

На правах рукописи

Каркокли Хамид Маджид Сабер



Разработка методики предварительной обработки
данных мобильного лазерного сканирования

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – кандидат технических наук Алтынцев Максим Александрович.

Официальные оппоненты:

Мустафин Мурат Газизович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», заведующий кафедрой инженерной геодезии.

Долгополов Даниил Валентинович, кандидат технических наук, Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис», руководитель направления корпоративных ГИС систем Центра геоинформационных технологий.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству» (г. Москва).

Защита диссертации состоится 26 апреля 2022 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/karkoklikhamid-madzhid-saber/>

Автореферат разослан 11 марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 21.02.2022. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ 18.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность выбранной темы научного исследования и степень ее разработанности, выполнено формулирование целей и задач, отражена научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость работы, приведены выносимые на защиту положения.

В первом разделе выполнен обзор технологии МЛС. Приведена ее сущность, отражены области ее применения, преимущества перед традиционными геодезическими методами съемки. Рассмотрены технические характеристики современных систем МЛС и основные этапы технологии выполнения геодезических работ с их помощью. Проанализировано современное программное обеспечение (ПО) для предварительной обработки полученных данных МЛС. Выявлено, что современное ПО способно получить единый массив ТЛО полностью в автоматическом режиме. Но для этого необходимо соблюдение как методик топографической съемки, включающей создание планово-высотного обоснования (ПВО), так и ме-

тодик обработки полученных данных. Показано, как выбранная методика топографической съемки и схема сканирования влияют на качество и точность генерируемого массива ТЛО. Обсуждается, что необходимо учитывать в ходе предварительной обработки данных МЛС. Среди задач предварительной обработки данных основное внимание следует уделять их фильтрации и взаимному ориентированию, автоматическое выполнение которых по существующим методикам не всегда приводит к качественному результату.

Во втором разделе приводятся теоретические основы предварительной обработки данных МЛС. Анализируется степень влияния внешних условий измерений и характера объекта сканирования на точность данных. Большинство связанных с ними ошибок можно устранить при планировании топографической съемки с помощью выбора оптимального времени сканирования, когда погодные условия наиболее благоприятны. Для устранения ошибок, возникающих при сканировании во время неблагоприятных погодных условий, необходимо выполнять фильтрацию данных.

Выполняя разработку нового метода или алгоритма фильтрации, следует соблюдать баланс между качеством фильтрации данных и сохранением существующих характеристик. В результате должно быть удалено наибольшее число ошибочных точек с сохранением тех из них, которые описывают реальные формы объектов. При повторной фильтрации массив ТЛО не должен быть чрезмерно сглажен. Дополнительно на результат фильтрации не должны оказывать влияния угол сканирования и применяемая система координат. По итогам анализа существующих методов и алгоритмов фильтрации данных МЛС было определено, что большинство из них применяют информацию только о пространственном положении точек массива. Также для улучшения результатов фильтрации необходимо принимать во внимание все характеристики каждой ТЛО: порядковый номер отражения, интенсивность отраженного сигнала и реальный цвет.

Сильное влияние на результаты фильтрации оказывает характер распределения каждой точки в массиве. Чем более равномерным является характер рас-

пределения массива ТЛЮ, тем достовернее работают автоматические методы фильтрации. Для данных МЛС характер распределения точек является неравномерным. По направлению движения плотность массива зависит от скорости движения транспортного средства. Также следует учитывать высоту установки всей системы сканирования. Чем выше расположен сканер, тем меньшим будет расстояние $l_{\text{накл}}$, которое можно выразить формулой

$$l_{\text{накл.}} = h \cdot \text{tg}(\text{arctg} \frac{S}{h} + \Delta\theta) - S, \quad (1)$$

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

S – расстояние от сканера до объекта съемки;

h – высота сканера относительно снимаемого объекта.

Еще сильнее уменьшает достоверность фильтрации большое количество растительности вдоль траектории сканирования. Плотность массива точек, полученного при сканировании растительности, значительно снижается. При сканировании находящихся за растительностью горизонтальных поверхностей полученные редкие точки часто воспринимаются алгоритмами фильтрации в качестве шума и могут быть удалены.

Проблема 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 цифровой модели рельефа (ЦМР). Точность ее построения резко уменьшается при увеличении расстояния в сторону от дороги. При построении ЦМР, удовлетворяющей требованиям определенного масштаба топографического плана, следует выполнять исследования с целью вычисления максимальной полезной дальности системы МЛС.

Для вычисления полезной дальности можно применять формулу

$$R_{\text{полез}} = k_{\text{прозрач}} \cdot h \cdot \text{ctg } \beta, \quad (2)$$

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

β – минимальный угол падения лазерного луча сканера;

h – высота сканера относительно снимаемого объекта.

Для построения ЦМР 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, из-за большого количества необходимых для учета факторов разработка универсального алгоритма фильтрации является сложной задачей. Универсальный алгоритм фильтрации должен быть приемлем для разнообразных условий съемки и включать рекомендации, позволяющие фильтровать данные с минимальной потерей реальной информации об объектах местности.

Предварительная обработка также включает взаимное и внешнее ориентирование данных МЛС. Взаимное ориентирование в автоматическом режиме выполняется в большинстве программ от компаний, производящих лазерные сканеры. Для этого выполняется поиск плоских участков массива точек. При взаимном ориентировании по высоте ищутся горизонтальные плоскости, а в плане – вертикальные. Для вписывания горизонтальных плоскостей применяются точки поверхности земли. Автоматическое взаимное ориентирование в плане с максимальной точностью возможно при съемке территорий с наличием объектов, имеющих вертикальные плоскости, такие как стены сооружений.

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. Многие из таких методов, использующие собственные программные модули, позволяют конкурировать с методами

на основе дорогостоящего ПО, такого как TerraSolid. В TerraSolid выполняется дополнительное взаимное ориентирование после обработки в ПО от компаний-производителей лазерных сканеров.

Недостатком применения ПО от компаний, производящих лазерные съемочные системы, является относительно небольшое количество инструментов и закрытый программный код. Максимальной точности автоматического взаимного ориентирования не всегда удается добиться на основе существующих инструментов в случае сложных условий съемки. Например, если вертикальных плоскостей на территории практически нет, точность взаимного ориентирования в плане снижается. В этом случае требуется осуществить интерактивный набор соответственных точек на отдельных небольших объектах, таких как светофоры, опорные сооружения и дорожные знаки.

В настоящее время выполняется разработка алгоритмов, позволяющих автоматически выявить отдельные небольшие объекты. Реализация таких алгоритмов выполняется с помощью различных языков программирования в виде отдельных программных модулей.

После взаимного ориентирования массивов ТЛЮ на основе координат опорных точек, размещаемых вдоль траектории сканирования и измеряемых с помощью другого высокоточного геодезического оборудования, выполняется внешнее. Для сокращения времени, затрачиваемого на измерение координат опорных точек, необходимо исследовать, как характер застройки территории и внешние условия измерений оказывают влияние на точность массива ТЛЮ с целью определения минимально допустимого их количества.

Таким образом, к настоящему времени был разработан ряд алгоритмов и методов автоматического взаимного и внешнего ориентирования данных МЛС, которые не адаптированы для всех внешних условий и типов местности. Для разработки новых алгоритмов взаимного и внешнего ориентирования следует использовать комплексный подход, способный учесть различные особенности снимаемой территории при минимальном объеме дополнительных геодезических работ.

В третьем разделе представлены разработанные автоматизированные алгоритмы и методика предварительной обработки данных МЛС. На рисунке 1 приведена усовершенствованная технологическая схема процесса МЛС.

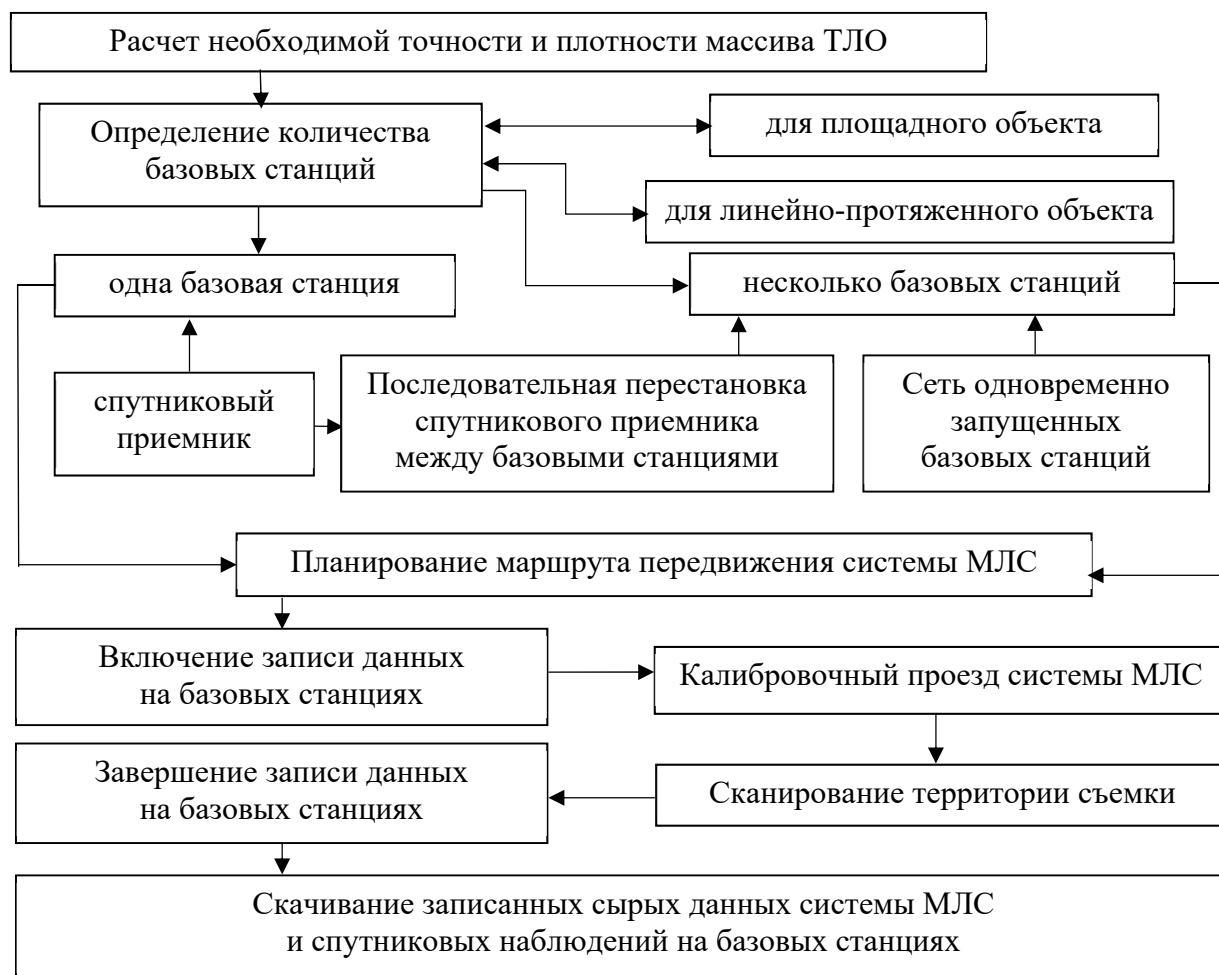


Рисунок 1 – Технологическая схема процесса МЛС

Данная схема основной акцент делает на выборе маршрута передвижения системы МЛС и создания для нее съемочного обоснования. На пунктах ПВО параллельно со сканированием должна производиться запись спутниковых измерений. От того, сколько базовых станций используется одновременно, будет зависеть схема процесса МЛС.

На рисунке 2 показан пример схемы МЛС для площадных объектов при использовании сети базовых станций, а на рисунке 3 – схема для линейно-протяженных при сканировании по участкам от одной базовой станции путем ее по-

следовательной перестановки. Движение по каждому участку всей территории следует выполнять в прямом и обратном направлении. 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.

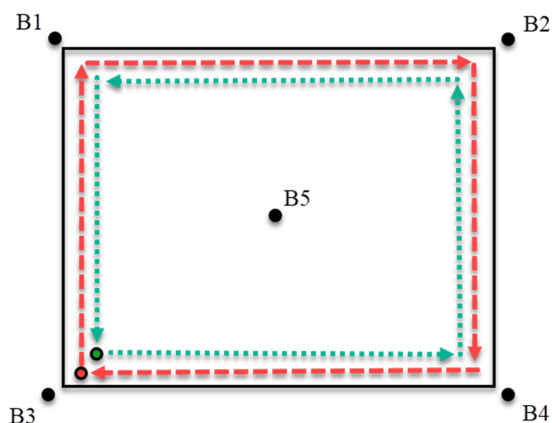


Рисунок 2 – Схема МЛС при съемке площадных объектов

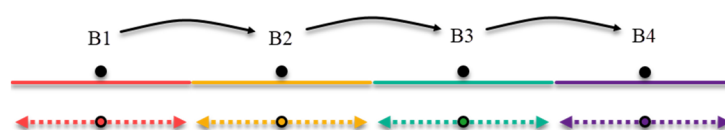


Рисунок 3 – Схема МЛС при съемке линейно-протяженных объектов

Далее выполняется предварительная обработка, итогом которой является единый массив ТЛО во внешней системе координат. По результатам оценки точности массива ТЛО делается вывод, требуется ли выполнить дополнительную обработку с помощью разработанной в диссертации методики.

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. Для удаления ложных точек алгоритм включает методы распознавания нижних точек, воздушных точек и точек, расположенных ниже поверхности.

Данные методы реализованы в ПО TerraSolid. Выбор этих четырех методов обоснован тем, что они применимы для наиболее сложных внешних условий сканирования, когда из-за съемки при повышенной влажности появляется большое количество точек переотражений.

В кратком виде алгоритм фильтрации состоит из следующих этапов:

- удаление всех точек с интенсивностью более 15 000 и точек, полученных в результате одного отражения за импульс, с интенсивностью более 8 000;
- распознавание точек физической поверхности земли по методу Аксельсона;
- распознавание ТЛО по алгоритму поиска нижних точек тех из них, которые получены в результате одного отражения за импульс;
- распознавание всего массива точек по методу поиска нижних точек;
- распознавание ТЛО по методу поиска точек, расположенных ниже заданной поверхности;
- распознавание ТЛО по методу поиска воздушных точек тех из них, у которых количество отражений за один импульс больше одного;
- распознавание ТЛО по алгоритму поиска воздушных точек.

Значения параметров применяемых методов разработаны по массиву ТЛО, полученного системой МЛС Riegl VMX-250. Но они подходят и для любых других массивов, в которых плотность данных не ниже той, которая получается при скорости движения 40 км/ч, частоте зондирующих импульсов 600 кГц и частоте сканирования 200 Гц. В случае более низкой плотности массива ТЛО необходимо заново подбирать параметры методов.

Предварительно выполненная фильтрация данных позволяет повысить точность дальнейшей стадии предварительной обработки – взаимного ориентирования. Разработанный алгоритм взаимного ориентирования данных МЛС выполняется для каждого фрагмента траектории движения отдельно и включает следующие этапы:

- автоматический поиск соответственных линий по точкам дорожного покрытия;

– поиск по соответственным линиям локальных поправок в высотное положение точек траекторий и ТЛО, сглаживание значений поправок с помощью одномерного фильтра Гаусса и их применение

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где $x = 50$ м – расстояние вдоль траектории сканирования, в пределах которого выполняется сглаживание;

σ – стандартное отклонение распределения Гаусса;

– разделение всего массива ТЛО на два уровня по высоте от физической поверхности земли: 0–1 м, > 1 м. Вычисление нормалей для каждой ТЛО;

– перенос точек, у которых количество отражений за один импульс больше одного, во временный класс;

– поиск групп точек по уровню «> 1 м» на основе вычисления расстояния между соседними точками и их перенос в отдельный класс небольших вертикальных объектов;

– перенос групп точек из класса небольших вертикальных объектов в класс растительности с помощью алгоритма распознавания деревьев ПО TerraSolid;

– перенос групп точек, у которых максимальное значение высоты меньше 2,1 м и больше 13 м, из класса вертикальных объектов в класс растительности;

– для каждой точки класса вертикальных объектов выполняется расчет попарных евклидовых расстояний на плоскости XU до каждой точки класса растительности. В случае, если значение расстояния оказывается меньше порогового, то точка переносится в класс растительности;

– перенос точек, у которых значение высоты над землей больше 6 м, из класса вертикальных объектов во временный класс.

– автоматический поиск соответственных линий по плоским вертикально расположенным объектам массива ТЛО всех классов и соответственных точек по точкам класса вертикальных объектов;

– интерактивный анализ результатов поиска соответственных точек на участках с их низкой плотностью – менее, чем 3 точки на 100 м. Удаление неверно найденных соответственных точек;

– поиск и применение локальных поправок положения точек траекторий и ТЛО в плане, сглаживание значений поправок с помощью одномерного фильтра Гаусса при $x = 100$ м.

Разработанный алгоритм подходит для различных по плотности застройки территорий, особенно для незастроенных участков с большим количеством растительности. Методика предварительной обработки данных МЛС с учетом разработанных алгоритмов и технологической схемы процесса МЛС представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Методика предварительной обработки данных МЛС

В четвертом разделе описаны экспериментальные исследования разработанной методики, которые выполнялись по материалам, полученным в процесс съемки автомобильной дороги «Талакан – Витим» в Республике Саха протяженностью 160 км и улиц г. Новосибирска.

Участок дороги Талакан – Витим был разделен на 7 частей (рисунок 5). Во время сканирования каждого участка, отмеченного на рисунке 5 отдельным цветом, была запущена одна из ближайших базовых станций. Максимальное расстояние между базовыми станциями не превысило 26,7 км (между НГДУ и В1), а от базовой станции до системы МЛС – 15 км.

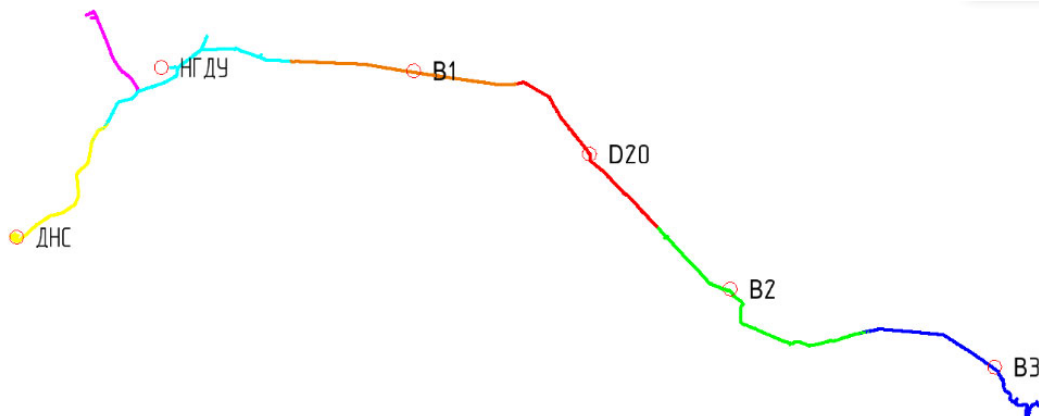


Рисунок 5 – Участок автомобильной дороги Талакан – Витим

Рассмотрим алгоритм фильтрации на примере территории, сканирование которой было выполнено при повышенной влажности. На рисунке 6, а показан исследуемый участок полосой 200 м с видом сверху. Данный участок содержит большое количество грубых ошибок измерений в виде точек переотражений под землей и в воздухе. В этом случае фильтрация может быть выполнена путем распознавания точек земли, построения по ним высокоточной ЦМР и совместного анализа пространственного взаимного положения ТЛЮ и их характеристик. На рисунке 6, б продемонстрированы результаты автоматического построения ЦМР по автоматически распознанным точкам земли. Все ошибки автоматической классификации были интерактивно устранены для создания набора контрольных точек по высоте, располагаемых в узлах сетки размером $1 \times 1 \text{ м}^2$ (рисунок 6, в).

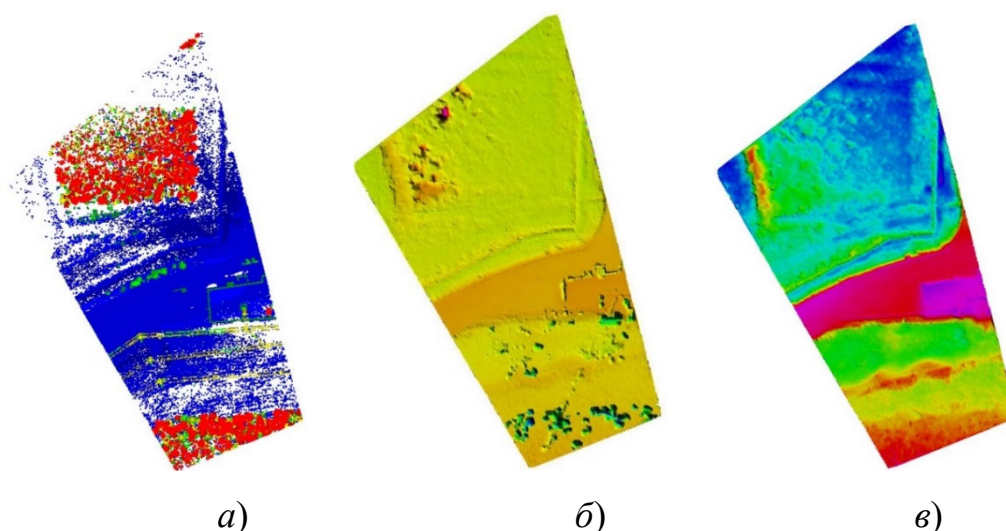


Рисунок 6 – Данные МЛС и ЦМР после распознавания точек земли:
 а) ТЛО по высоте; б) ЦМР по методу Аксельсона; в) ЦМР по методу
 Аксельсона с интерактивной фильтрацией

В таблице 1 показаны результаты оценки точности автоматически построенной ЦМР на основе созданного набора контрольных точек. Результаты точности автоматически построенной ЦМР свидетельствуют о необходимости применения дополнительных методов и разработанного алгоритма фильтрации.

Таблица 1 – Оценка точности построения ЦМР по автоматически распознанным точкам физической поверхности земли

Ошибка, м \ ЦМР	Рис. 6, б	Рис. 7, а	Рис. 7, б	Рис. 7, в	Рис. 7, в полоса 100 м
Среднее отклонение	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

На рисунке 7, а приведены промежуточные результаты построения ЦМР после этапа удаления точек по интенсивности. На рисунке 7, б показаны результаты построения ЦМР после этапа распознавания нижних точек и расположенных ниже поверхности, а на рисунке 7, в – итоговый результат фильтрации.

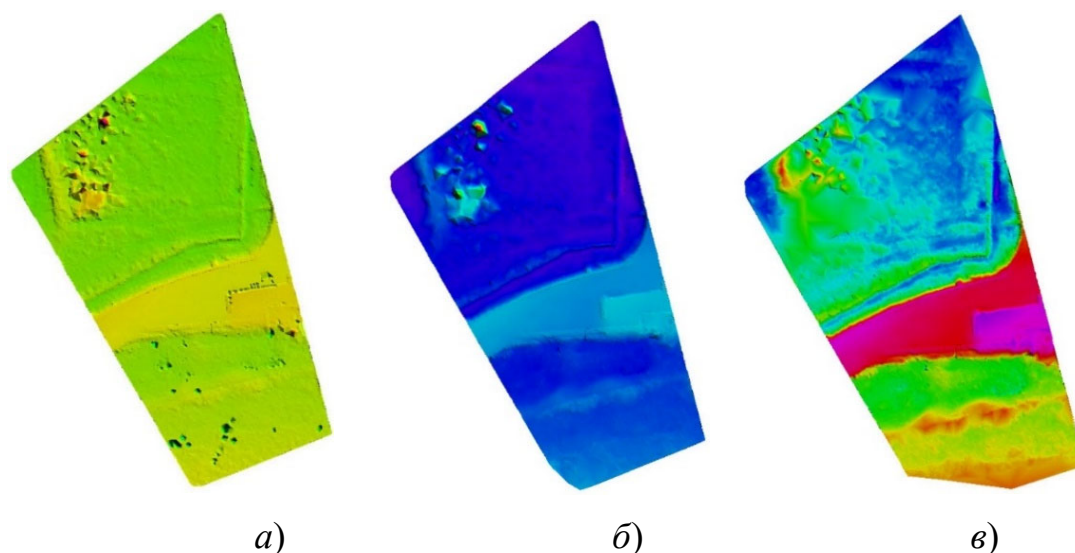


Рисунок 7 – ЦМР после этапов фильтрации: *а)* после удаления ТЛО по интенсивности и номеру отражения; *б)* после фильтрации по методу поиска нижних точек и расположенных ниже поверхности; *в)* после фильтрации по методу поиска воздушных точек

Применение алгоритма фильтрации позволило значительно повысить точность автоматического создания итоговой ЦМР. Значение средней ошибки автоматически построенной ЦМР стало удовлетворять требованиям инструкции по топографической съемке, выполняемой с высотой сечения рельефа 0,25 см, при уменьшении полосы съемки до 100 м. Уменьшенная полоса включает преимущественно травянистую и кустарниковую растительность, захватывая лишь незначительную часть лесного массива – около 20 м² в северной части.

После фильтрации было выполнено взаимное ориентирование массивов ТЛО с помощью разработанного алгоритма путем поиска соответственных точек для ориентирования в плане и соответственных линий для ориентирования по высоте.

В отличие от взаимного ориентирования по высоте, ориентирование в плане требует более глубокого анализа. На рисунке 8 показан пример результатов поиска соответственных точек на одном из участков трассы с видом сверху. Точки, идентифицируемые на объектах дорожной инфраструктуры и опорных сооруже-

ниях, практически всегда верно показывают ошибки взаимного положения массивов ТЛО. Те из них, которые оказались на растительности, могут верно показывать ошибки только частично. Одна из трех точек, идентифицируемая на растительности, показывает неверную ошибку взаимного положения. На двух опорах ЛЭП из-за большого их наклона не было найдено точек. В таблице 2 приведены ошибки взаимного положения данных МЛС в высотном положении для всей территории трассы Талакан – Витим, рассчитанные по разнице положения соответственных точек и линий. В таблице 3 приведены результаты оценки точности взаимного ориентирования данных МЛС после применения поправок в плане и по высоте.

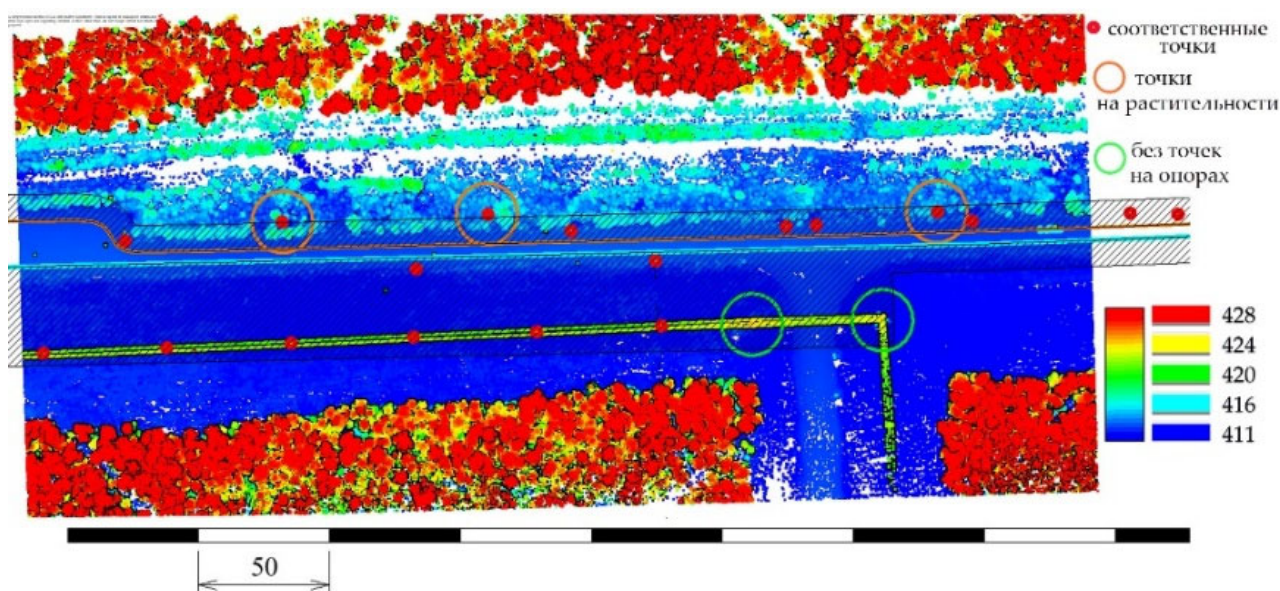


Рисунок 8 – Пример данных МЛС и результаты поиска соответственных точек

Таблица 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

Таблица 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

Также было определено, что если расстояния между соответственными точками превышают 100 м, то неверно идентифицируемые точки нужно удалять интерактивно. Разработанный алгоритм взаимного ориентирования рекомендуется применять для незастроенных территорий без вертикальных плоскостей.

Чтобы оценить точность внешнего ориентирования данных МЛС, вдоль автомобильной дороги измерялись координаты опорных точек каждый километр с помощью спутниковых приемников. В таблице 4 приведены результаты оценки точности внешнего ориентирования данных МЛС.

Таблица 4 – Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам, размещенным через 1 км, 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

Все измеренные 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. Наибольшие значения ошибок наблюдаются в зонах максимального удаления от базовых станций. Для создания топографических планов с большей высотой сечения рельефа необходимо применять опорные точки. Выполнялось внешнее ориентирование данных МЛС при размещении опорных точек каждые 2, 4 и 8 км. В таблице 5 приведена оценка точности по кон-

трольным точкам через 1 км при размещении опорных точек каждые 8 км. Полученная точность оказалась на границе допуска для создания топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м. Было выявлено, что опорные точки следует размещать на границах участка съемки.

Таблица 5 – 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

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 НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркоккли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 3. – С. 5–19. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.

2 Алтынцев, М. А. Методика автоматизированного уравнивания данных мобильного лазерного сканирования / М. А. Алтынцев, Каркоккли Хамид Маджид Сабер. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 5–23. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-4-5-23.

3 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.

4 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 технологий. – 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.

5 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.

6 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.