

УДК 528.721.221.6:528.8

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Максим Александрович Алтынецв

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (952)915-29-80, e-mail: mnbcv@mail.ru

Каркокли Хамид Маджид Сабер

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (923)173-41-25, e-mail: enghamid72@yahoo.com

Результатом лазерного сканирования является массив точек лазерных отражений (ТЛО). Формирование единого массива ТЛО в заданной системе координат производится в процессе уравнивания на этапе предварительной обработки данных, полученных во время полевой съемки. На этом этапе часто требуется выполнить фильтрацию данных, в процессе которой устраняются ТЛО, имеющие ошибочное положение. Количество ошибочных ТЛО определяется особенностями применяемой модели лазерного сканера, характером территории съемки и погодными условиями. Разработка методик и алгоритмов фильтрации данных лазерного сканирования выполняется на основе анализа пространственного положения каждой ТЛО и некоторого набора дополнительных характеристик, таких как значение интенсивности, порядковый номер отражения, значение цвета. В статье рассматривается методика фильтрации данных мобильного лазерного сканирования территории автомобильной дороги, проходящей среди лесного массива и вблизи с отдельными промышленными объектами и зданиями. Основная цель предлагаемой методики фильтрации – получение данных, по которым возможно выполнить автоматическое построение точной цифровой модели рельефа. Методика фильтрации разработана для данных, полученных при наименее благоприятных условиях – в сырую погоду. Выполнена оценка точности построения цифровой модели рельефа по отфильтрованным данным.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, фильтрация данных, растительность, цифровая модель рельефа, оценка точности

Введение

Технология лазерного сканирования плотно вошла в различные сферы геодезического производства. С каждым годом увеличиваются объемы выполняемых геодезических работ с применением лазерного сканирования. Благодаря высокой точности, детальности и скорости сбора данных стало возможным значительно упростить процесс полевой съемки с це-

лью решения разнообразных задач, от составления топографических планов и создания трехмерных моделей объектов до определения деформаций инженерных сооружений и осуществления большого количества других измерений в различных отраслях производства [1].

Лазерное сканирование может осуществляться как из стационарного положения, так и в процессе движения с наземного или воздушного транспортного средства. В зависимо-

сти от этого выделяют наземное, мобильное и воздушное лазерное сканирование. Результатом любого вида лазерного сканирования является массив ТЛО, каждая точка которого обладает пространственными координатами и такими характеристиками, как значение интенсивности, зависящее от отражательной способности сканируемого объекта, порядковый номер отражения и реальный цвет [2].

Информация об интенсивности присуща массиву точек, полученных любым лазерным сканером. Значение интенсивности точки прямо пропорционально величине отражательной способности объекта, которому она соответствует.

Порядковый номер отражения может фиксироваться для каждой точки массива. Эта информация связана с явлением, когда зондирующий лазерный импульс по пути распространения достигает сразу нескольких объектов, каждый из которых вызывает отдельный импульс в направлении приемника лазерного излучения. Данное явление называют регистрацией множественных отражений [3, 4]. На рис. 1 показан пример ситуации, когда за один зондирующий импульс может быть зарегистрировано несколько отражений от кроны дерева и здания. Максимально возможное количество регистрируемых отражений определяется моделью лазерного сканера.



Рис. 1. Регистрация множественных отражений

Информация о реальном цвете объекта для каждой точки массива фиксируется в том случае, когда совместно с процессом сканирования выполняется цифровая фотосъемка. Цифровая камера может быть встроена в лазерный сканер либо устанавливаться на него с помощью специального крепления. Для точного назначения реальных цветов необходимо осу-

ществлять калибровку камеры и определять ее позицию относительно лазерного сканера [5].

Для решения топографических и любых других измерительных задач с максимальной точностью, в независимости от вида лазерного сканирования, необходимо выполнять предварительную обработку, заключающуюся в уравнивании и фильтрации его данных. В результате уравнивания формируется единый массив ТЛО в определенной системе координат, а фильтрации – его сглаживание и исключение шумовых составляющих, то есть точек с ошибочным положением в пространстве [6].

Фильтрация может осуществляться как до уравнивания массивов ТЛО, полученных при повторном сканировании территории, чаще всего во время движения в противоположных направлениях, так и после уравнивания. Применение алгоритмов фильтрации до уравнивания особенно актуально при большой плотности ошибочных ТЛО, когда они заключены в целые группы. Большое количество ошибочных точек на единицу площади может оказывать значительное влияние на точность результатов уравнивания, а также на достоверность автоматического распознавания объектов местности и точность трехмерного моделирования [7].

В случае, если плотность ошибочных ТЛО невысока, влияние на точность уравнивания будет минимальным, но возможны искажения при автоматическом построении цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей поверхности (ЦМП).

Влияние внешних условий съемки и характера объекта сканирования на точность данных

На количество ошибочных ТЛО и в целом на точность их положения влияют инструментальные ошибки, обусловленные качеством сборки и юстировки деталей лазерного сканера, и методические, связанные с влиянием внешних атмосферных условий и характером объекта съемки [8]. По сравнению с инструментальными, методические ошибки могут существенно влиять на результаты лазерного сканирования. Учитывать возможное влияние методических ошибок необходимо

как в процессе полевого этапа лазерного сканирования, так и во время камерального этапа обработки его 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 [9]. Рассеяние лазерного излучения происходит вследствие наличия в воздухе различных рассеивающих частиц. Явление мерцания часто называют сцинтилляцией, это явление возникает в результате нагрева частиц воздуха из-за турбулентности, изменяя тем самым плотность и показатель преломления. Сцинтилляция приводит к низкочастотным изменениям лазерного излучения, достигающего приемника и являющегося следствием увеличения количества битовых ошибок в системах лазерного сканирования [10].

Чтобы свести к минимуму влияние внешних условий, необходимо учитывать свойства лазерного излучения: спектральную ширину, монохроматичность, когерентность, расходимость и выходную мощность [11].

Спектральная ширина определяется интервалом частот около центра спектральной линии лазерного пучка. На краях данного интервала интенсивность падает 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 превышает во много раз когерентность естественного света. Под расходимостью понимается угловое распределение интенсивности в отдаленной зоне, то есть спектральная ши-

рина 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 [11].

Современные лазерные сканеры геодезического типа обладают большим диапазоном мощности излучения. Чем больше мощность лазерного излучения сканера, тем выше дальность его измерений. Недостатком лазерных сканеров с большим уровнем мощности является большее количество ошибочных измерений при сканировании неоднородных по текстуре и форме объектов, находящихся на небольшом расстоянии от сканера. Отражательная способность таких объектов будет значительно отличаться. Они в наибольшей степени влияют на интенсивность рассеянного сигнала. Даже при сканировании плоского объекта, одна часть которого окрашена в черный цвет, а другая – в белый, возникает большая шумовая составляющая на границе участков различного цвета [8].

Внешние условия съемки и характер объекта сканирования вносят наибольший вклад в появление ошибок высотного положения ТЛЮ. Отметки точек могут быть как больше своих истинных значений, так и меньше. Сильнее всего это проявляется при сканировании в сырую погоду, когда множество горизонтальных поверхностей становятся покрытыми водой [7]. В этом случае необходимо учитывать, что на покрытых водой поверхностях будут отсутствовать ТЛЮ. Это связано с высоким уровнем поглощения лазерного излучения водой в области ближнего инфракрасного спектра, в которой чаще всего выполняется лазерное сканирование [12]. Если в воде оказываются видны отражения близлежащих объектов, то отражения отображаются и в массиве ТЛЮ. Физически это можно обосновать тем, что гладкая водная поверхность является разновидностью плоского зеркала, и лазерный сканер фиксирует все отражения от воды наподобие тому, как человеческий глаз фиксирует отраженные от воды фотоны, испускаемые реальными объек-

тами [13]. В случае водной поверхности интенсивность отраженных объектов будет меньше, чем при отражении от плоского зеркала.

Большинство ошибок, вызванных влиянием внешней среды и характером объекта сканирования, можно исключить при проектировании процесса съемки путем выбора наиболее благоприятных условий для измерений. Чтобы устранить ошибки, возникшие вследствие лазерного сканирования при неблагоприятных условиях, требуется обязательное применение одного или нескольких методов фильтрации данных.

Методы фильтрации данных лазерного сканирования

При разработке любого метода фильтрации основной задачей является соблюдение баланса между качеством фильтрации и сохранением реальных характеристик. Необходимо, чтобы метод был способен удалить как можно большее число ошибочных точек, не затронув точки, описывающие фактические формы объектов. В случае повторного применения метода фильтрации не должно осуществляться чрезмерное сглаживание массива точек. Также результат фильтрации не должен зависеть от угла сканирования и применяемой системы координат [14].

К настоящему времени было разработано большое количество методов фильтрации данных лазерного сканирования. Существуют различные классификации данных методов, согласно одной из них все методы фильтрации можно разделить на 7 групп: статистические, методы на основе соседства, проецирования, обработки сигналов, составления дифференциальных уравнений, гибридные методы и группа других методов [15].

Статические методы используют средства математической статистики, такие как кластерный анализ, метод главных компонент, метод максимального правдоподобия, байесовский классификатор, 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, выполняется поиск опорной поверхности, на которую проецируются все точки массива. Для поиска такой поверхности часто применяется метод движущихся наименьших квадратов (Moving Least Squares), который представляет собой низкочастотный фильтр [16]. Методы этой группы позволяют уменьшить шум посредством сглаживания массива, а также удалить отдельные изолированные ошибочные точки. В зависимости от метода, проецирование может выполняться как для всех трех координат точек одновременно, так и сначала для координаты Z , а затем и для X , Y .

Методы на основе обработки сигналов включают различные фильтры, разработанные на основе дискретных ортогональных преобразований, таких как преобразования Фурье, Лапласа.

Методы на основе составления дифференциальных уравнений расширяют спектр применения данных уравнений и частных производных. Например, в [17] рассмотрено применение взвешенных графов, первоначально используемых при обработке цифровых изображений, для фильтрации массивов точек.

Гибридные методы совместно используют несколько методов фильтрации. В [18] описана методика, в которой сначала применяются статические методы, а затем – метод на основе соседства. Фильтрация выполняется 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 не подходящие ни к одной из шести описанных групп. Например, это метод фильтрации посредством представления всего пространства, охватывающего массив точек, в виде трехмерной воксельной сетки. Для множества точек, оказавшегося в пределах границ каждого вокселя, определяется пространственное среднее положение. Количество точек массива после фильтрации равняется количеству вокселей. Недостатком метода является потеря геометрической информации из-за снижения плотности массива и силь-

ная зависимость точности его положения от количества ошибочных точек [19].

Описанные группы представляют собой лишь одну из классификаций. Несмотря на огромное число существующих методов, ни один из них не может обеспечить максимально точные результаты фильтрации. Для каждого отдельного фрагмента массива точек, описывающего отдельный объект, часто требуется подбирать наиболее оптимальный метод. Выбор метода фильтрации и его параметров должен осуществляться в зависимости от типа сканируемой поверхности, плотности массива точек и характеристик его шумовых составляющих [14].

Большинство методов фильтрации данных лазерного сканирования используют только информацию о пространственном положении каждой точки массива. Чтобы улучшить результаты фильтрации, следует также учитывать все характеристики массива ТЛО: интенсивность отраженного сигнала, порядковый номер отражения и реальный цвет.

Влияние характера распределения ТЛО и растительности на результаты фильтрации данных лазерного сканирования

Существенное влияние на результаты фильтрации данных лазерного сканирования оказывает характер распределения ТЛО. Чем равномерней характер распределения массива точек, тем точнее работают автоматические методы

фильтрации. Наиболее равномерным характером обычно обладают массивы, полученные методом воздушного лазерного сканирования (ВЛС). Это связано, как правило, с постоянной высотой и скоростью полета, а также с применяемым методом выполнения развертки. Самым равномерным характером обладают данные ВЛС, полученные при развертке с помощью вращающейся призмы, когда ТЛО представляются в виде набора параллельных друг другу прямых линий [4]. При таком методе развертки плотность ТЛО уменьшается при увеличении угла отклонения лазерного луча от оси маршрута за счет большего пройденного расстояния до объекта.

Этот метод развертки применяется также в системах мобильного лазерного сканирования (МЛС). Но так как съемка осуществляется с наземных транспортных средств, то расстояния, преодолеваемые лазерными лучами от сканера до препятствий, существенно отличаются. При сканировании горизонтальных поверхностей с увеличением расстояния от траектории съемки уменьшается плотность массива ТЛО, что связано с острыми углами падения лазерных лучей. На рис. 2 на примере мобильного лазерного сканирования автомобильной дороги показана зависимость плотности массива ТЛО, определяемой величиной линейного шага сканирования по вертикали $l_{\text{накл.}}$, от высоты установки сканера h .

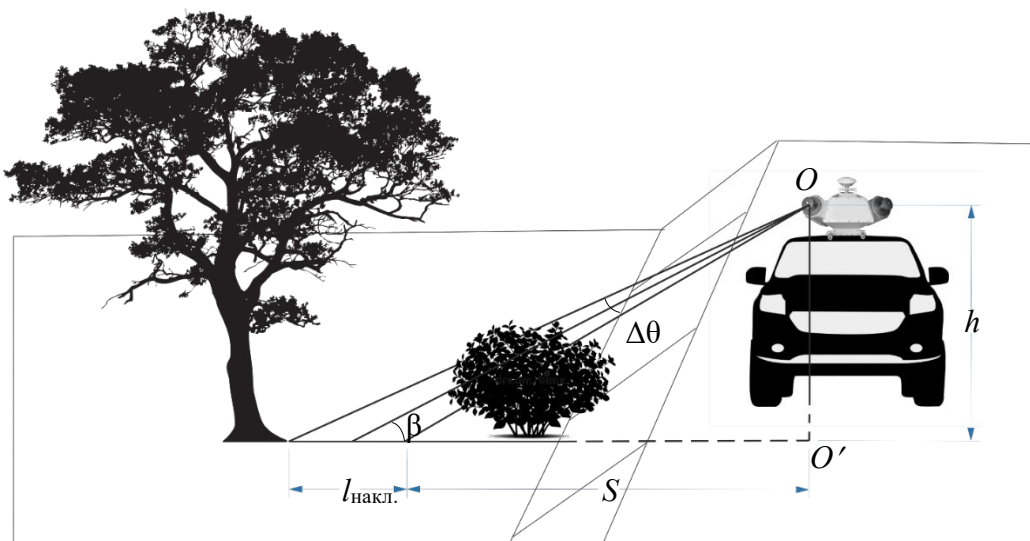


Рис. 2. Зависимость линейного шага сканирования по вертикали от высоты установки сканера

Из рис. 2. видно, что чем выше установлен сканер, тем меньше расстояние $l_{\text{накл.}}$, выражаемое формулой

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

где S – расстояние от сканера до объекта съемки; $\Delta\theta$ – угловой шаг сканирования по вертикали; h – высота сканера относительно снимаемого объекта.

Плотность массива ТЛО в направлении движения при МЛС зависит от того, насколько постоянную скорость имеет транспортное средство. В случае наземного лазерного сканирования (НЛС) характер распределения ТЛО в массиве является более неравномерным, так как лазерный луч отклоняется сразу в двух плоскостях посредством вращения призмы и поворота сервопривода, а также из-за непостоянства расстояния между соседними сканерными позициями.

Наличие растительности при МЛС и НЛС еще в большей степени снижает достоверность фильтрации. Плотность участка массива ТЛО, полученного в результате прохождения лазерного луча через слой растительности, значительно уступает плотности аналогичного участка, находящегося на том же самом расстоянии от сканерной станции или траектории съемки, и просканированного при том же самом угловом шаге сканирования и высоте установки сканера. При наземной съемке горизонтальных поверхностей, находящихся за растительностью, полученные редкие ТЛО могут быть восприняты алгоритмами фильтрации как шум и быть удалены.

Проблема удаления реальных ТЛО при применении алгоритмов фильтрации особо актуальна для данных мобильного лазерного сканирования автомобильных дорог, проходящих среди лесных массивов и других видов растительности. Низкая плотность массива ТЛО за пределами дорожного полотна предъявляет повышенные требования к точности подбора параметров алгоритмов фильтрации, особенно если необходимо выполнить построение точной цифровой модели рельефа (ЦМР).

На рис. 2 показана наиболее типичная ситуация во время МЛС, при которой точность

построения ЦМР резко снижается с увеличением расстояния по направлению в сторону от автомобильной дороги. Для построения ЦМР, приемлемой по точности для определенного масштаба топографического плана, необходимо осуществлять исследования с целью выявления максимальной полезной дальности действия системы МЛС. В [5] приведены результаты исследований, которые обосновывают выбор полезной дальности для наземных лазерных сканеров при съемке территорий, покрытых различными видами растительности, но также подходят и для систем МЛС. Полезную дальность можно рассчитать по формуле

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

где $k_{\text{прозрач.}}$ – коэффициент прозрачности; β – минимальный угол падения лазерного луча сканера; h – высота сканера относительно снимаемого объекта.

Коэффициент прозрачности показывает, какая часть лазерного излучения проходит через препятствия. Согласно проведенным в [5] исследованиям коэффициент прозрачности следует выбирать, руководствуясь целью осуществления сканерной съемки. Для построения ЦМР на территории с максимально плотным уровнем растительности, на лесные массивы, $k_{\text{прозрач.}} = 0,55$. Поэтому дальность действия сканера следует ограничивать на 50–60 % от максимальной при проектировании работ по мобильному лазерному сканированию.

Таким образом, при фильтрации данных МЛС необходимо принимать во внимание множество факторов. В зависимости от характера снимаемой территории и цели сканирования следует грамотно подбирать алгоритмы фильтрации, их параметры, а также учитывать внешние условия, при которых выполнялась съемка. Из-за большого количества различных факторов разработка универсальной методики фильтрации представляет собой сложную задачу, решить которую возможно, лишь проанализировав большое количество данных лазерного сканирования. Итоговая разработанная методика должна подходить для наиболее сложных условий съемки и содержать ряд рекомендаций, позволяющих

выполнить фильтрацию данных с минимальной потерей полезной информации путем изменения параметров отдельных входящих в ее состав алгоритмов.

Исходные данные для фильтрации

Для разработки методики фильтрации данных МЛС были выбраны результаты съемки территории автомобильной дороги Талакан – Витим на участок, включающий как примыкающие промышленные объекты и строения, так и большое количество разнообразной растительности: травянистую, кустарниковую и лесные массивы. Сканирование было выполнено со средней скоростью 40 км/ч с помощью системы МЛС Riegl VMX-250 в сырую погоду: территория содержала большое количество луж как на асфальтовом покрытии дороги, так и за его пределами. Это вызывало большое количество переотражений и появление ошибочных ТЛО в виде зеркально расположенных относительно горизонтальной плоскости объектов под землей. На рис. 3 с отображением по интенсивности и по высоте показан исследуемый участок с видом сверху, а на рис. 4 – его поперечное сечение. При обработке данных ширина полосы съемки была ограничена в 200 м.

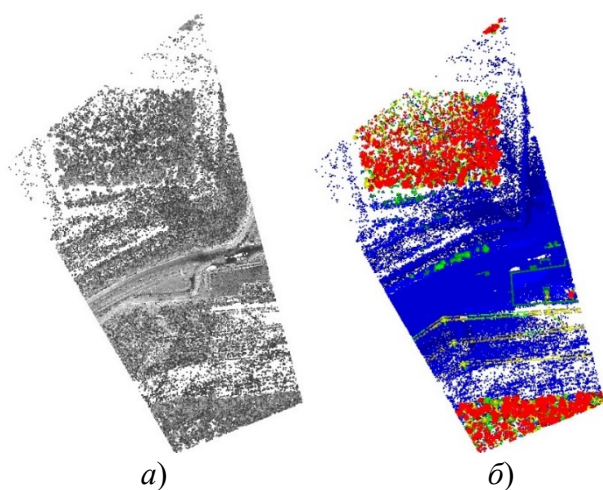


Рис. 3. Фрагмент данных МЛС:
а) по интенсивности; б) по высоте

Выбор полосы съемки можно аргументировать техническими характеристиками выбранной системы МЛС, наличием большого

количества растительности и целью фильтрации. Съемка территории выполнялась с максимальной частотой зондирующих импульсов 600 кГц и частотой сканирования 200 Гц. По техническим характеристикам системы [20] максимальный диапазон измерений для этой частоты зондирующих импульсов составляет 200 м. Основная цель фильтрации на таком типе территории – это выделение точек истинной земли под растительностью с сохранением ТЛО, характеризующих основные контуры промышленных объектов и сооружений. Согласно формуле (2) и значению коэффициента прозрачности для создания ЦМР на лесные массивы полезная дальность действия составляет 110 м.

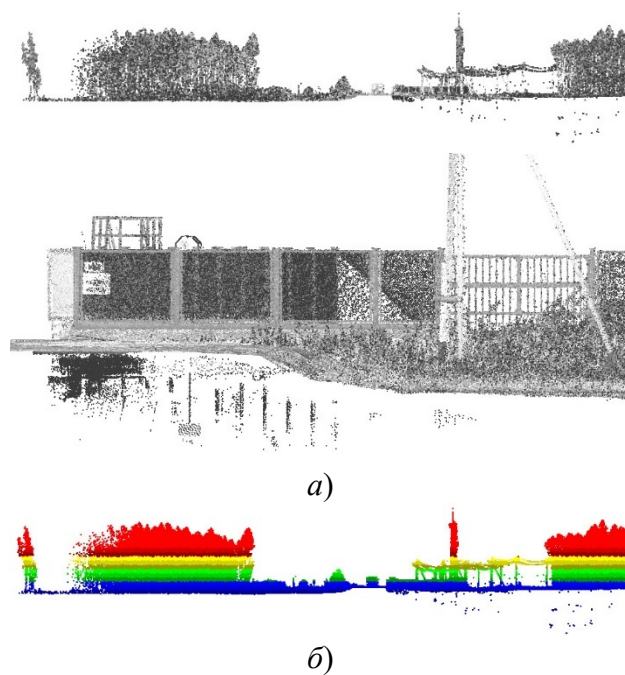


Рис. 4. Поперечное сечение фрагмента данных МЛС:
а) по интенсивности; б) по высоте

Присутствие точек переотражений на выбранном участке (рис. 4) значительно усложняет выделение точек истинной земли. В этом случае автоматическое удаление ложных точек для создания высокоточной ЦМР возможно при совместном анализе пространственного взаимного положения ТЛО в массиве, их значений интенсивности и порядковых номеров отражений.

Выбор алгоритмов фильтрации данных МЛС

При разработке методики фильтрации данных МЛС для выделения точек истинной земли был применен алгоритм Аксельсона [21–23]. Алгоритмы выделения точек истинной земли можно отнести к отдельной узконаправленной группе методов фильтрации. Согласно одной из классификаций, описанной в [24], все алгоритмы выделения точек истинной земли можно отнести к одному из следующих видов: алгоритмы морфологической фильтрации, прогрессивного сгущения, фильтрации на основе поверхностей и фильтрации на основе сегментов. Итерационный алгоритм Аксельсона относится к группе алгоритмов прогрессивного сгущения. В начале весь массив ТЛО разбивается на ячейки определенного крупного размера, в каждой из которых определяется точка с минимальным значением высоты. Размер ячейки выбирается по наибольшему объекту в массиве ТЛО. Для воздушного лазерного сканирования такими объектами являются здания. Чтобы точки земли не оказались на крышах зданий, размер ячейки должен превышать их площадь. По найденным точкам строится триангуляционная сеть в качестве начального приближения. На следующих итерациях в триангуляционную сеть включаются новые точки согласно значениям угла и дистанции приближения. Угол приближения – это максимальный угол между точкой-кандидатом, ее проекцией на грань треугольника и ближайшей вершиной треугольника. Дистанция приближения – это максимальная длина перпендикуляра, опущенного из точки-кандидата на грань треугольника. Итерационный процесс заканчивается, когда новые точки уже не могут быть включены в триангуляционную сеть согласно заданным пороговым значениям угла и длины приближения [21–25].

Описанный алгоритм выделения точек истинной земли работает тем лучше, чем меньше под землей и в воздухе присутствует ложных точек. Для фильтрации ложных точек применялись три следующих алгоритма [23]:

- классификация нижних точек;
- классификация воздушных точек;

– классификация точек, расположенных ниже поверхности.

Алгоритм классификации нижних точек позволяет найти расположенные под уровнем истинной земли как одиночные ложные точки, так и их группы. Выполняется поиск максимально заданного количества точек в группе, расположенных в пределах указанной площади ниже заданного расстояния относительно всех остальных.

Алгоритм классификации воздушных точек выполняет поиск ложных точек на основе вычисления среднего значения отметки и среднего квадратического отклонения (СКО) значений отметок точек, расположенных в пределах указанного радиуса. Минимальное количество точек в пределах радиуса не должно быть менее указанного пользователем значения. Точка классифицируется как воздушная в случае, если ее отметка отличается от среднего значения отметки больше, чем на произведение значения СКО и выбираемого коэффициента.

Алгоритм классификации точек, расположенных ниже поверхности, выполняет поиск ошибочно классифицированных точек истинной земли. Для каждой точки алгоритм находит до 25 соседних точек, в которые вписывает плоскую или сплайновую поверхность. Вычисляется среднее значение разности высот между точками и поверхностью. Решение об исключении точки из поверхности принимается в том случае, если разность между ее высотой и высотой вписанной поверхности превышает результат произведения рассчитанного среднего значения разности высот и выбираемого коэффициента.

Выбор описанных четырех алгоритмов для фильтрации ТЛО был обоснован характером сканируемой территории, большим количеством точек переотражений из-за съемки в сырую погоду и возможностями применяемого программного обеспечения [23].

Методика фильтрации данных МЛС

Для того, чтобы оценивать точность автоматической фильтрации ТЛО с целью построения ЦМР вначале было выполнено ее создание только на основе алгоритма выделения точек истинной земли Аксельсона с последую-

щей интерактивной классификацией и без нее. В результате анализа большого количества результатов МЛС, полученных при разных погодных условиях для автомобильных дорог различной конфигурации, были определены наиболее оптимальные параметры данного алгоритма: размер ячейки 10 м, угол приближения 8°, дистанция приближения 1 м. На рис. 5 продемонстрированы результаты построения ЦМР по классифицированным точкам истинной земли. Все расположенные под уровнем земли ложные точки, показанные на рис. 4, оказали отрицательное влияние на достоверность построения ЦМР (рис. 5, а). Все ошибки автоматической классификации были интерактивно устранены для создания набора контрольных точек по высоте, располагаемых в узлах сетки размером 1×1 м² (рис. 5, б). В таблице показаны результаты оценки точности автоматически построенной ЦМР на основе созданного набора контрольных точек. Количество контрольных точек составило 23 493. Большое значение минимальной ошибки отражает наличие ложных точек под уровнем истинной земли, а максимальной – в воздухе или

на кронах деревьев. Результаты точности автоматически построенной ЦМР свидетельствуют о необходимости применения дополнительных алгоритмов фильтрации и разработке соответствующей методики.

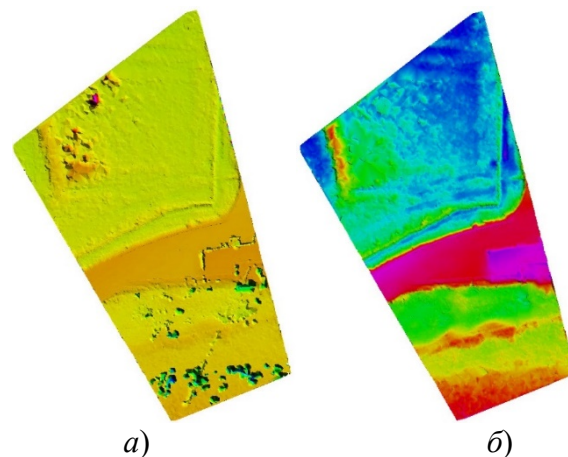


Рис. 5. ЦМР, построенная после классификации точек истинной земли: а) классификация по алгоритму Аксельсона; б) классификация по алгоритму Аксельсона с последующей интерактивной классификацией

Оценка точности построения ЦМР по автоматически классифицированным точкам истинной земли

ЦМР \ Ошибка, м	Рис 5, а	Рис 8, а	Рис 8, б	Рис 8, в	Рис 8, в, 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
Максимальная отрицательная ошибка	-18,670	-11,551	-0,533	-1,155	-0,153
Максимальная положительная ошибка	13,955	11,165	11,836	1,366	0,162

Методика автоматической фильтрации данных МЛС была разработана по описанному участку, но также протестирована для территорий с большим количеством промышленных объектов и совсем без них. Ее реализация была осуществлена на основе

ряда макросов, созданных с помощью системы автоматизированного проектирования Microstation и программного комплекса TerraSolid, который является набором дополнительных модулей для Microstation. Макросы представляют собой список ко-

манд с указанием порядка их запуска, используют язык программирования Microstation Development Language. Методика применяет описанные в предыдущем разделе алгоритмы, информацию об интенсивности отраженного сигнала и номере отражения за

один импульс. Из рис. 6 видно, что на участок растительности за каждый импульс получается большое количество ТЛЮ. В совокупности с их значениями интенсивности можно выполнить удаление большинства ложных точек.

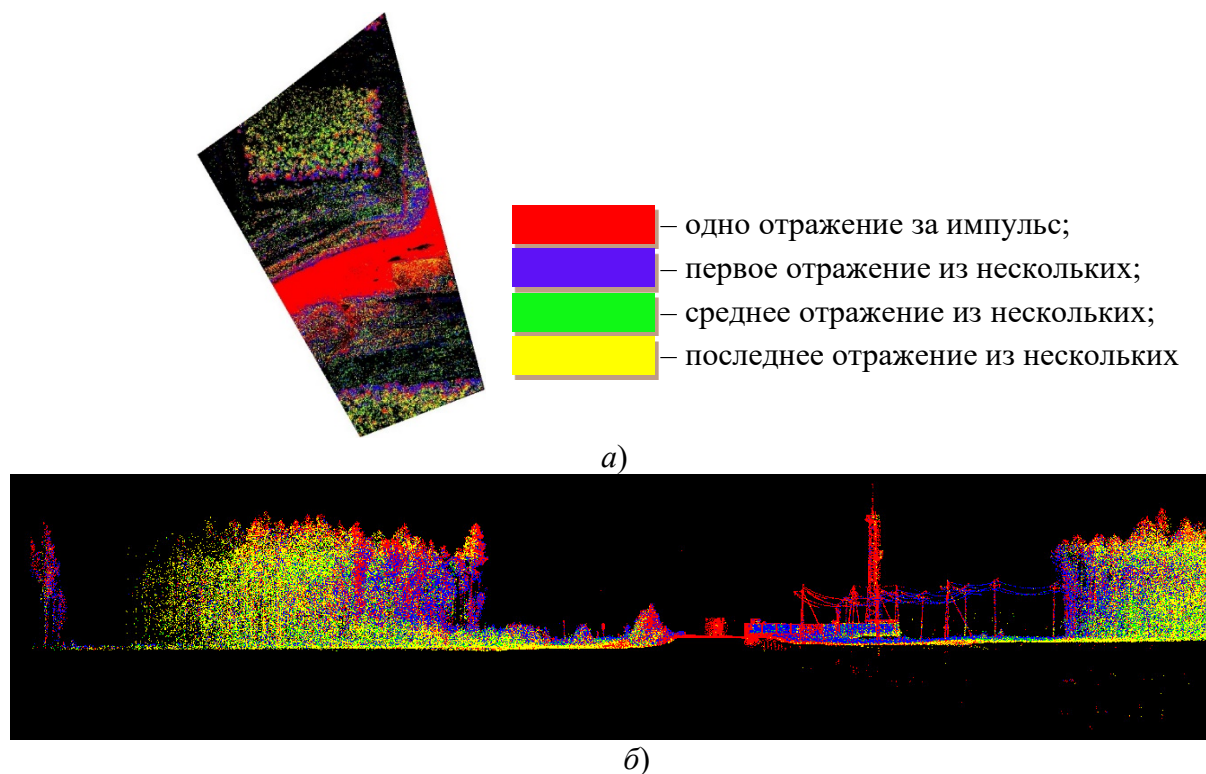


Рис. 6. Фрагмент данных МЛС с отображением по номеру отражения:

а) вид сверху; б) поперечное сечение

Поэтапно методику фильтрации можно представить в следующем виде:

1. Удаление точек, полученных в результате одного отражения за импульс, с интенсивностью более 8 000.

2. Удаление всех точек с интенсивностью более 15 000 (рис. 7).

3. Классификация точек истинной земли по алгоритму Аксельсона с приведенными ранее значениями параметров. На рис. 8, а показаны промежуточные результаты построения ЦМР, а в таблице – результаты ее оценки точности.

4. Перенос точек, полученных в результате одного отражения за импульс, из класса истинной земли в отдельный временный класс.

5. Перенос точек из временного класса в класс нижних точек путем применения алго-

ритма классификации нижних точек при следующих параметрах: максимальное количество точек в группе – 99, площадь – 0,09 м², расстояние – 0,03 м. Повторное применение алгоритма при параметрах: максимальное количество точек в группе – 10, площадь – 1 м², расстояние – 0,3 м.

6. Перенос точек из временного класса в класс истинной земли.

7. Перенос точек из класса истинной земли в класс нижних точек путем применения алгоритма классификации нижних точек при следующих параметрах: максимальное количество точек в группе – 10, площадь – 0,09 м², расстояние – 0,03 м. Повторное применение алгоритма при параметрах: максимальное количество точек в группе – 30, площадь – 25 м², расстояние – 0,3 м. Повторное применение алгоритма при параметрах: мак-

симальное количество точек в группе – 30, площадь – 1 м², расстояние – 0,1 м.

8. Перенос точек из класса истинной земли в класс нижних точек путем применения алгоритма классификации точек, расположенных ниже поверхности, при следующих параметрах: среднее значение разности высот – 0,05 см, коэффициент – 3 (рис 8, б, таблица).

9. Перенос точек, у которых количество отражений за один импульс больше одного, из класса истинной земли во второй временный класс. Классификация перенесенных точек в первый временный класс путем применения алгоритма классификации воздушных точек при следующих параметрах: радиус поиска – 30 м, коэффициент – 1, минимальное количество точек – 3.

10. Перенос точек из второго временного класса в класс истинной земли.

11. Классификация перенесенных точек из класса истинной земли в класс нижних точек путем применения алгоритма классификации воздушных точек при следующих параметрах:

радиус поиска – 10 м, коэффициент – 4, минимальное количество точек – 3 (рис 8, в, таблица).

Применение методики фильтрации позволило значительно повысить точность автоматического создания итоговой ЦМР. Средняя ошибка создания ЦМР стала удовлетворять требованиям инструкции по топографической съемке, выполняемой с высотой сечения рельефа 0,25 см. Максимальные ошибки построения итоговой ЦМР возникли на крайних частях исследуемого участка, занимаемых лесными массивами. Количество точек с ошибками, превышающими точность топографической съемки с высотой сечения рельефа 0,25 см, составило 1,2 %. Наличие большого числа контрольных точек с такими ошибками связано с сильным снижением плотности данных при удалении от траектории съемки и присутствием высокой растительности на концах полосы съемки. Алгоритмы фильтрации в этом случае частично удаляют точки, соответствующие истинной земле.

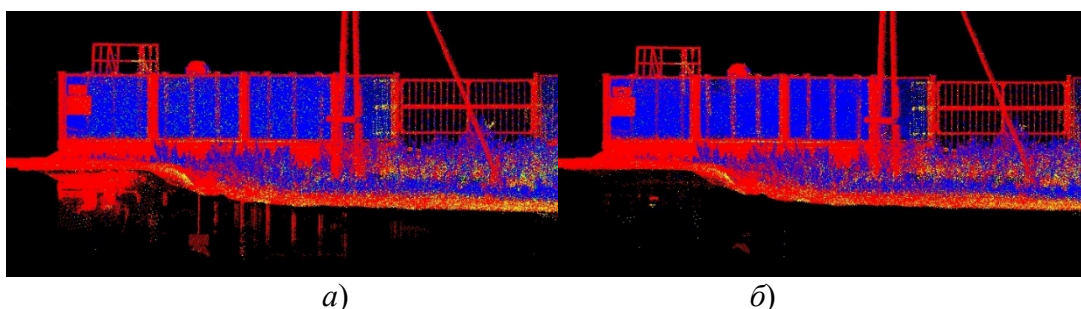


Рис. 7. Данные МЛС с отображением по номеру отражения:
а) до удаления ТЛО по интенсивности; б) после удаления ТЛО по интенсивности

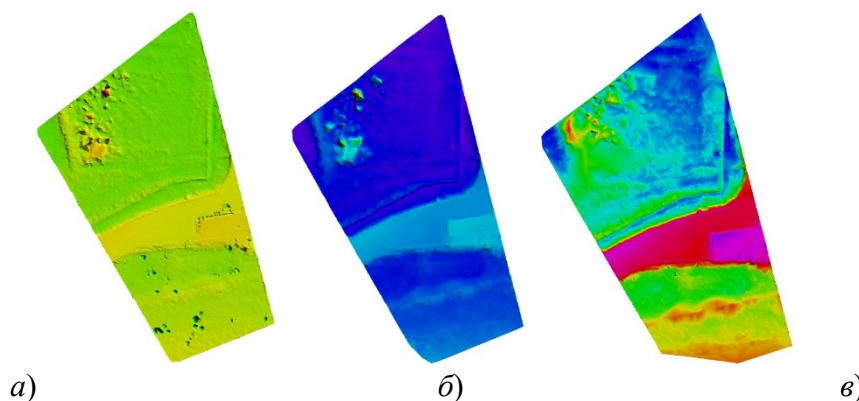


Рис. 8. ЦМР после этапов фильтрации:
а) после удаления ТЛО по интенсивности и номеру отражения; б) после фильтрации по алгоритмам поиска нижних точек и расположенных ниже поверхности; в) после фильтрации по алгоритму поиска воздушных точек

Если полосу съемки снизить с 200 до 100 м от центра автомобильной дороги, то максимальные ошибки начинают укладываться в требования инструкции по топографической съемке (см. таблицу). Уменьшенная полоса включает преимущественно травянистую и кустарниковую растительность, захватывая лишь незначительную часть лесного массива – около 20 м² в северной части.

Таким образом, в пределах уменьшенной полосы разработанная методика позволяет полностью автоматически удалить все ложные точки, возникающие в результате переотражений от водных поверхностей, сохранив точки реальных объектов. При исходной полосе съемки методика позволяет снизить объем камеральных работ, затрачиваемых на интерактивную классификацию.

В результате тестирования методики на других данных было определено, что в случае уменьшения частоты сканирования и частоты зондирующих импульсов при съемке покрытых растительностью территорий необходимо уменьшать скорость движения транспортного средства с установленной системой

МЛС, чтобы плотность массива ТЛО оставалась как на исследуемом участке. При сканировании территорий без растительности с меньшей частотой методика автоматически удаляет ложные точки в пределах допусков инструкции и при полосе съемки 200 м.

Заключение

Разработанная методика фильтрации данных МЛС позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на их предварительную обработку. Используя алгоритмы фильтрации, также можно добиться высокой точности построения ЦМР с минимальной необходимостью применения интерактивных инструментов классификации ТЛО. Методика была разработана для территорий с большим количеством растительности, когда плотность данных по уровню истинной земли существенно снижается, а также протестирована для других участков местности. Ее особенностью является применение алгоритмов фильтрации совместно с информацией об интенсивности и мере отражения каждой точки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 121–139.
2. Середович В. А., Алтынцев М. А., Попов Р. А. Особенности применения данных различных видов лазерного сканирования при мониторинге природных и промышленных объектов // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18.1 – С. 141–144.
3. Kumar P. Road Features Extraction Using Terrestrial Mobile Laser Scanning System: Doctor's thesis. – National University of Ireland Maynooth, 2012. – 270 p.
4. Медведев Е. М., Данилин И. М., Мельников С. Р. Лазерная локация земли и леса : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Геолидар, Геоскосмос; Красноярск : Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.
5. Комиссаров А. В., Алтынцев М. А. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с.
6. Алтынцев М. А., Каркокли Хамид Маджид Сабер. Особенности предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 239–248.
7. Yong-hua S., Xu-qing Z., Xue-feng N., Guo-dong Y., Ji-Kai Z. Denoising algorithm of airborne LIDAR point cloud based on 3D grid // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2017. – Vol. 10, No 2. – P. 85–92.

8. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
9. Климков Ю. М., Майоров В. С., Хорошев М. В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. – М. : МИИГАиК, 2014. – 108 с.
10. Kalashnikova O. V., Willebrand H. A., Mayhew L. M. Wavelength and altitude dependence of laser beam propagation in dense fog // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2002. – Vol. 4635. – P. 279–288.
11. Айрапетян В. С., Ушаков О. К. Физика лазеров. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 134 с.
12. Борейшо В. А., Клочков Д. В., Коняев М. А., Никулин Е. Н. Военные применения лазеров. – СПб. : Балт. гос. тех. ун-т., 2015. – 103 с.
13. Dickey F. M. Laser Beam Shaping: Theory and Techniques. – 2nd ed. – CRC Press, 2017. – 589 p.
14. Rakotosaona M.-J., Barbera V. L., Guerrero P., Mitra N. J., Ovsjanikov M. Pointcleannet: learning to denoise and remove outliers from dense point clouds // arXiv:1901.01060v3. – 2019. – P. 1–17.
15. Han X.-F., Jin J. S., Wang M.-J., Jiang W., Gao L., Xiao L. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud // Signal Processing: Image Communication. – 2017. – Vol. 57. – P. 103–112.
16. Levin D. The approximation power of moving least-squares // Mathematics of computation. – 1998. – Vol. 67, No. 224. – P. 1517–1531.
17. Lozes F., Elmoataz A., Lézoray O. Partial difference operators on weighted graphs for image processing on surfaces and point clouds // IEEE Trans. Image Process. – 2014. – Vol. 23, No. 9. – P. 3896–3909.
18. Zaman F., Wong Y. P., Ng B. Y. Density-based denoising of point cloud // ArXiv preprint arXiv:160205312. – 2016.
19. Orts-Escolano S., Morell V., García-Rodríguez J., Cazorla M. Point cloud data filtering and downsampling using growing neural gas // Neural Networks (IJCNN), The 2013 International Joint Conference on, Dallas, TX. – 2013. – P. 1–8.
20. Сайт компании «Riegl» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://riegl.ru/produksija/mobilnye-lazernye-skanery/11-riegl-vmx-250.html> (дата обращения 01.04.2021).
21. Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models // International Archives of ISPRS. – 2000. – Vol. XXXIII-4. – P. 111–118.
22. Bakuła K., Pilarska-Mazurek M., Salach A., Kurczyński Z. Detection of Levee Damage Based on UAS Data-Optical Imagery and LiDAR Point Clouds // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2020. – Vol. 9, No 4. – P. 248.
23. TerraScan User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (дата обращения 01.04.2021).
24. Vosselman G., Maas H. G. Airborne and terrestrial laser scanning. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 318 p.
25. Антипов А. В. Влияние плотности точек воздушного лазерного сканирования на точность создания цифровой модели рельефа местности // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч 1. – С. 18–23.

Получено 12.04.2021

© М. А. Алтынцев, Каркоккли Хамид Маджид Сабер, 2021

TECHNIQUE OF AUTOMATIC MOBILE LASER SCANNING DATA FILTERING

Maxim A. Altyntsev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (952)915-29-80, e-mail: mnbvc@mail.ru

Karkokli Hamid Majid Saber

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (923)173-41-25, e-mail: enghamid72@yahoo.com

The result of laser scanning is an array of laser points. The generation of a single point cloud in a given coordinate system is carried out during the registration process at the stage of preliminary field data processing. At this stage it is also often necessary to filter the data. Laser points with an erroneous position are eliminated during the data filtering. The number of erroneous laser points is determined by the of the laser scanner characteristics, surveyed area peculiarities and weather conditions. The development of methods and algorithms for filtering laser scanning data is carried out based on the analysis of the laser point spatial position and a certain set of additional characteristics, such as intensity value, echo signal, color value. The technique of mobile laser scanning data filtering for the territory of the road passing among the forest and close to individual industrial facilities and building. The main goal of the proposed filtration technique is to obtain data for automatic generation of an accurate digital terrain model. The filtration technique was developed for data acquired under the least favorable conditions – in wet weather. Accuracy estimation of generating digital terrain model based on filtered data was carried out.

Keywords: mobile laser scanning, data filtering, vegetation, digital terrain model, accuracy estimation

REFERENCE

1. Altyntsev, M. A. (2020). The technique for creating digital three-dimensional models of oil and gas manufacturing facility object infrastructure using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 121–139 [in Russian].
2. Seredovich, V. A., Altyntsev M. A., & Popov, R. A. (2013). Features of different laser scanning data type application in monitoring of natural and industrial objects. *Vychislitelnye tekhnologii [Computational Technologies]*, 18.1, 141–144 [in Russian].
3. Kumar, P. (2012). Road Features Extraction Using Terrestrial Mobile Laser Scanning System. Doctor's thesis. National University of Ireland Maynooth, 270 p.
4. Medvedev, E. M., Danilin, I. M., & Melnikov, S. R. (2007). *Lazernaya lokaciya zemli i lesa [LiDAR of ground and forest]*. Moscow: Geolidar, Geospace Publ.; Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forest SB RAS Publ., 230 p. [in Russian].
5. Komissarov, A. V., & Altyntsev, M. A. (2020). *Metod aktivnogo distancionnogo zondirovaniya: lazernoe skanirovanie [Active remote sensing method: laser scanning]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 254 p. [in Russian].
6. Altyntsev, M. A., & Karkokli Hameed Majeed Saber. (2019). Peculiarities of preliminary mobile laser scanning data processing. In *Sbornik materialov Interesko Geo-Sibir-2019: T. 4, no. 2 [Proceedings of Inter-expo GEO-Siberia-2019: Vol. 1, No. 1]* (pp. 239–248). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
7. Yong-hua, S., Xu-qing, Z., Xue-feng N., Guo-dong, Y., & Ji-Kai, Z. (2017). Denoising algorithm of airborne LIDAR point cloud based on 3D grid. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 10(2), 85–92.
8. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Terrestrial laser scanning]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 261 p. [in Russian].
9. Klimkov, Yu. M., Majorov, V. S., & Horoshev, M. V. (2014). *Vzaimodejstvie lazernogo izlucheniya s veshhestvom [Interaction of laser radiation with substance]*. Moscow: MIIGAiK Publ., 108 p. [in Russian].
10. Kalashnikova, O. V., Willebrand, H. A., & Mayhew, L. M. (2002). Wavelength and altitude dependence of laser beam propagation in dense fog. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 4635, 279–288.
11. Ajrapetyan, V. S., & Ushakov, O. K. (2012). *Fizika lazerov [Laser physics]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 134 p. [in Russian].
12. Borejsho, V. A., Klochkov, D. V., Konyaev, M. A., & Nikulin, E. N. (2015). *Voenny'e primeneniya lazerov [Military applications of lasers]*. Saint-Petersburg: Baltic State Technical University Publ., 103 p. [in Russian].
13. Dickey, F. M. (2017). *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques* (2nd ed.). CRC Press, 589 p.
14. Rakotosaona, M.-J., Barbera, V. L., Guerrero, P, Mitra, N. J., & Ovsjanikov, M. (2019). Pointcleanet: learning to denoise and remove outliers from dense point clouds, *arXiv:1901.01060v3*, 1–17.
15. Han, X.-F., Jin, J. S., Wang, M.-J., Jiang, W., Gao, L., & Xiao, L. (2017). A review of algorithms for filtering the 3D point cloud. *Signal Processing: Image Communication*, 57, 103–112.

16. Levin, D. (1998). The approximation power of moving least-squares. *Mathematics of computation*, 67(224), 1517–1531.
17. Lozes, F., Elmoataz, A., & Lézoray, O. (2014). Partial difference operators on weighted graphs for image processing on surfaces and point clouds. *IEEE Trans. Image Process*, 23(9), 3896–3909.
18. Zaman, F., Wong, Y. P., & Ng, B. Y. (2016). Density-based denoising of point cloud. *ArXiv preprint arXiv:160205312*.
19. Orts-Escolano, S., Morell, V., García-Rodríguez, J., & Cazorla, M. (2013). Point cloud data filtering and downsampling using growing neural gas. *Neural Networks (IJCNN), the 2013 International Joint Conference on, Dallas, TX* (pp. 1–8).
20. Website of Riegl company. (n. d.). Retrieved from <https://riegl.ru/produksija/mobilnye-lazernye-skanery/11-riegl-vmx-250.htm> (accessed 01.04.2021).
21. Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of ISPRS, XXXIII-4*, 111–118.
22. Bakula, K., Pilarska-Mazurek, M., Salach, A., & Kurczyński, Z. (2020). Detection of Levee Damage Based on UAS Data-Optical Imagery and LiDAR Point Clouds. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), P. 248.
23. TerraScan User Guide. (n. d.). Retrieved from <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (accessed 01.04.2021).
24. Vosselman, G., & Maas, H. G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Boca Raton: CRC Press, 318 p.
25. Antipov, A. V. (2010). Points' density influence of the airborne laser scanning on the accuracy of digital elevation model creation. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2010: T. 4, no. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2010: Vol. 4, No. 1]* (pp. 18–23). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

Received 12.04.2021

© M. A. Altyntsev, Karkokli Hamid Majid Saber, 2021