

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 681.5:528.721.221.6

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-4-5-23

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УРАВНИВАНИЯ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Максим Александрович Алтынецв

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

Уравнивание является основным этапом предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования (МЛС). В результате этого этапа формируется единый массив точек лазерных отражений (ТЛО) в требуемой системе координат. Современное программное обеспечение, поставляемое в комплекте с соответствующим съемочным комплексом, способно выполнить в автоматическом режиме большинство этапов уравнивания данных МЛС, полученных для территорий с различным характером застройки. При достаточном количестве вертикально расположенных плоских объектов, таких как стены зданий, алгоритмы, заложенные в программное обеспечение, обеспечивают высокую точность взаимного уравнивания, которое заключается в вычислении и применении поправок к позиции траекторий, полученных при повторном сканировании одного и того же участка местности. Этап внешнего уравнивания, заключающийся в трансформировании массива ТЛО по измеренным более высокоточными методами геодезической съемки координатам опорных точек, также может быть осуществлен автоматически при соблюдении правил размещения этих точек с целью их автоматического распознавания. Точность автоматического взаимного уравнивания может существенно снижаться при практически полном отсутствии плоских вертикальных объектов. В этом случае требуется осуществлять разработку дополнительных методик уравнивания, способных использовать не только плоские объекты большой площади, но и вертикальные объекты другого характера, такие как дорожные знаки и опорные сооружения. В статье предложена комплексная методика уравнивания данных МЛС, способная для территорий с недостаточным количеством плоских вертикальных объектов использовать информацию о положении дорожных знаков и опорных сооружений. Выполнена оценка точности как взаимного уравнивания данных МЛС по предложенной методике, так и внешнего. Обоснован выбор необходимой плотности размещения опорных точек для территорий с различным характером застройки.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, уравнивание данных, вертикальные объекты, опорные точки, оценка точности

Введение

Мобильное лазерное сканирование представляет собой один из самых современных методов геодезической съемки. В процессе

движения транспортного средства, на которое установлена система МЛС, осуществляется запись данных об окружающем пространстве. Результатами совместной обработки информации, полученной с помощью

входящего в состав системы МЛС оборудования, такого как приемники глобальных навигационных спутниковых систем, инерциальная навигационная система, цифровые камеры, лазерные сканеры, блок управления, являются траектория движения, цифровые фотографии и массив ТЛЮ. Технология МЛС может применяться для решения различных производственных задач, связанных со съемкой местности. На основе полученных данных создают топографические планы территорий, трехмерные модели зданий и сооружений, выполняют построение продольных и поперечных профилей автомобильных дорог, выявляют дефекты дорожного полотна и других объектов. Технология МЛС характеризуется высокой точностью и скоростью сбора данных, степень автоматизации их обработки находится на достойном уровне [1, 2].

В большинстве случаев для получения данных МЛС в достаточном объеме необходимо осуществить многократное сканирование одной и той же местности. Повторное сканирование позволяет повысить плотность данных, что положительно сказывается на результатах создания конечной продукции, но в то же время вызывает проблему дублирования массивов ТЛЮ в зонах перекрытия. Требуется выполнять уравнивание массивов ТЛЮ относительно друг друга. То, насколько сильно расходятся отдельные массивы точек в зонах перекрытия, зависит от качества приема спутникового сигнала, погодных условий, характеристик съемочной системы и от того, насколько далеко удаляется в процессе сканирования съемочная система от базовой станции [3].

Необходимо дополнительно учитывать, что дублирование данных может возникать и при сканировании только в одном направлении. Такая ситуация обуславливается тем, что элементы взаимного ориентирования лазерных сканеров рассчитаны с низкой точностью. Так как в состав системы МЛС, как правило, входят два двумерных лазерных сканера, то дублирование образуется между полученными ими массивами точек. Расчет точных значений элементов взаимного ориентирования лазерных сканеров обычно выполняется в процессе калибровки системы МЛС в результате тестовых заездов [4, 5]. Для съемочных систем, в которых лазерные сканеры

жестко связаны между собой с помощью специального крепежа, элементы взаимного ориентирования не меняются при повторной установке системы МЛС на транспортное средство. Калибровочная процедура осуществляется единожды на заводе-изготовителе. Если сканеры не имеют жесткой связи, калибровочную процедуру необходимо осуществлять каждый раз заново при новой установке. В [1] приведен пример методики расчета параметров калибровки.

Помимо повышения плотности, повторное сканирование приводит к увеличению итоговой, внешней, точности данных. При большом количестве повторных проездов взаимное уравнивание данных лазерного сканирования позволяет увеличить точность положения массива ТЛЮ во внешней системе координат. Для достижения еще большей точности применяют опорные точки, координаты которых измеряют другими геодезическими методами. При выборе плотности размещения опорных точек, кроме приведенных выше условий, влияющих на точность уравнивания массивов ТЛЮ, необходимо руководствоваться требованиями точности создания определенной конечной продукции [6].

В настоящее время основной задачей всех исследований, выполняемых в рамках вопроса уравнивания массивов ТЛЮ, является повышение степени автоматизации данного процесса при минимальном объеме полевых работ, связанных с созданием планово-высотного обоснования (ПВО) для МЛС.

Разработка методик уравнивания

Уравнивание массивов ТЛЮ является одним из основных этапов предварительной обработки данных МЛС. До уравнивания массивов точек должны быть выполнены следующие стадии предварительной обработки [7]:

- уравнивание точек траекторий, записанных с помощью спутниковых антенн системы МЛС, относительно базовых станций;
- ориентация и сгущение траектории, при котором уравненная траектория дополняется множеством промежуточных точек;
- генерация массивов точек за счет совместной обработки уравненной траектории

и дальномерных расстояний, измеренных лазерными сканерами.

Эти стадии предварительной обработки выполняются в специализированных программных комплексах (ПК), поставляемых вместе с системой МЛС. Алгоритмы, заложенные в таких ПК, полностью автоматически уравнивают траектории и генерируют массивы точек.

Задача автоматизации уравнивания сгенерированных массивов точек является более сложной. Она решается различными способами. В большинстве ПК от компаний-производителей лазерных сканеров стадия автоматического взаимного уравнивания осуществляется путем поиска плоских участков массива точек. Уравнивание высотного положения выполняется по горизонтальным плоскостям, а планового – по вертикальным. Вписывание горизонтальных плоскостей, как правило, осуществляется в точки поверхности земли, и сложностей взаимного уравнивания высотного положения не возникает на любых территориях. В свою очередь, автоматическое уравнивание планового положения с высокой точностью возможна только в случае съемки территорий с присутствием плоских вертикальных объектов, таких как стены зданий. Для достижения максимальной точности автоматического взаимного уравнивания, сканирование рекомендуется осуществлять в различных направлениях, выполняя движение вокруг строений и сооружений [8]. Поиск поправок в положение массивов точек обычно осуществляется с помощью итеративного алгоритма ближайших точек ICP или его модификаций [1]. Методики уравнивая в ПК от компаний-производителей лазерных сканеров подобны тем, что описаны в [9–11].

Чтобы повысить точность автоматического уравнивания массивов ТЛЮ, выполняемого в ПК от компаний-производителей лазерных сканеров, часто разрабатываются дополнительные программные модули и специальные методики обработки данных. В [3] приведен пример такой разработки, которая заключается в предварительном разделении сырых данных в виде траекторий и массивов точек, полученных мобильными лазерными сканерами от фирмы Riegl, на короткие

участки с продольными перекрытиями с помощью специального программного модуля. В зонах продольных перекрытий данные МЛС повторяются. Подготовленные участки загружаются и уравниваются в ПК Riprocess, входящий в комплект поставки системы МЛС. Предварительно выполненное разделение данных позволяет добиться более точного взаимного уравнивания траекторий и массивов ТЛЮ. Описанная методика уравнивания позволяет конкурировать даже с такими, которые используют более дорогостоящее специализированное программное обеспечение, такое как TerraSolid. Применение TerraSolid предполагает дополнительное уравнивание данных после стандартной обработки в Riprocess или другом подобном ПК.

Недостатком применения ПК от компаний-производителей лазерных сканеров зачастую является закрытый программный код и относительно небольшое количество инструментов. В случае сложных внешних условий сканирования не всегда удастся добиться максимальной точности автоматического взаимного уравнивания, используя предложенные инструменты. Например, если плоские вертикальные объекты в массиве точек практически отсутствуют, что характерно для загородных территорий, или съемка осуществлялась только в прямолинейном направлении, точность взаимного уравнивания в плановом положении может оказаться на низком уровне. Тогда требуется выполнять интерактивный набор связующих точек, используя отдельные мелкие объекты, такие как опорные сооружения, светодорожные знаки и т. п. Также для набора связующих точек могут применяться углы прерывистой дорожной разметки [8, 12].

В последнее время разрабатываются алгоритмы, позволяющие автоматически идентифицировать отдельные мелкие объекты с целью взаимного уравнивания. Реализация подобных алгоритмов осуществляется с применением различных языков программирования в виде отдельных программных модулей. TerraSolid представляет собой набор таких модулей, запускаемых из ПК MicroStation. TerraSolid включает большое количество инструментов, параметры которых можно гибко настраивать под решение определенной задачи.

В [13] приведена одна из методик автоматического уравнивания на основе идентификации объектов дорожной инфраструктуры, опорных сооружений и прерывистой дорожной разметки. Предложенная методика апробирована на примере результатов сканирования городских территорий. На первом этапе идентифицируются все мелкие объекты. Затем они разделяются по группам. Это необходимо, чтобы, например, отделить группы объектов городской инфраструктуры от растительности, которая из-за неоднородной структуры оказывает отрицательное влияние на точность идентификации мелких объектов. Недостатком методики является необходимость применения данных аэрофотосъемки с пилотируемых или беспилотных летательных аппаратов для автоматической классификации мелких объектов на группы. В противном случае большинство найденных групп объектов можно идентифицировать только интерактивно.

Для автоматической идентификации групп объектов без применения результатов аэрофотосъемки может быть использован метод классификации с обучением. Данный метод реализован во многих ПК обработки данных дистанционного зондирования Земли. Он также используется в TerraSolid [14]. Согласно этому методу классификации, сначала выполняется автоматическое разделение массива ТЛО на отдельные группы по определенным признакам. Затем осуществляется создание обучающих выборок, включающих различные группы объектов сканируемой территории. Формируется библиотека эталонов, в которой каждой группе назначается свой класс. В конце эталоны сравниваются со всеми неидентифицированными группами объектов массива ТЛО. Каждой группе массива присваивается тот класс эталона, к которому он наиболее близок. Недостатком метода является то, что результат классификации сильно зависит от плотности массива ТЛО, от количества повторных циклов сканирования территории и от того, с какой стороны идентифицируемого объекта выполнено сканирование. Также сам процесс создания библиотеки эталонов занимает длительное время [14].

Выполнив взаимное уравнивание массива ТЛО, приступают к внешнему. Во время

внешнего уравнивания данные МЛС трансформируются в местную систему координат из универсально-поперечной проекции Меркатора, первоначально применяемой при обработке сырых данных геодезических измерений. Трансформирование может быть выполнено по известным координатам пунктов съёмочного обоснования, на которых размещались базовые станции. Чтобы оценить точность трансформированных данных МЛС в известной внешней системе координат, а также повысить ее, применяют координаты опорных и контрольных точек, измеряемых вдоль траектории сканирования с помощью другого геодезического оборудования, такого как спутниковые приемники, тахеометры и нивелиры [15]. Без опорных данных точность уравниваемого массива ТЛО обычно не превышает 5 см в плановом и высотном положении при качественном спутниковом сигнале. Такой точности можно добиться при съемке территорий за пределами городской застройки с условием соблюдения ряда требований по созданию ПВО [16, 17]. В [18, 19] описаны такие требования для систем МЛС от фирмы Riegl:

- длины линий между базовой станцией ГНСС и системой МЛС не должны превышать 30 км в случае, если применяется только одна станция. В противном случае необходимо использовать сеть базовых станций;

- сеть может содержать от 4 до 50 базовых станций;

- длины базовых линий сети не должны превышать 70 км;

- система МЛС не должна покидать полигон, образованный сетью базовых станций.

Данные требования применимы и для большинства других коммерческих систем МЛС, использующих инерциальные навигационные системы (ИНС) от фирмы Aprlanix. Это связано с применением единого программного обеспечения POSPac MMS для уравнивания точек траекторий на основе совместной обработки данных спутниковых наблюдений и полученных с помощью ИНС.

Размещение опорных точек и измерение их координат геодезическим оборудованием – это трудоемкий процесс. Чтобы сократить затрачиваемое на него время, необходимо

представлять, какое влияние оказывают внешние условия съемки на точность массива ТЛО во внешней системе координат. Если вдоль траектории съемки находится большое количество высотных объектов, качество приема спутникового сигнала значительно снижается, и требуется размещать большое число опорных точек. В [20] показано, что в случае полной потери спутникового сигнала более, чем на 30 секунд, точность данных МЛС снижается в несколько раз, особенно при скорости перемещения системы МЛС более, чем 40 км/ч. На таких участках предложено с помощью краски размещать опорные точки на покрытии дороги каждые 400 м. На этапе камеральной обработки в массиве ТЛО интерактивно идентифицируют опорные точки и определяют их координаты. На основе разностей координат, полученных при МЛС и при измерениях другим геодезическим оборудованием, выполняют внешнее уравнивание.

Задача определения координат опорных точек в массиве ТЛО может быть решена автоматическим способом. Для этого опорные точки размещают на дорожном покрытии по определенным шаблонам, формам, которые должны быть известны программному обеспечению. Размещенные по известным шаблонам опорные точки снижают время камеральной обработки, но значительно его увеличивают при выполнении полевых работ.

В качестве источника опорных точек могут выступать результаты аэрофотосъемки. В [21] предложена методика автоматического уравнивания данных МЛС на основе аэрофотоснимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основная идея методики заключается в том, что на городских территориях с высотной застройкой БПЛА обеспечивают более высокую точность измерений, чем системы МЛС, так как в воздухе качество приема спутникового сигнала лучше. В качестве опорных точек предлагается использовать дорожную разметку, которая может быть автоматически идентифицирована как по данным МЛС, так и по результатам съемки с помощью БПЛА. Для этого данные МЛС представляются в виде растрового изображения с интерполированными значениями интенсивности, и вы-

полняются извлечение контуров разметки из обоих видов данных с помощью детектора углов Харриса, поиск соответствий на основе шаблонов границ разметки и уравнивание. Методика позволяет добиться точности уравнивания массивов ТЛО порядка 6–10 см при распознавании опорных точек каждые 100–200 м, но не уравнивает траектории. В [6, 22] применяется усовершенствованная методика, которая уравнивает не только массивы ТЛО, но и траектории.

Для автоматического внешнего уравнивания, как и взаимного, могут быть также применены объекты городской инфраструктуры [13].

Недостатком всех методик автоматического уравнивания по данным аэрофотосъемки является их узкая специализация, так как на всех территориях без высотных объектов точность данных МЛС выше. Кроме этого, аэрофотосъемка в большинстве ситуаций является лишним и трудоемким процессом.

Таким образом, к настоящему времени уже было разработано большое число методик автоматического взаимного и внешнего уравнивания данных МЛС. Но, чтобы добиться высокой точности, требуется перед этапом уравнивания осуществлять ряд циклов предварительной обработки, занимающих длительное время, а также выполнить большой объем дополнительных полевых измерений. Как правило, предлагаемые методики адаптированы для определенного характера застройки территории. Если для территорий с высотной застройкой точность автоматического уравнивания будет на высоком уровне, то для участков местности с минимальным количеством различных объектов и сооружений она может резко снижаться. Исходить в этом случае следует из цели лазерного сканирования, требований к точности создания конечной продукции. Решение о необходимости дополнительных полевых измерений для повышения точности исходных данных МЛС и их количестве стоит принимать, исходя из характера сканируемого участка местности. При разработке новых методик автоматического уравнивания следует опираться на комплексный подход, позволивший бы учесть большинство особенностей снимаемой территории и задаваемых пара-

метров сканирования с минимальным объемом дополнительных полевых работ.

Исходные данные

Для разработки методики уравнивания данных МЛС были использованы результаты съемок двух территорий:

– автомобильная дорога Талакан – Витим протяженностью 160 км;

– участок улицы проспект Дзержинского г. Новосибирска протяженностью 1 км.

По характеру застройки эти две территории противоположны друг другу. В пределах автомобильной дороги практически не было строений, она была окружена высокой расти-

тельностью. Среднее расстояние от дороги до деревьев составляло порядка 20 м, а их высота не превышала 30 м. Периодически встречались мелкие объекты в виде дорожных знаков и опорных сооружений. Второй участок включал высокие здания и большое количество разнообразных объектов городской инфраструктуры.

Прежде чем выполнить сканирование автомобильной дороги, было создано съемочное обоснование из шести пунктов (рис. 1). Координаты пунктов НГДУ и ДНС были известны, на них располагались постоянно действующие базовые станции. Координаты пунктов В1–В3, D20 измерялись от пунктов государственной геодезической сети посредством спутниковых наблюдений.

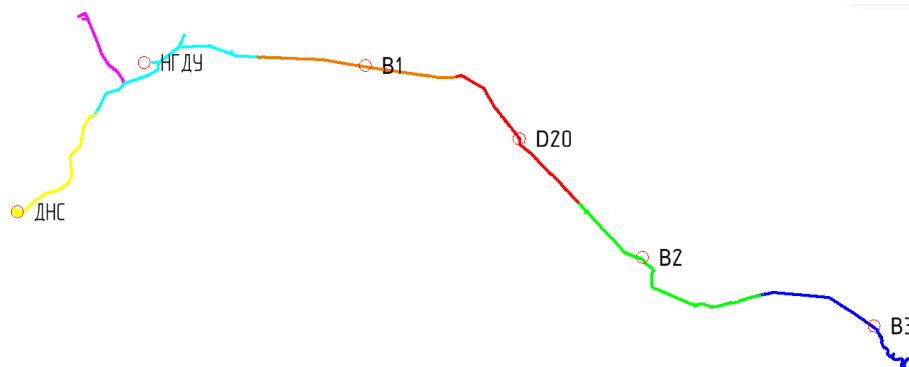


Рис. 1. Участки трассы Талакан – Витим

Сканирование выполнялось с помощью системы Riegl VMX-250 со средней скоростью 40 км/ч в прямом и обратном направлениях последовательно по участкам. Частота зондирующих импульсов задавалась 600 кГц, а частота сканирования – 200 Гц. Во время съемки каждого участка запускался сбор данных только на одной ближайшей базовой станции. Максимальное удаление от базовой станции не превысило 15 км, что в 2 раза меньше допустимого расстояния, заявленного в [19] для систем МЛС с инерциальными системами от фирмы Arplanix при съемке от одной станции. На рис. 1 каждым участком съемки помечен отдельным цветом. В начале сканировались участки от постоянно действующих базовых станций. Затем выполнялась съемка участка вокруг базовой станции В1. Далее спутниковый приемник переносился

поочередно на пункты D20, В2 и В3. По сравнению с методом создания спутниковой сети съемка по участкам позволила сократить время, затрачиваемое на установку спутниковых приемников на базовых станциях и их количество до одного. Создание сети базовых станций требует большого количества исполнителей, так как подразумевает одновременный сбор данных на станциях в процессе сканирования.

Это значительно увеличивает подготовительное время и снижает безопасность для исполнителей при съемке малонаселенных отдаленных территорий. Метод создания сети базовых станций наиболее актуален при возможности выполнить сканирование за один день. На рис. 2, а показан фрагмент результата сканирования с отображением массива ТЛО по высоте с видом сверху.

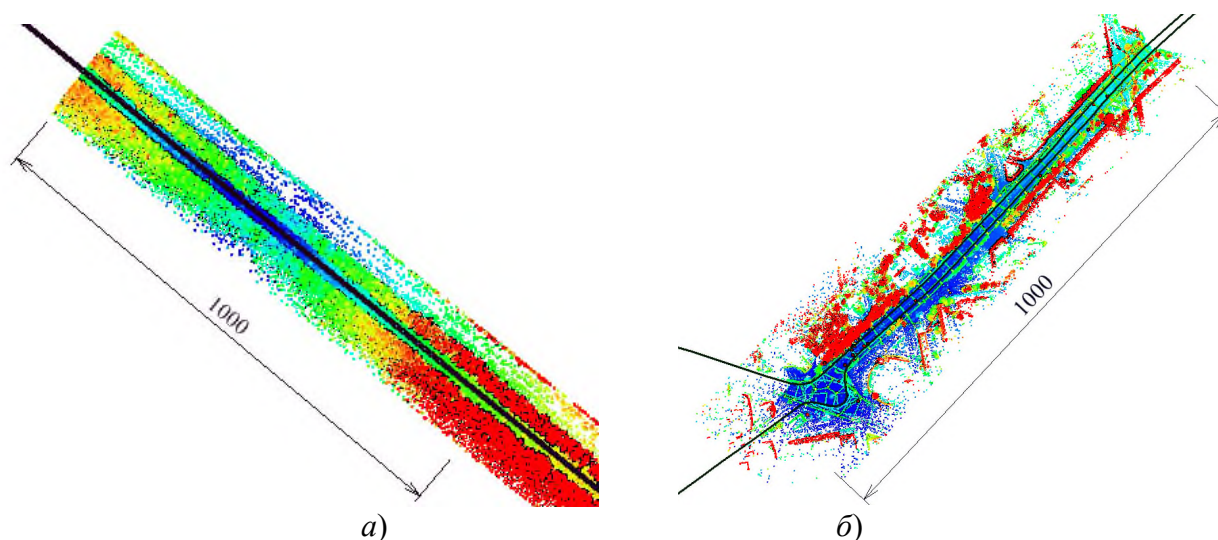


Рис. 2. Результаты МЛС:

а) участок трассы Талакан – Витим; б) участок улицы проспект Дзержинского

МЛС улиц г. Новосибирска осуществлялось от одной постоянно действующей станции NSKW. На рис. 2, б показан фрагмент результатов сканирования улиц протяженностью 1 км. Черным цветом показаны траектории сканирования.

Методика взаимного уравнивания данных МЛС

Первоначально все данные МЛС автоматически обрабатывались и уравнивались в программном обеспечении системы МЛС Riegl VMX-250: POSPac MMS и Riprocess. Так как базовые станции на каждом участке автомобильной дороги не запускались одновременно, в POSPac точки траекторий каждого участка трассы были уравнены независимо. Уравненные траектории и сырые данные лазерных сканеров загружались в ПК Riprocess, где выполнялся расчет координат точек массива. Затем осуществлялось автоматическое взаимное уравнивание массивов ТЛО для каждого участка съемки отдельно.

Массивы ТЛО, полученные методом МЛС, состоят из набора сканерных линий. Каждая сканерная линия имеет свои элементы внешнего ориентирования. Алгоритм уравнивания, заложенный в Riprocess, позволяет с высокой точностью на основе межмаршрутного перекрытия рассчитать поправки в угловые эле-

менты внешнего ориентирования каждой сканерной линии. Точность расчета линейных элементов будет зависеть от исходного качества данных и количества вертикальных плоских объектов вокруг траектории съемки.

Чтобы оценить точность взаимного уравнивания данных МЛС всех участков съемки совместно, и, в случае присутствия больших значений ошибок, выполнить дополнительное уравнивание, массивы ТЛО и траектории и импортировались в ПК TerraSolid, где выполнялась их совместная обработка с учетом анализа зон перекрытия между участками. До начала уравнивания осуществлялись такие стандартные этапы, как разделение траекторий на фрагменты согласно направлению движения, присвоение каждой ТЛО номера фрагмента траектории, с которой точка была получена, удаление лишних точек, полученных во время остановки движения, выделение в отдельный класс точек, полученных в момент поворотов [8]. Затем по алгоритмам, описанным в [14], выполнялась фильтрация, заключающаяся в удалении находящихся ниже поверхности земли или в воздухе ложных точек.

Для уравнивания данных МЛС была разработана следующая методика, все этапы которой выполняются автоматически для каждого фрагмента траектории отдельно.

1. Определение границ поиска поправок в линейные элементы внешнего ориентирова-

ния сканерных линий. Для определения ошибок высотного положения используется внутренняя зона, заключенная между траекториями съемки прямого и обратного направлений, а планового – зоны, заключенные между траекториями и внешними границами. Внешняя граница задается путем параллельного копирования траекторий на определенное расстояние, которое выбирается, исходя из местоположения различных объектов дорожной инфраструктуры, их количества и присутствия растительности. Контуры внешней границы редактируются в зависимости от присутствия объектов.

2. Классификация точек истинной земли по алгоритму Аксельсона [23].

3. Перенос точек истинной земли, расположенных между траекториями съемки, в класс дорожного покрытия.

4. Автоматический поиск соответственных линий, вписанных в точки дорожного покрытия противоположных маршрутов лазерного сканирования, каждые 10 м вдоль направления движения.

На рис. 3 приведен фрагмент результата поиска линий длиной 2 м с видом сверху, отображенных зеленым цветом. Показаны траектории движения, а область поиска заштрихована. Красным и синим цветом отображены ТЛО противоположных маршрутов.

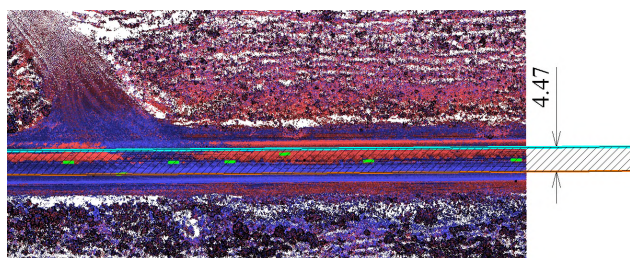


Рис. 3. Пример результата поиска соответственных линий

5. Поиск по соответственным линиям локальных поправок в высотное положение точек траекторий и ТЛО с помощью одномерного фильтра Гаусса [24]:

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

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

σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

Было определено, что для уравнивания высотного положения данных МЛС следует задавать $x = 50$ м.

В табл. 1 приведены ошибки высотного положения маршрутов для всей территории трассы Талакан – Витим, рассчитанные по разнице положения соответственных линий.

Таблица 1

Оценка точности данных МЛС до взаимного уравнивания

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

6. Применение локальных поправок к высотному положению траекторий, массива ТЛО и к файлу соответственных линий. В табл. 2 приведены результаты оценки точности взаимного уравнивания данных МЛС после применения поправок в высотное положение.

Таблица 2

Оценка точности взаимного уравнивания данных МЛС

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

7. Вычисление высоты от уровня земли для каждой точки ТЛО.

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

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

10. Вычисление нормалей в каждой ТЛО при помощи метода главных компонент за счет анализа расположения соседних точек [25]. Нормали необходимы для работы далее описываемых алгоритмов поиска групп точек и деревьев.

11. Поиск групп точек по уровню «> 1 м» на основе вычисления расстояния между соседними точками. Группы формируются из близлежащих к друг другу точек. задается минимальное количество точек для создания группы – 20 [14].

12. Перенос групп точек, попавших в зону между траекториями и внешними границами, в отдельный класс мелких вертикальных объектов.

13. Перенос групп точек из класса мелких вертикальных объектов в класс растительности с помощью алгоритма классификации деревьев ПК TerraSolid, который анализирует кроны деревьев. Для работы алгоритма задаются параметры минимальной высоты групп над уровнем истинной земли и их минимального диаметра. Чтобы проанализировать все точки класса вертикальных объектов на предмет их принадлежности к растительности, задается любое значение минимальной высоты, меньшее 1 м, и небольшое значение диаметра. В итоге для обоих параметров были заданы значения, равные 0,2 м.

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

15. Перенос групп точек, у которых максимальное значение высоты больше 13 м, из класса вертикальных объектов в класс растительности. Данное значение было выбрано исходя из максимальной высоты опорных сооружений. Таким образом, в классе вертикальных объектов остаются группы точек, максимальная высота которых над землей располагается в диапазоне 2,1–13 м.

16. Для каждой точки класса вертикальных объектов вычисляется 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. Условие изменения класса точки можно записать в виде

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

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

X_i, Y_i – координаты точки класса вертикальных объектов;

X_j, Y_j – координаты точки класса растительности.

17. Перенос точек из класса вертикальных объектов в класс растительности при условии, что в пределах области массива ТЛО объемом 0,512 м³ оказывается меньше двух точек класса вертикальных объектов.

18. Перенос точек, у которых значение высоты над землей больше 6 м, из класса вертикальных объектов во временный класс. Это позволяет исключить из дальнейшей обработки высотные части объектов. Например, исключить провода линий электропередачи (ЛЭП), так как в большинстве случаев они оказываются в одной группе с опорой и вносят большие ошибки в результаты поиска соответственных точек.

19. Автоматический поиск соответственных линий по плоским вертикально расположенным объектам массива ТЛО всех классов при следующих параметрах: длина линии – 0,3 м; глубина сечения ТЛО – 0,1 м; максимальный угол наклона линии – 10°.

Соответственные линии позволяют выполнить взаимное уравнивание массивов ТЛО при наличии большого количества стен зданий. Если такие объекты отсутствуют на территории съемки, соответственные линии могут быть найдены на больших табличках дорожных знаков, но точность взаимного уравнивания в этом случае только по автоматически найденным соответственным линиям будет низкой.

20. Автоматический поиск соответственных точек между точками класса вертикаль-

ных объектов противоположных маршрутов лазерного сканирования.

На рис. 4 показан пример результатов поиска соответственных точек на одном из участков трассы, а на рис. 5 – поперечное сечение этого участка. Для территории трассы Талакан – Витим внешняя граница поиска смещалась от траекторий сканирования на 10 м. Это было обусловлено наличием большого количества растительности и тем, что

в отведенную зону попадали все дорожные знаки. На участках трассы, где параллельно рядом проходила ЛЭП, зона смещалась за нее, но не далее, чем на 40 м. Было определено, что при сканировании системой Riegl VMX-250 с указанными ранее параметрами съемки плотности получаемых данных МЛС на большем расстоянии от траектории недостаточно, чтобы идентифицировать соответственные точки в зоне межмаршрутного перекрытия.

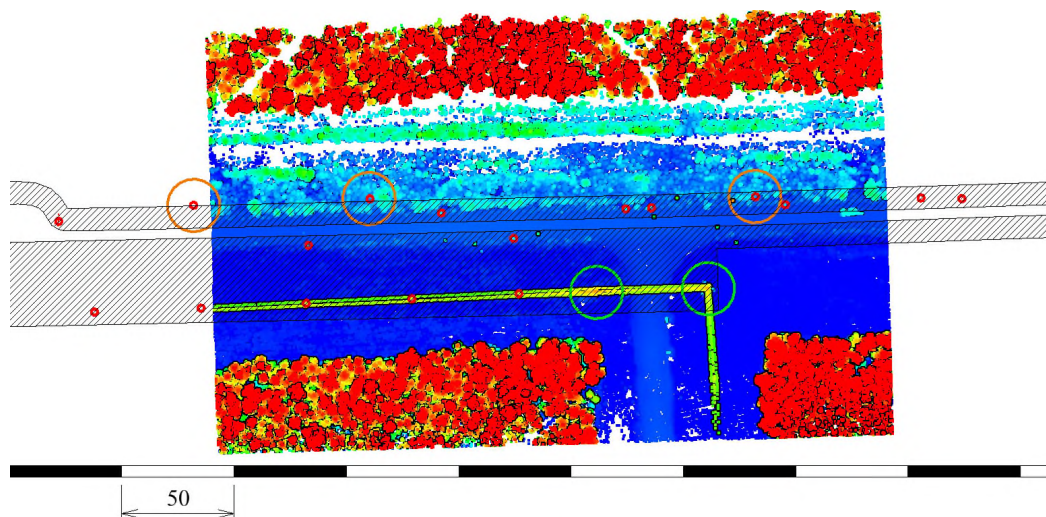


Рис. 4. Пример данных МЛС и результаты поиска соответственных точек

Расстояние поиска может быть увеличено в случае снижения средней скорости движения системы МЛС.

На рис. 4 красным цветом показан результат поиска соответственных точек. Точки, найденные на объектах дорожной инфраструктуры и опорных сооружений, практически всегда верно показывают ошибки взаимного положения массивов ТЛЮ. Те из них, которые оказались на растительности, могут

верно показывать ошибки только частично. Оранжевыми большими окружностями отмечены три точки, найденные на вершинах кустарниковой растительности. Одна из трех точек показывает неверную ошибку взаимного положения. Зелеными окружностями показаны две опоры ЛЭП, на которых не было найдено соответственных точек. Причиной этому мог послужить большой наклон опор ЛЭП.

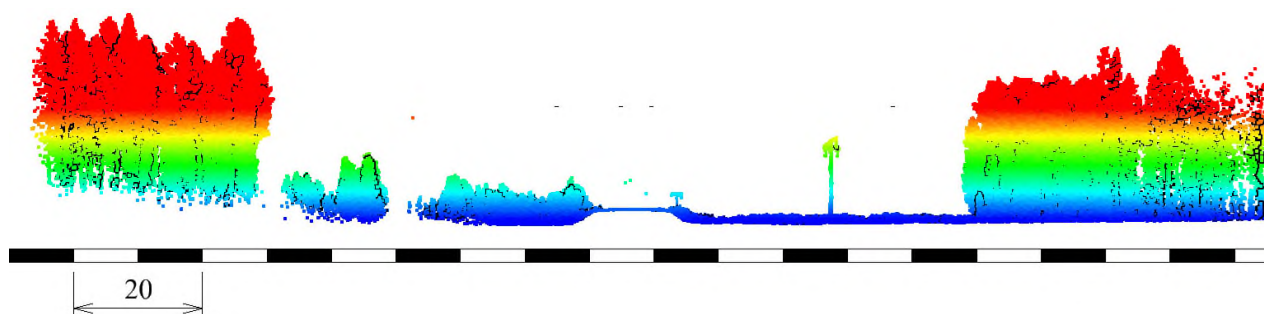


Рис. 5. Поперечное сечение фрагмента данных МЛС

21. Интерактивный анализ результатов поиска соответственных точек на участках с их низкой плотностью – менее, чем три точки на 100 м. Удаление неверно найденных соответственных точек.

На рис. 6 показан пример результата поиска соответственных точек и линий по ТЛО от дорожного знака. Ошибка положения массивов ТЛО по соответственным точкам составила 0,075 м, а по соответственным линиям – 0,035 м. В случае применения только соответственных линий ошибка взаимного положения не была бы устранена полностью, так как они определяют двойное данных только в одной плоскости. Кроме этого, соответственные линии не ищутся на дорожных знаках с небольшими табличками, такими как пикетажные столбы, и на опорах.

вила 0,075 м, а по соответственным линиям – 0,035 м. В случае применения только соответственных линий ошибка взаимного положения не была бы устранена полностью, так как они определяют двойное данных только в одной плоскости. Кроме этого, соответственные линии не ищутся на дорожных знаках с небольшими табличками, такими как пикетажные столбы, и на опорах.

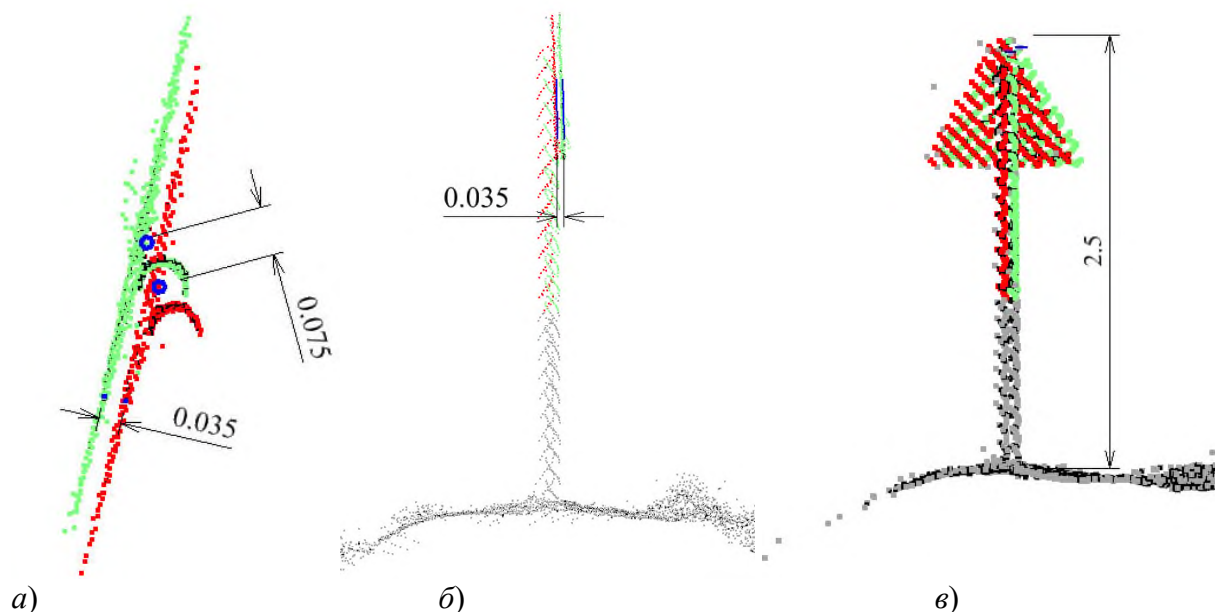


Рис. 6. Дорожный знак до уравнивания:
 а) вид сверху; б) вид сбоку; в) вид сбоку 2

В табл. 1 приведены ошибки планового положения маршрутов для всей территории трассы Талакан – Витим, рассчитанные по разнице положения соответственных точек и линий.

22. Поиск локальных поправок в плановое положение точек траекторий и ТЛО с помощью одномерного фильтра Гаусса. Определено, что для уравнивания планового положения данных МЛС следует задавать $x = 100$ м.

На рис. 7 показан пример результатов применения локальных поправок. Двоение данных было устранено. Положение соответственных точек и линий оставлено без изменений.

На рис. 8 показаны результаты поиска соответственных точек на другом участке трассы, где объекты дорожной инфраструк-

туры присутствуют в минимальном количестве. Область поиска ограничена расстоянием 10 м по обе стороны от траекторий и содержит большое количество кустарниковой и травянистой растительности. Древесная растительность расположена за пределами анализируемой области. На приведенном участке оказалось только два дорожных знака. Разработанная методика идентификации вертикальных объектов для набора соответственных точек позволила обнаружить оба знака, но также была добавлена одна точка на вершине кустарника. Так как расстояния между соответственными точками значительно превышают 100 м, те из них, которые были идентифицированы неверно, должны быть интерактивно удалены.

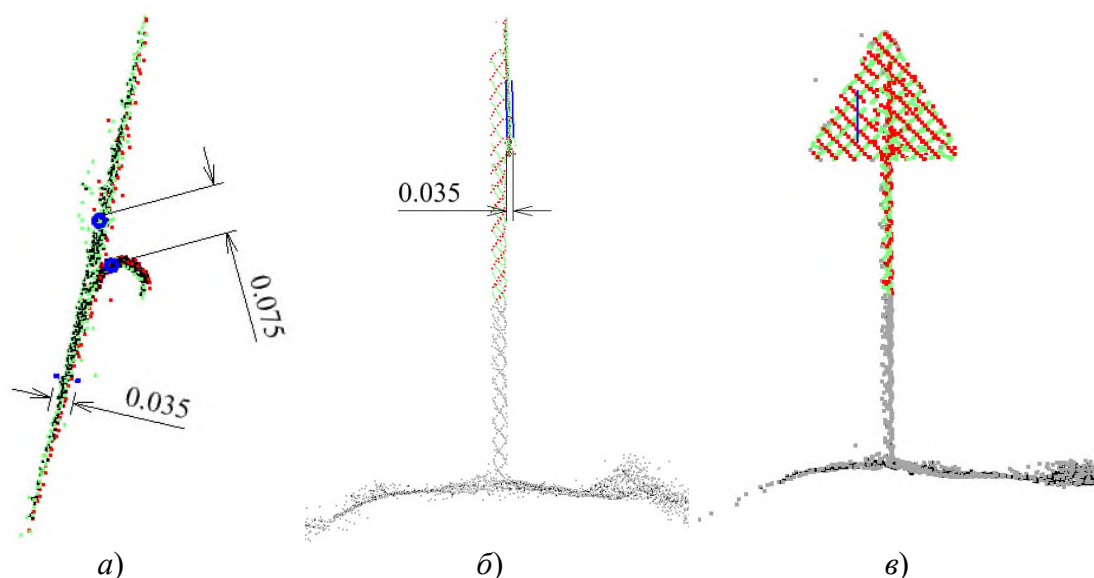


Рис. 7. Дорожный знак после уравнивания:
а) вид сверху; б) вид сбоку; в) вид сбоку 2

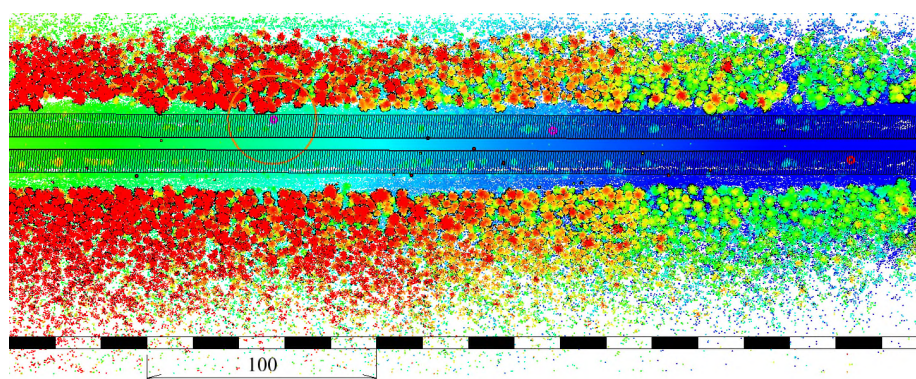


Рис. 8. Второй пример данных МЛС и результаты поиска соответственных точек

Взаимное уравнивание данных МЛС на городскую территорию

Разработанная методика взаимного уравнивания данных МЛС может быть применена для любых по характеру застройки территорий. При обработке данных сканирования городских улиц будет идентифицировано большое количество соответственных линий, а для поиска соответственных точек при условии движения системы МЛС по правым крайним полосам дорог минимально заданной зоны в 10 м будет достаточно, чтобы идентифицировать большинство дорожных знаков.

Ранее было отмечено, что ПК Riprocess позволяет полностью автоматически выполнить

взаимное уравнивание на участках с большим количеством плоских вертикальных объектов. Поэтому экспорт данных МЛС городских улиц в дополнительное программное обеспечение с целью дальнейшего уравнивания нецелесообразен для большинства ситуаций. В противном случае применение разработанной методики взаимного уравнивания в ПК TerraSolid существенно увеличит время обработки.

На рис. 9, а показан пример данных МЛС на участок городской улицы с отмеченной черным цветом зоной поиска соответственных точек, а на рис. 9, б – поперечное сечение угла здания. Красным и зеленым цветом отмечены массивы ТЛО противоположных маршрутов после уравнивания в Riprocess. Максимальная ошибка совмещения проездов не превысила 0,01 м.

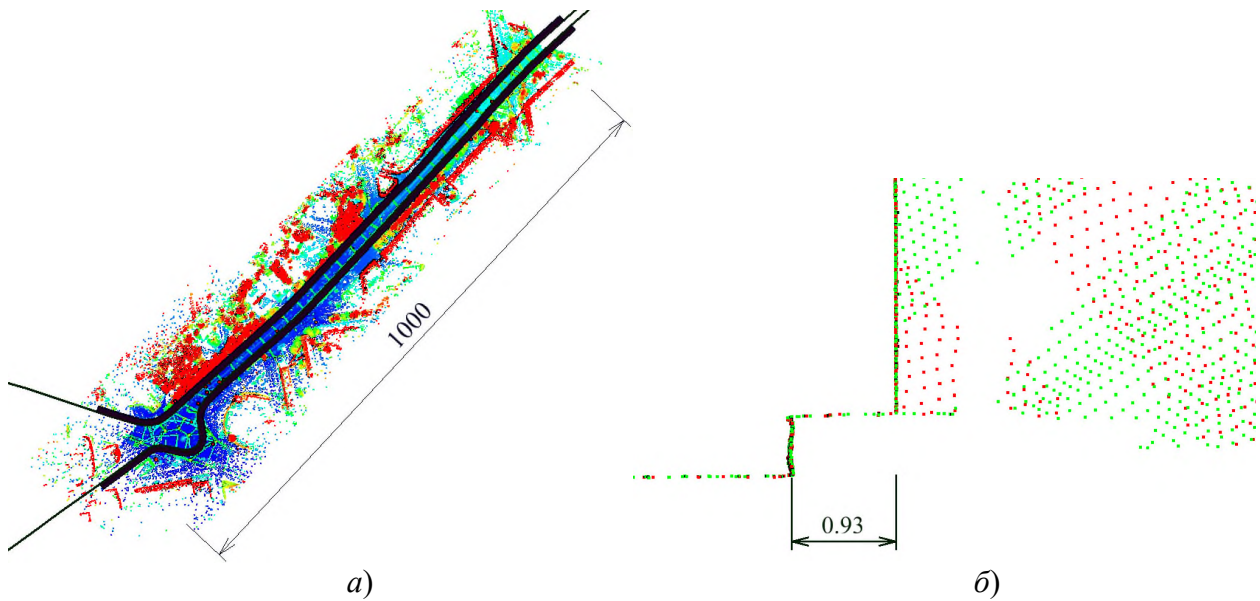


Рис. 9. Участок улицы:

а) вид сверху с зоной поиска соответственных точек; б) поперечное сечение стены здания

Таким образом, рекомендуется применять разработанную методику взаимного уравнивания для негородских территорий, где отсутствуют плоские вертикальные объекты. При ситуации, когда необходимо за один день выполнить сканирование территорий с различным характером застройки, следует останавливаться и перезапускать сбор данных, то есть делить траекторию на участки.

Деление траектории на участки может быть нецелесообразно, когда при съемке загородных территорий осуществляется краткосрочный въезд в город или другую застроенную территорию. В этом случае весь массив данных обрабатывается с применением разработанной методики. Большое количество вертикальных объектов застроенной территории позволяет сохранить высокую точность автоматиче-

ского взаимного уравнивания, выполненного в Riprocess. Особенностью поиска соответственных точек в TerraSolid является необходимость осуществления сканирования каждого вертикального объекта с одной стороны при движении в противоположных направлениях. Так всегда получается для всех объектов за пределами дороги. Если в зоне разделения движения противоположных направлений оказываются какие-либо объекты, то они сканируются с противоположных сторон. Массив точек этого объекта, полученного при сканировании в одном направлении, будет отличаться от массива, полученного при противоположном направлении. На рис. 10 показан пример неверно размещенных соответственных точек на столбе диаметра 0,10 м, находящегося в зоне разделения противоположных полос движения.

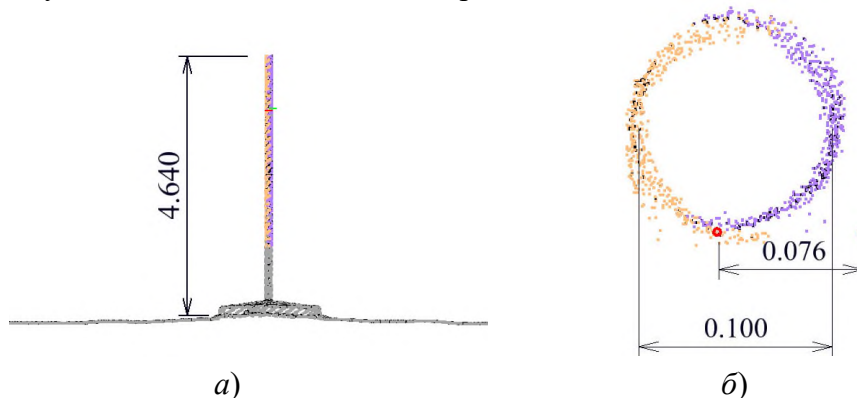


Рис. 10. Пример ошибочного результата поиска соответственных точек на столбе:

а) поперечное сечение; б) вид сверху

Фактическая ошибка взаимного положения массивов ТЛЮ в этом месте не превышает 0,01 м, хотя по автоматически найденным соответственным точкам ошибка составляет 0,076 м. По этой причине в разработанной методике не учитывается центральная зона дорог, расположенная между противоположными маршрутами сканирования.

Внешнее уравнивание данных МЛС

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 ТЛЮ. Преобразование данных МЛС выполнялось для трассы Талакан – Витим по координатам шести базовых станций. Оценка точности преобразования представлена в табл. 3. Для участка улицы проспект Дзержинского преобразование координат не выполнялось, данные были представлены в исходной системе – WGS-84.

Таблица 3

Оценка точности преобразования координат данных МЛС трассы Талакан – Витим в местную систему

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 ТЛЮ. Использо-

взюя данный способ, невозможно достоверно оценить внешнюю точность массива ТЛЮ в плановом положении. 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 планового положения массива ТЛЮ на открытых участках местности для системы Rigel VMX-250, небольшого удаления 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 ТЛЮ исследуемой системы МЛС в среднем ниже. Но, в отличие от точности планового положения, для высотного она может быть достоверно оценена.

На рис. 11 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.

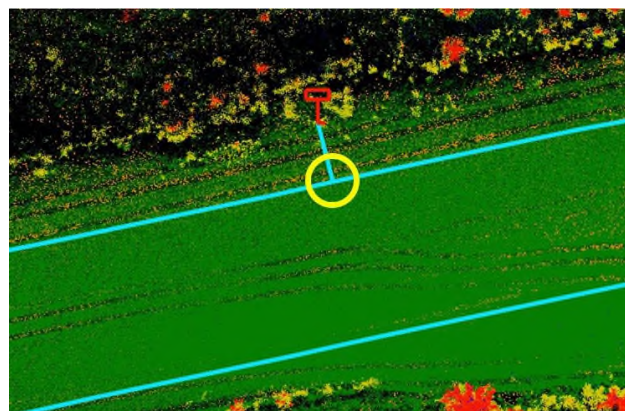


Рис. 11. Пример размещения опорной точки

В табл. 4 приведены результаты оценки внешней точности массива ТЛЮ по измеренным спутниковым приемником 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 [26]. При анализе результатов распределения оши-

бок было определено, что точность снижается при удалении от базовых станций. Наибольшие значения ошибок наблюдаются в зонах максимального удаления.

Таблица 4

Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам, размещенным через 1 км, без опорных точек

Ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,009	0,010	0,041
Средняя квадратическая ошибка	0,016	0,022	0,056
Максимальная ошибка	0,116	0,228	0,218

Для создания топографических планов с большей высотой сечения рельефа необходимо применять опорные точки. Для дальнейшей оценки точности количество опорных и контрольных точек комбинировалось. Выполнялось уравнивание данных МЛС при размещении опорных точек каждые 2, 4 и 8 км. В табл. 5 приведена оценка точности по контрольным точкам через 1 км при размещении опорных точек каждые 8 км.

Таблица 5

Оценка точности внешнего уравнивания данных МЛС по контрольным точкам через 1 км при размещении опорных точек через 8 км

Ошибки	Соответственные точки и линии		
	X, м	Y, м	Z, м
Средняя ошибка	0,018	0,016	0,028
Средняя квадратическая ошибка	0,028	0,020	0,033
Максимальная ошибка	0,170	0,110	0,170

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).

Полученная точность оказалась на границе допуска для создания топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м по значению максимальной ошибки для незастроенных территорий с хорошим качеством спутникового сигнала [26]. Также было определено, что опорные точки следует располагать на границах съемочного участка.

Заключение

Разработанная методика уравнивания данных МЛС позволяет значительно ускорить процесс полевой съемки и предварительной обработки ее результатов. Она учитывает различные внешние условия и степень застройки сканируемой территории.

Предложенная методика взаимного уравнивания позволяет практически полностью автоматизировать процесс поиска локальных поправок в линейные элементы взаимного ориентирования сканерных линий массива точек по межмаршрутному перекрытию путем фильтрации большинства ТЛО от растительности, влияющих на точность поиска соответственных точек на вертикальных объектах местности. Значения параметров алгоритмов, применяемых в рамках методики взаимного уравнивания, подходят для любых массивов ТЛО с плотностью не ниже той, которую имели исследуемые данные.

Результаты внешнего уравнивания 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 не обязательно при удалении от базовой станции не более, чем на 15 км. Для топографических планов с высотой сечения рельефа 0,25 м опорные точки необходимо располагать через 8 км.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li Y., Bai Y., Wang M. A self-calibration method for boresight error of mobile mapping system // 2nd International Conference on Geoscience and Environmental Chemistry (ICGEC 2020). – 2020. – Vol. 206. – Article Number 03010. – P. 5.
2. 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.
3. Рыльский И. А. Уравнивание данных лазерного сканирования в RIPROCESS // Вестник науки и образования. – 2020. – № 15-1(93). – С. 65–69.
4. Алтынцев М. А., Анцифиров Е. С. Исследование точности уравнивания данных мобильного лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 90–95.
5. Комиссаров А. В., Алтынцев М. А. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с.
6. Hussnain Z., Oude Elbernk S., Vosselman G. An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment. ISPRS // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-1. – P. 203–209.
7. Медведев В. И., Сарычев Д. С., Скворцов А. В. Предварительная обработка данных мобильного лазерного сканирования в системе IndorCloud // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 2 (3). – С. 67–74.
8. Середович В. А., Алтынцев М. А., Попов Р. А. Выбор методики уравнивания данных мобильного лазерного сканирования в зависимости от качества полученных данных и снимаемой территории // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 142–149.
9. Ding W., Wang J., Rizos C., Kinlyside D. Improving adaptive Kalman estimation in GPS/INS integration // Journal of Navigation. – 2007. – Vol. 60 (03). – P. 517–529.
10. Levinson J., Montemerlo M., Thrun S. Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments // Conference: Robotics: Science and Systems III (June 27-30). – Atlanta, Georgia, USA : Georgia Institute of Technology, 2007. doi:10.15607/RSS.2007.III.016.
11. Zhao Y. GPS/IMU integrated system for land vehicle navigation based on MEMS. – Stockholm, Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 2011. – 85 с.
12. Guan H., Li J., Yu Y., Wang C., Chapman M., Yang B. Using mobile laser scanning data for automated extraction of road markings // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 87. – P. 93–107.
13. Hu H., Sons M., Stiller C. Accurate global trajectory alignment using poles and road markings // IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – 2019. – arXiv:1903.10205v1. – P. 1186–1191.
14. TerraScan User Guide. – [Electronic resource]. – Mode of access : <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (дата обращения 28.04.2021).
15. Wu C.-T., Hsiao C.-Y., Chen C.-S. Improvement of LiDAR data accuracy using 12 parameter affine transformation // Journal of Chinese Soil and Water Conservation. – 2013. – Vol. 44 (4). – P. 293–301.
16. Wang Y., Chen Q., Zhu Q., Liu L., Li C., Zheng D. A survey of mobile laser scanning applications and key techniques over urban areas // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11(13). – P. 1540.
17. Wen C., Xia Y., Lian Y., Dai Y., Tan J., Wang C., Li J. Mobile laser scanning systems for GPS/GNSS-denied environment mapping // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-1. – P. 457–460.
18. Hutton J., Roy E. The Applanix SmartBase software for improved robustness, accuracy, and productivity of mobile mapping and positioning [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.applanix.com/pdf/applanix%20smartbase.pdf> (дата обращения 24.04.2021).
19. Scherzinger, B., Hutton, J. Applanix In-Fusion technology explained [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.applanix.com/pdf/Applanix_IN-Fusion.pdf (дата обращения 24.04.2021).
20. Schaer P., Vallet J. Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments // International Archives of ISPRS. – 2016. – Vol. XL-3/W4. – P. 61–64.

21. Gao Y., Huang X., Zhang F., Fu Z., Yang C. Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images // International Archives of ISPRS. – 2015. – Vol. XL-1/W4. – P. 41–46.
22. Hussnain Z., Oude Elbernk S., Vosselman G., 2019. Automatic extraction of accurate 3D tie points for trajectory adjustment of mobile laser scanners using aerial imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2019. – Vol. 154. – P. 41–58.
23. Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models // International Archives of ISPRS. – 2000. – Vol. XXXIII-4. – P. 111–118.
24. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. – 2-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с.
25. Hoppe H., Derose T., Duchamp T., Mcdonald J., Stuetzle W. Surface reconstruction from unorganized points // Proceedings of SIGGRAPH. – 1992. – P. 71–78.
26. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. – М. : ЦНИИГАиК, 2016.

Получено 11.05.2021

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

TECHNIQUE OF AUTOMATIC MOBILE LASER SCANNING DATA ADJUSTMENT

Maxim A. Altyntsev

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

Karkokli Hamid Majid Saber

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

Adjustment is a main step in the preliminary processing of mobile laser scanning (MLS) data. As a result of this step, a point cloud is generated in a certain coordinate system. The modern software, provided with the corresponding surveying system, is capable of performing in automatic mode most stages of MLS data adjustment obtained for territories with different quantity of buildings. With a sufficient number of vertically arranged planar objects, such as building walls, the algorithms embedded in the software provide a high accuracy of relative adjustment, which consists in calculating and applying corrections for trajectories obtained with re-scanning the same area. Absolute adjustment can also be carried out automatically, subject to the rules for placing control points in order to automatically detect them. This kind of adjustment involves transforming a point cloud with using control point coordinates measured with more accurate surveying methods. The accuracy of automatic relative adjustment can be significantly reduced with the almost complete absence of vertical flat objects. In this case, it is necessary to develop additional adjustment techniques capable of using not only flat objects of a large area, but also vertical objects, such as road signs and poles. Comprehensive technique of MLS data adjustment, which can use information on the position of road signs and poles for territories with an insufficient number of vertical flat objects is proposed. The accuracy estimation of both the relative and absolute MLS data adjustment according to the proposed technique was carried out. The choice of the required control point density for territories with different quantity of buildings is explained.

Keywords: mobile laser scanning, data adjustment, vertical objects, control points, accuracy estimation

REFERENCE

1. Li, Y., Bai, Y., & Wang, M. (2020). A self-calibration method for boresight error of mobile mapping system. *2nd International Conference on Geoscience and Environmental Chemistry (ICGEC 2020)*, Vol. 206, Article Number 03010, P. 5.

2. 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].
3. Rylskiy, I. A. (2020). LIDAR data adjustment using RIPROCESS. *Vestnik nauki i obrazovaniya [Bulletin of Science and Education]*, 15-1(93), 65–69 [in Russian].
4. Altyntsev, M. A., & Antsifirov, Y. S. (2013). Accuracy research of mobile laser scanning data adjustment. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 3. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 3. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 90–95). Novosibirsk: SSGA Publ. [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. Hussnain, Z., Oude Elbernk, S., & Vosselman, G. (2018). An automatic procedure for mobile laser scanning platform 6dof trajectory adjustment. *International Archives of ISPRS, XLII-1*, 203–209.
7. Medvedev, V. I., Sarychev, D. S., & Skvortsov, A. V. (2014). Lidar data preprocessing in IndorCloud. *SAPR i GIS avtomobil'ny'x dorog [CAD & GIS for Roads]*, 2(3), 67–74 [in Russian].
8. Seredovich, V. A., Altyntsev, M. A., & Popov, R. A. (2014). The choice of mobile laser scanning data adjustment technique subject to obtained data quantity of surveyed area. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 2 Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 2. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 142–149). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
9. Ding, W., Wang, J., Rizos, C., & Kinlyside, D. (2007). Improving adaptive Kalman estimation in GPS/INS integration. *Journal of Navigation*, 60(03), 517–529
10. Levinson, J., Montemerlo, M., & Thrun, S. (2007). Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments. *Conference: Robotics: Science and Systems III, June 27-30*. Atlanta, Georgia, USA: Georgia Institute of Technology. doi: 10.15607/RSS.2007.III.016.
11. Zhao, Y. (2011). *GPS/IMU integrated system for land vehicle navigation based on MEMS*. Stockholm, Sweden : KTH Royal Institute of Technology, 85 p.
12. Guan, H., Li, J., Yu, Y., Wang, C., Chapman, M., & Yang, B. (2014). Using mobile laser scanning data for automated extraction of road markings. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 93–107.
13. Hu, H., Sons, M., & Stiller, C. (2019). Accurate global trajectory alignment using poles and road markings. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, arXiv:1903.10205v1, 1186–1191.
14. TerraScan User Guide. (n. d.). Retrieved from <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (accessed 28.04.2021).
15. Wu, C.-T., Hsiao, C.-Y., & Chen, C.-S. (2013). Improvement of LiDAR data accuracy using 12 parameter affine transformation. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(4), 293–301.
16. Wang, Y., Chen, Q., Zhu, Q., Liu, L., Li, C., & Zheng, D. (2019). A survey of mobile laser scanning applications and key techniques over urban areas. *Remote Sensing*, 11(13), P. 1540.
17. Wen, C., Xia, Y., Lian, Y., Dai, Y., Tan, J., Wang, C., & Li, J. (2018). Mobile laser scanning systems for GPS/GNSS-denied environment mapping. *International Archives of ISPRS, XLII-1*, 457–460.
18. Hutton, J., & Roy, E. (n. d.). The Applanix SmartBase software for improved robustness, accuracy, and productivity of mobile mapping and positioning. Retrieved from <https://www.applanix.com/pdf/applanix%20smartbase.pdf> (accessed 24.04.2021).
19. Scherzinger, B., & Hutton, J. (n. d.). Applanix In-Fusion technology explained. Retrieved from https://www.applanix.com/pdf/Applanix_IN-Fusion.pdf (accessed 24.04.2021).
20. Schaer, P., & Vallet, J. (2016). Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments. *International Archives of ISPRS, XL-3/W4*, 61–64.
21. Gao, Y., Huang, X., Zhang, F., Fu, Z., & Yang, C. (2015). Automatic geo-referencing mobile laser scanning data to UAV images. *International Archives of ISPRS, XL-1/W4*, 41–46.
22. Hussnain, Z., Oude Elbernk, S., & Vosselman, G. (2019). Automatic extraction of accurate 3D tie points for trajectory adjustment of mobile laser scanners using aerial imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154, 41–58.

23. Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of ISPRS, XXXIII-4*, 111–118.
24. Shapiro, L., & Stockman, G. (2013). *Комп'ютерное зрение [Computer vision] (2nd ed.)*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 752 p. [in Russian].
25. Hoppe, H., Derose, T., Duchamp, T., McDonald, J., & Stuetzle, W. (1992). Surface reconstruction from unorganized points. *Proceedings of SIGGRAPH* (pp. 71–78).
26. Code of Practice. SP 47.13330.2016. *Engineering survey for construction. Basic principles*. (2016). Moscow: TSNIIGAiK Publ. [in Russian].

Received 11.05.2021

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