века для аэрокосмического мониторинга и таксации лесов. Задачи исследований и перспективы использования // Лесн. таксация и лесоустройство, 2005, 1 (34). С. 28–38.

28. Данилин И.М., Черкашин В.П., Михайлова И.А. Компьютерное картографирование и дистанционное зондирование в геоинформационных системах: Учеб. пособ. Красноярск: Сиб-ГТУ, 1998. 98 с.

29. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Балдина Е.А. и др. Цифровая стереоскопическая модель местности: экспериментальные исследования. М.: Научный мир, 2004. 244 с.

30. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Academia, 2004. 333 с.

31. Лобанов А.Н. Фототопография. М.: Недра, 1983.

32. Маркшейдерские технологии – основа качества, производительности и безопасности, М.: Фирма «Г.Ф.К.», 2006. 14 с.

33. Медведев Е.М. Основные тенденции развития и практического применения прикладной лазерной локации и систем картографирования реального времени // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии. Мат. Всерос. совещ.-семин. с меж-дунар. участ., 28 сент. – 1 окт. 2005 г., Красноярск. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 110–118.

34. Медведев Е.М. Мельников С.Р. Преимущества применения лазерных сканирующих систем наземного и авиационного базирования // Горн. пром-сть, 2002, 5. С. 2–4.

35. Мельников С.Р. Лазерное сканирование. Новый метод создания трехмерных моделей местности и инженерных объектов // Горн. пром-сть, 2001, 5. С. 3–5.

36. Науменко А.И. Наземное лазерное сканирование // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии. Мат. Всерос. совещ.-семин. с междунар. участ., 28 сент. – 1 окт. 2005 г., Красноярск. Красноярск: Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. С. 130–131.

37. Общие сведения о ГЛОНАСС. Координационный научно-информационный центр. М.: МО РФ,2005. 7*с.*

38. Основы импульсной лазерной локации: Учебное пособие для вузов / В.И. Козинцев, М.Л.Белов, В.М. Орлов и др. Под ред. В.Н. Рождествина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,2006. 512 *с.*

39. Серапинас Б.Б. Математическая картография. Учебник для вузов. М.: Академия, 2005. 336 с.

40. Серапинас Б.Б. Основы спутникового позиционирования. М.: Изд-во МГУ, 1998. 82 с.

41. Шануров Г.А. Радиогеодезические и электроннооптические измерения. Светодальномеры. М.: МИИГАиК, 1991. 46 с.

42. Шануров Г.А., Мельников С.Р. Геотроника. Наземные и спутниковые радиоэлектронные средства и методы выполнения геодезических работ: Учеб. пособ. М.: МИИГАиК, 2001. 136 с.

43. Choi C., Jennings A., Hulskamp J. Learning to segment using fuzzy boundary cell features // Complexity Int., 1996, 6 (Web publ.) http://www.csu.edu.au/ci/vol03/csc96f/csc96f.html

44. Erdas Imagine Professional for Windows. Version 8.5. Copyright © 2002 ERDAS, Inc. http://www.erdas.com/home.asp

45. Haala N., Reulke R., Thies M., Aschoff T. Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigation in forest applications and tree species recognition // http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2004/Panoramic_Dresden_thies.pdf

46. Haralick R.M., Stanley R.S., Xinhua Z. Image analysis using mathematical morphology // IEEE Transact. Pattern Anal. Machine Intelligence, 1987, 9 (4): 532–550.

47. Manual of Photogrammetry, 5th Edition, ASPRS, 2004.

48. Matheron G. Filters and lattices // Image Analysis and Mathematical Morphology. Vol. 2 / J. Serra ed., Theor. Adv., Chpt. 6. Acad. Press, Inc., 1988.

49. Means J.E., Acker S.A., Fitt B.J. et al. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar // Photogram. Eng. & Rem. Sens., 2000, 66 (11): 1367–1371.

50. Means J.E., Hopkins P.F., Jensen J.R. et al. Industry and academia explore remote sensing applications // J. For., 2001, 99 (6): 4–6.

51. Medvedev E.M. Digital automatic orthophoto production with laser locator and aerial photography data // Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. & Spat. Inf. Sci., 2003, XXXII (6W8/1).

52. Pal S.K., Ghosh A. Fuzzy geometry in image analysis // Fuzzy sets and systems, 1992, 48.

53. Европейская Глобальная Система отсчета (ETRS89)ttps://confluence.qps.nl/pages/viewpage.action?pageId=38700164

54. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации редакция от 21.12.2010.

Приложения

Приложение А. Классификатор пространственных данных ИЖТ

0	**Zona - Зона векторизации**				
Zona_poly		Зона векторизации (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ (Zona)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
00*		Зона векторизации			
	000000*	Zona		Зона векторизации	
	000005*	Zona_50m		Зона +/- 50м	
	000006*	Zona_60m		Зона +/- 60м	
1	**Geodesy - Математическая основа**				
Geodesy_point		Математическая основа (Point)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	NUM	Text	255	Номер	
Geodesy_line		Математическая основа (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	
3	NUM	Text	255	Номер	
Geodesy_surface		Математическая основа (MultiPatch)			

АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	
3	NUM	Text	255	Номер	

КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА (Geodesy)			
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА	
01*		Математическая основа	
	010200*	Km_stolb	Километровый столб
	010300*	Piketajnyi_stolbik	Пикетный столбик
	010400*	Predelnyi_stolbik	Предельный столбик
	010500*	Otmetki_vysot	Отметки высот
	010600*	Relief_thin	Горизонтали обычные
	010700*	Relief_thick	Горизонтали утолщенные
2	**Hydro - Гидрография и сопутствующие объекты**		
Hydro_line		Гидрография (Polyline)	

АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier

Hydro_poly	Гидрография заливка (Polygon)

АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier

КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ ГИДРОГРАФИЯ (Hydrography)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
02*		Гидрография			
	020100*	Beregovaya_liniya		Береговая линия	
	020200*	Beregovaya_liniya_zaliv		Береговая линия (заливка)	
3	**Building - Населенный пункт, Здания, Сооружения**				
Building_poly		Строения (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	TYPE	Long Integer	8	Тип строения	Type_building
4	HEIGHT	Short Integer	4	Этажность	
5	MATERIAL	Long Integer	8	Материал	Material_building
Building_surface		Строения (MultiPatch)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	TYPE	Long Integer	8	Тип строения	Type_building
4	HEIGHT	Short Integer	4	Этажность	
5	MATERIAL	Long Integer	8	Материал	Material_building
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ ЗДАНИЕ (Building)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
03*		Строения			
	030100*	Stroeniya		Строения	

	030200*	Stroeniya_railway		Ж.Д. строения	
4	**Facility - Железнодорожные сооружения**				
Facility_point		Железнодорожные сооружения (Point)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	NAME_PLATFORM	Text	255	Наименование платформы	
4	TYPE_PLATFORM	Long Integer	8	Тип платформы	Cover_platform
5	COVER_PLATFORM	Long Integer	8	Покрытие платформы	Type_platform
6	NUM_TRAFFIC	Text	255	Номер светофора	
7	TYPE_TRAFFIC	Long Integer	8	Тип светофора	Type_traffic
8	EYE_TRAFFIC	Long Integer	8	Значность светофора	Eye_traffic
9	DIRECT_TRAFFIC	Long Integer	8	Направление светофора	Direct_traffic
Facility_axis		Железнодорожные сооружения (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Facility_poly		Железнодорожные сооружения (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	NAME_PLATFORM	Text	255	Наименование платформы	

4	TYPE_PLATFORM	Long Integer	8	Тип платформы	Cover_platform
5	COVER_PLATFORM	Long Integer	8	Покрытие платформы	Type_platform
6	NUM_TRAFFIC	Text	255	Номер светофора	
7	TYPE_TRAFFIC	Long Integer	8	Тип светофора	Type_traffic
8	EYE_TRAFFIC	Long Integer	8	Значность светофора	Eye_traffic
9	DIRECT_TRAFFIC	Long Integer	8	Направление светофора	Direct_traffic
Facility_surface		Железнодорожные сооружения (MultiPatch)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	NAME_PLATFORM	Text	255	Наименование платформы	
4	TYPE_PLATFORM	Long Integer	8	Тип платформы	Cover_platform
5	COVER_PLATFORM	Long Integer	8	Покрытие платформы	Type_platform
6	NUM_TRAFFIC	Text	255	Номер светофора	
7	TYPE_TRAFFIC	Long Integer	8	Тип светофора	Type_traffic
8	EYE_TRAFFIC	Long Integer	8	Значность светофора	Eye_traffic
9	DIRECT_TRAFFIC	Long Integer	8	Направление светофора	Direct_traffic
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ ЖЕЗНОДОРОЖНЫЕ СООРУЖЕНИЯ (Facility)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
04*		Железнодорожные сооружения			
	040100*	Platforma		Платформа	

	0402000*	Fundament_platformy	Фундамент платформы
	0403000	Svetofor	Светофор жд
	0403001	Svetofor_axis	Ось светофора жд
	040310*	Svetofor_drugoi	Светофор не через жд
	040400*	Pereezd_cherez_jd_puti	Переезд через ЖД пути
	040500*	Shlagbaum	Шлагбаум
	040600*	Perehod_cherez_jd_puti	Переход через ЖД пути
	040700*	Stancii	Станции
	040900*	Ustroystva_SCB	Устройства СЦБ

Rail_axis		Осевая пути (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	NUM_PUTI	Long Integer	8	Номер пути	Num_puti

Rail_line00		Рельсовая нить (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier

Rail_point		Верхнее строение пути (Point)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН

1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Rail_line		Верхнее строение пути (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Rail_poly		Верхнее строение пути (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Rail_shpala_line		Шпалы (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Rail_surface		Верхнее строение пути (MultiPatch)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	Description	Text	255	Описание	
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ ВЕРХНЕЕ СТРОЕНИЕ ПУТИ (Rail)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
05*		**Верхнее строение пути**			
	050100*	Put (Осевая)		Ось пути	
	050200*	Relsovaya_nit_gl_verch		Рельсовая нить (по главным путям, по	

			головке рельса)
	050210*	Relsovaya_nit_gl_rab	Рельсовая нить (по главным путям, по рабочей поверхности)
	050300*	Relsovaya_nit_negl_verch	Рельсовая нить (по не главным путям, по головке рельса)
	050310*	Relsovaya_nit_negl_rab	Рельсовая нить (по не главным путям, по рабочей поверхности)
	050400*	Kontrrels	Контррульс
	050500*	Brovka_BP	Бровка БП
	050600*	Podoshva_BP	Подошва БП
	050900*	Brovka_ZP	Бровка ЗП
	051000*	Podoshva_ZP	Подошва ЗП
	051100*	Shpaly	Шпалы
	051300*	Osveschenie	Освещение
	051400*	Truboprovod	Трубопровод
	051500*	Ferma_osvescheniya	Ферма освещения
	051600*	Tupik	Тупик
	051700*	Vodotvodnaya_kan ava	Водоотводная канава
	051800*	Gromkogoboriteli	Громкоговорители
	053000*	Strelochny_perevod	Стрелочный перевод
6	**El - Линии электропередач и связи**		
El_line		Линии электропередач и связи (Polyline)	
АТРИБУТЫ			

№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier

El_point		Линии электропередач и связи (Point)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	TYPE_TOWER	Long Integer	8	Тип опоры	Type_tower
El_poly		Линии электропередач и связи (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
El_surface		Линии электропередач и связи (MultiPatch)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	TYPE_TOWER	Long Integer	8	Тип опоры	Type_tower

КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И СВЯЗИ ЛЭП (El)			
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА	
06*		Линии электропередач и связи ЛЭП	
	060100*	Opora	Опора
	060200*	Provod	Провод
	060500*	Podstanciya	Подстанция
	060600*	Transformator	Трансформатор
	060700*	Shkaf	Шкаф

	060900*	Konsol_LEP		Консоль ЛЭП	
7	**Road - Автодороги**				
Road_line		Автодороги (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Road_poly		Автодороги заливка (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	COVER_ROAD	Long Integer	8	Тип покрытия	Cover_road
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ АВТОДОРОГИ (Road)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
07*		Автодороги			
	070100*	Doroga		Дорога	
	070200*	Doroga_zaliv		Дорога (заливка)	
8	**Border - Границы, ограждения**				
border_line		Границы, ограждения (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	TYPE_BORDER	Long Integer	8	Тип ограждения	Type_border
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ АВТОДОРОГИ (Road)					

№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
08*		Границы, ограждения			
	080100*	Ograjdeniya		Ограждение	
9	ISSO - Искусственные сооружения (ИССО)				
Isso_line		Искусственные сооружения (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Isso_poly		Искусственные сооружения (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Isso_surface		Искусственные сооружения (MultiPatch)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ ИСКУССТВЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ (ISSO)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
09*		Искусственные сооружения			
	090100*	Most_jeleznodorojnyi		Мост железнодорожный	
	090200*	Avtodorojnyi_puteprovod		Автодорожный путепровод	
	090300*	Most_avtodorojnyi		Мост автодорожный	
	090400*	Most_peshehodnyi		Мост пешеходный	
	090500*	Tonnel_jeleznodorojnyi		Тоннель железнодорожный	

	090600*	Tonnel_peshehodnyi		Тоннель пешеходный	
	090800*	Vodopropusknaya_truba		Водопропускная труба	
	091000*	Tonnel_avtodorojnyi		Тоннель автодорожный	
	091100*	Ukrepitelnye_soorujeniya		Укрепительные сооружения, Подпорная стенка, Габион	
10	**Rail_wire - Контактная сеть**				
Rail_wire_line, Rail_construction_line		Контактная сеть (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Rail_tower_point		Контактная сеть (Point)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
3	NUM	Text	255	Номер опоры	
Rail_tower_axis		Контактная сеть (Polyline)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
Rail_tower_surface, Rail_construction_surface		Контактная сеть (MultiPatch)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier

3	NUM	Text	255	Номер опоры	
4	TYPE_TOWER	Long Integer	8	Тип опоры	Type_tower
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ КОНТАКТНАЯ СЕТЬ (Rail_wire, Rail_costruction)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
10*		Контактная сеть			
	1001000	Opora_ks		Опора КС	
	1001001	Opora_ks_axis		Ось опоры КС	
	100200*	Tros		Трос КС	
	100300*	Kontaktnyi_provod		Контактный провод	
	100600*	Konsol_ks		Консоль точка подвеса	
	100700*	Poperechiny		Поперечины	
	100800*	Kompensator		Компенсатор	
	100900*	Podves_kompensatora		Подвес компенсатора	
	101000*	Ottjazhki		Оттяжки	
	101100*	Anker		Анкер	
	101200*	Old_fundament		Брошенные фундаменты	
11	**Vegetation - Растительность**				
Vegetation_surface		Растительность (Raster Dataset, Cell Size: 0.5,0.5)			
Vegetation_poly		Растительность (Polygon)			
АТРИБУТЫ					
№	АТРИБУТ	ТИП ДАННЫХ	ШИРИНА	ПСЕВДОНИМ	ДОМЕН
1	OBJECTID	Object ID		Идентификатор	
2	CLASS_ID	Long Integer	8	Код группы объектов	Classifier
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ (Vegetation)					
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА			
11*		Растительность			
	110300*	Grass_common		Растительность луговая	

	110400*	Wood_common	Лес смешанный
12	**Ground - Цифровая модель рельефа земли (ЦМР)**		
Ground_surface		ЦМР (Raster Dataset, Cell Size: 0.1,0.1)	
КОДЫ ОБЪЕКТОВ ГРУППЫ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ (Ground)			
№	КОД	НАЗВАНИЕ ОБЪЕКТА	
12*		ЦМР	