

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Каркокли Хамид Маджид Сабер



Разработка методики предварительной обработки
данных мобильного лазерного сканирования

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
Алтынцев Максим Александрович

Новосибирск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ	9
1.1 Сущность технологии мобильного лазерного сканирования	9
1.2 Области применения и преимущества технологии мобильного лазерного сканирования	15
1.3 Технические характеристики современных систем мобильного лазерного сканирования	16
1.4 Этапы технологии мобильного лазерного сканирования	23
1.5 Программное обеспечение для предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования	31
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ	36
2.1 Влияние внешних условий съемки и характера объекта сканирования на точность данных	36
2.2 Методы фильтрации данных мобильного лазерного сканирования	38
2.3 Влияние характера распределения точек лазерных отражений и растительности на результаты фильтрации данных лазерного сканирования	41
2.4 Алгоритмы уравнивания данных мобильного лазерного сканирования	44
3 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ	53
3.1 Технологическая схема подготовительных работ и процесса мобильного лазерного сканирования	53
3.2 Технологическая схема предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования	57
3.3 Разработка алгоритма фильтрации	58

3.4 Разработка алгоритма взаимного ориентирования.....	62
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	68
4.1 Описание района исследования и исходные данные	68
4.2 Исследование алгоритма автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования.....	71
4.3 Исследование алгоритма автоматизированного взаимного ориентирования данных мобильного лазерного сканирования	78
4.4 Исследование точности внешнего ориентирования данных мобильного лазерного сканирования для незастроенных территорий.....	92
4.5 Сравнение шумовых составляющих данных разных систем мобильного лазерного сканирования	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время технология лазерного сканирования активно применяется для выполнения геодезических работ в различных сферах жизнедеятельности человека. С каждым годом популярность применения лазерных сканеров возрастает. Благодаря высокой детальности, точности и скорости сбора данных стало возможным значительно упростить полевую съемку и способы решения различных производственных задач – от создания трехмерных моделей объектов и составления крупномасштабных топографических планов территорий до определения деформационных характеристик инженерных сооружений.

Среди всех методов лазерного сканирования значительное место занимает мобильное. Современная система мобильного лазерного сканирования (МЛС) представляет собой совокупность комплекса оборудования, на слаженную работу которого влияет большое количество факторов: внешние условия съемки, характер объекта сканирования, плотность застройки территории, технические характеристики съемочной системы. Эти факторы необходимо учитывать при планировании топографической съемки, ее осуществлении и обработке полученных результатов. От необходимой точности создания конечного продукта будет зависеть методика осуществления как полевого, так и камерального этапа МЛС, заключающегося в предварительной обработке полученных данных.

На сегодняшний день было разработано большое количество таких методик, но каждую из этих методик нельзя назвать универсальной и полностью автоматической. Из-за большого количества необходимых для учета факторов каждая определенная методика решает задачу получения единого массива точек окружающего пространства лишь с определенной долей автоматизации. Поэтому разработка методики топографической съемки и обработки полученных данных с целью повышения уровня автоматизации и сокращения времени выполнения всех работ является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Вопросами разработки методик осуществления МЛС и предварительной обработки полученных данных занимались как отечественные, так и зарубежные ученые: Карпик А. П., Комиссаров А. В., Мустафин М. Г., Сарычев Д. С., Скворцов А. В., Щербаков В. В., Чибуничев А. Г., Якушев Д. А., Vosselman G., Hussnain Z., Li J., Stilla U., Kukko A., Kumar P., Julge K.

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение уровня автоматизации и точности предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *основные научно-технические задачи*:

- выполнить информационно-аналитический анализ научно-технических разработок, связанных с повышением уровня автоматизации обработки данных мобильного лазерного сканирования;
- разработать алгоритмы фильтрации грубых ошибок результатов измерений и взаимного ориентирования данных мобильного лазерного сканирования на различных территориях;
- усовершенствовать технологическую схему топографической съемки территорий с применением мобильного лазерного сканирования;
- выполнить апробацию разработанной методики на примере автомобильных дорог Республики Саха и Новосибирской области.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются данные мобильного лазерного сканирования на примере автомобильных дорог, расположенных в различных регионах Российской Федерации. Предметом исследования является методика предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования.

Научная новизна диссертационных исследований состоит в следующем:

- разработан алгоритм фильтрации данных мобильного лазерного сканирования, учитывающий внешние условия выполнения измерений;

- разработан алгоритм взаимного ориентирования данных мобильного лазерного сканирования, учитывающий плотность застройки территории;
- усовершенствована методика предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования, включающая технологическую схему процесса выполнения геодезических измерений, алгоритмы фильтрации и взаимного ориентирования.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов диссертационных исследований состоит в разработанных алгоритмах фильтрации результатов измерений и взаимного ориентирования данных мобильного лазерного сканирования, заключающихся в учете пространственного положения точек лазерных отражений (ТЛО) и характеристик каждой отдельной точки. Предложенный алгоритм взаимного ориентирования массивов точек позволяет использовать все вертикально расположенные объекты небольших размеров, не превышающих $0,2 \text{ м}^2$.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что разработанные алгоритмы фильтрации и взаимного ориентирования позволяют сократить время предварительной камеральной обработки результатов лазерного сканирования без снижения точности полученных данных. Предложенная технологическая схема осуществления процесса мобильного лазерного сканирования позволяет сократить трудоемкость выполнения топографической съемки различных территорий за счет применения схемы сканирования от одной базовой станции при съемке линейно-протяженных объектов.

Методология и методы исследований.

В диссертационной работе используются методы математической обработки пространственных данных, теоретические основы обработки данных лазерного сканирования, методы статистической обработки результатов измерений. Разработанная методика основана на теоретических, аналитических и экспериментальных исследованиях, а также проверена на реальных данных мобильного лазерного сканирования.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанные алгоритмы фильтрации и взаимного ориентирования позволяют повысить точность построения цифровой модели местности по полученному в результате МЛС массиву точек за счет совместного анализа пространственного положения точек и их характеристик;
- усовершенствованная технологическая схема процесса мобильного лазерного сканирования и методика предварительной обработки его результатов существенно повышает производительность труда при выполнении топографических съемок различных территорий.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует областям исследования: 2 – Создание геодезической координатно-временной основы различного назначения с использованием геодезических, астрономических, гравиметрических и других (космических, наземных и подземных) методов измерений; оценка их степени устойчивости и характера изменений, вопросы их проектирования и оптимизации. Геодезические системы координат; 3 – Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы и технологии. Формирование активного координатно-временного пространства на основе навигационной инфраструктуры ГЛОНАСС и др. Геодезические системы наземного, морского и космического базирования для определения местоположения и навигации подвижных объектов геопространства, в том числе транспорта, военной техники, людей и животных; 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным паспорта специальности 25.00.32 – Геодезия.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Результаты выполненных исследований и основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск) в 2019–2021 гг.

Практическое применение методик апробировано на большом объеме материалов сканирования автомобильных дорог городских территорий и загородных трасс. Методика внедрена в ГБУ НСО «ЦЦТ НСО».

Публикации по теме диссертации. Основные результаты выполненной работы опубликованы в шести научных работах, две из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, одна опубликована в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 116 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 86 наименований, содержит 8 таблиц и 55 рисунков.

1 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

1.1 Сущность технологии мобильного лазерного сканирования

МЛС – это вид лазерного сканирования, который на сегодняшний день является одним из наиболее высокотехнологичных методов геодезической съемки.

Основной частью системы МЛС являются лазерные 2D-сканеры. Обычно в систему устанавливается пара таких сканеров, принцип работы которых состоит в том, что производится излучение коротких импульсов с помощью лазерного локатора и регистрация их направлений с помощью оптической системы и входящего в ее состав сканирующего элемента. Импульсы распространяются по прямолинейной траектории от источника излучения по направлению к объекту съемки. При достижении препятствия лазерный луч отражается от него. Отраженная энергия частично возвращается к лазерному локатору и регистрируется на приемнике излучения. Это позволяет рассчитать расстояние от лазерного локатора до препятствия [24].

МЛС выполняется в процессе движения транспортного средства, на которое устанавливается система сканирования. Скорость съемки окружающего пространства совпадает со скоростью перемещения транспортного средства. Ни один другой наземный метод геодезической съемки не может дать такой высокой производительности сбора пространственной информации с точностью первых значений сантиметров [2, 26].

В состав системы МЛС обычно входят пара лазерных 2D-сканеров, инерциальная навигационная система (ИНС – IMU), спутниковый приемник ГНСС, цифровые камеры, блок управления, одометр (DMI) (рисунок 1.1). Сущность МЛС заключается в том, что бортовой ГНСС-приемник регистрирует траекторию перемещения системы МЛС. Далее ГНСС-данные на основе измерений неподвижной базовой ГНСС-станции подвергаются дифференциальной коррекции. Лазерные импульсы отражаются от объектов, регистрируются приемником излучения и трансформируются в цифровую форму. Движение системы МЛС обеспечивает продоль-

ную развертку. То есть за счет перемещения плоскости сканирования 2D-сканера по траектории движения транспортного средства итоговый массив данных представляется в трехмерном виде. Траектория движения формируется посредством отслеживания местоположения системы МЛС спутниковыми приемниками, установленными на пунктах высокоточной опорной геодезической сети (ОГС) и на самой системе сканирования. Параметры угловой ориентации платформы записываются инерциальной системой, которая компенсирует влияние вынужденных пространственных колебаний носителя системы МЛС и потери спутникового сигнала. 2D-сканеры реализуют круговую развертку в 360° и в случае отсутствия препятствий обеспечивают получение данных на расстоянии до 100–400 м. Измеренные углы и расстояния позволяют рассчитать координаты данных в системе координат сканеров. Параллельно с осуществлением сканирования выполняется фотосъемка. Получаемые фотоснимки оказываются привязанными к траектории движения системы МЛС. Получаемые в процессе съемки данные цифровой фотосъемки и лазерного сканирования передаются на контролирующий работу всей аппаратуры блок управления. Управление работой всей системы выполняет оператор с помощью планшета или ноутбука. Все данные записываются на жесткие диски. В процессе съемки оператор контролирует работу всего оборудования, следит за качеством спутникового сигнала [37].

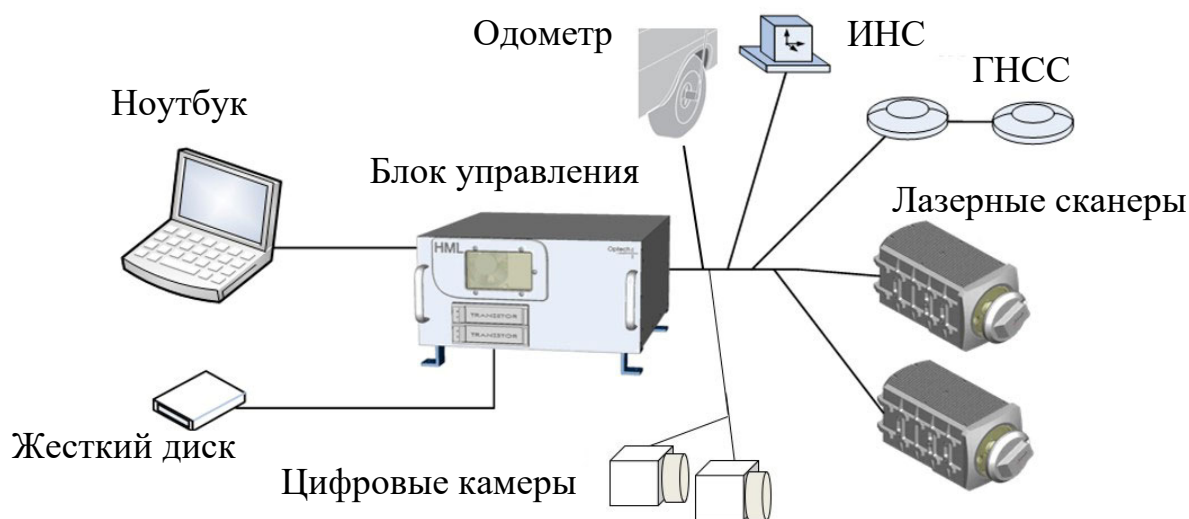


Рисунок 1.1 – Схема системы МЛС

В состав ИНС могут входить кольцевые лазерные, волоконно-оптические гироскопы и микроэлектромеханические системы (MEMS).

Основой волоконно-оптических и кольцевых гироскопов является вихревой эффект Саньяка. Преимуществом волоконно-оптических гироскопов является отсутствие вращающихся элементов, широкий динамический диапазон скоростей, отсутствие шумов и высокая точность при небольшом энергопотреблении и себестоимости производства [16].

В кольцевых лазерных гироскопах носителем информации об угловой скорости является электромагнитное излучение. В зависимости от вектора угловой скорости вращения параметры излучения меняются. Достоинствами кольцевых лазерных гироскопов являются высокий коэффициент чувствительности и относительно небольшие габариты. Недостатками являются сложная технология изготовления, а также высокая стоимость материалов и комплектующих.

Микроэлектромеханические системы обычно создают на кремниевой подложке, применяя технологию микрообработки. Системы MEMS применяются для изготовления различных датчиков, таких как датчики угловых скоростей, акселерометры, гироскопы и др. К недостаткам гироскопов, изготовленных на основе технологии MEMS, можно отнести повышенный шум сигнала и дрейф нуля.

От устройства ИНС зависят особенности их работы с системами МЛС. На стадии инициализации ИНС требует движения по круговой самопересекающейся траектории, выполняя ускорения и торможения.

К измерительному блоку может подсоединяться одометр (датчик пройденного пути), записывавший пройденное расстояние, которое может учитываться при расчете траектории движения системы МЛС, полученной при неблагоприятных для приема спутникового сигнала условиях. Также одометр позволяет определить, находится ли автомобиль в пути или стоит на месте. Это позволяет останавливать измерения автоматически в целях оптимизации объема записываемых данных. Величина пройденного пути также может служить и для съемки фотопанорам с определенным интервалом. ИНС и измерительный блок жестко крепятся на общей раме, после чего

МЛС калибруется с целью вычисления поворотов и смещений от центра отсчета координат до каждого измерительного устройства. Блок обработки и синхронизации включает в свой состав компьютер для сбора, синхронизации, обработки и хранения всех полученных в ходе сканирования данных. Питание системы МЛС выполняется от бортовой сети автомобиля или от отдельного аккумулятора, что позволяет производить установку таких систем на немоторизованные транспортные средства.

Итоговым результатом МЛС является массив точек лазерных отражений, точки траектории перемещения съемочной системы и набор геопривязанных фотоснимков. В зависимости от типа используемого лазерного сканера массив ТЛО может включать в себя информацию об интенсивности отраженного сигнала и порядковом номере отражения. Также в результате камеральной обработки данных МЛС массиву точек могут быть присвоены реальные цвета с фотоснимков [37].

Информацию об интенсивности имеют все массивы точек, получаемых любыми лазерными сканерами. Значения интенсивности точек прямо пропорциональны величинам отражательной способности соответствующих объектов.

Порядковый номер отражения может быть присвоен каждой точке массива. Эта информация связана с тем, что зондирующий импульс по пути следования доходит сразу до нескольких объектов, каждый из которых формирует отдельный импульс по направлению приемника лазерного излучения. Это явление называется регистрацией множественных отражений [25, 60]. На рисунке 1.2 показана ситуация, когда несколько отражений регистрируется за один зондирующий лазерный импульс. Сначала регистрируется отражение от кроны дерева, а затем от здания. Максимально возможное количество отражений зависит от модели лазерного сканера.

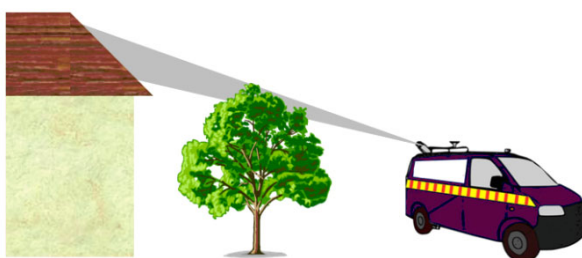


Рисунок 1.2 – Регистрация множественных отражений

Информация о реальном цвете может быть присвоена массиву ТЛО в случае совместно выполняемой со сканированием фотосъемкой. Цифровые камеры обычно всегда включаются в состав системы МЛС. Данные камеры должны быть откалиброваны и их позиции определены относительно лазерных сканеров для точного назначения реальных цветов [15].

С целью увеличения точности результатов МЛС дополнительно применяют опознавательные знаки – опорные точки. Смысл опорных точек заключается в том, чтобы они хорошо опознавались в массиве ТЛО. Координаты опорных точек должны быть измерены относительно ближайших пунктов ОГС. Специальное программное обеспечение (ПО) позволяет осуществлять внешнее ориентирование массивов ТЛО по таким опорным точкам. В ходе внешнего ориентирования выполняется уравнивание координат ТЛО с целью уменьшения влияния погрешностей геодезической привязки траектории МЛС.

Общий рабочий процесс системы МЛС может быть представлен в виде схемы (рисунок 1.3).

МЛС применяется на всех территориях, где существует возможность проезда транспортного средства с установленной системой сканирования: железные и автомобильные дороги, различные водные пути сообщения, улицы города, промышленные территории. В случае необходимости система МЛС может быть даже установлена на вездеходную технику и выполнять сканирование при отсутствии дорог [26].

МЛС чаще всего применяется для получения следующих результатов [2]:

- топографические планы линейных объектов (железные дороги, автомобильные дороги, мосты, тоннели);
- трехмерные модели объектов;
- продольные и поперечные профили дорог;
- анализ продольных и поперечных уклонов проезжей части;
- цифровые 3D-модели рельефа и цифровые модели дорожного покрытия;
- паспорт автодороги;

- оценка колейности и определение продольной ровности покрытия по международному индексу ровности IRI;
- ведомости дорожных знаков, дорожных ограждений;
- оценка зон видимости;
- поиск информационных и рекламных щитов.



Рисунок 1.3 – Схема рабочего процесса МЛС

1.2 Области применения и преимущества технологии мобильного лазерного сканирования

МЛС позволяет значительно повысить производительность труда при выполнении проектно-изыскательских работ на объектах как при проведении изысканий, так и на стадии разработки предпроектной и проектной документации. МЛС позволяет осуществлять съемочные работы с высокой производительностью, из-за чего значительно сокращается время выполнения полевых работ [2].

При выполнении инженерно-геодезических изысканий МЛС позволяет в сжатые сроки выполнить съемочные работы в пределах полосы отвода. По ТЛО создают топографические планы, распознают ось пути, создают ведомости габаритов. В отделах проектирования по данным МЛС определяют количественные и качественные характеристики объектов съемки, например:

- плотность застройки, характер рельефа;
- количество опор линий электропередачи и контактной сети.

Общие принципы камеральной работы совпадают для наземных лазерных сканеров и систем МЛС. Процессы обработки данных различных видов лазерного сканирования схожи.

Из-за безопасного, эффективного и точного сбора данных МЛС часто применяют для геодезической съемки автомобильных дорог и городского планирования.

МЛС может осуществляться как самостоятельно, так и в совокупности с другими видами геодезической съемки (наземное и воздушное лазерное сканирование, тахеометрическая съемка, съемка с помощью спутниковых приемников).

Преимуществами технологии МЛС являются [31]:

- экономия средств по сравнению с традиционными методами съемки;
- высокая детальность и точность получаемых данных;
- повышенная безопасность при геодезических работах на опасных объектах (железнодорожные пути, высоковольтные электростанции, химические производства);
- высокая производительность сбора данных – до нескольких сотен погонных километров в день;

– высокая мобильность (система МЛС может устанавливаться на любое транспортное средство).

К недостаткам МЛС относится большое количество «теневых» зон, куда лазерный луч не проникает из-за различных препятствий. Поэтому МЛС полностью не может заменить другие методы геодезической съемки.

Ещё одним недостатком МЛС является то, что точки в массиве данных не несут семантической информации в виде кодов. Семантические коды обычно применяются в традиционных видах геодезических съемок и представляют собой сведения о снимаемом объекте, что позволяет провести его идентификацию в автоматизированном режиме. Использование системы кодов при тахеометрической съемке существенно ускоряет камеральные работы. ТЛО представляют собой огромный массив неидентифицированных точек, что не дает возможности распознавать объекты в автоматическом режиме. Еще один недостаток МЛС связан с тем, что лазерный луч не проходит сквозь снежный покров, что означает возможность проведения работ по МЛС только в местах отсутствия этого покрова.

Так как ТЛО не несут семантической информации, то они не могут быть обработаны в полностью автоматическом режиме. Средства обработки результатов МЛС постоянно развиваются. Некоторое ПО, например, способно распознать ось железнодорожного пути и выделить рельеф. Чаще всего при этом необходимо вмешательство оператора, то есть идентификация объектов в массиве ТЛО выполняется в полуавтоматическом режиме [35, 36].

1.3 Технические характеристики современных систем мобильного лазерного сканирования

В настоящее время наибольшее распространение получили системы МЛС таких производителей, как Trimble, Riegl, Topcon, Phoenix, Leica, АГМ-Системы и СНС Navigation. Рассмотрим основные технические характеристики некоторых систем МЛС.

Линейка систем МЛС австрийской компании Riegl включает ряд экземпляров, среди которых наиболее производительным является Riegl VMX-2HA (рисунок 1.4). Система позволяет выполнить съемку со скоростью до 80 км/ч, а частота сканирования достигает 2 000 000 Гц [71].



Рисунок 1.4 – Общий вид измерительного блока системы МЛС
Riegl VMX-2HA

Измерительный блок этой системы включает два сканера Riegl VUX-1HA, ИНС Applanix AP-60 и двухчастотный ГНСС-приемник. Модульная компоновка и единый интерфейс позволяют подключить до девяти внешних устройств. Для фотосъемки могут применяться камеры Riegl с разрешающей способностью до 12 Мп, камеры Nikon D810 и D610, панорамная камера FLIR Ladybug 5+, а также их сочетание. Дальность измерений лазерных сканеров достигает 420 м.

Отдельно стоит остановиться на одной из самых популярных систем МЛС от фирмы Riegl – VMX-250 (рисунок 1.5). В состав системы VMX 250 входят лазерные сканеры VQ-250 со скоростью измерения до 300 000 измерений в секунду [29].

Система МЛС Trimble MX9 (рисунок 1.6) американской компании Trimble, как и Riegl VMX-2HA, состоит из двух сканеров Riegl VUX-1HA, ИНС Applanix AP-60 и ГНСС-приемника [79].



Рисунок 1.5 – Общий вид измерительного блока системы МЛС
Riegl VMX-250



Рисунок 1.6 – Общий вид измерительного блока системы МЛС
Trimble MX9

Особенностью системы Trimble MX9 является возможность осуществления поворота сканеров в вертикальной и горизонтальной плоскостях по трем фиксированным положениям. Это позволяет установить систему на любое транспортное средство и адаптироваться под различные условия съемки. В качестве главной фотокамеры в этой системе применяется FLIR Ladybug 5+. Также имеются две боковые поворотные камеры, которые направлены вперед по ходу движения, и камера, которая направлена на дорожное покрытие вниз. Trimble MX9 позволяет подсоединить одно дополнительное внешнее устройство, используя протокол NMEA с поддержкой PPS. Контролировать работу системы можно через мобильное устройство в виде планшета или ноутбука.

Американская компания Phoenix Lidar Systems выпускает как мобильные, так и воздушные лазерные сканеры. Производимые системы являются универсальными. Они могут быть размещены не только на железнодорожном, автомобильном и других видах наземного транспорта, но и на беспилотных летательных аппаратах вследствие их невысокой массы и компактности. Рассмотрим две системы Phoenix Alpha AL3-32 (рисунок 1.7, а) с лазерным сканером Velodyne HDL-32е, ИНС KVH 1725 и Phoenix Ranger (рисунок 1.7, б) с лазерным сканером Riegl VUX-1HA и ИНС Litef Northrop Grumman. Достоинством всех этих систем является возможность выполнения их быстрого монтажа на различных транспортных средствах или летательных аппаратах, а также высокие технические характеристики при малой массе и размерах [27].



Рисунок 1.7 – Внешний вид измерительных блоков систем Phoenix:

а) Alpha AL3-32; б) Ranger

Особенностью систем МЛС Phoenix является модульная конструкция. Используя различную комбинацию лазерных сканеров, систем ИНС, а также различных видов фотокамер, можно сгенерировать систему для решения определенных задач. Системы Phoenix также имеют возможность выполнить подключение дополнительных сенсоров, измерительных устройств и разных вариантов камер: фото- и видеокамер, сферических, панорамных, инфракрасных или тепловизионных.

Китайская компания CHC Navigation производит систему МЛС Alpha3D, которая может быть установлена на различные виды наземного или водного транспорта. Измерительный блок в базовой комплектации (рисунок 1.8) содержит лазерный сканер Riegl VUX-1HA, панорамную камеру FLIR Ladybug 5+, блок-системы ИНС, совмещенные со спутниковым приемником. Максимальная скорость движения транспортного средства с установленной системой МЛС можешь достигать 110 км/ч [44].



Рисунок 1.8 – Измерительный блок системы Alpha3D

К преимуществам этой системы можно отнести присутствие поворотной платформы, у которой имеется семь фиксированных позиций и которая позволяет установить измерительный блок под различными углами от минус 45° до плюс 45° . Система Alpha3D позволяет подключить два внешних устройства. Одним из устройств может быть дополнительный лазерный сканер Riegl VUX-1HA. Это позволяет в два раза увеличить производительность системы. Управление системой также осуществляется через мобильное устройство.

Компактная система мобильного лазерного сканирования Torcon IP-S3 (рисунок 1.9, а) от японской компании Torcon состоит из лазерного сканера Velodyne

HDL-32e, системы ИНС, ГНСС-приемника и панорамной камеры FLIR Ladybug 5. Преимуществом системы является компактность и относительно небольшая масса измерительного блока (18 кг). Лазерный сканер позволяет осуществлять сканирование на расстоянии до 100 м в горизонтальной плоскости одновременно 32 лучами в плоскости 40° (рисунок 1.9, б), что увеличивает плотность массива ТЛО [58].

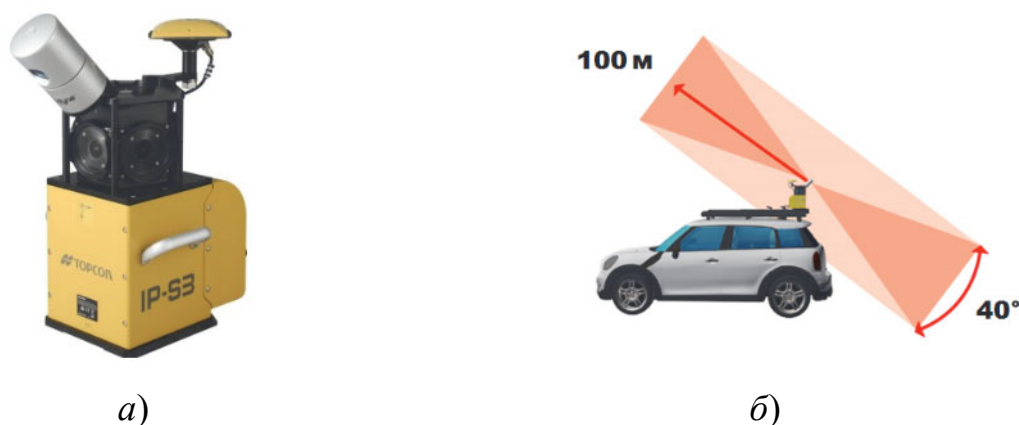


Рисунок 1.9 – Система МЛС Topcon IP-S3:

а) общий вид измерительного блока; б) область сканирования

Система МЛС Leica Pegasus: Two (рисунок 1.10) от швейцарской компании Leica Geosystems включает лазерный сканер Z+F PROFILER 9012, блок ИНС, ГНСС-приемник и восемь встроенных фотокамер, имеющих разрешающую способность 4 Мп, которые размещены по периметру измерительного блока.

Производителем заявлена максимальная скорость движения транспортного средства с установленной системой МЛС до 35 км/ч [60], что по сравнению с другими системами значительно ниже. В Leica Pegasus: Two применяется лазерный сканер с фазовым методом измерения расстояния, что увеличивает точность измерений, но снижает максимальную дальность съемки до 119 м.

В 2015 г. российской компанией АГМ Системы была представлена первая серийная система МЛС АГМ-МС7 (рисунок 1.11), которая в 2016 г. была успешно внесена в Государственный реестр средств измерений [38].



Рисунок 1.10 – Общий вид измерительного блока системы Leica Pegasus: Two



Рисунок 1.11 – Общий вид измерительного блока системы АГМ-МС7.2100

В состав системы АГМ-МС7 входит сканер PENTAX S2100 (аналог Z+F PROFILER 9012), блок ИНС АГМ-ПС собственной разработки, спутниковый приемник от Novatel и панорамная камера FLIR LadyBug 5. Как и большинство систем, АГМ-МС7 устанавливается на железнодорожный, автомобильный и водный транспорт, а скорость движения на этом транспорте может достигать 80 км/ч.

Таким образом, на основе выполненного анализа технических характеристик нескольких систем МЛС можно сделать вывод, что измеряемое этими системами

расстояние лежит в пределах от 100 до 420 м, частота сканирования лежит в пределах от 0,7 МГц до 1,016 МГц для систем с одним лазерным сканером и до 2 МГц для систем, где установлено два лазерных сканера. При достаточно высокой точности измерения расстояния абсолютная точность измеряемых данных у систем МЛС ниже. Это связано в первую очередь с тем фактом, что пространственное положение рассчитывается с помощью спутниковых измерений. Итоговая погрешность каждого отдельного измерения представляет собой сумму погрешностей пространственного позиционирования системы на основе определения ее ориентации и измерения расстояния до точки отражения от объектов местности. Таким образом, чем меньшее значение погрешностей измерений имеет каждое из устройств системы МЛС, тем выше будет итоговая точность всех измерений.

1.4 Этапы технологии мобильного лазерного сканирования

Технология МЛС состоит из четырех основных этапов:

- подготовительные работы;
- мобильное лазерное сканирование;
- предварительная обработка данных;
- камеральная обработка данных.

Геодезическое обеспечение процесса МЛС является неотъемлемой частью процесса съемки и непосредственно влияет на качество получаемых результатов. В связи с этим пристальное внимание уделяют данному этапу как на стадии подготовительных работ, так и во время самой геодезической съемки с помощью систем МЛС.

На этапе подготовительных работ создается планово-высотное съемочное обоснование процесса МЛС, представляющего собой осуществление спутниковых измерений в режиме статики. В самом начале этого этапа определяются с количеством базовых станций и конфигурацией их расположения. Выполняется создание сети базовых станций. Базовые станции располагают вдоль территории съемки. Каждая базовая станция должна иметь известные координаты.

Критерием выбора мест расположения базовых станций служат требования, предъявляемые к ним со стороны ПО, служащего для расчета координат точек траекторий:

- в равнинных, мало- и среднезалесяенных, предгорных районах должен обеспечиваться прием сигнала горизонтных спутников. В случае невозможности осуществления приема сигнала горизонтных спутников должен быть обеспечен качественный прием сигнала со спутников с углом возвышения 10° ;
- положение антенны над подстилающей поверхностью должно быть не менее 1 м;
- удаление от ретрансляторов и линий электропередачи (ЛЭП);
- возможность осуществления повторных наблюдений;
- в качестве базовых станций могут применяться пункты государственной геодезической сети (ГГС);
- закрепление базовых станций должно быть долговременным;
- ГНСС-приемники должны быть двухчастотными.

Качество работы базовых станций должно контролироваться геодезистом от начала и до конца записи измерений. Контролируются следующие параметры:

- электропитание базовой станции;
- количество наблюдаемых спутников;
- непрерывность записи данных;
- надежность установки антенны ГНСС-приемника;
- защищенность базовой станции от негативных внешних факторов.

На этапе подготовительных работ также рассчитывается приблизительная плотность получаемого массива ТЛО и разрабатывается схема движения транспортного средства с установленной системой МЛС по территории, подлежащей геодезической съемке.

Затем выполняется МЛС в соответствии с разработанной схемой. В ходе МЛС геодезистами контролируется запись спутниковых наблюдений ГНСС-приемниками, установленными на базовых станциях.

После полевых работ выполняется предварительная обработка полученных данных МЛС. Методики предварительной обработки данных МЛС, полученных различными съемочными системами, могут иметь свои особенности, но общая их сущность одинакова. Сущность предварительной обработки заключается в том, что в начале осуществляется уравнивание точек траекторий по данным с входящих в состав МЛС и установленных на базовых станциях спутниковых приемников. Траектория представляет собой модель движения транспортного средства с установленной системой МЛС за промежуток съемки. Каждая точка траектории включает информацию о времени ее записи, пространственном положении подвижного спутникового приемника и его угловой ориентации в пространстве. За пространственное положение подвижного спутникового приемника принимают данные о центре его внутренней системы координат, который совпадает с системой ИНС или ГНСС-антенны. Чтобы добиться наивысшей точности уравнивания точек траектории на уровне 1–5 см, при обработке от базовых станций должен применяться дифференциальный фазовый режим [21]. Получение точных координат точек траектории выполняется в режиме пост-обработки автономно записанных на подвижных приемниках и базовых станциях данных. Это исключает проблему возникновения помех радиосигнала и запаздывания применения дифференциальных поправок, существующую при координировании точек спутниковых измерений в реальном времени.

В ходе уравнивания точек траекторий применяются известные координаты базовых станций, которые служат для расчета вектора поправок к значениям установленных на них ГНСС-приемников. На основе вектора поправок каждой базовой станции вычисляются уравненные поправки, которые далее применяются к значениям подвижных приемников системы МЛС. Результатом являются уравненные координаты подвижных приемников.

Полученные уравненные координаты траектории соответствуют временному интервалу записи на базовых станциях, который устанавливается в диапазоне от 0,1 до 1 с. Такой временной интервал не позволяет добиться высокой плотности точек траектории, необходимой для достижения заявленных производителями си-

стем МЛС точностей. Также уравненные точки траектории не содержат информацию об угловой ориентации носителя системы МЛС, которая меняется на поворотах, при ускорениях и торможениях. То есть неизвестны значения курса, крена и тангажа автомобиля, которые могут существенно расходиться с направлением перемещения подвижного приемника. Неизвестные данные об угловой ориентации вносят значительные ошибки в определение его положения. При учете того, что расстояния от измерительного блока системы МЛС до точек съемки может достигать десятков и даже сотен метров, итоговые ошибки положения ТЛО могут составлять метр и более.

Для того чтобы к точкам траектории добавилась информация об угловой ориентации носителя и чтобы увеличить их плотность, в состав комплекта оборудования МЛС включают систему ИНС, образованную совокупностью гироскопов и акселерометров, с помощью которой выполняются сгущение и ориентация траектории. В ходе сгущения уравненная траектория дополняется множеством промежуточных точек и векторами ориентации в каждой точке. Осуществляется также дополнительное уравнивание координат точек ГНСС-траектории.

Система ИНС также имеет свою погрешность, из-за которой суммарный вектор перемещения, вычисленный за длительный промежуток времени этой системой, может значительно не совпадать с вектором перемещения от одной точки траектории до другой [20, 23]. Это приводит к необходимости решения задачи уравнивания данных системы ИНС по точкам ГНСС-траектории. Эта задача решается путем вписывания измерений системы ИНС на временном интервале между двумя соседними точками ГНСС-траектории. Данные акселерометра системы ИНС на основе известной скорости транспортного средства в начальной точке вычисляют смещения, а данные гироскопа – угловые отклонения от определенного исходного направления. Для каждого смещения генерируется новая точка траектории, дополненная тремя угловыми элементами ориентирования. Таким образом, каждая точка приобретает вектор направления перемещения подвижного ГНСС-приемника. Обычно для этого используется отдельное ПО [24].

Далее полученные траектории, сырые записанными лазерными 2D-сканерами данные и цифровые фотографии загружаются в другое специализированное ПО. В нем осуществляется генерация массивов точек в трехмерном виде путем совместной обработки лазерных дальномерных измерений и уравненной траектории. Первоначально лазерный сканер для каждого дальномерного измерения сохраняет время t , расстояние от сканера до точки $S(t)$ и угол поворота головки сканера $\alpha(t)$ в этот момент времени. На основе этих измерений и данных траектории выполняется расчет координаты точки съемки $X(t)$.

На рисунке 1.12 показан пример расчета координаты точки съемки, полученной в момент времени t . Точка отчета системы МЛС производится от известного положения подвижного приемника $X_{\text{подвижного_приемника}}(t)$ с заданными углами курса, крена и тангажа $hrp_{\text{приемника}}(t)$. По смещениям Δx , Δy , Δz вычисляется позиция центра головки лазерного сканера, у которого из паспортных данных системы МЛС известными являются углы курса, крена и тангажа головки $hrp_{\text{головки_сканера}}(t)$.

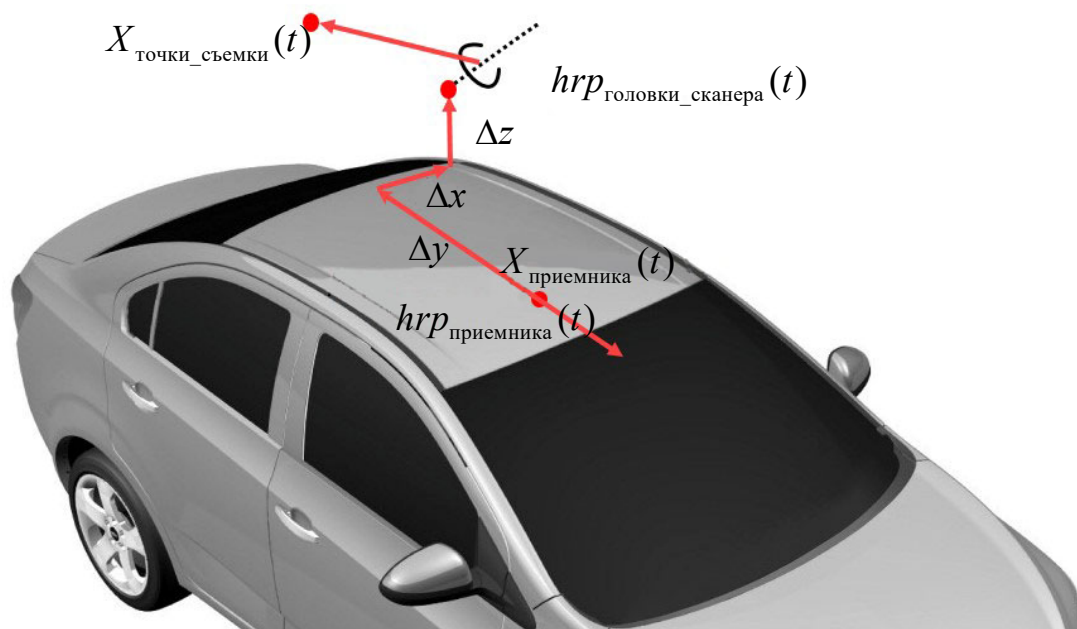


Рисунок 1.12 – Вычисление координаты точки съемки

Чтобы рассчитать координаты точки съемки $X(t)$ в момент времени t , когда отраженный лазерный луч попадает на головку лазерного сканера, следует знать о направлении лазерного излучения, определяющемся двумя углами (рисунок 1.13). Первый угол определяет поворот головки лазерного сканера $\alpha_0 + \alpha(t)$, где α_0 – это начальный угол поворота. Второй угол, показанный на рисунке 1.13 как β , определяет смещение луча назад по отношению к плоскости вращения головки сканера.

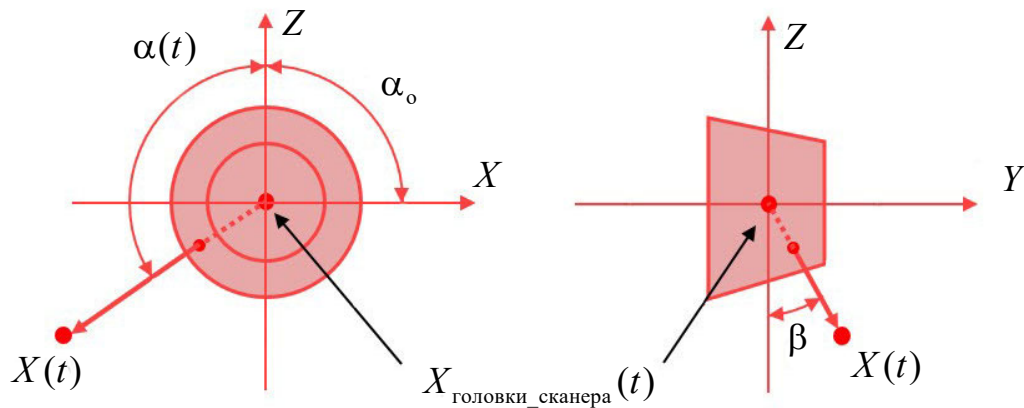


Рисунок 1.13 – Пример расчета координаты точки съемки

Общую формулу расчета координаты точки съемки в системе координат подвижного приемника можно представить в виде [22]

$$X(t) = \begin{pmatrix} S(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times M_{\text{направления_луча}} \times M_{\text{ориентация_головки}} \times M_{\text{смещение_головки}} \times M_{\text{ориентация_приемника}}, \quad (1.1)$$

$$\text{где } M_{\text{направление_луча}} = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\alpha_0 + \alpha(t)) & 0 & \sin(\alpha_0 + \alpha(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_0 + \alpha(t)) & 0 & \cos(\alpha_0 + \alpha(t)) \end{pmatrix};$$

$$M_{\text{ориентации приемника или головки сканера}} = \begin{pmatrix} \cos r & 0 & \sin r \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin r & 0 & \cos r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos p & -\sin p \\ 0 & \sin p & \cos p \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh h & -\sinh h & 0 \\ \sinh h & \cosh h & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$M_{\text{смещения головки сканера}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \end{pmatrix}.$$

Формула (1.1) позволяет сгенерировать массив ТЛО на основе массива измерений лазерного сканера и данных уравненной траектории. Координаты точки отчета подвижного приемника $X_{\text{подвижного_приемника}}(t)$ и углы его ориентации $hrp_{\text{приемника}}(t)$ рассчитываются посредством линейной интерполяции соседних точек траектории.

Генерация массивов ТЛО выполняется автоматически в специализированном ПО, поставляемым вместе с системой МЛС.

Затем выполняются фильтрация и уравнивание массивов ТЛО. Уравнивание заключается в том, что сначала выполняется взаимное ориентирование массивов ТЛО, а затем внешнее. Методы, заложенные в специализированном ПО, полностью автоматически позволяют выполнить взаимное ориентирование данных МЛС и калибровку сканеров. Повысить точность внешнего ориентирования можно автоматизированным способом по известным координатам опорных точек. Результатом внешнего ориентирования является единый массив ТЛО в заданной системе координат. В результате фильтрации выполняется его сглаживание и удаление шумовых составляющих, представляющих собой отдельные точки, расположенные в массиве с ошибками пространственного положения [6].

Фильтрацию можно выполнять как до взаимного и внешнего ориентирования массивов ТЛО, получаемых в случае сканирования территории повторно, обычно при движении в противоположных направлениях, так и после ориентирования. Применять методы фильтрации до начала процесса уравнивания особенно актуально при большой плотности ТЛО с ошибками пространственного положения, когда точки представляют собой целые группы. Значительное число ошибочных точек на небольшую единицу площади оказывает большое влияние на точность уравнивания, но также и на достоверность распознавания отдельных природных и антропогенных объектов местности [85].

В случае невысокой плотности ошибочных ТЛО, их влияние на итоговую точность уравнивания может быть незначительным, но они будут вносить ошибки в построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей поверхности (ЦМП) автоматическим способом.

Взаимное ориентирование данных МЛС осуществляется при многократном сканировании одного и того же участка местности, что необходимо для повышения плотности массива ТЛО и снижения количества «теневых» зон. Также, повторно выполнив сканирование, можно повысить плотность массива ТЛО за счет усреднения их положения. Это положительно отражается на результатах построения конечного продукта. Недостатком повторного выполнения сканирования территории является возникновение двоения массивов ТЛО в зонах их перекрытия. Чтобы устранить двоения, взаимное ориентирование массивов данных должно быть выполнено с максимально возможной точностью. Степень двоения массивов данных в зонах перекрытия определяется техническими характеристиками системы МЛС, внешними погодными условиями съемки, качеством приема спутникового сигнала и расстоянием удаления транспортного средства, с которого выполняется сканирование, от базовой станции [33].

Следует также учитывать, что двоение массивов ТЛО может появляться и при съемке в одном направлении. Такая ситуация возможна в случае, если калибровочные параметры лазерных сканеров, входящих в состав МЛС, известны с низкой точностью. Двоение образуется в области перекрытия между полученными в один и тот же момент массивами ТЛО лазерных сканеров. Расчет калибровочных параметров, в результате которых становятся известными точные элементы взаимного ориентирования между лазерными сканерами, возможен по данным тестовых проездов [15, 36]. Если лазерные сканеры жестко закреплены в измерительном блоке системы МЛС, элементы взаимного ориентирования сохраняются после повторного сбора и установки системы сканирования на транспортное средство. Калибровочная процедура всегда осуществляется на заводе-изготовителе в случае жесткой установки лазерных сканеров. В случае отсутствия жесткой связи, калибровочная

процедура каждый раз при новой установке повторяется. В [64] продемонстрирована одна из методик расчета параметров калибровки.

Кроме повышения плотности, повторно выполненное сканирование приводит к увеличению итоговой, внешней, точности данных. Каждый дополнительный повторный цикл сканирования позволяет повысить внешнюю точность массива ТЛО. Окончательно увеличить внешнюю точность данных позволяют опорные точки, что выполняется во время внешнего ориентирования данных МЛС [48, 43, 84]. Количество необходимых опорных точек зависит от тех же параметров, что и взаимное ориентирование, но также регламентируется требованиями к точности создания необходимого конечного продукта [53].

На этапе камеральной обработки данных выполняется создание требуемого заказчика продукта, такого как топографические планы, трехмерные модели, поперечные и продольные профили или др.

1.5 Программное обеспечение для предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования

Для обработки результатов МЛС используется достаточно большое количество специализированного ПО. В состав комплекта поставки системы МЛС всегда входит такое ПО, которое позволяет осуществить предварительную обработку получаемых данных. Автоматизация в этом ПО является обычно очень высокой. Рассмотрим примеры систем МЛС и ПО для них [34].

Для систем Lynx SG1 и Optech Lynx Mobile Mapper M1 применяется ПО LIDAR Mapping Suite (LMS). Для систем МЛС Riegl VMX-450 и VMX-250 используется ПО RiProcess. Для системы МЛС Topcon IP-S3 – ПО Spatial Factory. Для системы Trimble MX9 – Trimble MX Office Software. Для системы Leica Pegasus: Two – ПО Pegasus: MapFactory [10, 29, 57, 66, 73, 79].

ПО RiProcess применяется для первичной обработки данных МЛС – взаимного и внешнего ориентирования массивов ТЛО. Взаимное ориентирование может быть

выполнено полностью в автоматическом режиме на основе анализа перекрытий между массивами ТЛО соседних проездов. Внешнее ориентирование выполняется на основе измерения координат известных опорных и контрольных точек в массиве ТЛО. В ходе внешнего ориентирования выполняется трансформирование данных МЛС в необходимую систему координат. Это ПО также включает различные методы фильтрации точек, такой как «Off-Terrain Classifier» – распознавание точек физической поверхности земли [73]. Исходное количество ошибочных измерений в данных МЛС значительно зависит от технических характеристик съемочной системы и оказывает большое влияние на итоговую точность получаемых данных. Для фильтрации ошибочных измерений в ПО RiProcess используются различные методы, такие как «Isolated Points Classifier» – распознавание ошибочных, изолированных точек, представляющих собой шумовую составляющую данных МЛС; «Terrain filter tool» – метод фильтрации разнообразных нежелательных объектов, таких как транспортные средства, деревья, люди, движущиеся конструкции [35].

Точность результатов уравнивания и калибровки данных МЛС также зависит от уровня застройки территории. На застроенных территориях, где присутствует большое количество крупных и небольших объектов, можно достичь максимально возможной точности уравнивания и калибровки с помощью автоматических инструментов ПО. На незастроенных территориях, где количество крупных объектов вокруг придорожной полосы, таких как здания, невелико, двоение массивов ТЛО в зонах перекрытия может достигать 20–30 см после автоматического взаимного ориентирования в ПО RiProcess. В этом случае необходимо выполнить интерактивные операции взаимного ориентирования путем добавления соответственных точек в зонах перекрытия массивов ТЛО. Это возможно в любом специализированном ПО предварительной обработки данных МЛС [7, 35].

Кроме ПО компаний-производителей систем МЛС, ПО обработки этих данных разрабатывают сторонние разработчики. Такое ПО позволяет импортировать массивы ТЛО из форматов съемки различных систем МЛС и может либо являться

отдельным программным продуктом, либо быть включенным в качестве модулей CAD-систем [19, 32, 67, 77, 78, 83].

Таким отдельным ПО, например, является 3D СКАН, разработанный компанией Кредо, и VRMesh компании VirtualGrid.

VirtualGrid VRMesh включает большое количество форматов данных МЛС, может уравнивать массивы ТЛО в автоматическом или интерактивном режимах, выполнять автоматизированную фильтрацию и классификацию ТЛО, выполнять поиск характерных линий, таких как кромки дороги, дорожная разметка, головки рельсов, линии откосов [7].

ПО Кредо 3D СКАН позволяет также уравнивать массивы ТЛО, либо в него могут подгружаться уравненные ранее данные в специализированных ПО, созданных компаниями-производителями лазерных сканеров. 3D СКАН включает функции последующей предварительной обработки данных, такие как функции классификации, фильтрации, прореживания данных МЛС, автоматического поиска характерных линий, распознавания элементов дорожной инфраструктуры [83].

Также среди ПО сторонних разработчиков можно отметить Topodot от компании Certainty3d и TerraSolid от одноименной компании. Данные ПО реализованы на базе ПО Microstation и представляются в виде отдельных программных модулей [32, 67, 77, 79].

TerraSolid – это универсальное ПО. Его преимуществом является наличие большого количества инструментов с возможностью их гибкой настройки. TerraSolid может уравнивать данные воздушного и мобильного лазерного сканирования, осуществлять фильтрацию, прореживание, классификацию массивов ТЛО, а также строить ЦМР, рассчитывать объемы материалов и генерировать ортофотопланы [32].

TerraSolid состоит из ряда модулей, работающих на основе ПО Microstation [67]. TerraSolid включает такие модули, как TerraScan, TerraMatch, TerraSurvey, TerraPhoto и др.

TerraScan служит для просмотра и обработки данных МЛС в автоматическом или интерактивном режимах. В программе представлен обширный инструментарий автоматического и автоматизированного трехмерного моделирования таких объектов местности, как здания, линии электропередачи и др. на основе классифицированных или неклассифицированных массивов ТЛО. Модуль поддерживает ряд систем координат и форматов данных от различных современных систем воздушного и мобильного лазерного сканирования.

TerraScan – это основной модуль ПО TerraSolid, который также включает следующие операции:

- автоматическая классификация точек;
- интерактивная классификация точек;
- визуализация результатов лазерного обследования;
- фильтрация ошибочных точек;
- прореживание массива ТЛО для цели снижения их избыточности;
- трансформирование данных МЛС между различными типами картографических проекций и системами координат;
- автоматическое трехмерное моделирование линий электропередачи и крыш сооружений;
- создание ряда сечений;
- экспорт ТЛО в файлы различные форматы данных.

Модуль TerraMatch предназначен для осуществления автоматической калибровки сканеров в системах лазерного сканирования и уравнивания их данных. Модуль выполняет расчет расхождений в межмаршрутных перекрытиях и последующее автоматическое совмещение для увеличения точности взаимного ориентирования данных. Для увеличения точности внешнего ориентирования данные лазерного сканирования могут быть подвергнуты различным преобразованиям на основе известных координат опорных точек. Вычисление итоговой невязки (межмаршрутной или на основе опорных точек) позволяет добиться точности, требуемой для дальнейшей камеральной обработки [32].

Модуль TerraSurvey позволяет обрабатывать результаты тахеометрической съемки. Он позволяет выполнять импорт данных из всех распространенных форматов. Все данные тахеометрической съемки можно произвольным образом кодировать, что позволяет применять TerraSurvey в целях дальнейшей обработки данных лазерного сканирования.

Другой модуль, созданный на базе ПО Microstation, – это Topodot. Он включает большое количество инструментов автоматического извлечения характерных линий дорог, фильтрации и классификации массивов ТЛО, построения ЦМР [78].

Таким образом, ПО от сторонних производителей обладает многими функциями ПО, входящих в комплект поставки систем лазерного сканирования, но также расширяет функционал за счет включения новых инструментов обработки данных лазерного сканирования. Стороннее ПО существенно позволяет увеличить уровень автоматизации предварительной обработки данных МЛС и может быть адаптировано для полученных различными съемочными системами массивов ТЛО, имеющих различное качество исходных данных.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

2.1 Влияние внешних условий съемки и характера объекта сканирования на точность данных

На точность данных МЛС влияют инструментальные ошибки, обусловленные качеством сборки и юстировки отдельных деталей лазерных сканеров, и ошибки внешних условий съемки, связанные с влиянием атмосферных условий и характером сканируемого объекта местности [30]. По сравнению с инструментальными, ошибки внешних условий съемки могут более существенно влиять на данные МЛС. Учитывать влияние ошибок внешних условий съемки следует как в ходе полевого этапа МЛС, так и при камеральной обработке получаемых данных.

Среди внешних условий можно выделить рефракцию лазерных лучей, затухание электромагнитных волн, турбулентность воздуха. Ошибки, которые связаны с рефракцией, возникают в результате изменения показателя преломления. Затухание характеризуется уменьшением интенсивности лазерного излучения, которое возникает в результате его поглощения, рассеяния и мерцания. Поглощение возникает из-за наличия в атмосфере молекул воды и углекислого газа, плотность которых зависит от влажности и высоты [14]. Рассеяние лазерного излучения происходит из-за наличия в воздухе различных рассеивающих частиц. Явление мерцания называют сцинтилляцией, оно возникает как результат нагрева частиц воздуха вследствие турбулентности, меняя тем самым показатель преломления и плотность. Следствием сцинтилляции являются низкочастотные изменения лазерного излучения, которое достигает приемника. Сцинтилляция является следствием увеличения числа битовых ошибок в системах лазерного сканирования [59].

Чтобы свести к минимуму влияние внешних условий, необходимо учитывать свойства лазерного излучения: спектральная ширина, монохроматичность, когерентность, расходимость и выходная мощность [1].

Спектральная ширина определяется интервалом частот около центра спектральной линии лазерного пучка. На краях этого интервала интенсивность уменьшается в два раза по отношению к центру линии. Свойство монохроматичности заключается в необходимости получения лазерного излучения по своей структуре близко к идеальной гармонической волне, определяется усилением электромагнитной волны из-за влияния свойств активной среды и строгой частотой излучения лазера. Когерентность лазера представляется упорядоченной структурой его излучения, когда разность фаз любых точек волнового фронта излучения стремится к постоянству. Когерентность лазерного излучения во много раз превышает когерентность естественного света. Под расходимостью понимается угловое распределение интенсивности в отдаленной зоне, то есть спектральная ширина данного распределения в ней. Чем меньше значение расходимости, тем точнее будут измеряться координаты на гранях объектов. Выходная мощность лазерного излучения является наиболее важным его параметром, может серьезно отличаться в зависимости от модели лазерного сканера и на несколько порядков превосходить наиболее яркий источник света – ртутную лампу [1, 11].

Современные сканеры имеют большой диапазон мощности лазерного излучения. Дальность измерений лазерных сканеров тем больше, чем выше мощность их излучений. Недостаток лазерных сканеров, имеющих большой уровень мощности, заключается в большом количестве ошибочных измерений при съемке неоднородных по форме и текстуре объектов, находящихся недалеко от сканера. Отражательная способность этих объектов может сильно отличаться. Они оказывают значительное влияние на интенсивность рассеянного сигнала. Даже в случае сканирования плоского объекта, одна часть которого окрашена черным цветом, а другая белым, появляется высокая шумовая составляющая в области границы участков различного цвета [30].

Характер объекта сканирования и внешние условия съемки вносят более высокий вклад в возникновение ошибок ТЛО в высотном положении. Отметки ТЛО могут быть больше или меньше своих истинных значений. Сильнее это заметно при

съемке при повышенной влажности, когда горизонтальные поверхности участков местности покрываются водой [62]. Тогда необходимо учитывать, что на всех покрытых водой поверхностях не будет ТЛО. Это связано с тем фактом, что вода сильно поглощает лазерное излучение в зоне ближнего инфракрасного спектра, где чаще всего выполняется лазерное сканирование [9]. Все отражения близлежащих объектов в воде видны и в массиве ТЛО. Обосновать физически это можно тем фактом, что гладкая водная поверхность представляет собой разновидность плоского зеркала, и лазерный сканер записывает все отражения от воды подобно тому, как человеческий глаз фиксирует испускаемые реальными объектами и отраженные от воды фотоны [51]. По сравнению с отражением от плоского зеркала, от водной поверхности интенсивность отраженных объектов будет значительно меньше.

Большинство ошибок, которые вызваны влиянием внешних условий съемки и характером сканируемого объекта местности, можно исключить во время планирования процесса съемки посредством выбора наиболее благоприятных для измерений условий. Для устранения ошибок, возникших вследствие сканирования во время неблагоприятных условий, необходимо обязательно применять один или несколько методов фильтрации данных.

2.2 Методы фильтрации данных мобильного лазерного сканирования

При разработке любых методов фильтрации главной задачей является необходимость соблюдения баланса между сохранением реальных характеристик и качеством фильтрации. Необходимо, чтобы метод фильтрации позволял распознать большинство ошибочных измерений, не затронув описывающие фактические формы объектов точки. При повторном применении метода фильтрации также не должно выполняться чрезмерное сглаживание массива ТЛО. Дополнительно необходимо, чтобы результат фильтрации не зависел от угла сканирования и выбранной системы координат [70].

В настоящее время существует большое число методов фильтрации результатов лазерного сканирования. Существуют разнообразные классификации этих методов. Согласно одной из классификаций все методы фильтрации можно поделить на семь групп: статистические, методы на основе соседства, проецирования, обработки сигналов, составления дифференциальных уравнений, гибридные методы и группа других методов [42].

Статистические методы используют средства математической статистики, такие как метод главных компонент, кластерный анализ, байесовский классификатор, метод максимального правдоподобия, метод наименьших квадратов.

Методы на основе соседства вычисляют подобие между анализируемой и всеми соседними точками. Подобие может быть определено на основе анализа взаимного положения точек, их общего положения в пространстве и вычисления нормалей.

В методах, основанных на проецировании, осуществляется поиск опорной поверхности. На эту поверхность выполняется проецирование всех точек массива. Для обнаружения такой поверхности наиболее часто выбирают метод движущихся наименьших квадратов (Moving Least Squares), представляющий собой низкочастотный фильтр [62]. Методы данной группы уменьшают шум путем сглаживания массива ТЛО, а также удаляют изолированные ложные точки. В зависимости от определенного метода этой группы, проецирование может осуществляться одновременно как для всех трех координат точек, так и сначала для координаты Z , а затем – для X , Y .

Методы на основе обработки сигналов содержат разнообразные фильтры, которые разработаны на основе дискретных ортогональных преобразований, таких как преобразование Лапласа и Фурье.

Методы, основанные на составлении дифференциальных уравнений, расширяют сферы применения этих уравнений и частных производных. Например, в [85] исследуется применение взвешенных графов, используемых первоначально при обработке цифровых изображений, для фильтрации массивов ТЛО.

Гибридные методы используют несколько методов фильтрации совместно. В [85] приведена методика, в которой в начале применяются статические методы, а затем – метод на основе соседства.

Фильтрация осуществляется в следующем порядке:

- оптимизация методом роя частиц при выборе ширины полосы частот для ядерной оценки плотности;
- применение алгоритма кластеризации среднего сдвига;
- применение билатерального фильтра.

К группе других методов относятся те, которые не подходят ни к одной из описанных групп. Например, это метод фильтрации путем представления всего охватывающего массив ТЛО пространства в виде трехмерной воксельной сетки. В пределах границ каждого вокселя для множества точек определяется пространственное среднее положение. Количество точек массива ТЛО после фильтрации будет равно количеству вокселей. Недостатком этого метода будет потеря геометрической информации вследствие снижения плотности массива точек и зависимость точности его положения от числа ошибочных точек [69].

Данные группы методов представляют лишь одну из классификаций. Несмотря на большое число существующих методов, ни один из них не способен выполнить фильтрацию с максимальной точностью. Для каждого описывающего отдельный объект фрагмента массива точек часто требуется производить выбор наиболее оптимального метода. В зависимости от типа сканируемой поверхности, плотности массива точек и характеристики его шумовых составляющих будут отличаться [70].

Наибольшее количество методов фильтрации результатов лазерного сканирования применяют информацию только о пространственном положении каждой точки в массиве данных. Для улучшения результатов фильтрации также следует учитывать все характеристики массива точек: порядковый номер отражения, интенсивность отраженного сигнала, а также реальный цвет.

2.3 Влияние характера распределения точек лазерных отражений и растительности на результаты фильтрации данных лазерного сканирования

Сильное влияние на результаты фильтрации оказывает характер распределения каждой точки в массиве. Чем более равномерным является характер распределения массива ТЛО, тем достовернее работают автоматические методы фильтрации. Более равномерный характер обычно имеют массивы, полученные методом воздушного лазерного сканирования (ВЛС) [12, 17]. Это связано, как правило, с постоянной высотой и скоростью полета, а также с применяемым методом выполнения развертки. Наиболее равномерным характером распределения обладают массивы точек ВЛС, получаемые при развертке посредством вращающейся призмы, когда ТЛО отображаются в виде ряда параллельных друг другу прямых линий [24]. При развертке таким методом плотность массива ТЛО снижается при увеличении значения угла отклонения от оси маршрута лазерного луча за счет большего расстояния до объекта.

Данный метод развертки реализован также в системах МЛС. Но по причине того, что эта съемка выполняется с наземных транспортных средств, преодолеваемые лазерными лучами расстояния от сканера до препятствий отличаются значительно. При сканировании поверхностей, расположенных горизонтально, с увеличением расстояния от траектории съемки снижается плотность массива точек. Это связано с тем, что лазерные лучи падают под острыми углами. На рисунке 2.1 показан пример связи плотности массива ТЛО, определяемой значением линейного шага сканирования по вертикали $l_{\text{накл.}}$, от высоты установки сканера h .

Из рисунка 2.1 следует, что чем выше расположен сканер, тем меньшим будет расстояние $l_{\text{накл.}}$, которое можно выразить формулой

$$l_{\text{накл.}} = h \cdot \operatorname{tg}\left(\arctg \frac{S}{h} + \Delta\theta\right) - S, \quad (2.1)$$

где $\Delta\theta$ – угловой шаг сканирования по вертикали;

S – расстояние от сканера до объекта съемки;

h – высота сканера относительно снимаемого объекта.

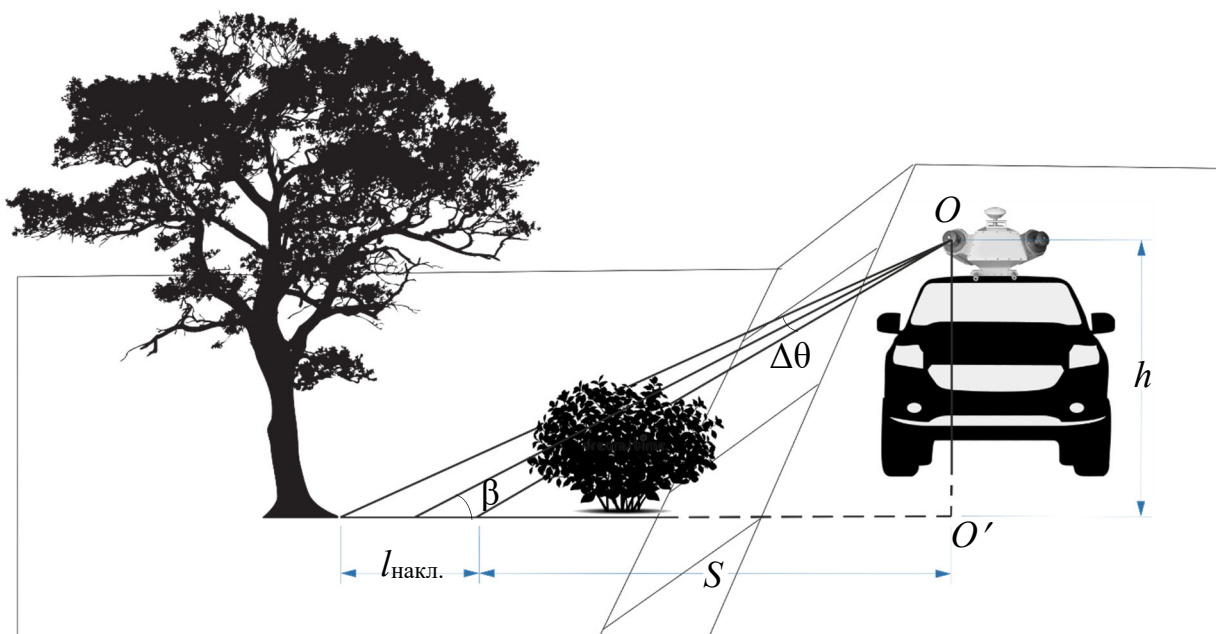


Рисунок 2.1 – Связь линейного шага сканирования по вертикали с высотой установки лазерного сканера

Плотность массива точек по направлению движения системы МЛС зависит от того, с насколько постоянной скоростью двигалось транспортное средство.

Характер распределения ТЛО в массиве, полученного методом наземного лазерного сканирования (НЛС), более неравномерен, так как отклонение лазерного луча выполняется в двух плоскостях одновременно путем поворота сервопривода и вращения призмы, а также вследствие меняющегося расстояния между близлежащими сканерными позициями.

Растительность при съемке методами МЛС и НЛС еще значительно снижает достоверность фильтрации. Плотность фрагмента данных МЛС, полученных по результатам проникновения лазерного луча через растительность, сильно уступает плотности данных похожего участка, расположенного на аналогичном расстоянии от траектории съемки или сканерной станции и снятого при той же высоте уста-

новки сканера и угловом шаге сканирования. При сканировании наземными методами находящихся за растительностью горизонтальных поверхностей полученные редкие точки часто воспринимаются алгоритмами фильтрации в качестве шума и могут быть удалены.

Задача удаления реальных точек алгоритмами фильтрации наиболее актуальна для данных, полученных при сканировании автомобильных дорог, проходящих вдоль высокой растительности. Низкая плотность точек за границами дорожного полотна повышает требования к точности выбора параметров для алгоритмов фильтрации. Особенно это актуально при построении ЦМР [3].

На рисунке 2.1 продемонстрирована наиболее часто возникающая ситуация в ходе сканирования территорий, при которой точность создания ЦМР резко уменьшается с повышением расстояния в сторону дороги. При построении ЦМР, удовлетворяющей требованиям определенного масштаба топографического плана, следует выполнять исследования с целью вычисления максимальной полезной дальности системы МЛС. В [15] показаны результаты исследований, обосновывающих выбор полезной дальности наземных сканеров при съемке участков местности с большим количеством растительности. Результаты выполненных исследований также приемлемы и для систем МЛС. Для вычисления полезной дальности можно применять формулу

$$R_{\text{полез}} = k_{\text{прозрач}} \cdot h \cdot \text{ctg } \beta, \quad (2.2)$$

где $k_{\text{прозрач}}$ – коэффициент прозрачности;

h – высота сканера относительно снимаемого объекта;

β – минимальный угол падения лазерного луча сканера.

Коэффициент прозрачности дает представление о том, какой процент лазерного излучения проникает через препятствия. По результатам исследований, выполненным в [15], коэффициент прозрачности необходимо подбирать, исходя из

цели выполнения сканерной съемки. Для создания ЦМР территорий лесных массивов $k_{\text{прозрач}} = 0,55$. Поэтому дальность действия следует задавать не более, чем 50–60 % от максимальной при планировании работ по сканированию.

Таким образом, выполняя фильтрацию данных МЛС, следует учитывать множество факторов. Выбор методов фильтрации и их параметров будет зависеть от особенностей сканируемой территории, цели выполнения сканирования и внешних условий, во время которых осуществлялась съемка. Вследствие большого числа разнообразных факторов разработка универсального алгоритма фильтрации является сложной задачей, для решения которой необходимо выполнить анализ ряда данных лазерного сканирования. Итоговый разработанный алгоритм должен быть приемлемым для самых разнообразных условий съемки и включать рекомендации, позволяющие осуществить фильтрацию данных лазерного сканирования без потери полезной информации посредством изменения параметров различных входящих в его состав методов.

2.4 Алгоритмы уравнивания данных мобильного лазерного сканирования

Задача автоматизации уравнивания координат сгенерированных массивов ТЛО может быть решена различными способами. Большинство ПО от компаний-производителей лазерных сканеров выполняют автоматическое взаимное ориентирование массивов ТЛО посредством поиска в них плоских участков. Взаимное ориентирование по высоте осуществляется по горизонтальным плоскостям, а в плане – по вертикальным. Для вписывания горизонтальных плоскостей обычно применяются точки поверхности земли, и сложностей взаимного ориентирования в высотном положении не возникает почти на любых участках местности. В свою очередь, автоматическое уравнивание в плане с высокой точностью возможно только в случае съемки территорий с присутствием плоских вертикальных объектов, таких как стены зданий. С целью получения наибольшей точности автоматического взаимного ориентирования, процесс сканирования следует выполнять в противополож-

ных направлениях, двигаясь вокруг зданий и сооружений [35]. Расчет поправок в позицию массивов ТЛО чаще всего осуществляется с применением итеративного алгоритма ближайших точек ICP или его модификаций [64]. Методики взаимного ориентирования в ПО от компаний-производителей лазерных съемочных систем подобны тем, что описаны в [56, 63, 86].

Для повышения точности автоматического взаимного ориентирования массивов ТЛО, выполняемого в ПО от компаний-производителей лазерных съемочных систем, часто создают различные программные модули и разрабатывают специальные алгоритмы обработки данных. В [33] представлен пример такого алгоритма, который заключается в том, что сырые данные в виде массивов точек и траекторий, полученных системами МЛС от компании Riegl, в специальном программном модуле предварительно разделяются на короткие участки с продольными перекрытиями, где данные МЛС дублируются. Полученные участки экспортируются и уравниваются во входящем в состав системы МЛС ПО Riprocess. Выполненное предварительное разделение данных МЛС на участки позволяет повысить точность взаимного ориентирования массивов ТЛО и траекторий. Приведенный алгоритм взаимного ориентирования позволяет конкурировать даже с такими алгоритмами, которые основаны на применении более дорогостоящего специализированного ПО, такого как TerraSolid. ПО TerraSolid позволяет выполнить дополнительное уравнивание координат массивов ТЛО и траекторий после предварительной обработки в Riprocess или другом похожем ПО.

Основные недостатки ПО от компаний-производителей лазерных сканеров – это относительно небольшое количество инструментов и закрытый программный код. При сложных и неблагоприятных внешних условиях сканирования не всегда возможно достичь максимальной точности автоматического взаимного ориентирования, используя существующий инструментарий. Например, если вертикальные плоскости в массиве ТЛО практически отсутствуют, что является особенностью загородных территорий, точность взаимного ориентирования в плане часто оказывается на низком уровне. В этом случае необходимо до-

бавлять соответственные точки интерактивно на отдельных небольших объектах, таких как светофоры, опорные сооружения, дорожные знаки и т. п. Также соответственные точки могут быть размещены на углах прерывистой дорожной разметки [35, 81].

В настоящее время ведется разработка методов, позволяющих автоматически распознать отдельные небольшие объекты для решения задачи взаимного ориентирования. Реализация подобных методов выполняется с помощью определенных языков программирования в виде соответствующих программных модулей. Одним из наборов подобных модулей является TerraSolid, который содержит ряд инструментов, параметры которых могут быть гибко настроены для решения определенных задач.

В [52] приведен один из алгоритмов автоматического взаимного ориентирования путем распознавания объектов дорожной инфраструктуры, прерывистой дорожной разметки и опорных сооружений. Предложенный алгоритм апробирован на данных лазерного сканирования городских территорий. На первом этапе этого алгоритма распознаются все небольшие объекты. Далее они разделяются на группы. Например, это необходимо, чтобы отделить объекты городской инфраструктуры от растительности, которая оказывает негативное влияние на точность распознавания небольших объектов из-за своей неоднородной структуры. Недостатком алгоритма является необходимость применения результатов аэрофотосъемки для автоматического разделения небольших объектов на группы. В противном случае большинство групп объектов можно распознать только интерактивно.

Чтобы автоматически распознать группы объектов без использования данных аэрофотосъемки, можно применить метод классификации с обучением. Этот метод реализован во многих ПО обработки данных дистанционного зондирования Земли. Он также реализован в программном модуле TerraScan [76]. Метод классификации с обучением по определенным признакам в начале выполняет автоматическое разделение массива точек на отдельные группы. Далее пользователь ПО создает обу-

чающие выборки, включающие различные группы объектов сканируемого участка местности. Результатом создания обучающих выборок является библиотека эталонов, где каждой группе назначен свой класс. В итоге эталоны библиотеки сравниваются с неидентифицированными группами объектов массива точек, и каждой такой группе присваивается класс соответствующего эталона. Недостатком метода является сильная зависимость результата классификации от плотности массива точек, от числа межмаршрутных перекрытий и от того, с какой стороны был отсканирован распознаваемый объект. Также, создание библиотеки эталонов может занимать длительное время [76].

После взаимного ориентирования массивов ТЛО выполняется внешнее. В ходе внешнего ориентирования данные МЛС трансформируются в необходимую систему координат на основе существующих или рассчитанных по опорным точкам параметрам преобразования. Трансформирование осуществляется с помощью формулы [15, 18]

$$\begin{bmatrix} X_{\text{вн}} \\ Y_{\text{вн}} \\ Z_{\text{вн}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

где $X_{\text{вн}}, Y_{\text{вн}}, Z_{\text{вн}}$ – координаты точек массива ТЛО во внешней системе координат;

X, Y, Z – исходные координаты точек массива ТЛО;

X_0, Y_0, Z_0 – координаты начала системы координат $OXYZ$ массива ТЛО во внешней системе координат $OX_0Y_0Z_0$;

A – матрица направляющих косинусов, которая определяет ориентацию системы координат $OXYZ$ относительно $OX_0Y_0Z_0$. В общем виде матрица A имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots, c_3$ – направляющие косинусы, которые являются функциями углов Эйлера ε, η, ξ , показанных на рисунке 2.2.

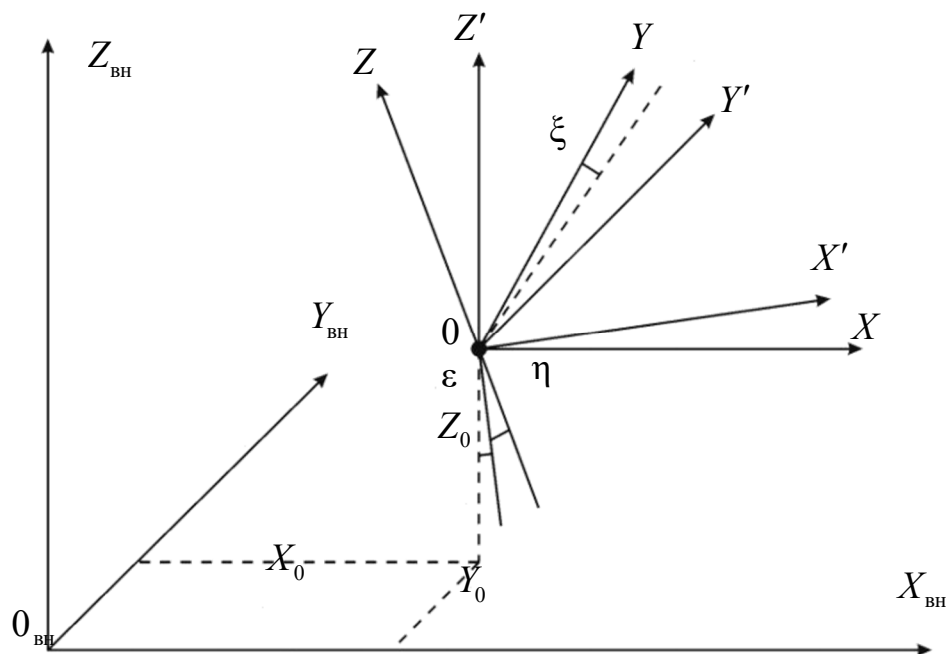


Рисунок 2.2 – Элементы внешнего ориентирования массива ТЛО

Из формул (2.3) и (2.4) следует, что для преобразования координат массива ТЛО из системы $OXYZ$ в систему $X_{BH} Y_{BH} Z_{BH}$ следует знать элементы внешнего ориентирования $X_0, Y_0, Z_0, \varepsilon, \eta, \xi$.

При МЛС элементы внешнего ориентирования рассчитываются с помощью обоих существующих методов: прямого и аналитического. В исходной системе координат эти элементы определяются на основе прямого метода путем совместной обработки данных, записанных спутниковой аппаратурой, лазерными сканерами и инерциальной системой. В случае необходимости трансформирования данных МЛС в другую внешнюю систему координат применяется аналитический метод, при котором элементы внешнего ориентирования вычисляются по известным координатам пунктов съемочного обоснования, где располагались базовые станции, на основе решения обратной геодезической задачи по формуле (2.3).

При трансформировании данных МЛС из одной системы координат в другую могут применяться и другие виды преобразований, в которых используется различное число параметров.

Для оценки точности трансформированных данных МЛС в известную внешнюю систему координат, а также для повышения внешней абсолютной точности используют координаты опорных и контрольных точек, которые измеряют вдоль траектории сканирования другим геодезическим оборудованием, таким как тахеометры, нивелиры и спутниковые приемники [84]. Без опорных точек точность внешнего ориентирования массивов ТЛО составляет обычно не более 5 см в плане и по высоте в случае хорошего спутникового сигнала. Этой точности можно достичь при сканировании территорий за пределами городской застройки при соблюдении требований создания планово-высотного обоснования ПВО [42, 67]. В [55, 75] рассмотрены такие требования для систем МЛС, разработанных компанией Riegl:

- при применении одной базовой станции ГНСС длины линий между ней и системой МЛС не должны быть более 30 км. Иначе следует применять сеть базовых станций;
- количество базовых станций в сети может быть от 4 до 50;
- длины базовых линий сети должны быть не более 70 км;
- сканирование должно выполняться в пределах полигона, образованного сетью базовых станций.

Этими требованиями руководствуются и при сканировании большинством других систем МЛС, использующих ИНС от компании Applanix, что связано с применением единого ПО POSPac MMS при уравнивании точек траекторий путем совместной обработки результатов спутниковых наблюдений и данных, записанных ИНС.

Размещение опорных и контрольных точек, а также измерение их координат с помощью высокоточного геодезического оборудования является трудоемким процессом. Для сокращения затрачиваемого на него времени следует представлять,

как внешние условия съемки влияют на точность данных МЛС во внешней системе координат. При большом количестве высотных объектов вдоль траектории сканирования качество приема спутникового сигнала понижается. В этом случае требуется выполнять размещение большого числа опорных точек. В [74] показано, что при потере спутникового сигнала более, чем на полминуты, точность данных МЛС в несколько раз понижается, особенно при ситуации, когда скорость движения становится выше 40 км/ч. На таких территориях предложено наносить светоотражающей краской опорные точки на дорожном покрытии каждые 400 м. При камеральной обработке данных МЛС выполняются интерактивная идентификация опорных точек и измерение их координат. Вычисляют разности координат, измеренных по массиву ТЛО и другим геодезическим оборудованием. По полученным смещениям выполняют внешнее ориентирование массивов ТЛО путем расчета поправок в его позицию.

Измерение координат опорных точек по массиву ТЛО может быть выполнено автоматически. Для этого размещение опорных точек на дорожном покрытии выполняют в соответствии с определенными формами, шаблонами, которые задаются в ПО. Опорные точки, располагаемые по известным шаблонам, уменьшают время камеральной обработки, но значительно увеличивают сроки выполнения полевых работ.

Источником опорных точек могут служить аэрофотоснимки. В [46] описан алгоритм автоматического внешнего ориентирования данных МЛС по аэрофотоснимкам, полученным с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основная идея алгоритма состоит в том, что по сравнению с методом МЛС, метод съемки с БПЛА обеспечивает более высокую точность получаемых данных на застроенных высотными строениями территориями, что объясняется более надежным качеством приема спутникового сигнала в воздухе. Набор соответственных точек предлагается выполнять по углам дорожной разметки, которую можно автоматически распознать и по данным МЛС, и по данным БПЛА. Для этой цели данные МЛС преобразуются в форму растрового изображения, где значения яркости

пикселей соответствуют интерполированным значениям интенсивности. Контуры разметки извлекаются при помощи детектора углов Харриса из данных МЛС и БПЛА. С помощью шаблонов границ выполняется поиск соответствий между результатами извлечения контуров.

На основе найденных соответствий выполняется уравнивание координат точек массива МЛС. Предложенный алгоритм позволяет выполнить внешнее ориентирование массивов ТЛО с точностью около 6–10 см в случае распознавания опорных точек каждые 100–200 м, но не уравнивает траектории. В [53, 54] применяется усовершенствованный алгоритм, который может уравнивать как массивы ТЛО, так и траектории.

С целью автоматического внешнего ориентирования, как и взаимного, могут быть использованы также объекты городской инфраструктуры [52].

Недостаток всех алгоритмов автоматического уравнивания по аэрофотоснимкам заключается в их узкой специализации, так как на территориях без высотной застройки точность результатов МЛС выше. Аэрофотосъемка также часто является лишним и трудоемким процессом.

Таким образом, к настоящему времени был разработан ряд алгоритмов автоматического уравнивания, позволяющих выполнить как взаимное, так и внешнее ориентирование данных МЛС. Но для достижения высокой точности перед этапом уравнивания требуется выполнить ряд циклов предварительной обработки, занимающих продолжительное время, и большое количество дополнительных полевых измерений. Предлагаемые алгоритмы, как правило, адаптированы для территорий с определенным уровнем застройки. В отличие от территорий с высотной застройкой, где точность автоматического взаимного ориентирования находится на высоком уровне, для незастроенных территорий без плоских вертикальных участков объектов местности эта точность может сильно снижаться.

Делать вывод о достаточном уровне точности данных МЛС следует исходя из цели его осуществления. Принимать решение о том, необходимы ли дополни-

тельные полевые измерения для повышения точности исходных данных МЛС, следует исходя из характера застройки территории. При разработке новых алгоритмов и методов автоматического уравнивания опираться необходимо на комплексный подход, который позволил бы принять во внимание большинство особенностей сканируемой территории с минимальным количеством дополнительных полевых наземных работ.

3 РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

3.1 Технологическая схема подготовительных работ и процесса мобильного лазерного сканирования

Создание ПВО – это основная часть этапа подготовительных работ для МЛС. Пункты ПВО применяются в качестве базовых станций, на которые устанавливаются спутниковые приемники. Сбор данных с базовых станций должен быть запущен в ходе МЛС [41].

Схема ПВО определяется следующим:

- точностью, предъявляемой к получаемому массиву ТЛО;
- техническими характеристиками системы МЛС;
- размером территории съемки и тем, площадной или линейно-протяженный характер она имеет;
- количеством спутниковых приемников, одновременно устанавливаемых на базовых станциях, и числом исполнителей.

Согласно рекомендациям, приведенным в разделе 2.4, и результатам выполненных в разделе 4.4 экспериментальных исследований, применения одной базовой станции будет достаточно при работах, где требуется получить точность массива ТЛО в плане, удовлетворяющую требованиям по созданию топографических планов масштаба 1 : 500 с высотой сечения рельефа 0,25 м, в случае удаления от этой базовой станции на расстояние не более 15 км в процессе сканирования. Если точность высотного положения массива ТЛО должна удовлетворять допуску для высоты сечения рельефа 0,5 м, то максимальное расстояние удаления от базовой станции может быть увеличено до 30 км. Для съемки больших по площади и протяженности территорий следует использовать большее число базовых станций, объединенных в единую сеть.

Недостатком применения сети базовых станций является то, что их количество должно быть не менее четырех, даже там, где было бы достаточно двух или трех станций. Это ограничено возможностями ПК POSПас MMS, применяемого большинством коммерческих систем МЛС для обработки траекторий [55, 75]. Поэтому даже при съемке относительно небольших по протяженности и площади территорий, но где удаление от одной базовой станции больше значения порогового расстояния, необходимо применять сеть базовых станций из четырех приемников, или сканирование осуществлять по участкам, поочередно переставляя спутниковые приемники с одной станции на другую.

На рисунке 3.1 показан пример схемы МЛС при использовании сети базовых станций. При выборе мест расположения базовых станций необходимо, чтобы территория съемки не выходила за пределы полигона, образованного крайними из них. В случае, если достаточно минимального числа станций, расположенных по периметру территории съемки, рекомендуется разместить в центре еще одну. Движение по каждому участку всей территории следует выполнять в прямом и обратном направлении. Спутниковые приемники должны записывать данные со всех базовых станций в ходе МЛС.

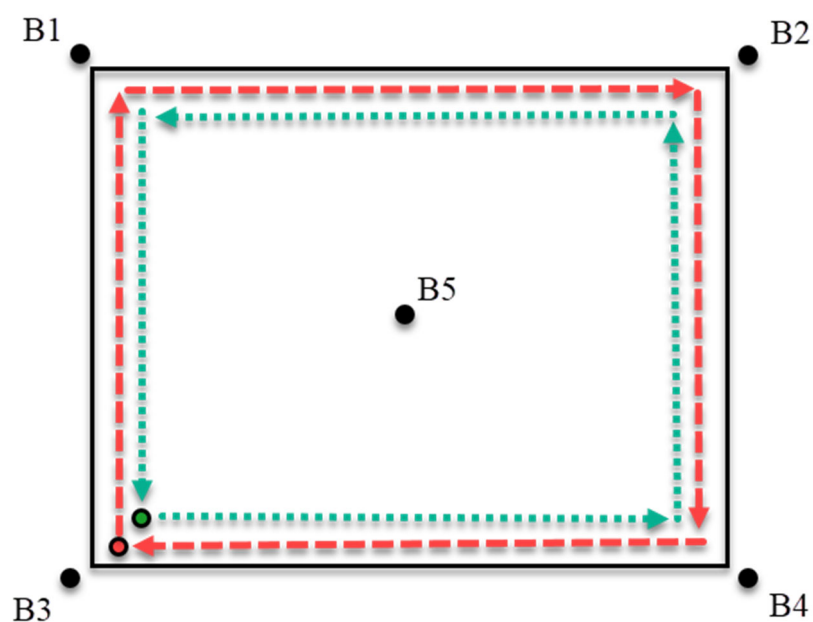


Рисунок 3.1 – Схема МЛС при съемке площадных объектов

Сканирование по участкам от одной базовой станции может быть обосновано при ситуации, когда площадь территории съемки слишком велика, а число исполнителей и спутниковых приемников недостаточно. Расстановка и включение спутниковых приемников на всех базовых станциях может занимать большую часть съемочного дня, существенно сокращая продолжительность процесса МЛС. Поэтому планирование маршрута передвижения приобретает первостепенное значение.

Сканирование от одной базовой станции становится особенно актуальным при съемке линейно-протяженных объектов. В этом случае для достижения наибольшей производительности сначала устанавливается спутниковый приемник на первую базовую станцию в центре первого участка объекта съемки, и сканирование выполняется в прямом и обратном направлении, начиная около базовой станции. Затем спутниковый приемник переставляется на вторую по ходу движения базовую станцию, и выполняется сканирование второго участка. Получается, что расстояние между базовыми станциями будет равно двойному значению максимально допустимого расстояния удаления от базовой станции. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнена съемка всей территории. На рисунке 3.2 показана схема МЛС при съемке линейно-протяженного объекта.

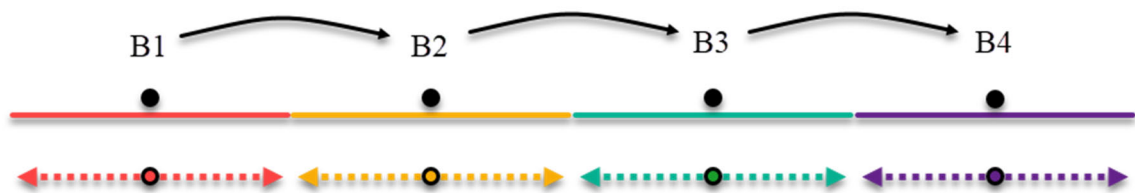


Рисунок 3.2 – Схема МЛС при съемке линейно-протяженных объектов

Интервал записи спутниковых наблюдений на базовых станциях в независимости от их количества должен покрывать время работы системы МЛС. Непосредственно перед запуском сбора данных с лазерных сканеров в ходе работы системы МЛС должна быть проверена работоспособность других основных ее блоков в ходе

калибровочного кратковременного проезда. На рисунке 3.3 приведена технологическая схема процесса МЛС.



Рисунок 3.3 – Технологическая схема процесса МЛС

3.2 Технологическая схема предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования

Предварительная обработка начинается с импорта сырых данных системы МЛС и результатов спутниковых наблюдений на базовых станциях в специализированное программное обеспечение от компании-производителя системы МЛС.

В этом программном обеспечении выполняются стандартные этапы, описанные в разделе 1.4: уравнивание точек траектории движения системы мобильного лазерного сканирования при их обработке от базовых станций, ориентация и сгущение точек траектории, генерация массивов ТЛО, калибровка лазерных сканеров и цифровых камер, автоматическая фильтрация и уравнивание координат точек лазерных отражений, оценка точности результатов фильтрации и уравнивания.

По результатам оценки точности делается вывод об их приемлемости для решения определенной производственной задачи.

Далее, в зависимости от внешних условий, при которых выполнялась съемка, и характера застройки сканируемой территории делается вывод, требуется ли выполнить дополнительную фильтрацию и уравнивание по предложенным в разделе 3.3 и 3.4 алгоритмам.

Методика предварительной обработки данных МЛС с учетом разработанных алгоритмов представлена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Методика предварительной обработки данных МЛС

3.3 Разработка алгоритма фильтрации

Территории, сканирование которых необходимо выполнить, бывают достаточно разнообразны. Как правило, применение метода МЛС становится актуальным при необходимости осуществления съемки больших по площади территорий. В этом случае МЛС может занимать несколько дней. В течение рабочего дня внешние условия съемки могут существенно изменяться. Часто съемку приходится вы-

полнять даже при мелком дожде, и тогда при фильтрации массивов ТЛО необходимо учесть огромное количество факторов, влияющих на их качество.

Чтобы учесть все возможные факторы, методика фильтрации должна быть разработана и апробирована по данным, полученным при различных погодных условиях для разных по плотности застройки территорий.

Наиболее значимая проблема, которую нужно решить при фильтрации данных, – это удаление ложных точек, возникающих под землей и в воздухе. Это можно осуществить в процессе построения точной ЦМР. Для этого выполняется распознавание точек физической поверхности земли.

При разработке алгоритма фильтрации данных МЛС для распознавания точек физической поверхности земли был применен метод Аксельсона, точность работы которого зависит от количества ложных точек, находящихся под землей и в воздухе [47, 50, 76]. Все методы выделения точек физической поверхности земли можно отнести к отдельной группе методов фильтрации. В соответствии с описанной в [82] классификацией все методы выделения точек физической поверхности земли принадлежат к одной из следующих групп: методы прогрессивного сгущения, морфологической фильтрации, фильтрации на основе поверхностей и фильтрации на основе сегментов. Итерационный алгоритм Аксельсона относится к группе методов прогрессивного сгущения. Сначала весь массив ТЛО разделяется на ячейки заданного крупного размера. В пределах каждой ячейки определяется точка с минимальным значением высоты. Размер ячейки задается по размеру наибольшего объекта в массиве точек. Для ВЛС таким объектом является крупное здание. Чтобы точки поверхности земли не идентифицировались на крышах зданий, выбранный размер ячейки должен быть больше их площади. По результату поиска точек в качестве начального приближения выполняется построение триангуляционной сети. Во время следующих итераций в триангуляционную сеть добавляются новые точки согласно заданным критериям на значения угла и дистанции приближения. Углом приближения является максимальный угол между точкой-кандидатом, ее проекцией на ближайшую грань и вершину треугольника. Дистанцией приближения яв-

ляется максимальная длина перпендикуляра, опущенного из точки-кандидата на ближайшую грань треугольника. Когда новые точки перестают включаться в триангуляционную сеть согласно выбранным пороговым значениям угла и длины приближения, итерационный процесс завершается [8, 47, 50, 76, 82].

Результат выделения точек земли по описанному методу выделения точек физической поверхности земли тем лучше, чем меньше ложных точек находится под землей и в воздухе. Для фильтрации ложных точек были выбраны три следующих метода [76]:

- распознавание нижних точек;
- распознавание воздушных точек;
- распознавание точек, расположенных ниже поверхности.

Метод распознавания нижних точек позволяет выделить находящиеся под уровнем физической поверхности земли одиночные ложные точки или их группы. Сначала задается максимальное количество точек в группе. Осуществляется поиск не более заданного количества точек в группе, находящихся в пределах заданной площади ниже указанного расстояния относительно остальных точек.

Метод распознавания воздушных точек осуществляет поиск ложных точек путем расчета среднего значения отметки и среднего квадратического отклонения (СКО) значений отметок точек, располагаемых в рамках указанного радиуса. Минимальное количество точек в пределах радиуса не должно быть менее указанного пользователем значения. Точка распознается как воздушная, если ее отметка отличается от среднего значения отметки больше, чем на произведение значения СКО и выбираемого коэффициента.

Метод распознавания точек, расположенных ниже поверхности, осуществляет поиск ошибочно распознанных точек физической поверхности земли. Для каждой точки метод распознает до 25 соседних точек, в которые выполняет вписывание плоской или сплайновой поверхности. Выполняется расчет среднего значения разности высот между поверхностью и точками. Точка исключается из поверхности в том случае, если разность между значением ее высоты и высотой вписанной по-

верхности больше результата произведения рассчитанного среднего значения разности высот и выбираемого коэффициента.

Выбор описанных методов фильтрации массивов ТЛО можно обосновать тем, что они подходят для наиболее сложных внешних условий съемки, когда присутствует большое число точек переотражений из-за сканирования при повышенной влажности, и возможностями применяемого ПО [76].

Поэтапно алгоритм фильтрации заключается в следующем [5].

1 Удаление точек, у которых значения интенсивности превышают 8 000 и которые получены в результате одного отражения за импульс.

2 Удаление точек, значения интенсивности которых превышают 15 000.

3 Распознавание точек физической поверхности земли по методу Аксельсона с указанием следующих параметров: размер ячейки 10 м, дистанция приближения 1 м, угол приближения 8° .

4 Перенос точек, полученных в результате одного отражения за импульс, из класса физической поверхности земли во временный класс.

5 Перенос точек из временного класса в класс нижних точек в результате распознавания по алгоритму распознавания нижних точек при следующих параметрах: максимальное количество точек в группе – 99, площадь – $0,09 \text{ м}^2$, расстояние – 0,03 м. Повторное применение алгоритма при следующих параметрах: максимальное количество точек в группе – 10, площадь – 1 м^2 , расстояние – 0,3 м.

6 Перенос точек из временного класса в класс физической поверхности земли.

7 Перенос точек из класса физической поверхности земли в класс нижних точек в результате распознавания по алгоритму распознавания нижних точек при параметрах: максимальное количество точек в группе – 10, площадь – $0,09 \text{ м}^2$, расстояние – 0,03 м. Повторное применение алгоритма при параметрах: максимальное количество точек в группе – 30, площадь – 25 м^2 , расстояние – 0,3 м. Второе повторное применение алгоритма при параметрах: максимальное количество точек в группе – 30, площадь – 1 м^2 , расстояние – 0,1 м.

8 Перенос точек из класса физической поверхности земли в класс нижних точек в результате распознавания по алгоритму распознавания точек, расположенных ниже поверхности, при параметрах: среднее значение разности высот – 0,05 см, коэффициент – 3.

9 Перенос точек, у которых количество отражений за один импульс больше одного, из класса физической поверхности земли во второй временный класс. Распознавание среди точек временного класса расположенных выше физической поверхности земли по алгоритму распознавания воздушных точек при параметрах: радиус поиска – 30 м, коэффициент – 1, минимальное количество точек – 3.

10 Перенос точек из второго временного класса в класс физической поверхности земли.

11 Перенос точек из класса физической поверхности земли в класс нижних точек посредством распознавания по методу распознавания воздушных точек при параметрах: радиус поиска – 10 м, коэффициент – 4, минимальное количество точек – 3.

Значения параметров разработанного алгоритма подобраны на основе данных, полученных системой Riegl VMX-250. Но они также приемлемы для любых данных МЛС, плотность которых не ниже той, которая получается при таких параметрах съемки:

- скорость движения 40 км/ч;
- частота зондирующих импульсов 600 кГц;
- частота сканирования 200 Гц.

При более низкой плотности данных значения параметров методов необходимо подбирать снова.

3.4 Разработка алгоритма взаимного ориентирования

Сначала все данные МЛС обрабатываются и уравниваются автоматически в ПО от компании-производителя системы сканирования. В зависимости от точно-

сти уравнивания в этом ПО принимается решение о том, необходимо ли выполнять дополнительную обработку. Если точность оказалась низкой, уравненные траектории и массивы ТЛО импортируются в ПО TerraSolid с целью дополнительного взаимного ориентирования массивов ТЛО в зонах межмаршрутных перекрытий.

До начала взаимного ориентирования в ПО TerraSolid осуществляются следующие этапы [35]:

- разделение траекторий на фрагменты по ходу движения;
- присвоение номера фрагмента траектории каждой ТЛО;
- удаление точек, полученных во время остановки движения;
- удаление точек, полученных в момент резких поворотов;
- фильтрация, заключающаяся в удалении находящихся ниже поверхности земли или в воздухе ложных точек по методам, описанным в [76].

Для взаимного ориентирования данных МЛС был разработан следующий алгоритм, все этапы которого автоматически осуществляются для каждого фрагмента траектории отдельно [5].

1 Размещение границ, в пределах которых выполняется поиск поправок в линейные элементы внешнего ориентирования сканерных линий. Для расчета ошибок по высоте выбирается внутренняя зона между траекториями съемки прямого и обратного направлений, а в плане – зоны между траекториями и внешними границами. Внешняя граница размещается посредством параллельного копирования траекторий сканирования на заданное расстояние, которое определяется на основе местоположения объектов дорожной инфраструктуры, их числа и наличия растительности. Контуры внешней границы затем могут редактироваться в зависимости от наличия отдельных объектов.

2 Распознавание точек физической поверхности земли по алгоритму Аксельсона [47].

3 Перенос точек физической поверхности земли, заключенных в зоне между траекториями съемки противоположных направлений, в класс дорожного покрытия.

4 Автоматический поиск каждые 10 м вдоль направления движения соответственных линий, вписываемых в ТЛО и соответствующих дорожному покрытию противоположных маршрутов сканирования.

5 Расчет по соответственным линиям локальных поправок в высотное положение ТЛО и точек траекторий при применении одномерного фильтра Гаусса [40]:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.1)$$

где x – расстояние вдоль траектории сканирования, в пределах которого выполняется сглаживание;

σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

Было определено, что для взаимного ориентирования данных МЛС в высотном положении необходимо задавать $x = 50$ м.

6 Применение локальных поправок к высотному положению массива ТЛО и траекторий.

7 Расчет высоты от уровня физической поверхности земли для каждой точки ТЛО.

8 Разбиение всего массива ТЛО на два уровня по высоте от уровня поверхности земли: 0–1 м, > 1 м.

9 Перенос во временный класс всех точек, у которых количество отражений за один импульс больше, чем одно.

10 Расчет нормалей в каждой ТЛО посредством метода главных компонент за счет выполнения анализа расположения близлежащих точек. Нормали применяются для работы далее описываемых методов поиска деревьев и групп точек.

11 Поиск групп точек по уровню от земли «> 1 м» путем вычисления расстояния между близлежащими точками. Группы формируются на основе соседних точек. Минимальным количеством точек для формирования группы является 20 [76].

12 Перенос в отдельный класс небольших вертикальных объектов групп точек, расположенных в зоне между траекториями и внешними границами.

13 Перенос групп точек из класса небольших вертикальных объектов в класс растительности путем распознавания по методу выделения деревьев ПО TerraSolid. Метод выполняет анализ кроны деревьев путем указания таких параметров, как минимальная высота группы над уровнем физической поверхности земли и минимальный диаметр кроны. Для анализа всех ТЛО класса небольших вертикальных объектов на предмет их соответствия растительности указывается любое значение минимальной высоты, меньшее 1 м, и небольшое значение диаметра. В результате анализа работы метода путем подбора его параметров были определены оптимальные значения, равные 0,2 м.

14 Перенос в класс растительности из класса вертикальных объектов групп точек, у которых максимальное значение высоты меньше 2,1 м. Это значение было выбрано на основе того, что минимальная высота дорожных знаков и столбов, расположенных вблизи дороги, превосходит его.

15 Перенос из класса вертикальных объектов в класс растительности групп точек, имеющих максимальное значение высоты большее, чем 13 м. Это значение было подобрано на основе максимальной высоты существующих на местности большинства опорных сооружений, расположенных вблизи с дорогами. Таким образом, в классе вертикальных объектов остаются те группы точек, у которых максимальная высота над уровнем поверхности земли находится в диапазоне 2,1–13 м.

16 Вычисление попарных евклидовых расстояний на плоскости XU от каждой точки класса вертикальных объектов до каждой точки класса растительности. При ситуации, если значение расстояния меньше порогового, выполняется перенос точки в класс растительности. Условие изменение класса точки можно записать в виде

$$\sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \leq D, \quad (3.2)$$

где D – пороговое значение евклидова расстояния между точками классов растительности и вертикальных объектов;

$X_i Y_i$ – координаты точки класса вертикальных объектов;

$X_j Y_j$ – координаты точки класса растительности.

17 Перенос точек в класс растительности из класса вертикальных объектов при условии, что в пределах фрагмента массива ТЛО объемом $0,512 \text{ м}^3$ оказывается менее двух точек класса вертикальных объектов. Объем области анализа может быть увеличен в случае, если плотность данных ниже той, которая получается при следующих параметрах съемки: скорость движения 40 км/ч , частота зондирующих импульсов 600 кГц и частота сканирования 200 Гц .

18 Перенос точек, имеющих высоту над поверхностью земли более 6 м , во временный класс из класса вертикальных объектов. Благодаря этому из дальнейшей обработки исключаются высотные части объектов. Например, исключаются провода ЛЭП, так как они оказываются в большинстве случаев в одной группе с опорами и вносят ряд ошибок в результаты поиска соответственных точек.

19 Автоматический поиск соответственных линий по плоским вертикальным участкам массива ТЛО всех классов при следующих параметрах: длина линии – $0,3 \text{ м}$; глубина сечения ТЛО – $0,1 \text{ м}$; максимальный угол наклона линии – 10° .

Взаимное ориентирование данных МЛС может быть выполнено с высокой точностью при большом количестве стен зданий и сооружений. При отсутствии таких объектов поиск соответственных линий может быть выполнен по большим плоским участкам дорожных знаков, но точность взаимного ориентирования только на основе автоматически найденных соответственных линий будет низкой.

20 Автоматический поиск соответственных точек между точками класса вертикальных объектов в межмаршрутных перекрытиях массивов ТЛО.

21 Интерактивный анализ результатов поиска соответственных точек на участках с низкой плотностью этих точек – менее трех точек на 100 м . Интерактивное удаление неверно найденных соответственных точек.

22 Поиск значений локальных поправок положения ТЛО в плане и точек траекторий при применении одномерного фильтра Гаусса. В результате экспериментальных исследований определено, что для взаимного ориентирования данных МЛС в плановом положении следует задавать $x = 100$ м.

23 Применение локальных поправок к положению массива ТЛО и траекторий в плане.

Разработанный алгоритм подходит для территорий, различных по плотности застройки. Его применение является наиболее оптимальным для незастроенных территорий, покрытых большим количеством растительности.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Описание района исследования и исходные данные

Исследования разработанной методики предварительной обработки данных МЛС выполнялись по материалам, полученным в процессе съемок следующих территорий:

- автомобильная дорога ОАО «Сургутнефтегаз» Талакан – Витим протяженностью 160 км;
- улицы г. Новосибирска.

МЛС автодороги было выполнено в начале августа 2018 г. системой Riegl VMX-250 за 3 дня. До начала процесса сканирования создавалось ПВО, занявшее 10 дней. На рисунке 4.1 показана схема ПВО на автодорогу Талакан – Витим. Дополнительно, каждый километр измерялись координаты опорных точек, размещенных на границе дорожного полотна.

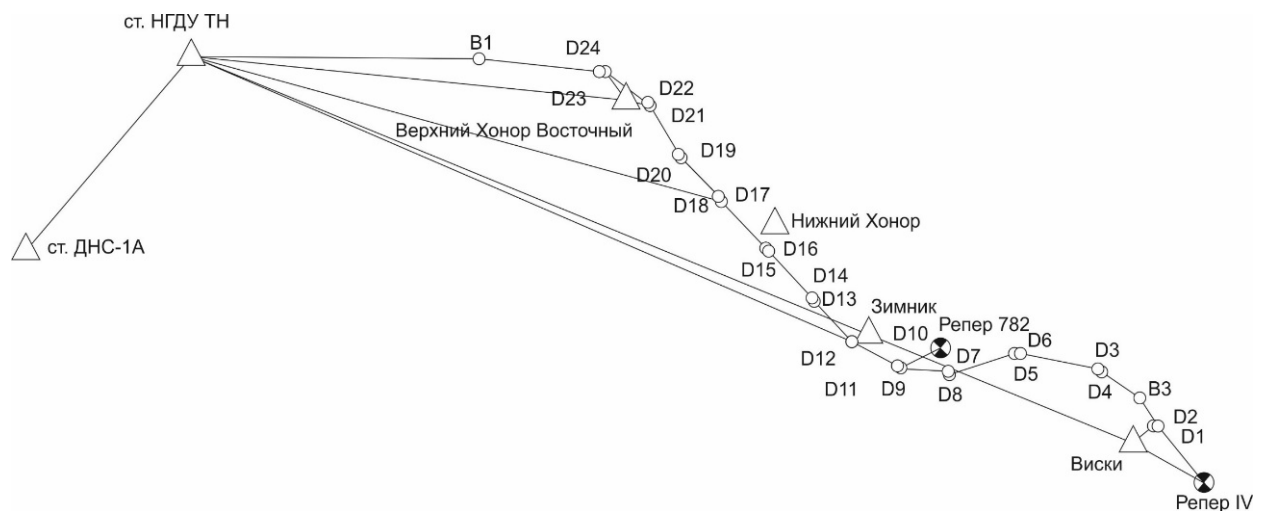


Рисунок 4.1 – Схема создания ПВО на автодорогу Талакан – Витим

Дорога Талакан – Витим на практически на всем протяжении была окружена высокой травянистой, древесной и кустарниковой растительностью. Периодически встречались промышленные объекты и строения.

Участок автодороги был поделен на 7 частей. Сканирование осуществлялось со средней скоростью движения 40 км/ч в противоположных направлениях последовательно по участкам. Частота зондирующих импульсов составила 600 кГц, а частота сканирования – 200 Гц. Во время сканирования каждого участка, отмеченного на рисунке 4.2 отдельным цветом, была запущена одна из ближайших базовых станций: ДНС, НГДУ, В1, В2, В3, D20. ДНС и НГДУ – это постоянно действующие базовые станции с известными координатами. Координаты остальных станций определялись в результате создания и уравнивания сети ПВО от пунктов государственной геодезической сети, показанных на рисунке 4.1, путем спутниковых наблюдений. Максимальное расстояние между базовыми станциями не превысило 26,7 км (между НГДУ и В1). Максимальное удаление от базовой станции до работающей системы МЛС не превысило 15 км, что в 2 раза меньше допустимого расстояния, заявленного в [75] для систем МЛС с инерциальными системами от фирмы Applanix при съемке от одной станции.



Рисунок 4.2 – Участок автомобильной дороги Талакан – Витим

В начале сканировались участки от постоянно действующих базовых станций. Затем выполнялась съемка участка вокруг базовой станции В1. Далее спутниковый приемник поочередно переносился на пункты D20, В2 и В3. По сравнению с созданием спутниковой сети, съемка по участкам позволяет уменьшить

время, затрачиваемое на установку спутниковых приемников на базовых станциях, а также их количество до одного. Для создания сети базовых станций необходимо большее число исполнителей, так как сбор спутниковых измерений на всех базовых станциях и процесс сканирования должны осуществляться одновременно. Это значительно повышает время выполнения подготовительных работ и снижает безопасность для исполнителей при съемке малонаселенных территорий. Создание сети базовых станций наиболее актуально в случае наличия возможности осуществления сканирования за один день. На рисунке 4.3, *а* приведен фрагмент результата съемки при отображении массива ТЛО по высоте с видом сверху.

Топографическая съемка методом МЛС улиц г. Новосибирска выполнялась от одной постоянно действующей станции NSKW. На рисунке 4.3, *б* приведен фрагмент результата сканирования одной из улиц протяженностью 1 км – проспекта Дзержинского. Сканирование этой улицы было выполнено с помощью системы VMX-250 летом 2020 г. Черным цветом отмечены траектории сканирования.

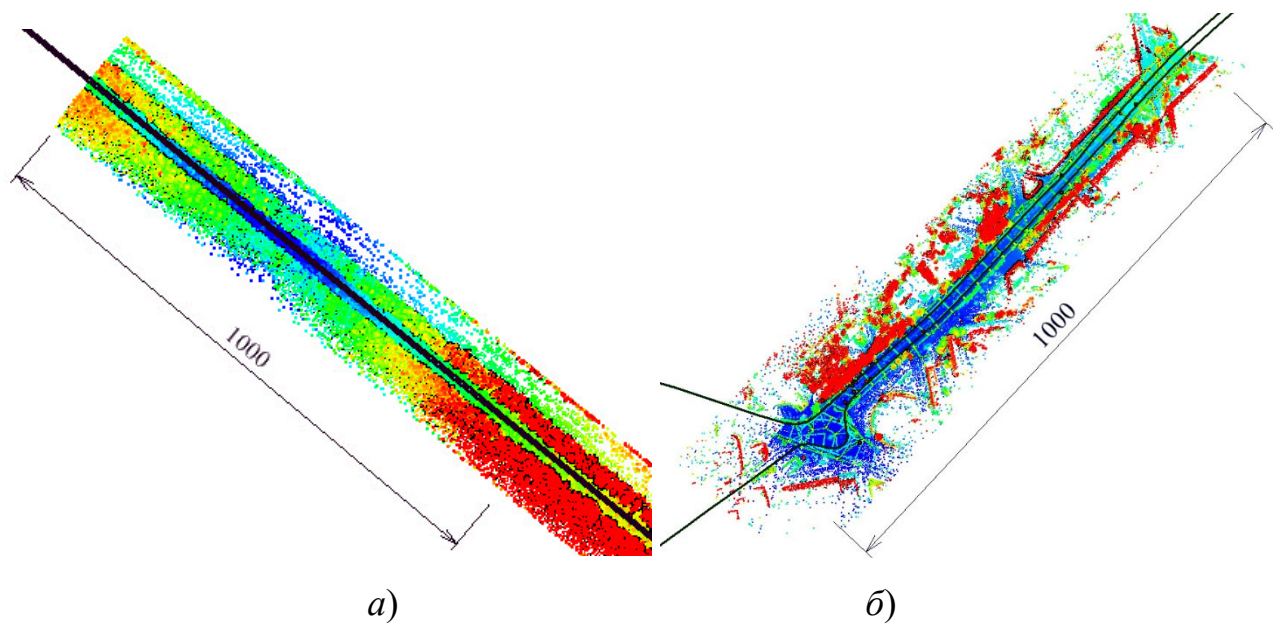


Рисунок 4.3 – Результаты МЛС: *а*) участок трассы Талакан – Витим;
б) участок улицы проспект Дзержинского

Для оценки уровня шумовых составляющих системы МЛС Riegl VMX ее данные сравнивались с данными системы LYNX Mobile Mapper M1. Для наибольшей достоверности сравнение выполнялось по данным одной и той же территории. С помощью системы LYNX съемка улиц г. Новосибирска осуществлялась в 2012–2014 гг.

4.2 Исследование алгоритма автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования

Рассмотрим алгоритм автоматизированной фильтрации данных МЛС на один из участков автомобильной дороги Талакан – Витим, который наиболее сложен для фильтрации. На рисунке 4.4 продемонстрирован исследуемый участок с видом сверху, а на рисунке 4.5 – его поперечное сечение.

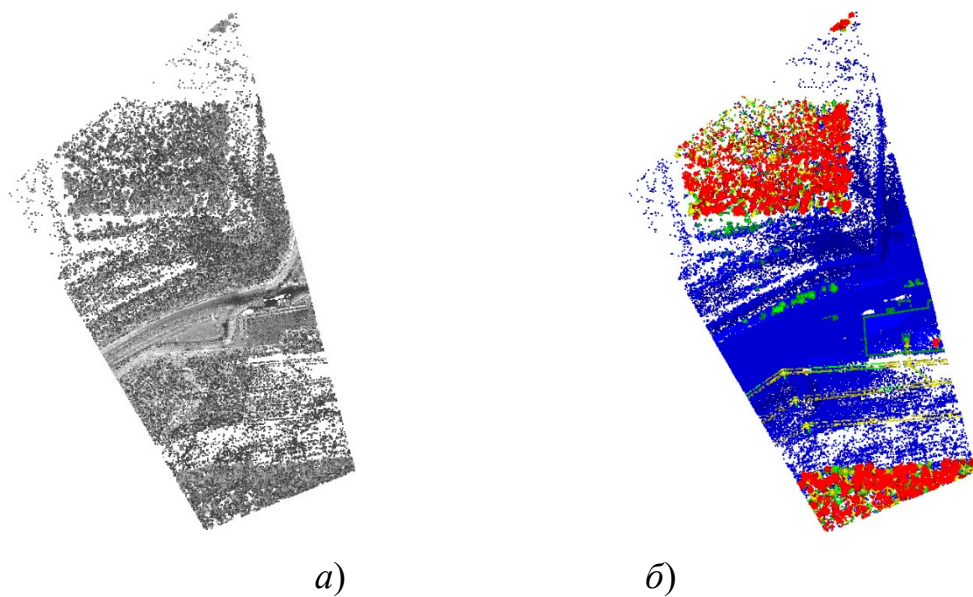


Рисунок 4.4 – Фрагмент данных МЛС: а) по интенсивности; б) по высоте

Сканирование этого участка было выполнено при повышенной влажности: на асфальтовом покрытии дороги и за его пределами было большое количество луж. Это стало причиной большого числа переотражений и появления ложных ТЛО в виде зеркально расположенных относительно горизонтальной плоскости объек-

тов под уровнем поверхности земли. Участок включает автомобильную дорогу, промышленные объекты в виде опорных сооружений, ограждений, строений и различные виды растительности.

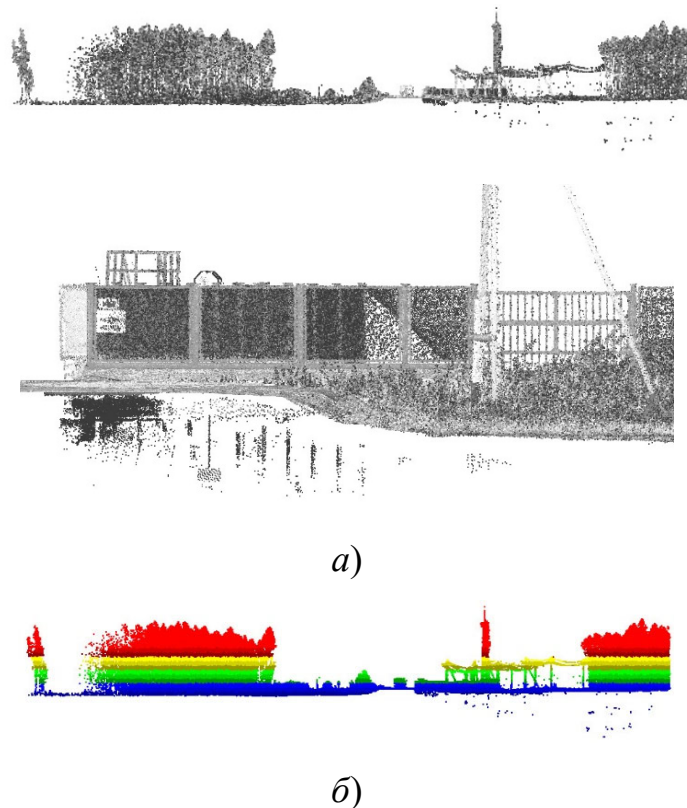


Рисунок 4.5 – Поперечное сечение фрагмента данных ЛС:

а) по интенсивности; *б)* по высоте

Для обработки данных ЛС полосы съемки была ограничена шириной в 200 м. Выбранное значение полосы связано с техническими характеристиками выбранной системы ЛС, присутствием растительности и задачей фильтрации. Основная задача фильтрации на таких территориях – это распознавание точек физической поверхности земли под слоем растительности с сохранением ТЛО, представляющих основные контуры сооружений и промышленных объектов. В соответствии с формулой (2.2) и значением коэффициента прозрачности для построения ЦМР на территории лесных массивов полезная дальность действия составляет 110 м.

Наличие точек переотражений на анализируемом участке сильно усложняет распознавание точек поверхности земли. При такой ситуации автоматическое распознавание и удаление ложных точек для построения высокоточной ЦМР целесообразно выполнять при совместном анализе пространственного положения ТЛО в массиве, их порядковых номеров отражений и значений интенсивности.

В соответствии с разработанным и представленным в разделе 3.3 алгоритмом сначала было выполнено автоматическое распознавание точек поверхности земли с помощью метода Аксельсона. Для оценки точности автоматического распознавания точек поверхности земли было интерактивно осуществлено удаление неверно распознанных точек, после чего выполнялось построение эталонной ЦМР. Эталонная ЦМР сравнивалась с результатами автоматического построения ЦМР для оценки достоверности распознавания точек поверхности земли автоматическими методами. На рисунке 4.6 показаны результаты построения ЦМР.

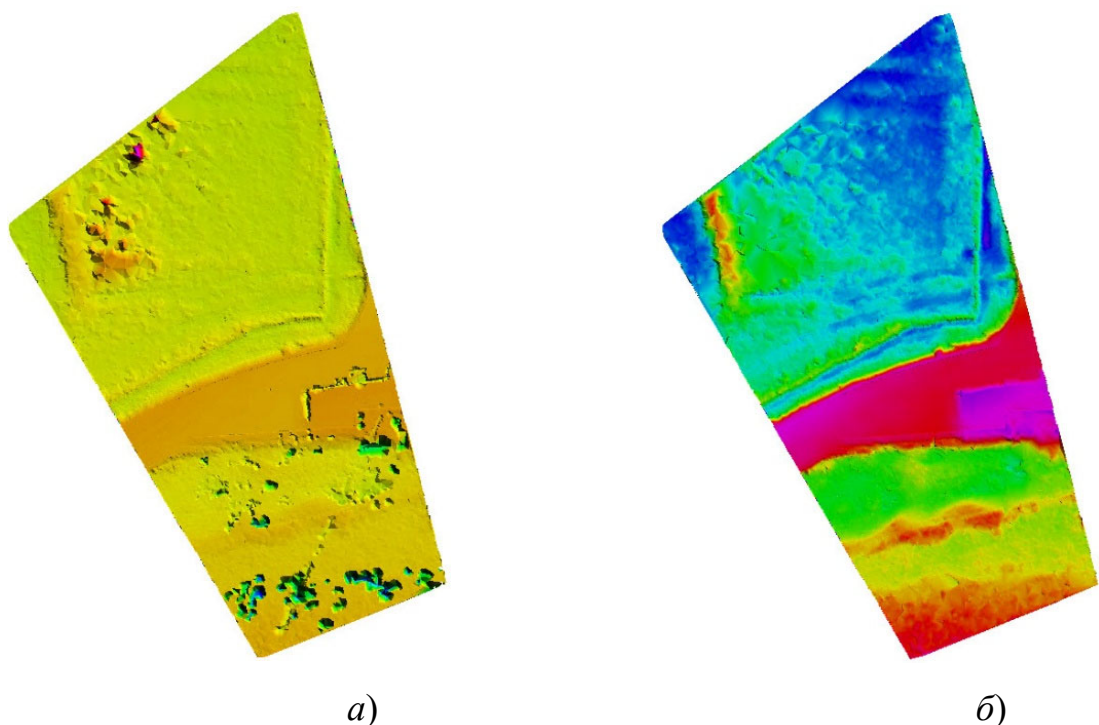


Рисунок 4.6 – ЦМР, построенная после распознавания точек поверхности земли:

а) распознавание по алгоритму Аксельсона; б) распознавание по алгоритму Аксельсона с последующим интерактивным удалением ложных точек

Все расположенные под уровнем земли ложные точки, отображенные на рисунке 4.5, отрицательно повлияли на достоверность создания ЦМР (рисунок 4.6, *а*). Все ошибочно распознанные точки поверхности земли были интерактивно удалены для создания эталонной ЦМР (рисунок 4.6, *б*) с целью создания набора контрольных точек по высоте, расположенных в узлах сетки размером $1 \times 1 \text{ м}^2$. В таблице 4.1 приведена оценка точности автоматически созданной ЦМР по набору контрольных точек, количество которых составило 23 493. Большое значение минимальной ошибки показывает наличие ложных точек под уровнем физической поверхности земли, а максимальной – на кронах деревьев или в воздухе. Результаты точности автоматически построенной ЦМР свидетельствуют о необходимости применения дополнительных методов и разработанного алгоритма фильтрации.

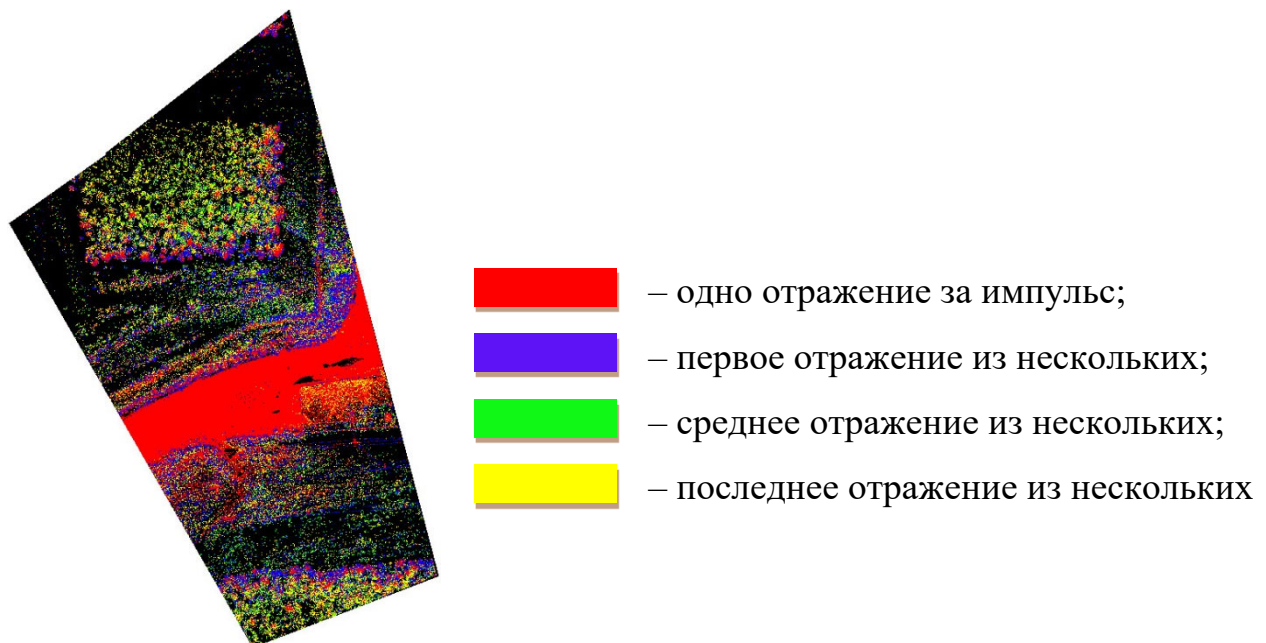
Таблица 4.1 – Оценка точности построения ЦМР по автоматически распознанным точкам физической поверхности земли

ЦМР Ошибка, м	Рисунок 4.6, <i>а</i>	Рисунок 4.9, <i>а</i>	Рисунок 4.9, <i>б</i>	Рисунок 4.9, <i>в</i>	Рисунок 4.9, <i>в</i> полоса 100 м
Средняя ошибка	0,260	0,114	0,113	0,064	0,027
Средняя квадратическая ошибка	1,300	0,453	0,429	0,140	0,058
Максимальное отрицательное отклонение	–18,670	–11,551	–0,533	–1,155	–0,153
Максимальное положительное отклонение	13,955	11,165	11,836	1,366	0,162

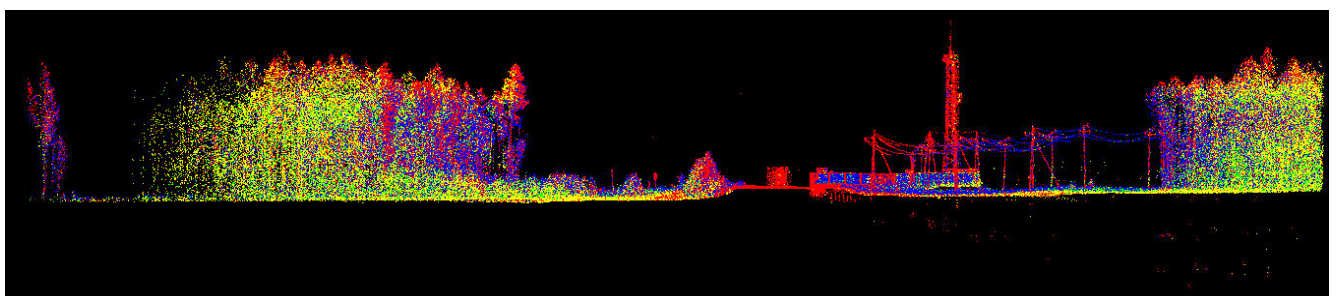
Алгоритм автоматической фильтрации данных МЛС, описанный в разделе 3.3, был разработан по рассматриваемому участку, но также протестирован для застроенных большим количеством промышленных объектов территорий и других незастроенных территорий. Реализация алгоритма была выполнена с помощью отдельных макросов, созданных на базе системы автоматизированного проектирования

Microstation и ПО TerraSolid. Макросы представляются в виде списка команд, где указан порядок их запуска. Команды создаются с помощью языка программирования Microstation Development Language.

Из рисунка 4.7 видно, что на область растительности за каждый импульс фиксируется большое количество ТЛО. В совокупности со значениями интенсивности можно распознать большинство ложных точек.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Фрагмент данных МЛС с отображением по номеру отражения:

а) вид сверху; б) поперечное сечение

На рисунке 4.8 продемонстрирован результат удаления ТЛО, значения интенсивности которых ниже пороговых (после этапа № 2 алгоритма). На рисунке 4.9,

a показаны промежуточные результаты построения ЦМР после удаления ТЛО по интенсивности. На рисунке 4.9, *б* приведены результаты построения ЦМР после этапа алгоритма № 8, а на рисунке 4.9, *в* – финальный результат фильтрации. В таблице 4.1 были приведены результаты оценки точности создания промежуточных ЦМР.

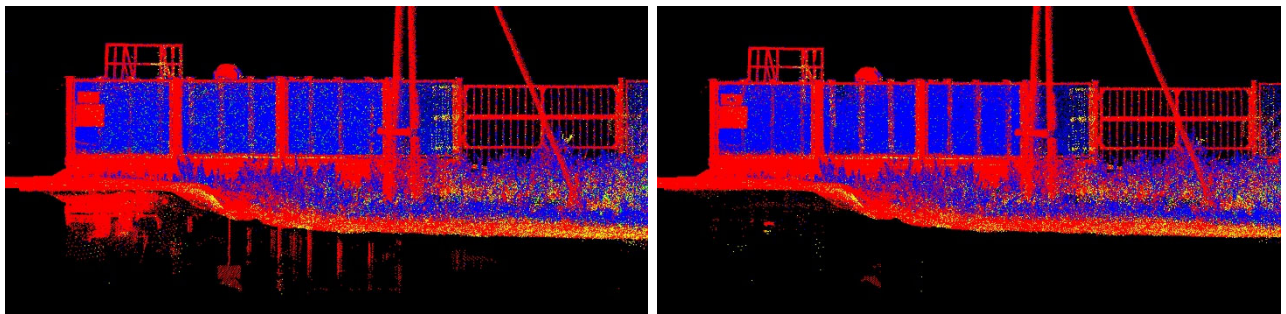
*a)**б)*

Рисунок 4.8 – Данные МЛС с отображением по номеру отражения:

a) до удаления ТЛО по интенсивности; *б)* после удаления ТЛО по интенсивности

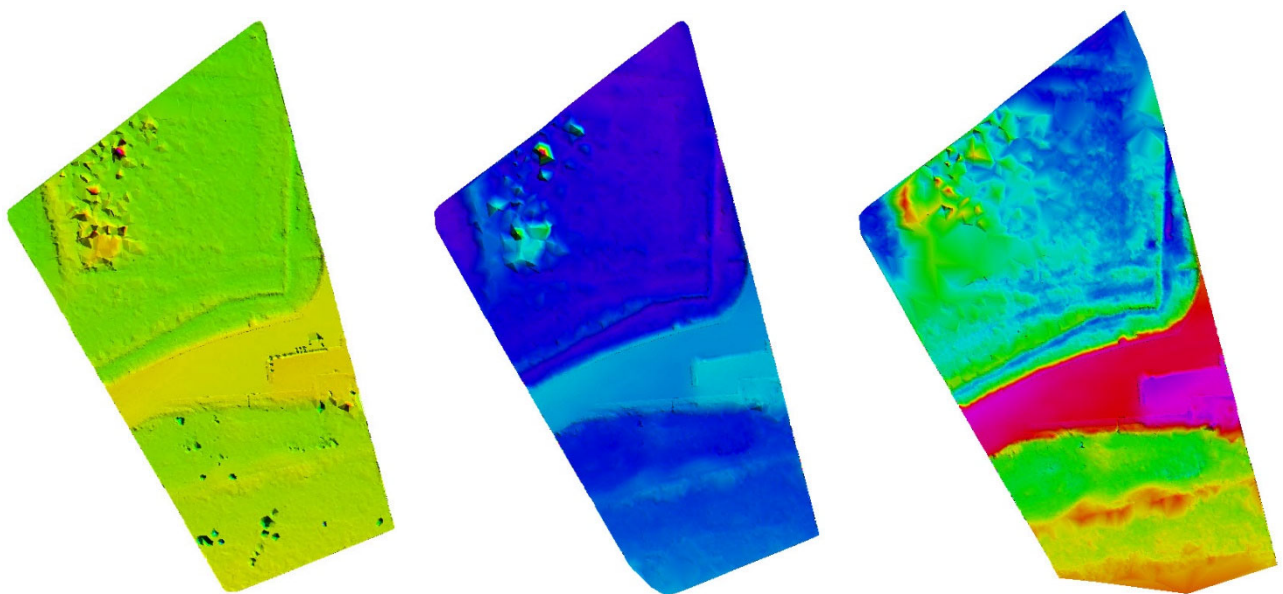
*a)**б)**в)*

Рисунок 4.9 – ЦМР после этапов фильтрации: *a)* после удаления ТЛО по интенсивности и номеру отражения; *б)* после фильтрации по алгоритмам поиска нижних точек и расположенных ниже поверхности; *в)* после фильтрации по алгоритму поиска воздушных точек

Применение алгоритма фильтрации позволило повысить точность автоматического построения ЦМР. Значение средней ошибки автоматически построенной ЦМР стало удовлетворять требованиям инструкции по топографической съемке, выполняемой с высотой сечения рельефа 0,25 см. Максимальные значения ошибок возникли на границах исследуемого участка местности, занимаемого лесными массивами. Количество точек со значениями ошибок, превышающими точность выполнения топографической съемки с высотой сечения рельефа 0,25 см, составило 1,2 %. Наличие большого числа контрольных точек с такими значениями ошибок можно связать с сильным снижением плотности данных МЛС при удалении от траектории съемки и наличием высокой растительности в виде лесных массивов на границах полосы съемки. Методы фильтрации при такой ситуации частично удаляют точки, принадлежащие физической поверхности земли.

При снижении полосы съемки до 100 м от центра автомобильной дороги максимальные значения ошибок начинают удовлетворять требованиям инструкции по топографической съемке (см. таблицу 4.1). Уменьшенная полоса содержит в основном кустарниковую и травянистую растительность, охватывая только небольшую зону лесного массива – около 20 м² в северной части.

Таким образом, в пределах сокращенной полосы съемки разработанный алгоритм фильтрации позволил автоматически распознать и удалить все ложные точки, появившиеся из-за переотражений от водных поверхностей, сохранив при этом ТЛО реальных объектов. При первоначальной полосе съемки в 200 м алгоритм позволяет уменьшить объем камеральных работ, связанных с интерактивным распознаванием ложных точек.

В результате тестирования алгоритма по другим данным было выявлено, что при снижении частоты зондирующих импульсов и частоты сканирования при съемке территорий, содержащих большое количество растительности, необходимо снизить скорость движения транспортного средства, на котором установлена система МЛС, чтобы плотность массива точек осталась такой же, как на исследуемой территории. При сканировании территорий без большого количества растительно-

сти с меньшей частотой алгоритм автоматически распознает ложные точки в пределах значений допусков инструкции и при полосе 200 м.

Разработанный алгоритм фильтрации данных МЛС позволяет значительно сократить время предварительной обработки. Используя методы фильтрации, можно достичь высокой точности создания ЦМР с минимальным применением инструментов интерактивного распознавания ТЛО. Алгоритм был разработан для территорий, покрытых большим количеством растительности, когда плотность массива ТЛО по уровню физической поверхности земли существенно падает, а также протестирован для других по характеру застройки территорий. Особенностью алгоритма является использование методов фильтрации совместно с информацией о номере отражения каждой точки и значений интенсивности.

4.3 Исследование алгоритма автоматизированного взаимного ориентирования данных мобильного лазерного сканирования

Сначала все данные МЛС автомобильной дороги Талакан – Витим автоматически обрабатывались в ПО системы МЛС Riegl VMX-250: POSPac MMS и Riprocess. По причине того, что запись измерений базовых станций выполнялась на каждом участке отдельно, в POSPac уравнивание координат точек траекторий каждого участка дороги было выполнено независимо. Уравненные траектории и сырые данные лазерных сканеров импортировались в ПО Riprocess, где производился расчет координат точек массива. Далее осуществлялось автоматическое взаимное ориентирование массивов ТЛО в межмаршрутных перекрытиях отдельно для каждого участка съемки.

Массивы ТЛО, полученные с помощью метода МЛС, представляются в виде набора сканерных линий, каждая из которых имеет собственные элементы внешнего ориентирования. Метод уравнивания, заложенный в ПО Riprocess, позволяет путем анализа ТЛО межмаршрутных перекрытий вычислить поправки в линейные и угловые элементы внешнего ориентирования каждой сканерной линии. Точность

вычисления линейных элементов зависит от исходного качества данных и количества вертикальных плоскостей объектов вдоль траектории съемки.

С целью оценки совместной точности взаимного ориентирования данных МЛС всех участков при больших значениях ошибок и осуществления дополнительного уравнивания все массивы ТЛО и траектории загружались в ПО TerraSolid, в котором проводилась совместная обработка данных с учетом зон перекрытия между участками.

После выполнения начальных этапов обработки данных МЛС в ПО TerraSolid по методам, описанным в [76], была осуществлена фильтрация ложных точек, находящихся в воздухе или ниже поверхности земли. Затем по алгоритму, описанному в разделе 3.4, было выполнено автоматизированное взаимное ориентирование данных.

На рисунке 4.10 с видом сверху показан фрагмент результата поиска соответственных линий длиной 2 м, вписанных в горизонтальные поверхности массивов ТЛО. Соответственные линии описывают взаимное положение межмаршрутных массивов ТЛО по высоте. Область поиска соответственных линий заштрихована и заключена между траекториями движения противоположных маршрутов.

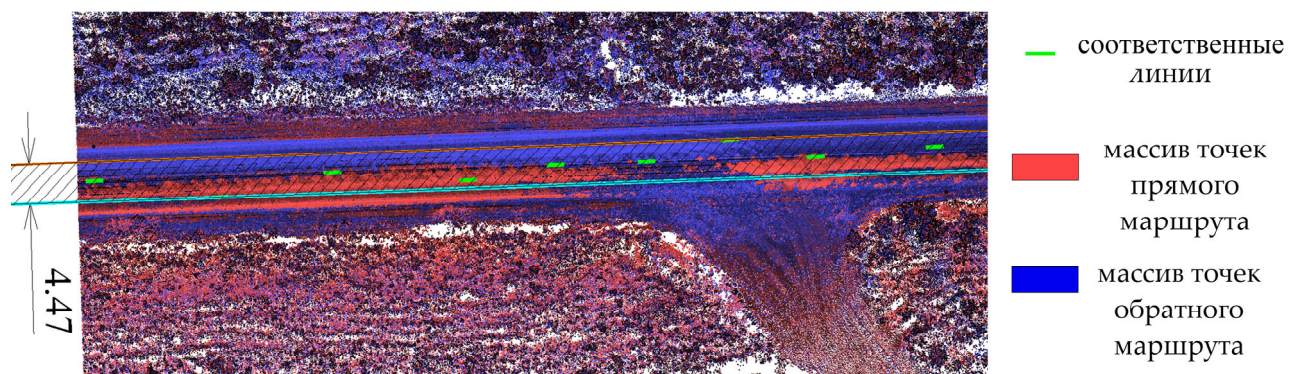


Рисунок 4.10 – Пример результата поиска соответственных линий

На рисунке 4.11 приведен пример результата поиска соответственных точек на одном из участков автомобильной дороги, а на рисунке 4.12 – поперечное сечение рассматриваемого участка. Для территории дороги Талакан – Витим внешняя граница поиска была смещена от траекторий движения на 10 м. Причиной этого

послужило большое количество растительности и присутствие дорожных знаков в отведенной зоне. В случае, если в пределах 40 м от дороги проходила ЛЭП, внешняя граница смещалась за нее. Было выявлено, что при сканировании системой Riegl VMX-250 с выбранными ранее параметрами съемки плотность получаемых данных МЛС на расстоянии, большем чем 40 м от траектории, оказывается недостаточной, чтобы выполнить идентификацию соответственных точек в зонах межмаршрутных перекрытий. В случае понижения средней скорости движения расстояние поиска можно увеличить.

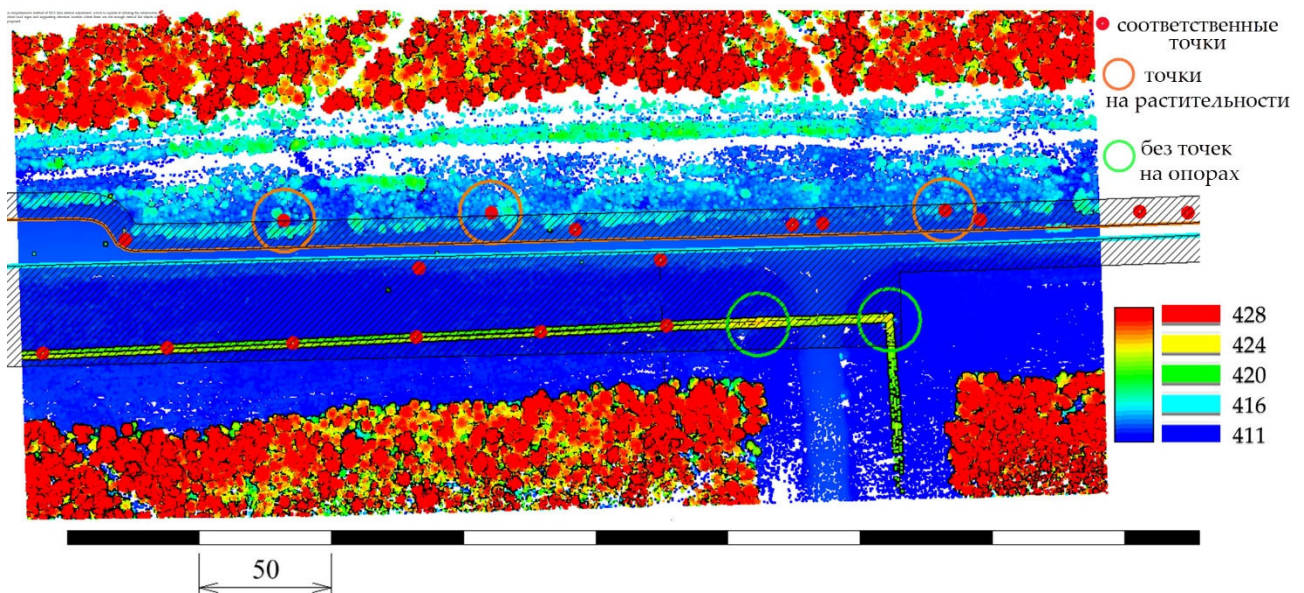


Рисунок 4.11 – Пример данных МЛС и результаты поиска соответственных точек

Соответственные точки, идентифицированные на опорных сооружениях и объектах дорожной инфраструктуры с помощью предложенного алгоритма, в большинстве случаев правильно демонстрируют ошибки взаимного ориентирования массивов ТЛЮ. Те соответственные точки, которые идентифицированы на растительности, правильно показывают ошибки только частично. На рисунке 4.11 отмечены три соответственные точки на кустарниковой растительности. Одна из трех точек идентифицирована неверно. В свою очередь, на двух

опорах ЛЭП не было найдено соответственных точек. Причиной этому мог послужить их большой наклон.

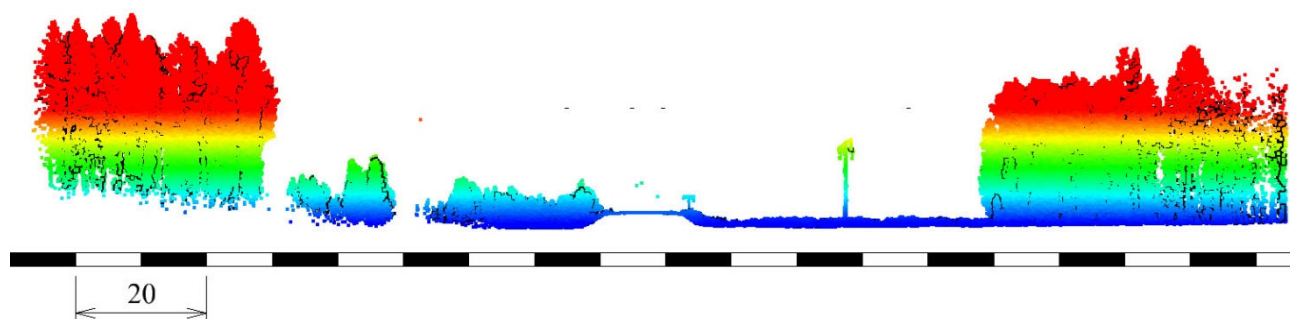


Рисунок 4.12 – Поперечное сечение фрагмента данных МЛС

В таблице 4.2 показаны ошибки высотного ориентирования маршрутов для всей территории автомобильной дороги, рассчитанные на основании разницы положения соответственных линий и точек.

Таблица 4.2 – Оценка точности данных МЛС до взаимного ориентирования

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X , м	Y , м	Z , м
Средняя ошибка	0,038	0,049	0,023
Средняя квадратическая ошибка	0,046	0,056	0,048
Максимальная ошибка	0,068	0,084	0,297

В таблице 4.3 показаны результаты оценки точности взаимного ориентирования данных МЛС после применения поправок в плане и по высоте.

Таблица 4.3 – Оценка точности взаимного ориентирования данных МЛС

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X , м	Y , м	Z , м
Средняя ошибка	0,009	0,005	0,003
Средняя квадратическая ошибка	0,013	0,008	0,010
Максимальная ошибка	0,033	0,025	0,046

На рисунке 4.13 приведен пример результата поиска соответственных точек и линий по ТЛО, соответствующих дорожному знаку. Ошибка взаимного ориентирования массивов ТЛО по соответственным точкам составила 0,075 м, а по соответственным линиям – 0,035 м. При использовании информации только о соответственных линиях ошибка взаимного ориентирования не была бы исключена полностью, так как соответственные линии выявляют дублирование данных только в одной плоскости. Также, соответственные линии не идентифицируются на дорожных знаках с небольшими плоскими участками, такими как пикетажные столбы, и на опорах.

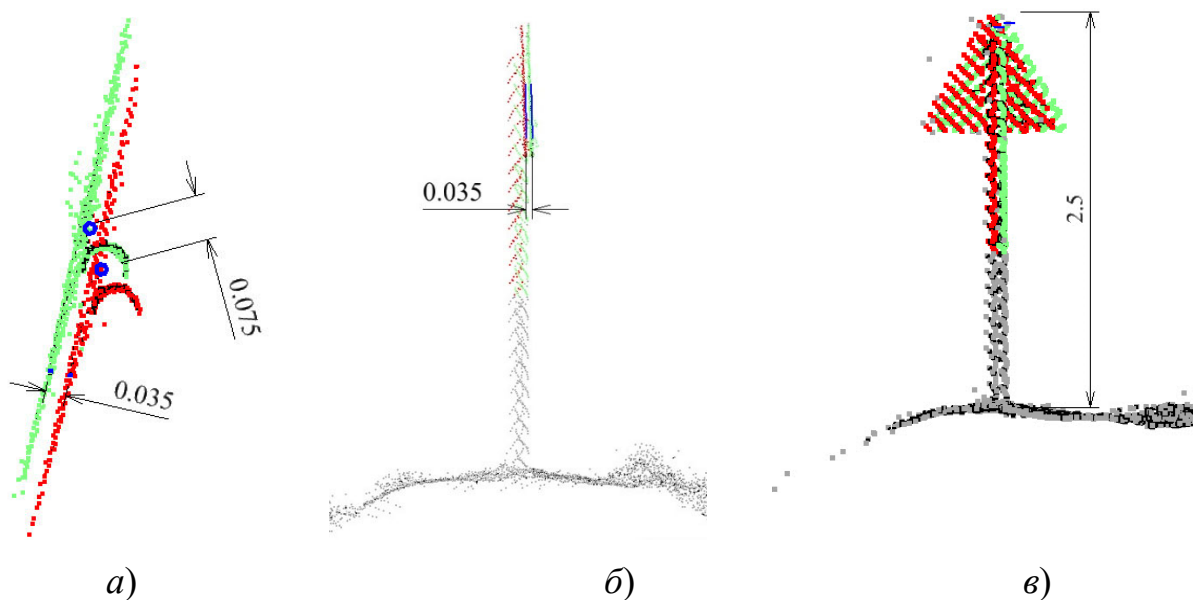


Рисунок 4.13 – Дорожный знак до взаимного ориентирования:

а) вид сверху; б) вид сбоку; в) вид сбоку 2

На рисунке 4.14 отображен пример результата уравнивания координат точек массива данных, дублирование которых было устранено, а позиция соответственных точек и линий оставлена без изменений.

На рисунке 4.15 отображен результат поиска соответственных точек на участке дороги, где присутствует только небольшое количество объектов дорожной инфраструктуры. Размеры области поиска ограничены расстоянием 10 м в стороны от траекторий. Рассматриваемый участок включает большое количество травянистой

и кустарниковой растительности. Древесная растительность находится вне границ анализируемой области. В пределах участка присутствует только два дорожных знака. Разработанный алгоритм идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах позволил обнаружить оба знака, но также одна соответственная точка была идентифицирована на вершине кустарника. Вследствие того, что расстояния между соответственными точками значительно превышают 100 м, необходимо удалять неверно идентифицированные точки.

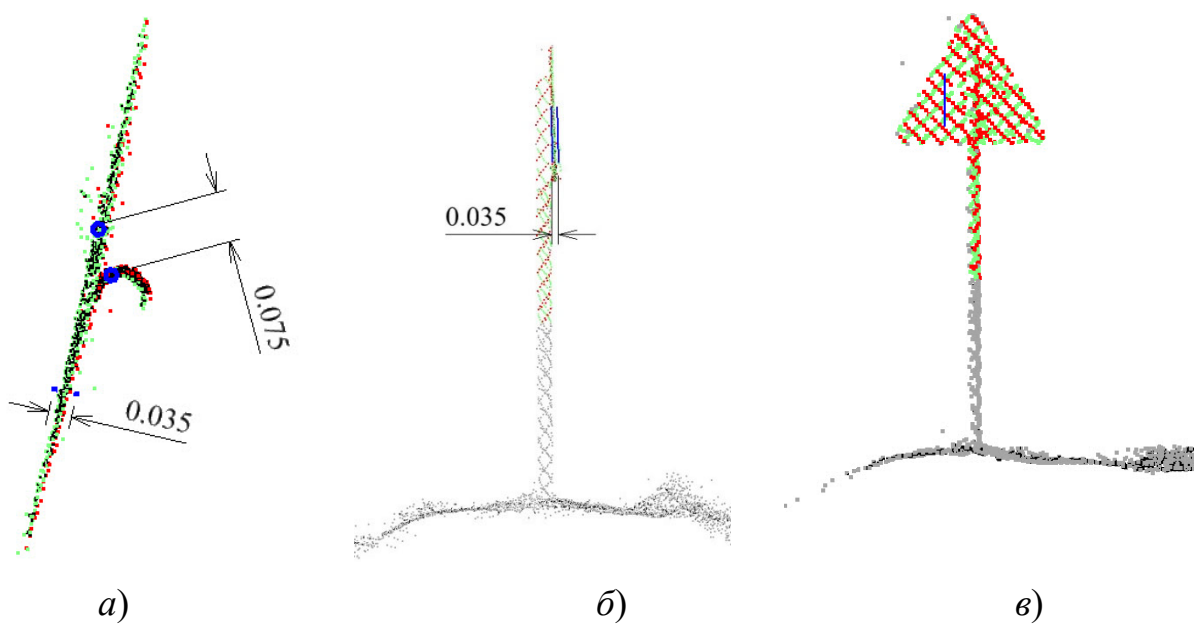


Рисунок 4.14 – Дорожный знак после уравнивания:

а) вид сверху; б) вид сбоку; в) вид сбоку 2

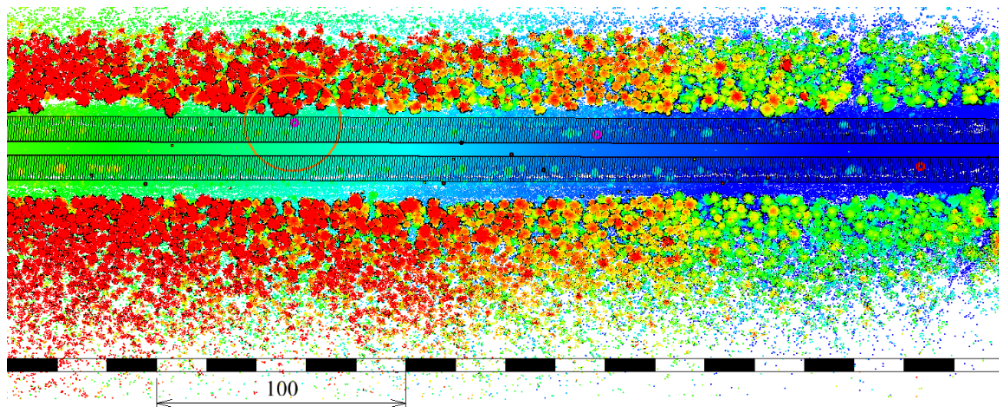


Рисунок 4.15 – Второй пример данных МЛС и результат поиска соответственных точек

Чтобы обосновать выбор наиболее оптимального значения переменной x фильтра Гаусса была исследована степень влияния значения переменной на точность взаимного ориентирования. На рисунке 4.16 показан третий пример результата поиска соответственных точек. Точки были идентифицированы на дорожных знаках, всех вертикально расположенных опорах ЛЭП и на кустарниках между ЛЭП и дорогой. На кустарниках многие соответственные точки идентифицированы с низкой точностью. Древесная растительность находится более чем на 60 м в сторону от дороги, а кустарниковая и травянистая – вблизи с ней. Рядом с автомобильной дорогой проходит ЛЭП – на расстоянии 40 м от нее.

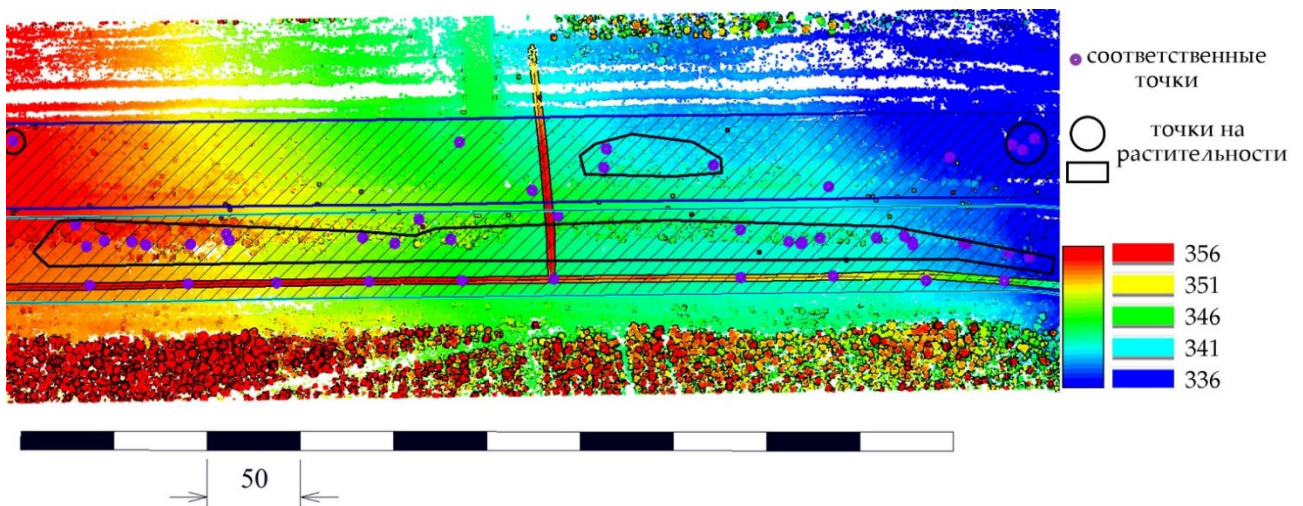


Рисунок 4.16 – Третий пример данных МЛС с результатами поиска соответственных точек

На рисунке 4.17 показано, как ошибка взаимного ориентирования массивов ТЛО в плане на одном из дорожных знаков участка, приведенного на рисунке 4.16, после уравнивания зависит от значений переменной x . Расстояние между соответственными точками, идентифицированными на этом дорожном знаке, и точками, найденными ошибочно на кустарнике, составило 18 м. В связи с тем, что локальные поправки вычисляются не для каждой ТЛО отдельно, а индивидуально для всех ТЛО, соответствующих одной сканерной линии, необходимо принимать во внимание расстояние в продольном направлении по ходу лазерного сканирования. Данное расстояние на рассматриваемом участке составило 14 м.

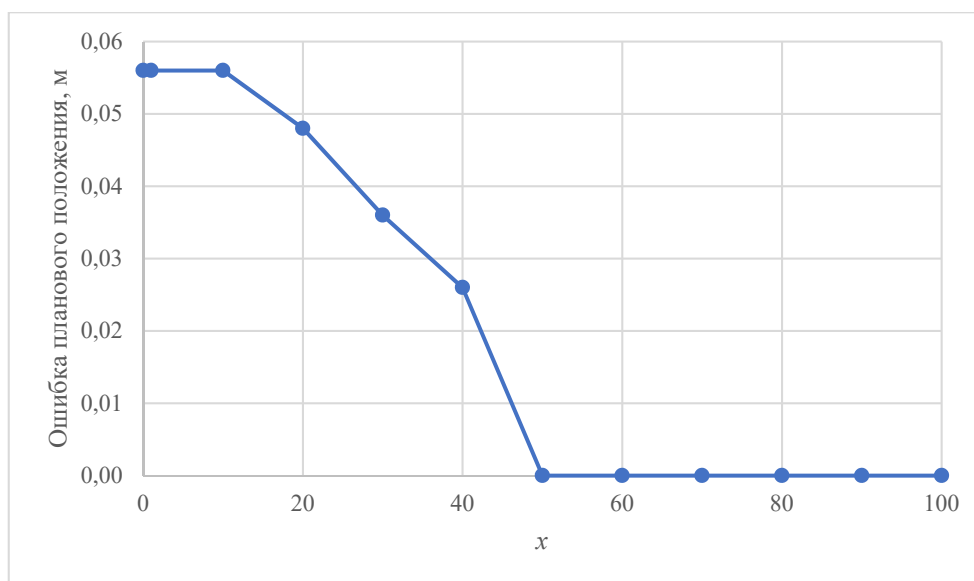


Рисунок 4.17 – Пример зависимости ошибки взаимного ориентирования в плане на дорожном знаке от значения переменной x

Из рисунка 4.17 видно, что при значениях $x > 50$ м двоение массивов ТЛО на дорожном знаке полностью устраняется. Пример такого двоения в месте, где находится дорожный знак, показан на рисунке 4.18, а на рисунке 4.19 отображено положение массива ТЛО после взаимного ориентирования.

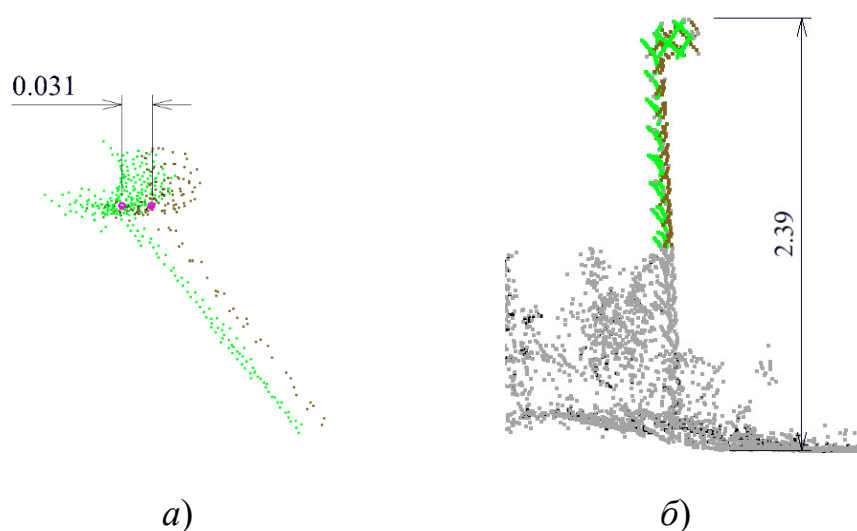


Рисунок 4.18 – Дорожный знак до взаимного ориентирования:

а) вид сверху; б) вид сбоку

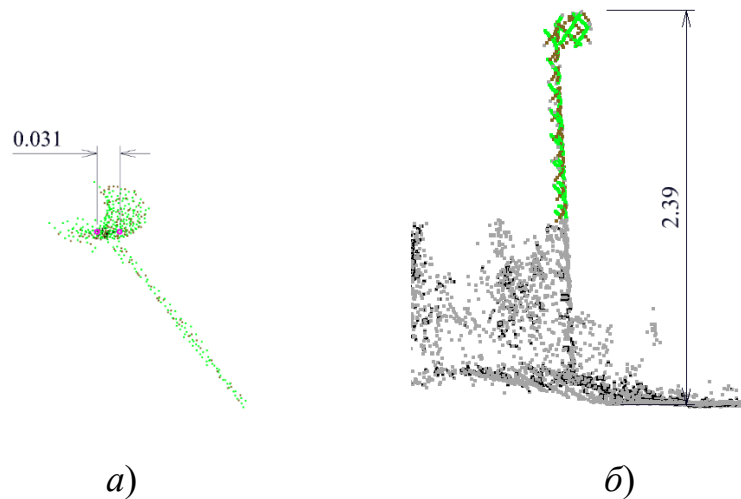


Рисунок 4.19 – Дорожный знак после взаимного ориентирования:

а) вид сверху; *б)* вид сбоку

На рисунке 4.20 показан пример зависимости ошибки взаимного ориентирования массивов ТЛО от значения переменной x в месте расположения другого дорожного знака. Расстояние между соответственными точками этого дорожного знака и ближайшими неверно идентифицированными соответственными точками кустарников составило 51 м, а расстояние в продольном направлении – 3 м. Двоение массивов ТЛО в этом месте полностью устраняется при значениях $x > 60$ м.

По результатам анализа некоторых других участков территории, где рядом с автомобильной дорогой присутствовали линейно-протяженные объекты с опорами, такие как наземные трубопроводы и ЛЭП, а также ряд других промышленных сооружений, было выявлено, что значение переменной x , равное 100, является наиболее оптимальным. В этом случае неверно идентифицируемые соответственные точки практически не снижают точность взаимного ориентирования [13].

Рассмотрим теперь ситуацию, когда территория вокруг автомобильной дороги покрыта растительностью и присутствует только небольшое число дорожных знаков. На рисунке 4.21 отображен результат автоматического поиска соответственных точек на одном из таких участков. На этом участке всего было добавлено 7 точек, из которых 4 – на дорожных знаках, а 3 – на кустарниковой растительности.

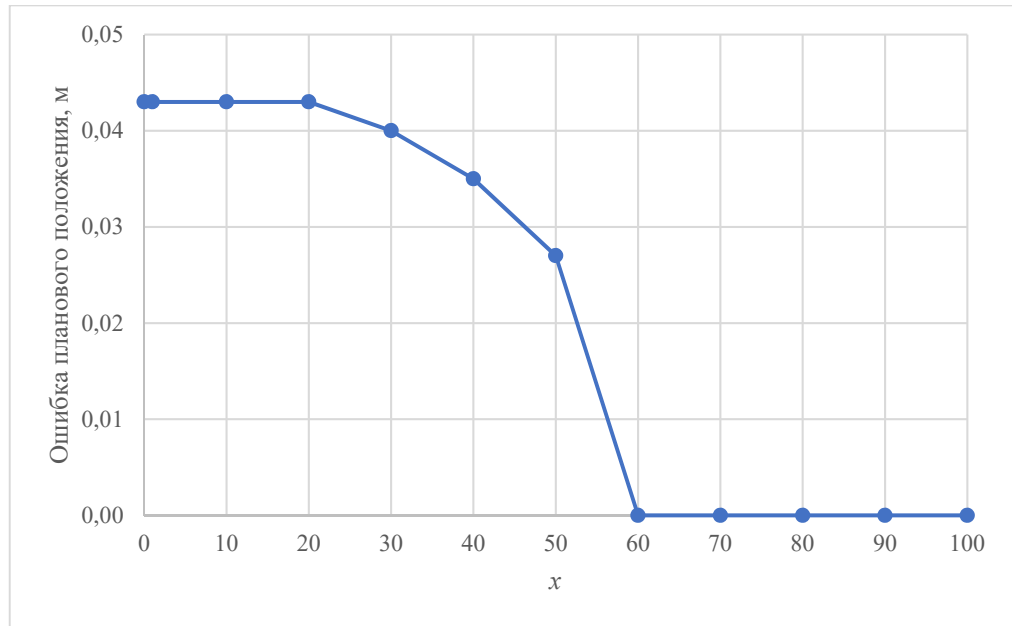


Рисунок 4.20 – Второй пример зависимости ошибки взаимного ориентирования в плане на дорожном знаке от значения переменной x

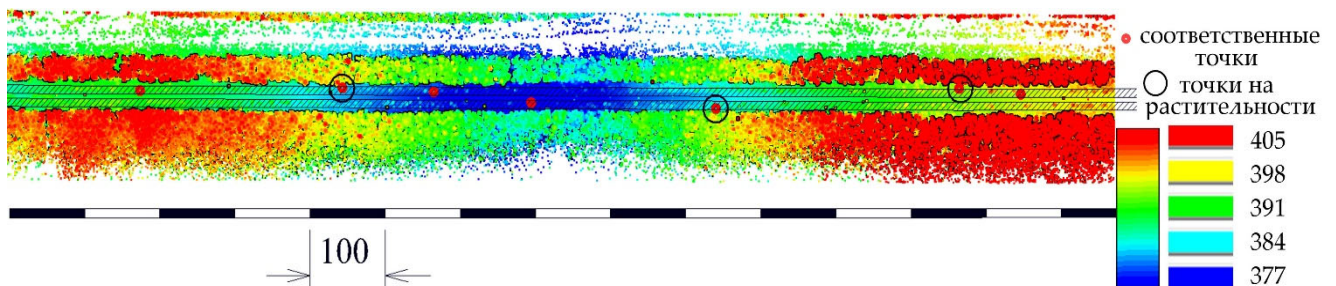


Рисунок 4.21 – Четвертый пример результата поиска соответственных точек

На рисунке 4.22 отображена увеличенная справа часть этого фрагмента, где зеленой окружностью обведены верно идентифицируемые на дорожном знаке соответственные точки. Соответственные точки на кустарниках этого участка идентифицированы с большой ошибкой в плане – 0,150 м. Реальная ошибка в этом месте, вычисленная на основе двоения массива ТЛЮ на дорожном знаке, составляет 0,017 м.

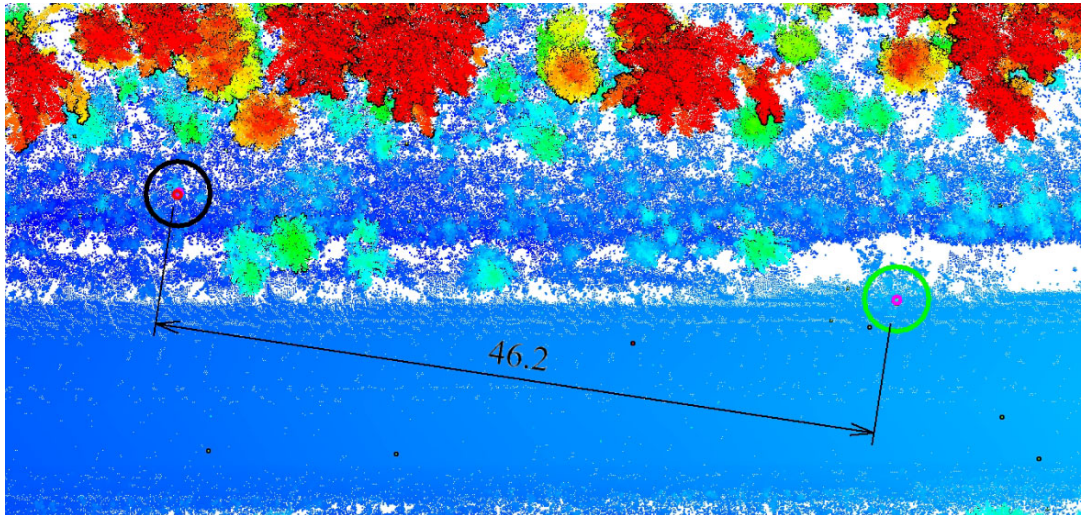


Рисунок 4.22 – Взаимное положение правильно и ошибочно идентифицированных соответственных точек

На рисунке 4.23 показана зависимость ошибки взаимного положения массива ТЛО в плане после уравнивания на рассматриваемом дорожном знаке от значения переменной x , применяемого при поиске локальных поправок. Результат построения графика оказался противоположен предыдущей ситуации. Двоение массивов ТЛО этого дорожного знака устраняется при значениях $x < 40$ м. Вследствие небольшого количества соответственных точек значение ошибки на показанной точке кустарника перестает оказывать влияние на правильно идентифицируемые соответственные точки, если значение расстояния между соответственными точками оказывается больше значения переменной x .

Проанализировав показанные на рисунке 4.23 результаты, можно сделать вывод, что без применения сглаживающего фильтра или с минимальным значением сглаживания можно достичь минимальных двоений на небольших вертикальных объектах при невысокой плотности соответственных точек. Но тогда рядом со всеми ошибочно идентифицированными точками будут наибольшие ошибки, которые, например, могут быть выражены в виде двоений границ асфальтового покрытия – то есть там, где соответственные точки не могут быть добавлены автоматически. То есть массив ТЛО после взаимного ориентирования может быть искажен в наибольшей степени. Устранить такие искажения в процессе взаимного

ориентирования помогает сглаживающий одномерный фильтр Гаусса со значением $x = 100$ м.

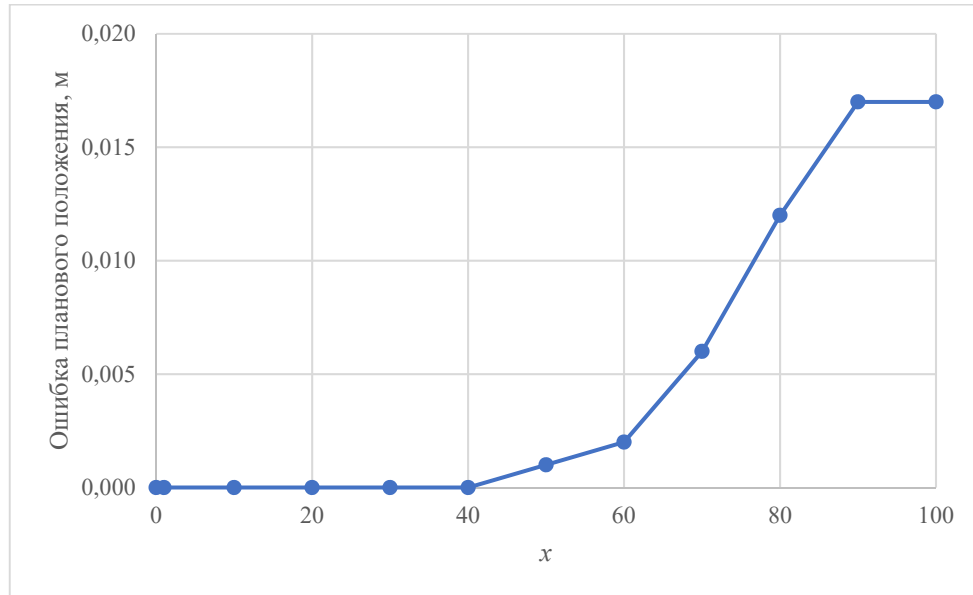


Рисунок 4.23 – Третий пример зависимости ошибки взаимного ориентирования в плане на дорожном знаке от значения переменной x

Таким образом, идентифицированные на растительности соответственные точки следует удалять интерактивно только при таких ситуациях, когда полоса их поиска ограничена расстоянием 10 м в сторону от траектории МЛС. Это небольшое значение полосы необходимо выбирать по причине отсутствия других небольших вертикальных объектов, кроме дорожных знаков, на расстоянии от дороги, превышающем 10 м. В случае наличия других линейно-протяженных объектов на расстоянии, не превышающем 45 м, полосу поиска соответственных точек необходимо увеличивать, и ошибочно идентифицированные точки на растительности не удаляются.

Разработанный алгоритм взаимного ориентирования данных МЛС может быть применен для различных по характеру застройки территорий. В результате обработки данных МЛС городских территорий идентифицируется большое количество соответственных линий, а для идентификации соответственных точек

в случае движения системы МЛС по правым крайним полосам дорог расстояния поиска в 10 м достаточно, чтобы в получившуюся зону попало большинство дорожных знаков.

В разделе 2.4 было отмечено, что ПО Riprocess позволяет полностью автоматически осуществить взаимное ориентирование данных МЛС на территориях с большим количеством плоских вертикальных объектов. Из-за этого импорт данных МЛС городских улиц в дополнительное ПО для дальнейшего уравнивания нецелесообразен в большинстве ситуаций. Иначе применение разработанного алгоритма взаимного ориентирования массивов ТЛО в межмаршрутных перекрытиях существенно увеличивает время предварительной обработки. На рисунке 4.24, *а* приведен пример данных МЛС части городской улицы с выделенной черным цветом зоной поиска соответственных точек, а на рисунке 4.24, *б* – поперечное сечение угла здания. Зеленым и красным цветом отображены массивы ТЛО противоположных маршрутов МЛС после взаимного ориентирования в ПО Riprocess. Максимальная ошибка взаимного ориентирования в плане не превысила 0,01 м.

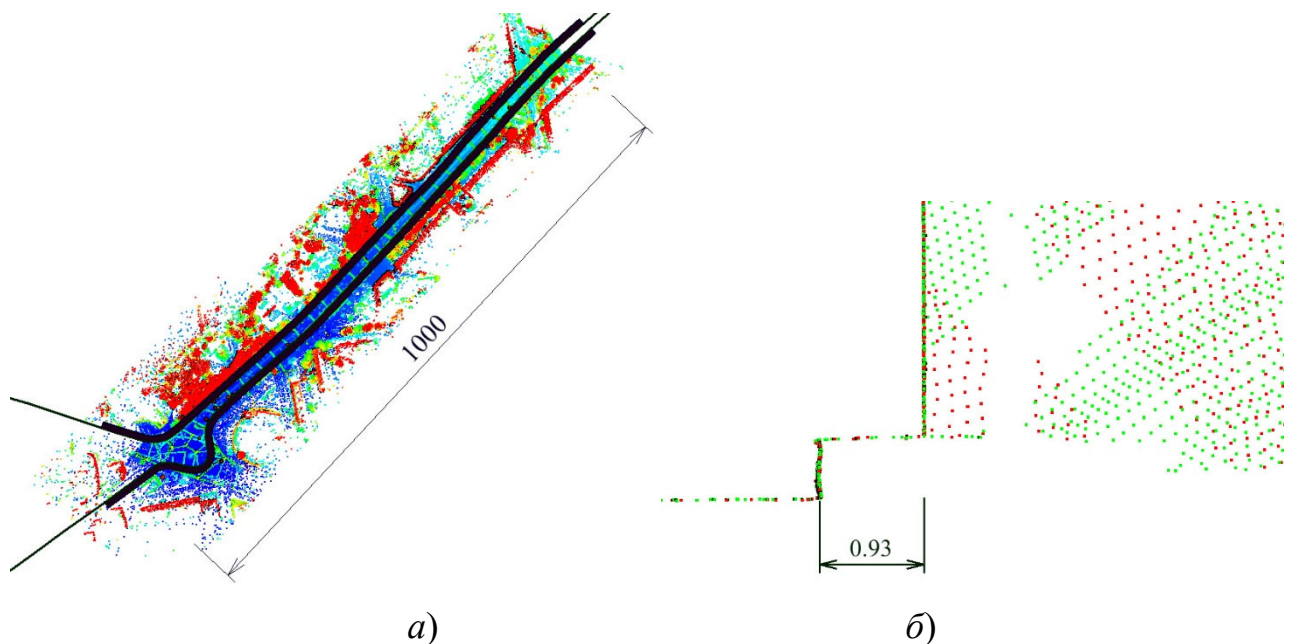


Рисунок 4.24 – Участок улицы: *а*) вид сверху с зоной поиска соответственных точек; *б*) поперечное сечение стены здания

Таким образом, разработанный алгоритм взаимного ориентирования данных МЛС рекомендуется использовать для незастроенных территорий, где количество вертикальных плоскостей минимально. В случае необходимости оперативного осуществления сканирования территорий с различным характером застройки, меняющегося в течение съемочного дня, следует останавливаться и перезапускать сбор всех данных, то есть выполнять разделение траектории на участки при смене характера застройки вдоль полосы съемки.

Разделение траектории МЛС на участки не всегда целесообразно, когда при движении по загородным территориям выполняется краткосрочный въезд в город или другие застроенные территории. В этом случае разработанный алгоритм актуален для обработки всего массива данных. Большое количество вертикальных плоскостей, присутствующих на застроенной территории, позволяет сохранить высокую точность автоматического взаимного ориентирования, осуществленного в ПО Riprocess.

Одной из особенностей поиска соответственных точек в ПО TerraSolid является то, что для получения достоверных результатов взаимного ориентирования небольшие вертикальные объекты должны быть одинаково отсканированы при съемке в противоположных направлениях, то есть только с одной стороны. Так всегда получается, когда объекты находятся за внешними границами дороги. Но если объекты присутствуют в зоне разделения движения противоположных направлений, то при повторном сканировании в обратном направлении ТЛО таких объектов будут получены с разных сторон. На рисунке 4.25 приведен пример неверно идентифицированных соответственных точек на столбе, имеющем диаметр 0,10 м и присутствующем в зоне разделения противоположных полос движения.

Фактическая ошибка взаимного ориентирования массивов ТЛО в таком месте не превышает 0,01 м, хотя по автоматически идентифицированным соответственным точкам она составляет 0,076 м. Из-за этого в разработанном алгоритме не учитывается центральная зона дорог, разделяющая противоположные потоки движения.

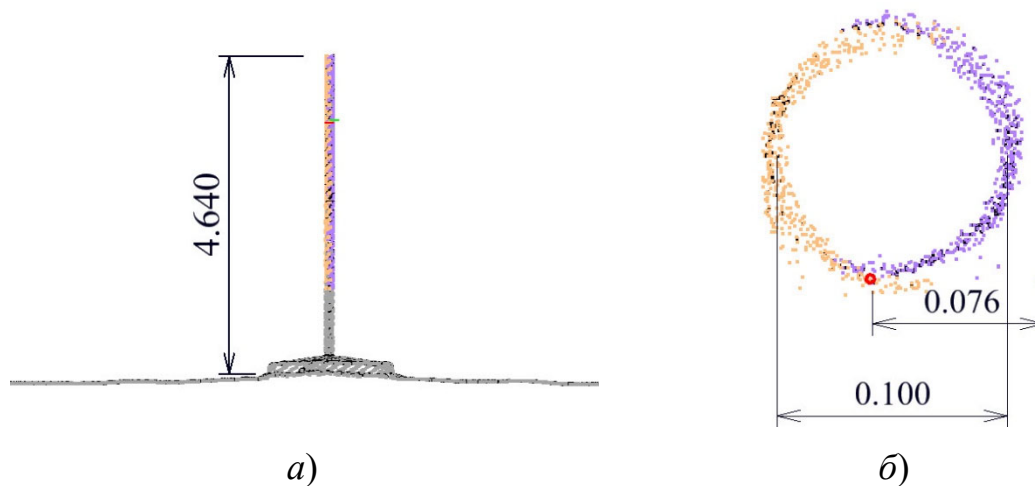


Рисунок 4.25 – Пример ошибочного результата идентификации соответственных точек на столбе: а) поперечное сечение; б) вид сверху

Разработанный алгоритм взаимного ориентирования данных МЛС позволяет значительно ускорить их предварительную обработку. Алгоритм учитывает характер застройки территории съемки и различные внешние условия. Предложенный алгоритм взаимного ориентирования позволяет практически полностью автоматизировать процесс поиска локальных поправок в линейные элементы взаимного ориентирования сканерных линий массива ТЛО в межмаршрутных перекрытиях путем осуществления фильтрации большинства ТЛО от растительности, которая влияет на точность идентификации соответственных точек на небольших вертикальных объектах местности. Значения параметров методов, применяемых в рамках алгоритма взаимного ориентирования, подходят для всех массивов ТЛО, плотность которых не ниже той, которую имели исследуемые данные.

4.4 Исследование точности внешнего ориентирования данных мобильного лазерного сканирования для незастроенных территорий

После взаимного ориентирования данных МЛС часто требуется выполнить их преобразование в местную систему координат. Зная координаты пунктов, на которых размещались базовые станции, в системе координат WGS-84 и в требуемой

выполняется расчет параметров преобразования, которые применяются для пересчета координат траекторий и массивов ТЛО. Преобразование данных МЛС выполнялось для дороги Талакан – Витим по координатам шести базовых станций. Оценка точности преобразования представлена в таблице 4.4. Для участка улицы проспект Дзержинского преобразование координат не выполнялось, данные были представлены в исходной системе – WGS-84 [45].

Таблица 4.4 – Оценка точности преобразования координат данных МЛС дороги Талакан – Витим в местную систему

Вид ошибки	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,001	0,001	0,030
Средняя квадратическая ошибка	0,001	0,001	0,034
Максимальная ошибка	0,001	0,001	0,06

Чтобы оценить точность внешнего ориентирования данных МЛС, вдоль автомобильной дороги каждый километр измерялись координаты опорных точек с помощью спутниковых приемников. Положения опорных точек на отмечались на местности. Они располагались на границе асфальтового покрытия напротив километровых столбов. Это позволило сократить время полевых работ, но снизило точность распознавания мест размещения опорных точек по массиву ТЛО. Используя данный способ, невозможно достоверно оценить внешнюю точность массива ТЛО в плане. Учитывая, что расстояние от границы асфальтового покрытия до километрового столба всегда было невелико, не превышало 2–3 м, точность распознавания опорных точек можно оценить на уровне первых значений сантиметров. Также этот способ размещения опорных точек было решено применять по причине первоначально высокой точности положения массива ТЛО в плане на открытых участках местности для системы Rigel VMX-250, небольшим удалением в процессе лазерного сканирования от базовой станции и главной его цели – создание топографического плана масштаба 1 : 500 с высотой сечения рельефа 0,25 м. Точность высотного положения массива ТЛО исследуемой системы МЛС в среднем ниже. Но в отличие от точности в плане, по высоте она может быть достоверно оценена.

На рисунке 4.26 показан пример размещения опорной точки, где красным цветом показан условный знак километрового столба, бирюзовыми параллельными линиями – граница асфальтового покрытия дороги, а желтой окружностью – расположение опорной точки.

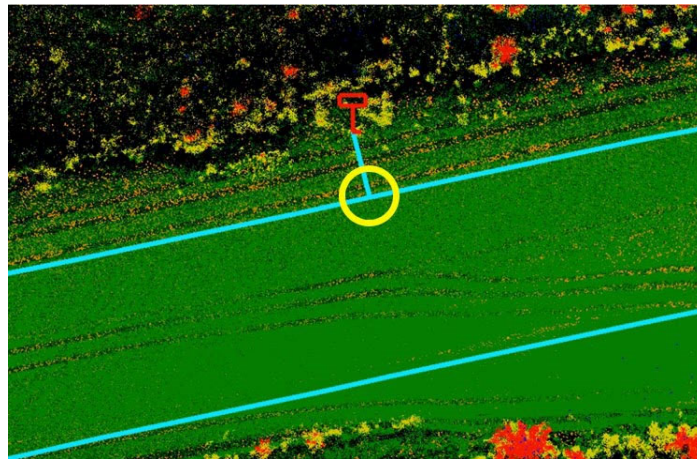


Рисунок 4.26 – Пример размещения опорной точки

В таблице 4.5 приведены результаты оценки внешней точности массива ТЛО по измеренным спутниковым приемником наземным точкам. Все точки были приняты в качестве контрольных. Полученная точность подходит для создания топографических планов масштаба 1 : 500 и мельче с высотой сечения рельефа 0,5 м [76]. При анализе результатов распределения ошибок было определено, что точность снижается при удалении от базовых станций. Наибольшие значения ошибок наблюдаются в зонах максимального удаления. Распределение ошибок показано на рисунке 4.27. Максимальное значение ошибки наблюдается по контрольной точке, размещенной в центре траектории между базовыми станциями, размещенными на пунктах ПВО В2 и В3. Длина этой базовой линии составляет 29 км. Эта контрольная точка расположена на удалении 14,5 км от пункта В2 и 13,4 км от пункта В3. При создании топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м значение максимальной ошибки по высотному положению не соответствует допуску в 16,6 см. Можно предположить, что размещения одной опорной точки на участке траектории МЛС по середине между пунктами В2 и В3 будет достаточно,

чтобы данные МЛС удовлетворяли допуску при высоте сечения рельефа 0,25 м. Длины остальных базовых линий меньше: 23,5 км для НГДУ-ДНС; 26,7 км для НГДУ-В1; 20,5 км для В1-D20; 20,5 для D20-В2.

Таблица 4.5 – Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам, размещенным через 1 км, и без опорных точек

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,020	0,018	0,041
Средняя квадратическая ошибка	0,031	0,026	0,056
Максимальная ошибка	0,170	0,228	0,218

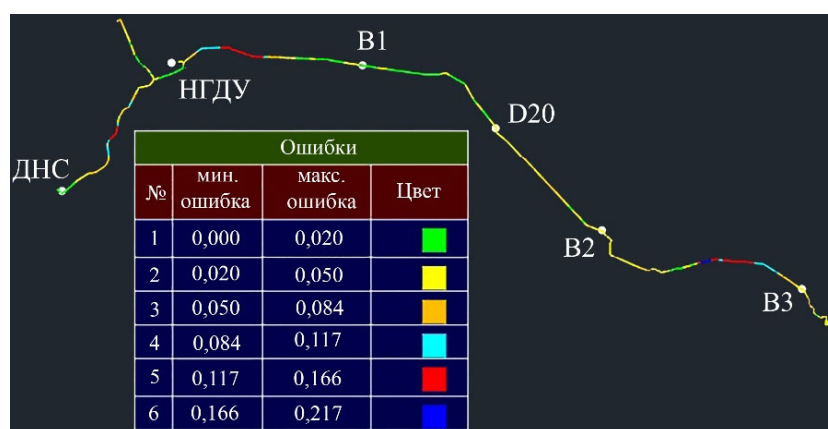


Рисунок 4.27 – Распределение ошибок внешнего ориентирования данных МЛС по контрольным точкам, размещенным через 1 км, и без опорных точек

Чтобы точнее рассчитать количество необходимых опорных точек и расстояние между ними для создания топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м, было выполнено исследование, при котором в ходе уравнивания комбинировалось количество опорных и контрольных точек. В случае применения всех измеренных с помощью спутниковых приемников наземных точек в качестве опорных, ошибки уравнивания, показанные в таблице 4.5, равны нулю. Это связано с тем, что расстояние между опорными точками достаточно большое, 1 км, и алгоритм уравнивания, заложенный в ПК TerraSolid, выполняет трансформирование

массива ТЛО по значениям разницы координат опорных точек и координатам их положения в массиве ТЛО.

Без применения опорных точек оценка точности внешнего ориентирования не может быть полной. Поэтому наземные точки, измеренные спутниковыми приемниками, были пополам поделены на опорные и контрольные. То есть каждые из них располагались через 2 км. Результаты оценки точности с таким количеством опорных и контрольных точек приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам, размещенным через 2 км, при внешнем ориентировании по опорным точкам, размещенным через 2 км

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,014	0,012	0,020
Средняя квадратическая ошибка	0,019	0,021	0,030
Максимальная ошибка	0,085	0,064	0,110

Максимальная ошибка высотного положения уменьшилась в 2 раза и вошла в допуск для высоты сечения рельефа 0,25 м. Рисунок 4.28 показывает распределение ошибок внешнего ориентирования данных МЛС по опорным точкам, размещенным через 2 км.

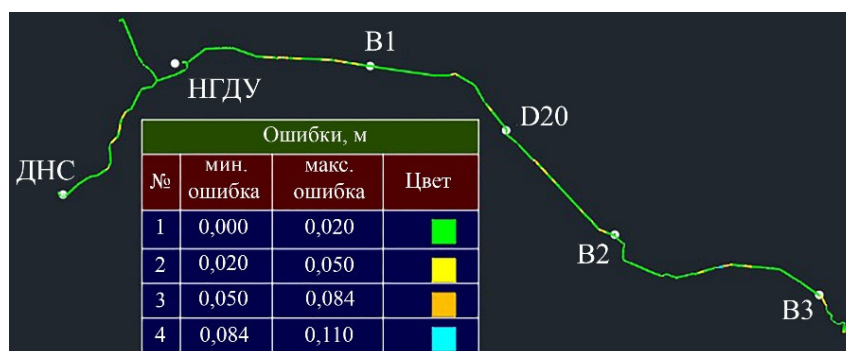


Рисунок 4.28 – Распределение ошибок данных МЛС по контрольным точкам при внешнем ориентировании по опорным точкам, размещенным через 2 км

Далее было решено каждые четвертые наземные точки по ходу траектории движения взять в качестве контрольных, а остальные – в качестве опорных. В таблице 4.7 приведена оценка точности внешнего ориентирования для этого случая. По сравнению с предыдущим результатом значения ошибок изменились незначительно. На рисунке 4.29 показано распределение ошибок.

Таблица 4.7 – Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам, размещенным через 4 км, при внешнем ориентировании по опорным точкам, размещенным через 1 км

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,014	0,013	0,020
Средняя квадратическая ошибка	0,020	0,022	0,032
Максимальная ошибка	0,123	0,098	0,117

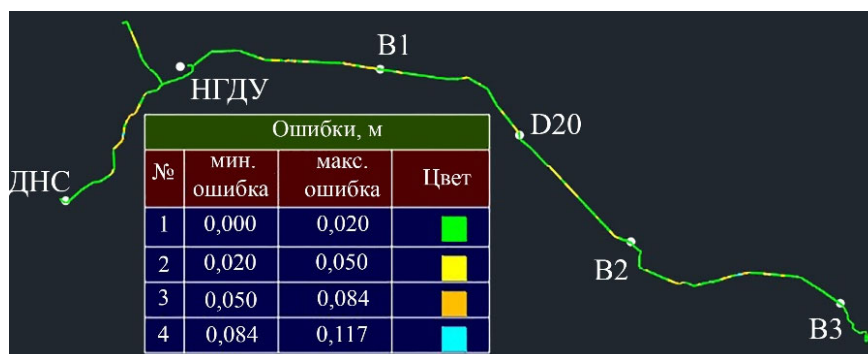


Рисунок 4.29 – Распределение ошибок данных МЛС по контрольным точкам при внешнем ориентировании по опорным точкам, размещенным через 4 км

В конце каждые восьмые наземные точки по ходу траектории движения были приняты в качестве контрольных, а остальные – в качестве опорных. В таблице 4.8 приведена оценка точности по контрольным точкам через 1 км при размещении опорных точек каждые 8 км. Значение максимальной ошибки немного превышает допуск для создания топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м [39].

Таблица 4.8 – Оценка точности внешнего ориентирования данных МЛС по контрольным точкам через 1 км при размещении опорных точек через 8 км

Вид ошибки	Соответственные точки и линии		
	X , м	Y , м	Z , м
Средняя ошибка	0,018	0,016	0,028
Средняя квадратическая ошибка	0,028	0,024	0,033
Максимальная ошибка	0,170	0,110	0,170

На рисунке 4.30 показано распределение ошибок по контрольным точкам для этой ситуации. Контрольная точка с максимальной ошибкой расположена в начале трассы около пункта ПВО В3. Точность внешнего ориентирования данных МЛС стала хуже на этом участке траектории.

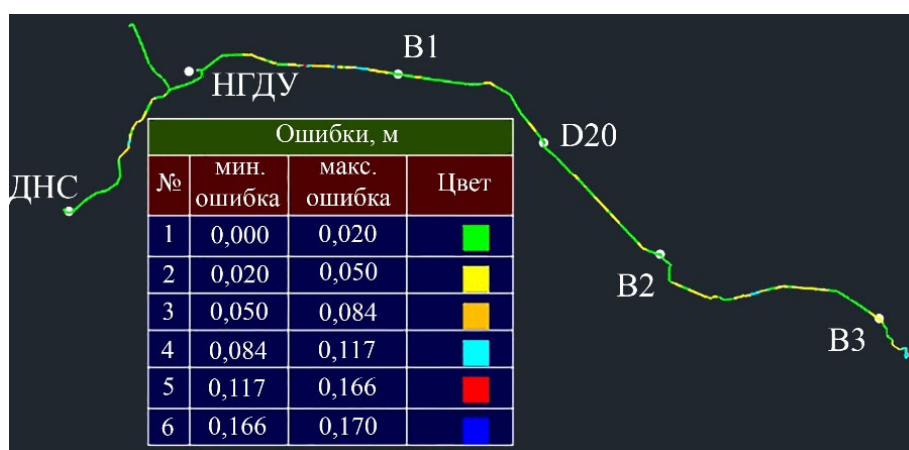


Рисунок 4.30 – Распределение ошибок данных МЛС по контрольным точкам при внешнем ориентировании по опорным точкам, размещенным через 8 км

На рисунке 4.31 показано сравнение участков траектории начала трассы, уравненных с применением опорных точек каждые 8 км и без них. Снижение точности внешнего ориентирования при размещении опорной точки можно объяснить тем, что эта точка располагается не в самом начале дороги, а лишь на расстоянии 4 км от него по прямой.



Рисунок 4.31 – Сравнение траектории, уравненной по размещенным каждые 8 км опорным точкам, с траекторией без уравнивания по опорным точкам

Чтобы избежать больших значений ошибок в начале и конце трассы, необходимо дополнительные опорные точки размещать по самым краям сканируемой территории. Для рассматриваемого участка сканирования это может быть опорная точка OT0_2км, используемая при внешнем ориентировании по опорным точкам через 2 км, вместо точки OT1_8км (рисунок 4.32).



Рисунок 4.32 – Выбор места размещения опорных точек

Дальнейшего исследования при увеличении расстояния между опорными точками выполнять не требуется, так как это расстояние ограничено допустимой максимальной дистанцией между базовыми станциями.

Применение меньшего количества опорных точек позволяет ускорить процесс полевой съемки. Для рассматриваемого примера, если расстояние между ближайшими базовыми станциями не превышает 26,7 км, как расстояние между пунктами НГДУ и В1, и при высоком качестве приема спутникового сигнала при съемке незастроенных территорий, применение опорных точек обязательно для создания топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м. В этом случае половина территории должна быть просканирована от одной базовой станции, а вторая – от соседней по ходу движения.

Таким образом, результаты внешнего ориентирования данных МЛС системы Riegl VMX-250 показали, что для задачи создания топографических планов масштаба 1 : 500 с высотой сечения рельефа 0,5 м на незастроенные территории при хорошем качестве приема спутникового сигнала применение опорных точек обязательно при удалении от базовой станции не более, чем на 15 км. Для топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м применение опорных точек для таких территорий обязательно при удалении от базовой станции не более, чем на 13 км. Иначе опорные точки следует располагать через 8 км при их обязательном размещении по краям сканируемой территории.

4.5 Сравнение шумовых составляющих данных разных систем мобильного лазерного сканирования

Отрицательное влияние на результаты уравнивания данных МЛС могут оказать различные шумовые составляющие сигнала. Уровень шума у различных систем МЛС может существенно отличаться.

Выполним сравнение результатов предварительной обработки данных двух систем МЛС: Riegl VMX-250 и Optech Lynx M1.

На рисунке 4.33 показан фрагмент сечения массива ТЛО для этих двух систем на один и тот же участок, на котором отображена поверхность земли и стена здания. Глубина сечения – 0,2 см. ТЛО с различных маршрутов съемочной системы отображены различными цветами. В отличие от данных со сканера Lynx двойное данных со сканера VMX-250 практически отсутствует. Небольшое двойное данных системы LYNX обусловлено шумовыми составляющими.

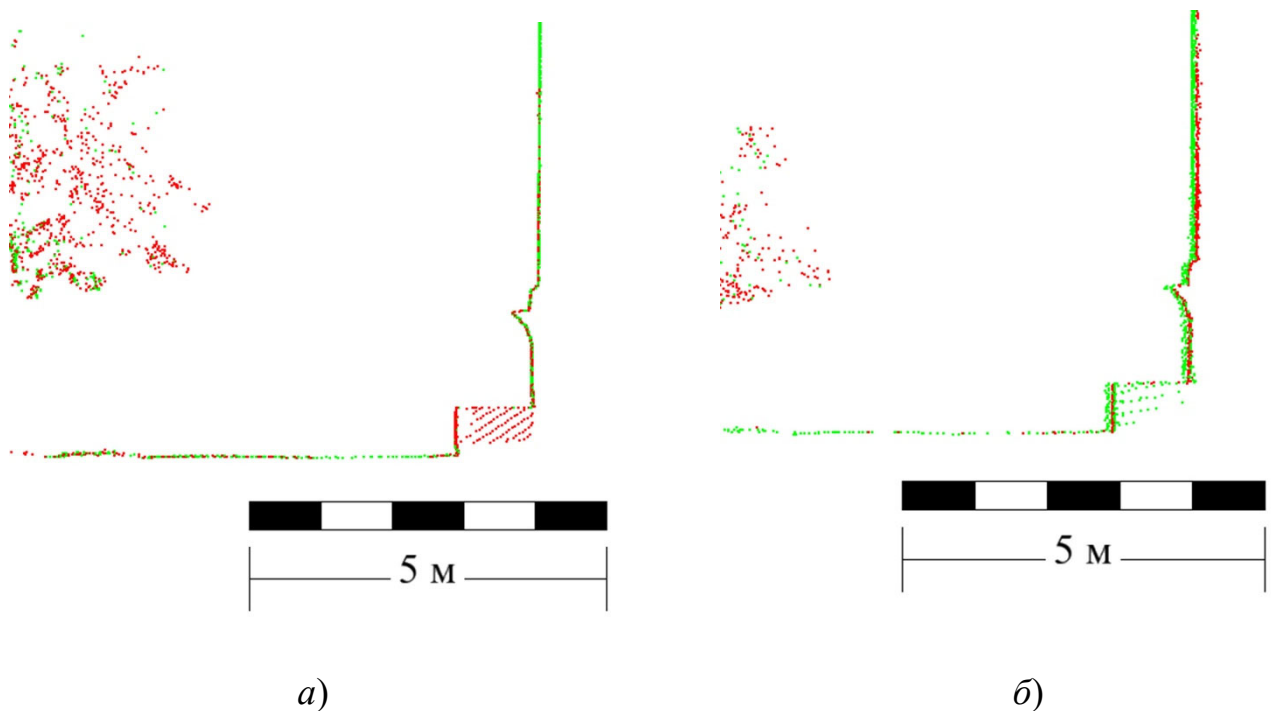


Рисунок 4.33 – Данные с систем МЛС:

a) Riegl VMX-250; б) Lynx Mobile Mapper M1

На рисунке 4.34 показан пример сечения асфальтового дорожного полотна одного и того же участка данных, полученного этими двумя системами. Глубина сечения составила 5 см. Данные системы VMX-250 позволяют отобразить даже незначительные неровности дороги. На данных системы Lynx шум не позволяет распознать такие неровности.

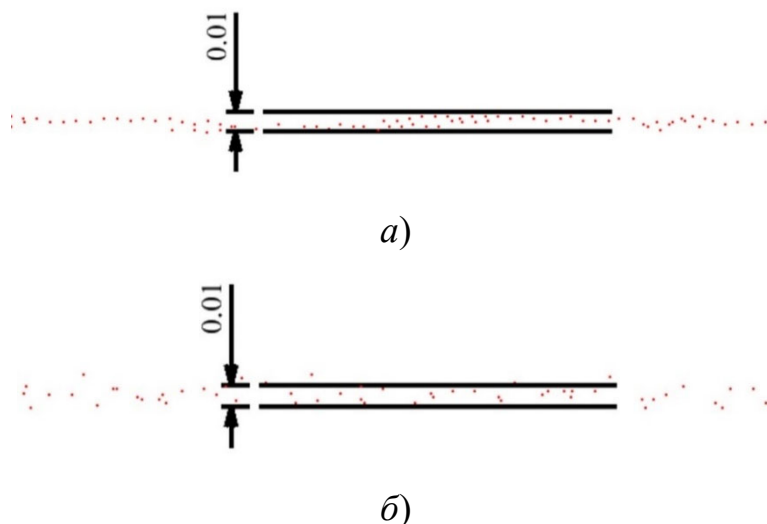


Рисунок 4.34 – Уровень шума данных МЛС:

а) Riegl VMX-250; б) Lynx Mobile Mapper M1

Для устранения шумовых составляющих данных МЛС необходимо применять различные методы фильтрации. Например, может быть осуществлено сглаживание. На рисунке 4.35 приведен результат сглаживания в пределах 1 см. На данных системы VMX-250 были сглажены все неровности дороги, а данные системы Lynx почти не изменились, так как уровень шума немного превысил значение сглаживания в 1 см.

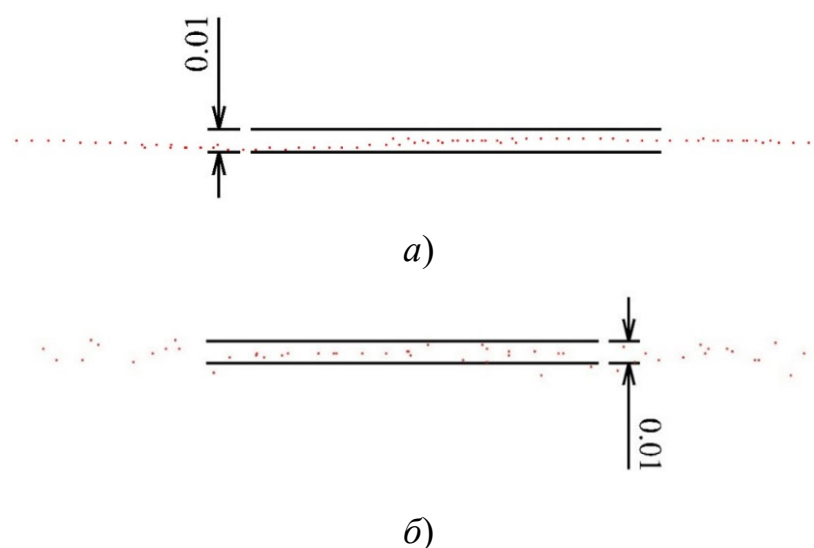


Рисунок 4.35 – Данные МЛС после сглаживания в 1 см:

а) Riegl VMX-250; б) Lynx Mobile Mapper M1

На рисунке 4.36 приведен результат сглаживания в пределах 2 см. Уровень сглаживания данных системы VMX-250 оказался таким же, как и в пределах 1 см, а на данных системы Lynx шумы были устранены.

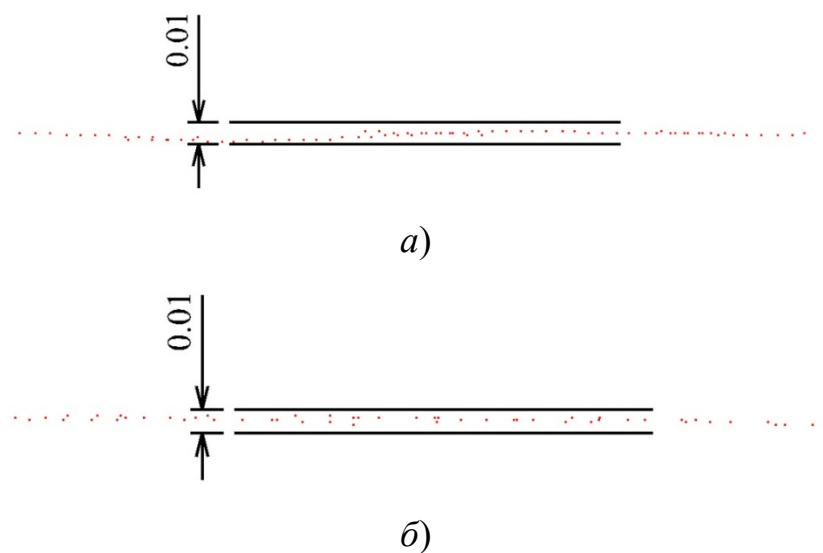


Рисунок 4.36 – Данные МЛС после сглаживания в 2 см:

а) Riegl VMX-250; б) Lynx Mobile Mapper M1

Таким образом, шумовые составляющие данных МЛС могут влиять на точность уранивания и построения ЦМП. Операции сглаживания могут повысить точность этих процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

- выполнен информационно-аналитический анализ разработок, связанных с повышением автоматизации обработки данных МЛС, на основании которого определены цель и научно-технические задачи диссертационного исследования;
- разработан алгоритм фильтрации грубых ошибок результатов измерений, особенностью которого является применение методов фильтрации, использующих информацию о пространственном положении точек совместно с характеристиками каждой отдельной точки, такими как интенсивность и номер отражения, и алгоритм взаимного ориентирования данных МЛС, позволяющий использовать небольшие вертикальные объекты для поиска соответственных точек и фильтровать те из них, которые неверно идентифицируемы на растительности;
- усовершенствована технологическая схема топографической съемки территорий с применением МЛС, заключающаяся в сканировании территорий по участкам;
- выполнена апробация разработанной методики на примере дорог Республики Саха и Новосибирской области, на основании которой доказана высокая эффективность предложенных алгоритмов и технологической схемы.

Результаты внешнего ориентирования показали, что для задачи создания топографических планов масштаба 1 : 500 с высотой сечения рельефа 0,5 м на незастроенные территории применение опорных точек необязательно при удалении от базовой станции не более, чем на 15 км. При высоте сечения рельефа 0,25 м опорные точки необходимо размещать через 8 км. Эти значения актуальны для системы Riegl VMX-250 и других со схожими техническими характеристиками.

Перспективы последующего диссертационного исследования заключаются в дальнейшем повышении степени автоматизации МЛС.

Разработанную методику предварительной обработки данных МЛС рекомендуется использовать в организациях, выполняющих топографические работы с применением рассмотренной технологии лазерного сканирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Айрапетян, В. С. Физика лазеров / В. С. Айрапетян, О. К. Ушаков ; Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 134 с. – ISBN 978-5-87693-528-1. – Текст : непосредственный.
- 2 Алексеенко, Н. Н. Применение технологии лазерного сканирования в различных отраслях и на различных этапах жизненного цикла объектов / Н. Н. Алексеенко. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2016. – № 2. – С. 62–73.
- 3 Алтынцев, М. А. Влияние результатов предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования на точность построения цифровых моделей поверхности автомобильных дорог / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020 : сборник материалов в 8 томах XVI Международного научного конгресса, Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 74–85. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-1-1-74-85.
- 4 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированного уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 5–23. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-4-5-23.
- 5 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 5–19. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.
- 6 Алтынцев, М. А. Особенности предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019 : сборник материалов в 9 томах XV Международного научного конгресса, Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г. / Сибирский государственный университет геосистем и тех-

нологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», № 1. – С. 239–248. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-1-1-239-248.

7 Алтынцев, М. А. Проблемы автоматизированного определения характерных линий автомобильных дорог по данным лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, А. М. Макаров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018 : сборник материалов XIV Международного научного конгресса, Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г. / Сибирский государственный университет геосистем и геотехнологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 96–104.

8 Антипов, А. В. Влияние плотности точек воздушного лазерного сканирования на точность создания цифровой модели рельефа местности / А. В. Антипов. – Текст : непосредственный // ГЕО-Сибирь-2010 : сборник материалов в 6 томах VI Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2010. – Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология», № 1. – С. 18–23.

9 Военные применения лазеров / В. А. Борейшо, Д. В. Клочков, М. А. Коняев, Е. Н. Никулин. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет, 2015. – 103 с. – ISBN 978-5-85546-906-6. – Текст : непосредственный.

10 Высокоточная съемка архитектурных памятников Венеции лазерной системой Riegl VMX-250 / Н. Штудницка, Г. Зах, Ф. Амон, М. Пфеннигбауэр. – Текст : непосредственный // Вестник СГГА. – 2015. – Вып. 2 (15). – С. 16–29.

11 Грищенкова, Е. Н. Математическое моделирование погрешностей лазерного сканирования на наблюдательных станциях / Е. Н. Грищенкова, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2017. – № 6. – С. 35–40.

12 Догополов, Д. В. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным ди-

станционного зондирования земли / Д. В. Догополов, М. Ю. Баборыкин, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021 : сборник материалов в 8 томах XVII Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология», № 1. – С. 25–32. – DOI 10.3364/2618-981X-2021-1-25-32.

13 Каркокли Хамид Маджид Сабер. Влияние плотности размещения соответственных точек на результаты уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / Каркокли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2021 : сборник материалов в 8 томах XVII Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. / Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 65–74. DOI 10.33764/2618-981X-2021-1-65-74.

14 Климков, Ю. М. Взаимодействие лазерного излучения с веществом : учебное пособие / Ю. М. Климков, В. С. Майоров, М. В. Хорошев ; Московский государственный университет геодезии и картографии. – Москва : МИИГАиК, 2014. – 108 с. – Текст : непосредственный.

15 Комиссаров, А. В. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование : монография / А. В. Комиссаров, М. А. Алтынцев ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с. – ISBN 978-5-907320-44-4. – Текст : непосредственный.

16 Коптенков, М. И. Основы проектирования измерительных устройств на базе волоконно-оптического гироскопа / М. И. Коптенков. – Текст : непосредственный // Лесной вестник. – 2015. – № 3. – С. 63–69.

17 Кочнева, А. А. Создание цифровых моделей рельефа для проектирования автодорог на основе технологии воздушного лазерного сканирования / А. А. Коч-

нева, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Естественные и технические науки. – 2015. – № 2. – С. 91–95.

18 Краснопевцев, Б. В. Фотограмметрия / Б. В. Краснопевцев. – Москва : УПП «Репрография» МИИГАиК, 2008. – 160 с. – Текст : непосредственный.

19 КРЕДО 3D СКАН 1.6. – Текст : электронный // Технологии CREDO : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/888-credo-3dscan-naznachenie.html> (дата обращения: 01.09.2021).

20 Кузовков, Н. Т. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н. Т. Кузовков, О. С. Салычев. – Москва : Машиностроение, 1982. – 216 с. – Текст : непосредственный.

21 Куприянов, А. О. Глобальные навигационные спутниковые системы : учебное пособие / А. О. Куприянов. – Москва : МИИГАиК, 2017. – 76 с. – Текст : непосредственный.

22 Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – Москва : Физматлит, 1961. – 824 с. – Текст : непосредственный.

23 Матвеев, В. В. Инерциальные навигационные системы : учебное пособие / В. В. Матвеев. – Тула : ТулГУ, 2012. – 199 с. – Текст : непосредственный.

24 Медведев, В. И. Предварительная обработка данных мобильного лазерного сканирования в системе IndorCloud / В. И. Медведев, Д. С. Сарычев, А. В. Скворцов. – Текст : непосредственный // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 2 (3). – С. 67–74.

25 Медведев, Е. М. Лазерная локация земли и леса : учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е. М. Медведев, И. М. Данилин, С. Р. Мельников. – Москва : Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с. – ISBN 5-903055-09-5. – Текст : непосредственный.

26 Метод проектирования ремонтов автомобильных дорог на основе мобильного лазерного сканирования / А. Н. Байгулов, М. А. Романескул, Б. М. Шумилов, М. М. Губская. – Текст : непосредственный // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2013. – № 1. – С. 29–32.

27 Мобильная сканирующая система Phoenix ALPHA AL3-32. – Текст : электронный // Technokauf : официальный сайт. – 2021. – URL: https://www.technokauf.ru/catalog/mobilnye_skaniruyushchie_sistemy/2100 (дата обращения: 01.09.2021).

28 Мобильная сканирующая система Riegl VMX-250. – Текст : электронный // ООО «Империком Гео». Геодезические приборы : официальный сайт. – 2021. – URL: http://imgeo.ru/images/laser_scan/riegl/DataSheetVMX-250-imgeo.pdf (дата обращения: 01.09.2021).

29 Мобильный лазерный сканер Leica Pegasus:Two. – Текст : электронный // Русгеоком : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://www.rusgeocom.ru/products/mobilnyj-lazernyj-skaner-leica-pegasus-two> (дата обращения: 01.09.2021).

30 Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова ; Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с. – ISBN 978-5-87693-336-2. – Текст : непосредственный.

31 Портнов, А. В. Применение мобильного лазерного сканирования при изысканиях и проектировании железных дорог. Краткий обзор / А. В. Портнов. – Текст : электронный. – 2014. – URL: http://www.topomatic.ru/upload/robur_laserscan.pdf (дата обращения: 01.09.2021).

32 Программные продукты компании Terrasolid. – Текст : электронный // GISware Integro : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://gisw.ru/ru/distribution/Terrasolid> (дата обращения: 01.09.2021).

33 Рыльский, И. А. Уравнивание данных лазерного сканирования в RIPROCESS / И. А. Рыльский. – Текст : непосредственный // Вестник науки и образования. – 2020. – № 15(93), Ч. 1. – С. 65–69.

34 Сарычев, Д. С. Обработка данных лазерного сканирования / Д. С. Сарычев. – Текст : непосредственный // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 1 (2). – С. 16–19.

35 Середович, В. А. Выбор методики уравнивания данных мобильного лазерного сканирования в зависимости от качества полученных данных и снимаемой территории / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Р. А. Попов. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : сборник материалов в 2 томах X Международного научного конгресса, Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 2 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 142–149.

36 Середович, В. А. Исследование точности уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Е. С. Анцифиров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013 : сборник материалов в 3 томах IX Международного научного конгресса, Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г. / Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 3 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – С. 90–95.

37 Середович, В. А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов / В. А. Середович, М. А. Алтынцев, Р. А. Попов. – Текст : непосредственный // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18.1 – С. 141–144.

38 Системы мобильного сканирования АГМ-МС7. – Текст : электронный // АГС Системы : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://www.agmsys.ru/mscan/ms7-2100> (дата обращения: 01.09.2021).

39 СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения = Engineering survey for construction. Basic principles : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30.12.2016 № 1033/пр : дата введения 2017-07-01 / разработан «АИИС». – Москва : ЦНИИГАиК, 2016. – Текст : непосредственный.

40 Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман ; пер. с англ. – 2-е изд. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с. – ISBN 978-5-87693-336-2. – Текст : непосредственный.

41 Шокер, Х. М. Геодезическое обеспечение использования технологии лазерного сканирования для фиксации памятников культурного наследия / Х. М. Шокер, М. Г. Мустафин. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82, № 2. – С. 2–10.

42 A review of algorithms for filtering the 3D point cloud / J. S. Jin, M.-J. Wang, W. Jiang, L. Gao., L. Xiao. – Текст : непосредственный // Signal Processing: Image Communication. – 2017. – Vol. 57. – P. 103–112.

43 A survey of mobile laser scanning applications and key techniques over urban areas / Y. Wang, Q. Chen., Q. Zhu, L. Liu, C. Li, D. Zheng. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11(13), 1540.

44 Alpha3D Advanced mobile mapping solution for 3D mass data acquisition. – Текст : электронный // CHCNAV : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://www.chcnave.com/product-detail/alpha3d> (дата обращения: 01.09.2021).

45 Altyntsev, M. A. The study of mobile laser scanning data adjustment results for large scale topographic mapping / M. A. Altyntsev, Karkokli Hameed Majeed Saber. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2020. – Vol. 43(B2). – P. 197–203.

46 Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images / Y. Gao, X. Huang, F. Zhang, Z. Fu, C. Yang. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2015. – Vol. XL-1/W4. – P. 41–46.

47 Axelsson, P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models / P. Axelsson. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2000. – Vol. XXXIII-4. – P. 111–118.

48 Continuous Fusion of Motion Data Using an Axis-Angle Rotation Representation with Uniform B-Spline / H. Hu, J. Beck, M. Lauer, C. Stiller. – Текст : непосредственный // Sensors. – 2021. – Vol. 21(15). – 5004.

49 Denoising algorithm of airborne LIDAR point cloud based on 3D grid / S. Yonghua, Z. Xu-qing, N. Xue-feng, Y. Guo-dong, Z. Ji-Kai. – Текст : непосредственный //

International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2017. – Vol. 10. – No 2. – P. 85–92.

50 Detection of Levee Damage Based on UAS Data-Optical Imagery and LiDAR Point Clouds / K. Bakula, M. Pilarska-Mazurek, A. Salach, Z. Kurczyński. – Текст : непосредственный // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2020. – Vol. 9 (4). – 248 p.

51 Dickey, F. M. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques, Second Edition / F. M. Dickey. – CRC Press, 2017. – 589 p. – Текст : непосредственный.

52 Hu, H. Accurate global trajectory alignment using poles and road markings / H. Hu, M. Sons, C. Stiller. – Текст : непосредственный // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – 2019. – arXiv:1903.10205v1. – P. 1186–1191.

53 Hussnain, Z. An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment / Z. Hussnain, S. Oude Elbernk, G. Vosselman. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-1. – P. 203–209.

54 Hussnain, Z. Automatic extraction of accurate 3D tie points for trajectory adjustment of mobile laser scanners using aerial imagery / Z. Hussnain, S. Oude Elbernk, G. Vosselman. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 154. – P. 41–58.

55 Hutton, J. The Applanix SmartBase software for improved robustness, accuracy, and productivity of mobile mapping and positioning / J. Hutton, E. Roy. – Текст : электронный // Applanix : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://www.applanix.com/pdf/applanix%20smartbase.pdf> (дата обращения: 01.09.2021).

56 Improving adaptive Kalman estimation in GPS/INS integration / W. Ding, J. Wang, C. Rizos, D. Kinlyside. – Текст : непосредственный // Journal of Navigation. – 2007. – Vol. 60(03). – P. 517–529.

57 IP-S2 Lite. – Текст : электронный // Topcon : официальный сайт. – 2021. – URL: https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/IP-S2_Lite_E.pdf (дата обращения: 01.09.2021).

58 IP-S3. Компактная мобильная сканирующая система. – Текст : электронный // Инжиниринг. Комплексные решения для вашей лаборатории : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://a3-eng.com/assets/files/11089/broshyura-topcop-ip-s3.pdf> (дата обращения: 01.09.2021).

59 Kalashnikova, O. V. Wavelength and altitude dependence of laser beam propagation in dense fog / O. V. Kalashnikova, H. A. Willebrand, L. M. Mayhew // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2002. – V. 4635. – P. 279–288. – Текст : непосредственный.

60 Kumar, P. Road Features Extraction Using Terrestrial Mobile Laser Scanning System: Doctor's thesis / P. Kumar. – National University of Ireland Maynooth., 2012. – 270 p. – Текст : непосредственный.

61 Leica Pegasus : Two Ultimate Mobile Sensor Platform. – Текст : электронный // Leica Geosystems : официальный сайт. – 2021. – URL: https://leica-geosystems.com/ru/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus_two-ultimate (дата обращения: 01.09.2021).

62 Levin, D. The approximation power of moving least-squares / D. Levin. – Текст : непосредственный // Math. Comp. – 1998. – Vol. 67. – No. 224. – P. 1517–1531.

63 Levinson, J. Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments / J. Levinson, M. Montemerlo, S. Thrun. – Текст : непосредственный // Robotics: Science and Systems. – 2007. – Vol. III.

64 Li, Y. A self-calibration method for boresight error of mobile mapping system / Y. Li, Y. Bai, M. Wang. – Текст : непосредственный // 2nd International Conference on Geoscience and Environmental Chemistry (ICGEC 2020). – 2020. – Vol. 206. – 03010.

65 Lozes, F. Partial difference operators on weighted graphs for image processing on surfaces and point clouds / F. Lozes, A. Elmoataz, O. Lézoray. – Текст : непосредственный // IEEE Trans. Image Process. – 2014. – Vol. 23. – No. 9. – P. 3896–3909.

66 Lynx HS300. – Текст : электронный // GeoShack : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://geoshack.com/product/lynx-hs300> (дата обращения: 01.09.2021).

67 Microstation. – Текст : электронный // Bentley : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://www.bentley.com/ru/products/brands/microstation> (дата обращения: 01.09.2021).

68 Mobile laser scanning systems for GPS/GNSS-denied environment mapping / C. Wen C., Y. Xia, Y. Lian, Y. Dai, J. Tan, C. Wang, J. Li. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-1. – P. 457–460.

69 Point cloud data filtering and downsampling using growing neural gas / S. Orts-Escolano, V. Morell, J. García-Rodríguez, M. Cazorla // Neural Networks (IJCNN), The 2013 International Joint Conference on, Dallas, TX. – 2013. – P. 1–8.

70 Pointcleannet: learning to denoise and remove outliers from dense point clouds / M.-J. Rakotosaona, V. L. Barbera, P. Guerrero, N. J. Mitra, M. Ovsjanikov. – Текст : непосредственный // arXiv:1901.01060v3. – 2019. – P. 1–17.

71 Riegl VMX-2HA. – Текст : электронный // Riegl laser measurements systems : официальный сайт. – 2021. – URL: https://riegl.ru/images/stories/pdf/Info-sheet-VMX-2HA_2017-09-14_RU.pdf (дата обращения: 01.09.2021).

72 Riegl VMX-450. – Текст : электронный // Riegl – Riegl Laser Measurements Systmes : официальный сайт. – 2021. – URL: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_VMX-450_2015-03-19.pdf (дата обращения: 01.09.2021).

73 Riprocess. – Текст : электронный // Riegl – Riegl Laser Measurements Systmes : официальный сайт. – 2021. – URL: <http://www.riegl.com/products/software-packages/riprocess> (дата обращения: 01.09.2021).

74 Schaer, P. Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments / P. Schaer, J. Vallet. – Текст : непосредственный // International Archives of ISPRS. – 2016. – Vol. XL-3/W4. – P. 61–64.

75 Scherzinger, B. Applanix In-Fusion technology explained / B. Scherzinger, J. Hutton. – Текст : электронный // Applanix : официальный сайт. – 2021. – URL: https://www.applanix.com/pdf/Applanix_IN-Fusion.pdf (дата обращения: 01.09.2021).

76 TerraScan User Guide. – Текст : электронный // TerraSolid : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (дата обращения: 01.09.2021).

77 TerraSolid : [сайт]. – 2021. – URL: <https://terrasolid.com/> (дата обращения: 01.09.2021).

78 TopoDOT : [сайт]. – 2021. – URL: <https://new.certainty3d.com> (дата обращения: 01.09.2021).

79 Trimble MX9 MOBILE MAPPING SOLUTION . – Текст : электронный // Trimble Geospatial : официальный сайт. – 2021. – URL: https://geospatial.trimble.com/sites/default/files/2019-08/022516-357G_Trimble%20MX9_DS_USL_0819_LR.pdf (дата обращения: 01.09.2021).

80 Trimble MX9. – Текст : электронный // Trimble Geospatial : официальный сайт. – 2021. – URL: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-mx9> (дата обращения: 01.09.2021).

81 Using mobile laser scanning data for automated extraction of road markings / H. Guan, J. Li, Y. Yu, C. Wang, M. Chapman, B. Yang. – Текст : непосредственный // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 87. – P. 93–107.

82 Vosselman, G. Airborne and terrestrial laser scanning / G. Vosselman, H. G. Maas. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 318 p. – Текст : непосредственный.

83 VRMesh : [сайт]. – 2021. – URL: <https://www.vrmesh.com> (дата обращения: 01.09.2021).

84 Wu, C.-T. Improvement of LiDAR data accuracy using 12 parameter affine transformation / C.-T. Wu, C.-Y. Hsiao, C.-S. Chen. – Текст : непосредственный // Journal of Chinese Soil and Water Conservation. – 2013. – Vol. 44(4). – P. 293–301.

85 Zaman, F. Density-based denoising of point cloud / F. Zaman, Y. P. Wong, B. Y. Ng. – Текст : непосредственный // ArXiv preprint arXiv:160205312. – 2016.

86 Zhao, Y. GPS/IMU integrated system for land vehicle navigation based on MEMS / Y. Zhao. – KTH Royal Institute of Technology, 2011. – 85 p. – Текст : непосредственный.