

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 528.721.221.6

DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-5-15

Привязка данных мобильного лазерного сканирования к результатам аэрофотосъемки на основе определения взаимного положения массивов точек

М. А. Алтынцев^{1}*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: mnbcv@mail.ru

Аннотация. Одним из самых оперативных геодезических методов наземной съемки является мобильное лазерное сканирование (МЛС). За короткий промежуток времени этот метод позволяет осуществить сбор данных об объектах окружающего пространства с высокой детальностью и точностью. Условием получения высокоточных данных МЛС является качественный прием спутникового сигнала. При сканировании застроенных городских территорий качество сигнала ухудшается, что приводит к снижению точности. Компенсировать потерю точности помогает применение дополнительных опорных точек, одними из которых могут быть результаты аэрофотосъемки. Для этого осуществляется привязка данных МЛС к данным аэрофотосъемки с помощью различных автоматических методов, которые осуществляются в двумерном или трехмерном пространстве. Поэтому предварительно осуществляется перевод трехмерных данных МЛС в форму двумерного изображения или группы аэрофотоснимков в форму трехмерного массива точек. Привязка в трехмерном пространстве является предпочтительной при низком изобразительном качестве аэрофотоснимков. В статье рассматривается методика автоматической привязки данных МЛС к сгенерированному по аэрофотоснимкам массиву точек с помощью метода ИСР. Предложено предварительно разделять данные МЛС на фрагменты. Показано, что размер фрагментов для расчета локальных поправок в плане может отличаться от размера фрагментов для их расчета по высоте.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), привязка, взаимное ориентирование, метод итеративного алгоритма ближайших точек (ИСР), оценка точности

Введение

Мобильное лазерное сканирование (МЛС) – это современный метод сбора геопространственной информации, который заключается в получении сплошного массива точек лазерных отражений (ТЛО) окружающего пространства за короткий промежуток времени в результате съемки с движущегося наземного транспортного средства. Съемка осуществляется с помощью двумерных лазерных сканеров, выполняющих поперечную развертку ла-

зерного луча. Продольная развертка обеспечивается в ходе движения транспортного средства. Для отслеживания положения системы МЛС в пространстве используются ГНСС-приемники и инерциальная навигационная система (ИНС). ГНСС-приемники определяют линейные элементы внешнего ориентирования каждой сканерной линии массива ТЛО, а ИНС – угловые. В ходе лазерного сканирования одновременно осуществляется сбор данных на базовых станциях, количество которых зависит от площади снимаемой территории [1, 2].

Точность определения элементов внешнего ориентирования данных МЛС зависит от множества факторов, таких как технические характеристики съемочной системы, максимальное расстояние от базовых станций до системы МЛС, качество спутникового сигнала. Среди этих факторов значительный вклад в итоговую точность вносит качество принимаемого спутникового сигнала. Если при съемке незастроенных участков местности, где отсутствуют высотные строения, качество сигнала является наилучшим и точность определения пространственных координат достигает в среднем нескольких единиц сантиметров, то на городских территориях из-за снижения количества одновременно наблюдаемых спутников и постоянного прерывания сигнала точность может падать до нескольких десятков сантиметров и даже метра [3].

Чтобы повысить точность данных МЛС городских застроенных территорий, применяют координаты опорных точек, измеренных более точными наземными методами геодезической съемки. Чем выше плотность городской застройки и чем чаще прерывается спутниковый сигнал, тем большее число таких точек требуется [4].

Измерение координат опорных точек наземными методами является трудоемкой задачей. Альтернативным вариантом повышения точности данных МЛС городских территорий является применение результатов аэрофотосъемки, что объясняется более стабильным приемом спутникового сигнала из-за отсутствия препятствий при съемке в воздухе. В этом случае исходная точность данных, полученных в результате аэрофотосъемки, может быть значительно выше точности данных наземной съемки, выполненной с помощью МЛС. Также для обработки результатов аэрофотосъемки требуется значительно меньшее количество наземных опорных точек, чем для обработки данных МЛС застроенных городских территорий. В результате обработки полученных аэрофотоснимков можно построить ортофотоплан и точечную модель, которые затем использовать в качестве источника опорных данных для привязки массивов ТЛО, полученных методом МЛС [5]. Особенно перспективным так-

же является применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), так как в этом случае можно существенно уменьшить высоту аэрофотосъемки, тем самым повысить точность данных [6].

Для осуществления привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки можно использовать один из двух подходов, так как исходные материалы обладают различной размерностью. Аэрофотоснимки принадлежат двумерному пространству, а массивы ТЛО – трехмерному.

Первый, двумерный, подход заключается в генерации изображений по массивам ТЛО и их привязке к аэрофотоснимкам, в частности, выполняется генерация ортоизображений и их привязка к построенному по аэрофотоснимкам ортофотоплану [7]. Для этого применяются методы автоматической идентификации соответственных точек, разработанные для привязки снимков [8, 9]. Существуют различные классификации этих методов. Согласно одной из них, в зависимости от анализируемой площади снимков, методы можно разделить на локальные, глобальные и полуглобальные [10]. По другой классификации методы разделяются по характеру используемых признаков: спектральные или структурные характеристики, границы объектов или их размер [11].

Второй, трехмерный, подход заключается в привязке массива ТЛО к массиву точек, сгенерированному по результатам фотограмметрической обработки аэрофотоснимков [12]. Для привязки применяются методы уравнивания сканов, являющихся результатом наземного лазерного сканирования (НЛС). Их можно разделить на 2 группы [13]. Если первая группа методов выполняет уравнивание на основе вычисления приблизительных элементов взаимного ориентирования массивов точек, то вторая выполняет дальнейшее уравнивание с целью повышения точности на основе уточнения элементов взаимного ориентирования массивов точек. Вторая группа методов всегда применяется после первой или в случае, когда приблизительные элементы взаимного ориентирования массивов точек уже известны. Так как в состав системы МЛС входят ГНСС-приемники, то в результате обработки

полученных данных с определенной точностью вычисляются элементы внешнего ориентирования сканерных линий массива ТЛО, что позволяет применить сразу методы второй группы, если аэрофотосъемка осуществлялась в той же системе координат.

Одним из наиболее простых методов первой группы является метод сопоставления центров ограничительных рамок (МВВС), суть которого заключается в построении рамки вокруг каждого скана. Затем определяются центры всех рамок, после чего рамки перемещаются таким образом, чтобы центры совпали. Метод осуществляет только перемещение. Вращение выполняется с помощью интерактивных операций или другого метода [14].

Самым популярным методом второй группы является «итеративный алгоритм ближайших точек» (ICP), заключающийся в поиске соответствий между массивами данных на основе анализа расстояний между ближайшими его точками и расчете параметров трансформирования [15]. Для привязки в плане данный метод требует наличия вертикальных плоскостей. Присутствие только небольших вертикальных объектов не способно обеспечивать высокой точности плановой привязки [16].

Каждый из двух подходов привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки обладает своими преимуществами и недостатками. Первый подход требует высокого разрешения аэрофотоснимков и плотности массивов ТЛО, чтобы можно было достоверно идентифицировать соответственные точки и контуры. Этого достигают посредством увеличения частоты сканирования, снижением скорости движения системы МЛС, ее дополнительными маршрутами съемки, уменьшением высоты аэрофотосъемки. Второй подход менее требователен к разрешению данных. По данным аэрофотосъемки можно построить массив точек высокой плотности, даже превышающий плотность массива ТЛО. На точность привязки в этом случае может оказывать влияние тот факт, что массив точек, полученный в результате обработки фотоснимков, обладает однородной плотностью, а плотность массива ТЛО значительно падает с увеличением расстояния. Также, в отличие от массива ТЛО, представление вертикаль-

ных и горизонтальных плоскостей объектов местности может быть искажено в сгенерированном по аэрофотоснимкам массиве точек при недостаточном изобразительном качестве некоторых из них. В массиве ТЛО, полученном методом МЛС, не будут изображаться крыши зданий, а в массиве точек, сгенерированном в результате фотограмметрической обработки, могут быть значительные ошибки в изображении их стен.

Из-за несовпадающего источника получения массивов точек двух различных методов съемки вопрос точности привязки наземных данных лазерного сканирования к данным аэрофотосъемки остается открытым. Также невозможно привязать все данные МЛС к результатам аэрофотосъемки за один цикл, что связано с непостоянством значений элементов внешнего ориентирования массива вследствие особенностей характера его получения в виде сканерных линий. Требуется выполнять привязку массивов ТЛО по фрагментам. Выбор размера фрагмента для достижения наиболее высокой точности привязки является одной из основных задач при применении второго подхода. В статье предложена методика привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки с использованием этого подхода, а также исследовано, как меняется точность привязки при изменении размера фрагментов данных МЛС.

Исходные данные для исследования

Для разработки и исследования методики привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки согласно подходу, использующему трехмерное пространство, были выбраны материалы съемок, выполненных на территорию г. Новосибирска в 2020 г. МЛС осуществлялось с помощью системы Riegl VMX-250 со средней скоростью 40 км/ч в прямом и обратном направлении, а аэрофотосъемка – с помощью БПЛА Supercam S350.

Обработка результатов МЛС выполнялась от одной базовой станции, расположенной на расстоянии 10,5 км от места съемки. Наземные опорные точки не использовались. Средняя плотность массива ТЛО вдоль траектории съемки составила 3 200 точек/м².

БПЛА Supercam S350 был укомплектован камерой Sony Alpha ILCE-6000 с объективом, имеющим фокусное расстояние 20 мм. Высота аэрофотосъемки составила 250 м. Это позволило получить аэрофотоснимки, имеющие размер пикселя 5 см. Для определения координат главной точки каждого аэрофотоснимка использовались размещенные на борту БПЛА ГНСС-приемники. Также каждые 500 м вдоль траектории полета использовались опорные точки. Фотограмметрическая обработка выполнялась в программном обес-

печении (ПО) Agisoft Metashape. Одним из результатов обработки результатов аэрофотосъемки стал массив, средняя плотность которого составила 100 точек/м². На рис. 1 показан участок исследуемых данных протяженностью 2 км с отображением по цвету. Массив ТЛО был окрашен в реальные цвета в результате наложения на него фотоснимков, полученных системой МЛС. Прежде чем выполнять привязку, были отфильтрованы ТЛО от автомобилей, а также выполнено межмаршрутное уравнивание данных МЛС.

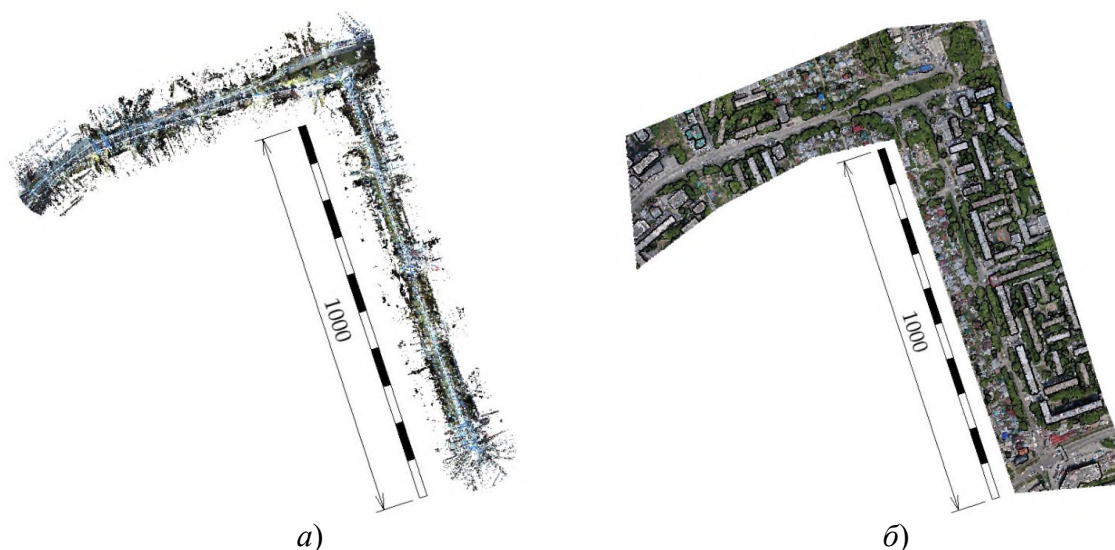


Рис. 1. Массив точек:
а) МЛС; б) БПЛА

Методика привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки

При НЛС уравнивание координат ТЛО выполняется автоматическими методами на основе анализа зон перекрытия близлежащих сканов с целью вычисления их элементов взаимного и внешнего ориентирования. Так как массивы ТЛО, полученные в результате МЛС, являются сплошными и генерируются в виде сканерных линий, то элементы взаимного и внешнего ориентирования каждой линии отличаются, и привязать сразу весь массив ТЛО к данным аэрофотосъемки теми же методами не представляется возможным. Применение автоматических методов уравнивания сканов для данных МЛС можно реализовать посред-

ством разделения этих данных на фрагменты определенного размера. Чем меньше размер фрагмента, тем точнее может быть выполнена привязка. При применении метода ИСР условием высокой точности привязки является наличие вертикальных и горизонтальных плоскостей. В качестве горизонтальных плоскостей может выступать покрытие дорог, а в качестве вертикальных – стены зданий. Из этого следует, что применение метода ИСР является оптимальным для данных застроенных городских территорий. На незастроенных территориях, где количество вертикальных плоскостей объектов минимально, привязка может быть выполнена только по высоте.

После привязки каждого отдельного фрагмента массива ТЛО контуры объектов на границах соседних фрагментов не совпадают.

Чтобы устранить несовпадение контуров, необходимо выполнить расчет индивидуальных значений поправок к каждой сканерной линии всего исходного массива ТЛО. Так как массив ТЛО по результатам предварительной обработки данных МЛС и фотограмметрический массив точек находятся в горизонтальном положении и сориентированы одинаково друг относительно друга при съемке в единой системе координат, то можно рассчитать векторы смещений между геометрическими центрами фрагментов массива ТЛО до и после привязки по методу ИСР:

$$\bar{S}_k = \begin{pmatrix} \bar{X}_{\text{ДП}} - \bar{X}_{\text{ПП}} \\ \bar{Y}_{\text{ДП}} - \bar{Y}_{\text{ПП}} \\ \bar{Z}_{\text{ДП}} - \bar{Z}_{\text{ПП}} \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n X_{\text{ДП}i} - \sum_{i=1}^n X_{\text{ПП}i} \\ \sum_{i=1}^n Y_{\text{ДП}i} - \sum_{i=1}^n Y_{\text{ПП}i} \\ \sum_{i=1}^n Z_{\text{ДП}i} - \sum_{i=1}^n Z_{\text{ПП}i} \end{pmatrix},$$

где \bar{S}_k – вектор смещения;

k – номер фрагмента;

n – количество ТЛО в фрагменте массива;

$\bar{X}_{\text{ДП}}, \bar{Y}_{\text{ДП}}, \bar{Z}_{\text{ДП}}$ – средние значения координат X, Y, Z точек фрагмента до привязки;

$\bar{X}_{\text{ПП}}, \bar{Y}_{\text{ПП}}, \bar{Z}_{\text{ПП}}$ – средние значения координат X, Y, Z точек фрагмента после привязки.

На основе рассчитанных векторов смещения с помощью метода трилинейной интерполяции выполняется вычисление локальных

поправок в линейные элементы сканерных линий исходного массива ТЛО. По значениям локальных поправок осуществляется уравнивание координат исходного массива ТЛО. Итоговым результатом является сплошной массив ТЛО с совпадающими контурами на границе стыка фрагментов. На рис. 2 приведена схема привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки на основе трехмерного подхода.

Исследование точности привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки

Высокоточная привязка данных МЛС к результатам аэрофотосъемки требует подбора оптимального размера фрагментов, на которые, согласно описанной методике, делятся эти данные. Размер фрагмента для каждой определенной части городской территории может отличаться. Необходимо сначала проанализировать территорию на предмет плотности размещения зданий и сооружений, а также их высоты. Исследуемые данные МЛС и БПЛА г. Новосибирска включают здания различной этажности. Их площадь и плотность размещения отличается. Поэтому с целью выбора размера фрагментов деление массивов ТЛО было выполнено трижды. Протяженность фрагментов составила 50, 100 и 150 м (рис. 3). Для каждого из трех наборов данных была выполнена обработка в соответствии со схемой, показанной на рис. 2.



Рис. 2. Схема привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки на основе трехмерного подхода

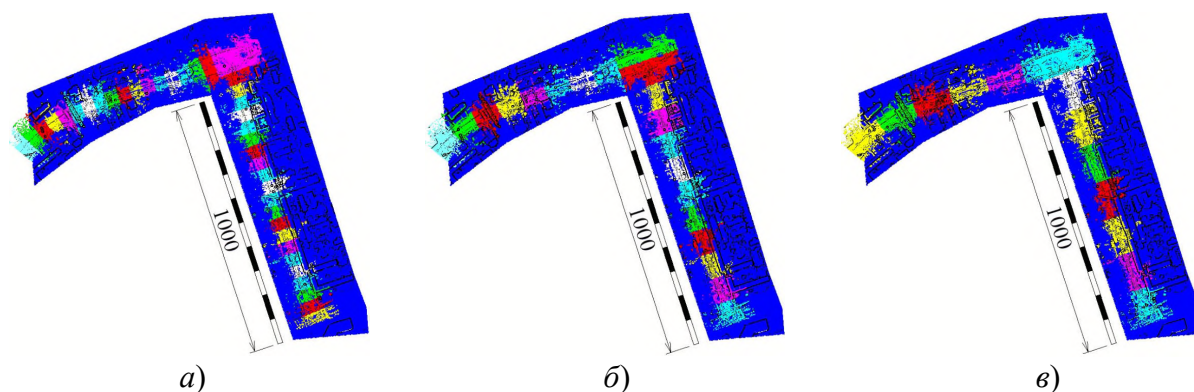


Рис. 3. Разделение массива ТЛО на блоки протяженностью:

а) 50 м; б) 100 м; в) 150 м; ■ ■ ■ ■ ■ ■ – блоки массива ТЛО; ■ – массив точек БПЛА

Чтобы оценить точность привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки на основе трехмерного подхода, по оси дороги и на углах зданий были размещены контрольные точки (рис. 4). Измерение истинных координат контрольных точек выполнялось по фотограмметрическому массиву точек. По контрольным точкам, размещенным на оси дороги, оценивалась точность привязки данных МЛС в плане, а по размещенным на углах зданий – по высоте.

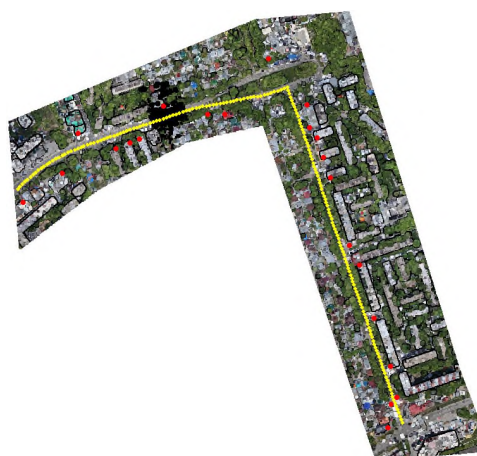


Рис. 4. Схема размещения контрольных точек

● – контрольные точки для оценки точности по высоте; ● – контрольные точки для оценки точности в плане

В табл. 1 приведены результаты оценки точности данных МЛС по размещенным контрольным точкам до выполнения привязки к фотограмметрическому массиву точек. Большие значения ошибок можно обосновать большим

расстоянием сканируемой территории от месторасположения базовой станции и низким качеством спутникового сигнала вследствие его прерывания из-за наличия на территории деревьев и высоких зданий.

Таблица 1

Оценка точности данных МЛС по контрольным точкам до привязки

Ошибка	X, м	Y, м	Z, м
Средняя	0,087	0,571	0,234
Средняя квадратическая	0,200	0,655	0,290
Максимальная	0,680	1,132	0,707

В табл. 2 показаны результаты оценки точности привязки данных МЛС к результатам аэрофотосъемки при делении массива ТЛО на фрагменты различной протяженности. Метод ИСР позволил повысить точность данных МЛС, но также видно, что протяженность фрагмента существенно влияет на итоговые результаты привязки. Точность привязки по высоте при уменьшении протяженности фрагмента повышается, в то время как в плане является более высокой для фрагментов протяженностью 100 м. Причиной более высокой точности привязки в плане при использовании фрагментов большей протяженности является повышение вероятности встретить большее количество вертикальных плоскостей крупных объектов. А в случае отсутствия таких плоскостей ошибки данных МЛС после привязки могут даже увеличиться.

Таблица 2

Оценка точности привязки данных МЛС при их делении на фрагменты по контрольным точкам

Ошибка	Протяженность фрагмента								
	50 м			100 м			150 м		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
Средняя	0,041	0,059	0,050	0,020	0,032	0,082	0,039	0,063	0,113
Средняя квадратическая	0,062	0,089	0,062	0,051	0,071	0,107	0,053	0,092	0,138
Максимальная	0,171	0,263	0,160	0,167	0,198	0,296	0,176	0,223	0,498

На рис. 5 показано распределение ошибок по высоте, а на рис. 6 – в плане. На рис. 6, б отмечен участок территории с максимальной ошибкой после привязки. На этом участке точность данных МЛС при использовании фрагментов длиной 50 м оказалась даже ниже, чем при применении фрагментов длиной 150 м.

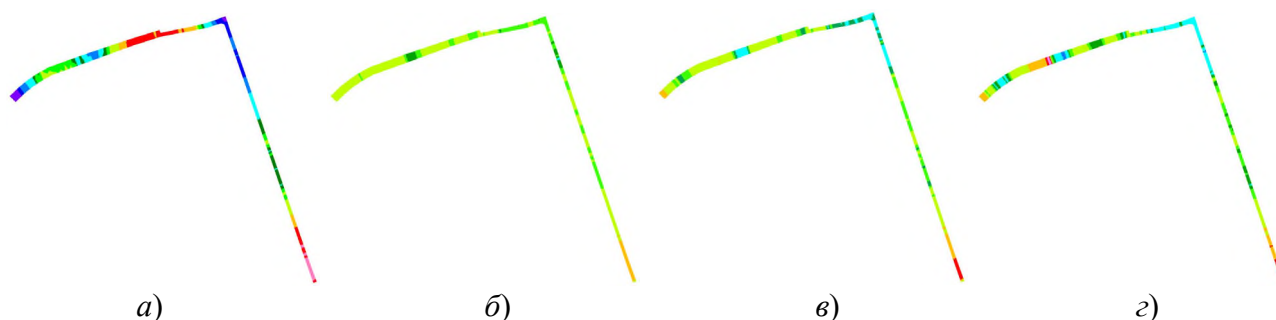


Рис. 5. Распределение ошибок данных МЛС по высоте:

а) до привязки к массиву точек БПЛА; б) после привязки по блокам протяженностью 50 м; в) после привязки по блокам протяженностью 100 м; г) после привязки по блокам протяженностью 150 м;
 pink минус 0,50 – минус 0,30 м; red минус 0,30 – минус 0,15 м; orange минус 0,15 – минус 0,05 м;
 light green минус 0,05 – 0,05 м; green 0,05 – 0,10 м; dark green 0,10 – 0,15 м; cyan 0,15 – 0,30 м; blue 0,30 – 0,45 м;
 dark blue 0,45 – 0,60 м; purple 0,60 – 0,72 м

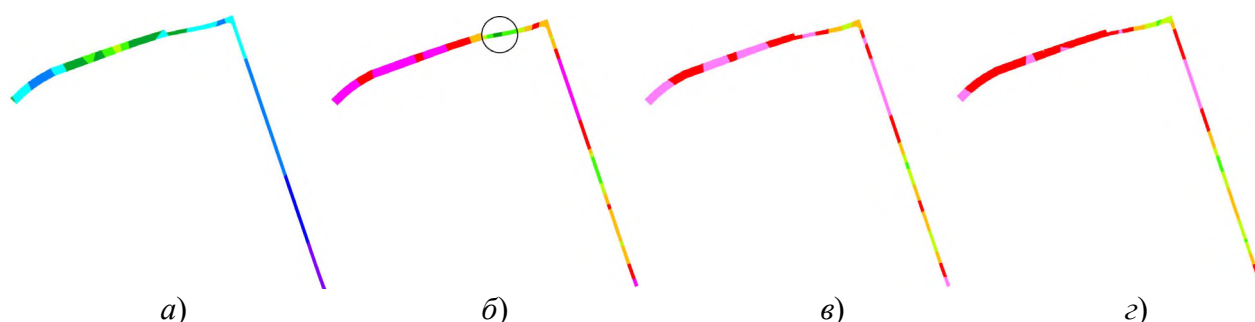


Рис. 6. Распределение ошибок данных МЛС в плане:

а) до привязки к массиву точек БПЛА; б) после привязки по блокам протяженностью 50 м; в) после привязки по блокам протяженностью 100 м; г) после привязки по блокам протяженностью 150 м;
 O – участок территории с максимальной ошибкой после привязки; pink 0,16 – 0,20 м;
 red 0,20 – 0,30 м; orange 0,20 – 0,30 м; light green 0,40 – 0,50 м; green 0,50 – 0,60 м; dark green 0,60 – 0,70 м;
 cyan 0,70 – 0,80 м; blue 0,80 – 0,90 м; dark blue 0,90 – 1,00 м; purple 1,00 – 1,14 м

Рис. 7 демонстрирует данные МЛС и БПЛА отмеченного на рис. 6, б участка, где присутствует максимальная ошибка привязки в плане по фрагментам длиной 50 м. На фрагменте длиной 50 м оказалось одно одноэтажное здание, нижняя часть которого перекрывается расти-

тельностью, а на фрагмент длиной 100 м дополнительно попало еще одно одноэтажное здание, растительность перед которым отсутствует. Дополнительное здание позволило методу ИСР извлечь большее число вертикальных плоскостей и повысить точность привязки.

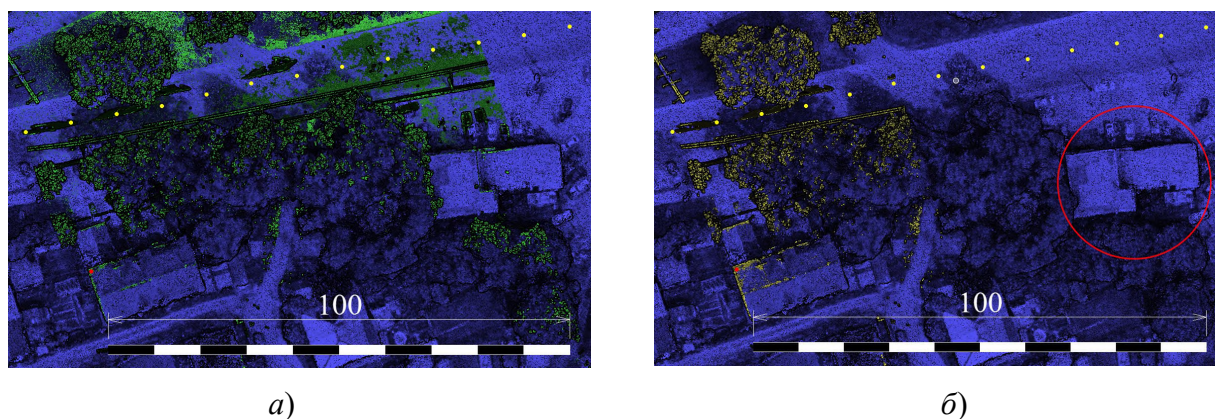


Рис. 7. Участок с максимальной ошибкой в плане после привязки по фрагментам протяженностью 50 м:

а) при отображении массива ТЛО протяженностью 100 м; б) при отображении массива ТЛО протяженностью 50 м; ■ – массив точек БПЛА; ■ – фрагмент массива ТЛО протяженностью 100 м; ■ – фрагмент массива ТЛО протяженностью 50 м; ● – контрольные точки на углу первого здания; ○ – местоположение второго здания

Пример сечения данных МЛС и БПЛА глубиной 30 см, демонстрирующий результаты привязки, показан на рис. 8. Видно, что метод ИСР позволяет выполнять привязку на основе расчета кратчайшего расстояния между плоскостями, вписываемыми в близлежащие массивы данных, что важно в связи с отличиями в характере представления массива ТЛО и массива точек, созданного фотограмметрическим способом. Точки, принадлежащие плоским горизонтальным и вертикальным поверхностям, находятся в пределах плоскости в массиве ТЛО. Эти же точки в фотограмметрическом массиве точек отклоняются от плоскостей. Рассматриваемый пример демонстрирует, что точки фотограмметрического массива на поверхности дороги находятся в пределах слоя 12 см и влияют на точность привязки. Кроме этого, по сравнению с массивом ТЛО, углы зданий и сооружений в фотограмметрическом массиве точек закруглены.

Результаты исследований показывают, что метод ИСР в рамках трехмерного подхода позволяет выполнить привязку данных МЛС и БПЛА. Это может быть полезным для повышения точности данных МЛС в условиях плотной городской застройки. В этом случае данные МЛС должны быть предварительно разделены на фрагменты определенного размера. При выборе размера фрагмента следует учитывать тот факт, что чрезмерное его уменьшение может приводить к обратному эффекту – ухудшению точности в плане за счет отсутствия достаточного количества вертикальных плоскостей зданий и сооружений.

Поэтому можно применить два варианта деления: на фрагменты меньшего размера для привязки по высоте и большего – для привязки в плане. В этом случае далее следует вычислить и применить локальные поправки сначала для коррекции планового положения, а затем высотного или наоборот.

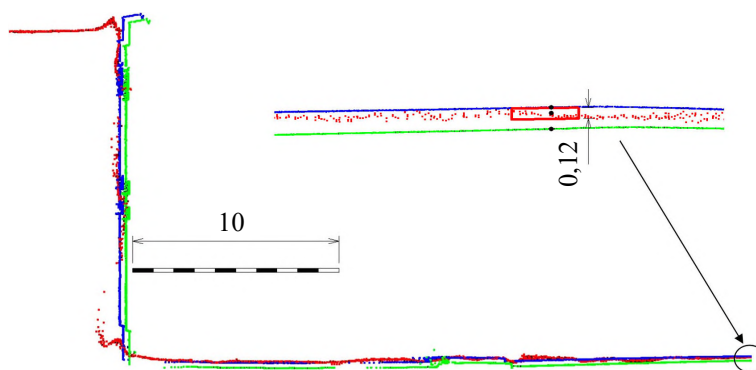


Рис. 8. Результаты привязки:

■ – массив точек БПЛА; ■ – массив ТЛО до привязки; ■ – массив ТЛО после привязки

Заключение

Повышение точности данных МЛС в условиях съемки плотной городской застройки является важной и актуальной задачей. Для ее решения могут быть использованы результаты аэрофотосъемки, так как устанавливаемые на борту летательных аппаратов ГНСС-приемники обладают более стабильным качеством приема сигнала, что позволяет применять для уравнивания меньшее количество наземных опорных точек, чем при МЛС.

В зависимости от качества анализируемых исходных данных необходимо решить, какой подход к привязке является более предпочтительным. При выборе трехмерного подхода следует определиться с размером фрагментов, на которые будут делиться данные МЛС. Результаты выполненных исследований по-

казали, что применяемый при трехмерном подходе метод ИСР позволяет выполнить привязку данных с высокой точностью, а деление на фрагменты можно выполнять дважды: для привязки в плане по фрагментам большего размера, а для привязки по высоте – меньшего. Для исследуемых данных длина фрагмента для привязки в плане составила 100 м, а для привязки по высоте – 50 м.

Для более точного определения оптимального размера фрагмента следует выполнить исследования большего набора данных, осуществить дополнительное деление на фрагменты других размеров. Также следует разработать критерий, который позволил бы автоматизировано выявлять фрагменты, для которых вектора смещений рассчитываются неверно из-за недостаточного количества плоскостей на территории съемки.

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. Wang Y., Chen Q., Zhu L., Liu L., Li. C., Zheng D. A Survey of Mobile Laser Scanning Applications and Key Techniques over Urban Areas // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, Issue 13. – No. 1540. – DOI 10.3390/rs11131540.
2. Комиссаров А. В., Алтынцев М. А. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование: монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с.
3. Altyntsev M. A., Popov R. A. The Analysis of GPS Signal Short-term Loss Influence on the Accuracy of Mobile Laser Scanning Data [Electronic resource] // XXV FIG Congress. – 2014. – Mode of access: http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts04b/TS04B_altyntsev_popov_7115.pdf.
4. Schaer P., Vallet J. Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments // International Archives of ISPRS. – 2015. – Vol. XL-3/W4. – P. 61–64. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-61-2016.
5. 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. – DOI 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-41-2015.

6. Amon P., Rieger P., Riegl U., Pfennigbauer M. Introducing a New Class of Survey-Grade Laser Scanning by use Unmanned Aerial Systems (UAS). XXV FIG Congress. – 2014. – Mode of access: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts11b/TS11B_amon_rieger_et_al_7074.pdf.
7. Forkuo E. K., King B. Automatic fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds // International Archives of ISPRS. – 2004. – Vol. XXXV-B4. – P. 921–926.
8. Han Y., Oh, J. Automated geo/co-registration of multi-temporal very-high-resolution imagery // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – No 1599. doi: 10.3390/s18051599.
9. Гук А. П., Алтынцев М. А. Автоматическая идентификация соответственных точек на аэроснимках лесных массивов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 68–77.
10. Чибуничев А. Г., Михайлов А. П., Старшов В. В. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 2. – С. 14–18.
11. Rao Ch. V., Rao K. M. M., Manjunath A. S., Srinivas R. V. N. Optimization of automatic image registration algorithms and characterization // International Archives of ISPRS. – 2004. – Vol. XXXV-B3. – P. 698–703.
12. Liu S., Jiang J. Registration Algorithm Based on Line-Intersection-Line for Satellite Remote Sensing Images of Urban Areas // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – No 1400. doi: 10.3390/rs11121400.
13. Dong Z., Liang F., Yang B., Xu Y., Zang Y., Li J., Wang Y., Dai W., Fan H., Hyypä J., Stilla U. Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 163. – P. 327–342. doi: 10.1016/j.isprsjs.2020.03.013.
14. Fuad N. Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data // International Archives of ISPRS. – 2018. – Vol. XLII-4/W9. – P. 11–21. – DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.
15. Besl P. J., McKay N. D. Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1992. – Vol. 14, Issue 2. – P. 239–256. doi: 10.1109/34.121791.
16. Алтынцев М. А., Каркокли Хамид Маджид Сабер. Методика автоматизированного уравнивания данных мобильного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 5–23.

Об авторах

Максим Александрович Алтынцев – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Получено 05.04.2022

© М. А. Алтынцев, 2022

Mobile laser scanning data registration using aerial photography results based on computing relative position of point clouds

*M. A. Altyntsev¹**

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: mnbcv@mail.ru

Abstract. One of the most rapid surveying methods of terrestrial survey is mobile laser scanning (MLS). This method allows collecting data for objects of the environment with high detail and accuracy in a short period of time. A condition for obtaining accurate MLS data is receiving a satellite signal of high quality. When scanning built-up urban areas, the quality of signal deteriorates, which leads to a decrease in accuracy. The use of additional control data, one of which may be aerial photography results, helps to compensate for the loss of accuracy. For this purpose, MLS data are registered using aerial photography data with various automatic methods, which are carried out in two- or three-dimensional space. Therefore, the three-dimensional MLS data are previously transformed into the form of a two-dimensional image or a group of aerial images into the form of a three-dimensional point cloud. Registration in 3D space is preferred with low quality of aerial images. The technique of automatic MLS data registration to point clouds generated from aerial images using the ICP method is discussed. It is proposed to pre-divide the MLS data into fragments. It is shown that the size of fragments for calculating local corrections in horizontal position can differ from the size of fragments for calculating corrections in vertical one.

Keywords: mobile laser scanning, aerial photography, UAV, registration, relative orientation, ICP method, accuracy estimation

REFERENCE

1. Wang, Y., Chen, Q., Zhu, L., Liu, L., Li, C., & Zheng, D. A. (2019). Survey of Mobile Laser Scanning Applications and Key Techniques over Urban Areas. *Remote Sensing*, 11(13), 1540. doi: 10.3390/rs11131540.
2. 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].
3. Altyntsev, M. A., & Popov, R. A. (2014). The Analysis of GPS Signal Short-term Loss Influence on the Accuracy of Mobile Laser Scanning Data. Retrieved from http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts04b/TS04B_altyntsev_popov_7115.pdf (accessed 23.03.2022).
4. 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. doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-61-2016.
5. 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. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-41-2015.
6. Amon, P., Rieger, P., Riegl, U., & Pfennigbauer, M. (2014). Introducing a New Class of Survey-Grade Laser Scanning by use Unmanned Aerial Systems (UAS). Retrieved from https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts11b/TS11B_amon_rieger_et_al_7074.pdf (accessed 23.03.2022).
7. Forkuo, E. K., & King B. (2004). Automatic fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds. *International Archives of ISPRS, XXXV-B4*, 921–926.
8. Han, Y., & Oh, J. (2018). Automated geo/co-registration of multi-temporal very-high-resolution imagery. *Sensors*, 18, 1599. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s18051599>. doi: 10.3390/s18051599.
9. Guk, A. P. & Altyntsev, M. A. (2017). Automatic identification of corresponding points for aerial images of forest areas. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 68–77 [in Russian].
10. Chibunichev, A. G., Mikhailov, A. P., & Starshov, V. V. (2015). Automatic generation of a dense point cloud using multiple images, based on semi-global method of matching corresponding points. *Izvestia vuzov. Geodeziya I aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 2, 14–18 [in Russian].
11. Rao, Ch. V., Rao, K. M. M., Manjunath, A. S., & Srinivas, R. V. N. (2004). Optimization of automatic image registration algorithms and characterization. *International Archives of ISPRS, XXXV-B3*, 698–703.
12. Liu, S., & Jiang, J. (2019). Registration Algorithm Based on Line-Intersection-Line for Satellite Remote Sensing Images of Urban Areas. *Remote Sensing*, 11, 1400. doi: 10.3390/rs11121400.
13. Dong, Z., Liang, F., Yang, B., Xu, Y., Zang, Y., Li, J., Wang, Y., Dai, W., Fan, H., Hyypä, J., & Stilla, U. (2020). Registration of large-scale terrestrial laser scanner point clouds: A review and benchmark. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 163, 327–342. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.03.013.
14. Fuad, N. (2018). Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. *International Archives of ISPRS, XLII-4/W9*, 11–21. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.
15. Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. doi: 10.1109/34.121791.
16. Altyntsev, M. A., & Karkokli Hamid Majid Saber. (2021). Technique of automatic mobile laser scanning data adjustment. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(4), 5–23 [in Russian].

Author details

Maxim A. Altyntsev – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Received 05.04.2022

© M. A. Altyntsev, 2022