

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ СООТВЕТСТВЕННЫХ ТОЧЕК НА РЕЗУЛЬТАТЫ УРАВНИВАНИЯ ДАННЫХ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

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

Основным этапом обработки результатов мобильного лазерного сканирования (МЛС), влияющих на итоговую точность создания конечной продукции, является взаимное уравнивание траекторий и массивов точек лазерных отражений (ТЛО), полученных при повторном проезде съемочной системы по одному и тому же участку местности. Уравнивание данных МЛС выполняется на основе поиска соответственных точек в зонах перекрытия проездов. Соответственные точки могут быть добавлены как в интерактивном режиме, так и найдены автоматически с помощью различных алгоритмов и методик. Точность уравнивания будет зависеть от достоверности идентификации соответственных точек, их количества и алгоритма поиска локальных поправок в положение ТЛО. В статье выполнено исследование результатов уравнивания в зависимости от этих факторов. Показано, как выбранный алгоритм уравнивания и его параметры оказывают влияние на итоговую точность.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, уравнивание, предварительная обработка, оценка точности, алгоритм уравнивания

INFLUENCE OF TIE POINT PLACEMENT DENSITY ON MOBILE LASER SCANNING DATA ADJUSTMENT RESULTS

Karkokli Hamid Majid Saber

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student of Engineering Geodesy and Mine Surveying Department, phone: (383)361-01-59, e-mail: enghamid72@yahoo.com

The main stage of the mobile laser scanning data processing results, affecting the total accuracy of creating the final product, is the relative adjustment of trajectories and point clouds obtained during the re-passage of the survey system over the same area. The MLS data adjustment is performed based on the search for tie points in the overlapping areas of the driveways. Corresponding points can be added both interactively and automatically found using various algorithms and techniques. The accuracy of the adjustment depends on the reliability of the tie point identification, their number and the algorithm for searching local corrections to the position of the laser points. The study of the adjustment results depending on these factors is performed. It is shown how the selected adjustment algorithm and its parameters affect the final accuracy.

Keywords: mobile laser scanning, adjustment, preliminary processing, accuracy estimation, adjustment algorithm

Введение

Мобильное лазерное сканирование – это один из трех видов лазерного сканирования, который обычно применяется при съемке линейно-протяженных объектов. Среди наземных методов геодезической съемки МЛС является наиболее оперативным. За полевой день можно получить данные съемки объекта протяженностью в несколько сотен тысяч километров. По данным МЛС выполняют создание топографических планов, трехмерных моделей территорий, определяют геометрические характеристики автомобильных и железных дорог, выявляют их дефекты [1, 2].

Съемка методом МЛС осуществляется в движении. На крышу транспортного средства устанавливаются лазерные сканеры, спутниковые антенны, фотокамеры, инерциальная навигационная система (ИНС). На колесо может крепиться датчик пройденного пути. Контролирует работу все этих устройств блок управления, располагаемый внутри транспортного средства. Запись данных ведется на расположенные внутри блока управления жесткие диски. Включение и остановку записи, слежение за ее процессом выполняет оператор через ноутбук или планшет [3, 4].

После осуществления полевого этапа лазерного сканирования необходимо выполнить предварительную обработку данных, которая заключается в уравнивании сырых траекторий от базовых станций, генерации массивов ТЛО, уравнивании взаимного положения траекторий и массивов ТЛО в межмаршрутных перекрытиях, внешнего ориентирования обработанных данных. Межмаршрутные перекрытия образуются в результате повторного сканирования территории. Они повышают внешнюю точность данных МЛС, увеличивают их плотность, уменьшают количество теневых зон, образующихся из-за различных препятствий [5, 6].

В настоящее время взаимное уравнивание данных МЛС выполняется автоматически в программном обеспечении (ПО) от компаний-производителей лазерных съемочных систем. Например, для систем МЛС от фирмы Riegl данный этап выполняется в ПО Riprocess [7]. Алгоритмы, заложенные в данное ПО, способны с максимальной точностью выполнить взаимное ориентирование массивов ТЛО на территории с высокой плотностью застройки при наличии большого количества вертикальных плоских объектов, таких как стены зданий. В случае, если МЛС выполнено на территории загородных автомобильных дорог, точность автоматического взаимного ориентирования снижается. На мелких вертикальных объектах дорожной инфраструктуры образуются двоения в межмаршрутных перекрытиях [8, 9]. Степень двоения зависит также от погодных условий, при которых выполнялась съемка, характеристик системы МЛС, качестве приема спутникового сигнала, длины базовых линий [5]. В [10–12] описаны основные методики уравнивания данных МЛС с использованием ПО от производителей лазерных съемочных систем.

Для повышения точности результатов взаимного ориентирования данных МЛС, выполненного в ПО от компаний-производителей лазерных съемочных систем, может применяться дополнительное стороннее ПО. Одним из таких ПО является TerraSolid, который обладает большим набором инструментов и алгоритмов

обработки данных лазерного сканирования, имеет возможности гибкой настройки параметров алгоритмов. Широкие возможности ПО TerraSolid требуют разработки соответствующих методик [13, 14].

Точность взаимного уравнивания данных МЛС в высотном положении определяется достоверностью вписывания соответственных линий и плоскостей в точки истинной земли. При верной классификации таких точек достоверность вписывания всегда максимальна. Точность взаимного уравнивания в плановом положении определяется достоверностью идентификации соответственных точек и их количеством. На участках автомобильных дорог, где нет зданий, соответственные точки могут быть добавлены на мелких вертикальных объектах, таких как дорожные знаки и опорные сооружения. Но в случае автоматического поиска количество неверно идентифицируемых соответственных точек может быть велико. В этом случае необходимо выбрать такой алгоритм уравнивания и его параметры, чтобы неверно идентифицируемые точки не оказывали отрицательного влияния на точность уравнивания. В противном случае следует разработать критерий интерактивного исключения соответственных точек из уравнивания [15–20].

Методы и материалы

Одними из наиболее сложных территорий для уравнивания данных МЛС являются участки автомобильных дорог, окруженных растительностью и незначительным количеством мелких объектов, такими как дорожные знаки и опорные сооружения. Взаимное уравнивание планового положения таких территорий требует высокой достоверности идентификации мелких объектов в процессе поиска соответственных точек. На территориях с большим количеством растительности соответственные точки могут быть найдены не только на мелких объектах, но и на самой растительности. Точность идентификации соответственных точек на растительности достаточно низкая, они негативно влияют на результаты взаимного ориентирования.

Чтобы снизить влияние неверно добавленных соответственных точек на итоговую точность взаимного ориентирования, часто необходимо при поиске локальных поправок во взаимное положение массивов ТЛО применять сглаживающие фильтры. В зависимости от плотности размещения соответственных точек следует подобрать параметры фильтрации таким образом, чтобы неверно идентифицируемые точки оказывали наименьший вклад в поиск поправок. В противном случае следует дать рекомендации, когда неверно идентифицируемые соответственные точки следует интерактивно удалять.

Данные МЛС с системы Riegl VMX-250 на территорию автомобильной дороги, вокруг которой располагалась высокая и низкая растительность, были выбраны для исследований процесса взаимного уравнивания. Было определено, что область поиска соответственных точек следует ограничивать как можно меньшим расстоянием от дорог. Если вдоль дороги присутствуют только дорожные знаки, максимальную область поиска от траектории движения системы МЛС следует ограничивать десятью метрами. В противном случае она не должна превышать 45 м.

На рис. 1 в режиме отображения по высоте от синего до красного цвета показан фрагмент данных, где древесная растительность располагается на расстоянии более 60 м от дороги, а травянистая и кустарниковая – вплотную к ней. Параллельно автомобильной дороге проходит линия электропередач (ЛЭП) – на расстоянии 40 м от дороги. Чтобы соответственные точки определялись на опорах ЛЭП задавалась максимальная область поиска – 45 м. Область поиска на рисунке заштрихована черными диагональными линиями. Автоматически найденные соответственные точки отображены малыми синими и бирюзовыми окружностями. Их поиск осуществлялся на основе разработанной методики взаимного уравнивания в ПК TerraSolid. В ходе уравнивания необходимо было разделить точки на класс истинной земли с помощью алгоритма Аксельсона [21], 2 уровня по высоте от истинной земли (0–1 м, > 1 м) и класс мелких объектов.

Как видно из рис. 1, соответственные точки были найдены на всех вертикально расположенных опорах ЛЭП, на кустарниках между ЛЭП и дорогой, а также на дорожных знаках. Все точки, найденные на кустарниках, обведены черными полигонами, многие из точек идентифицированы с низкой точностью.

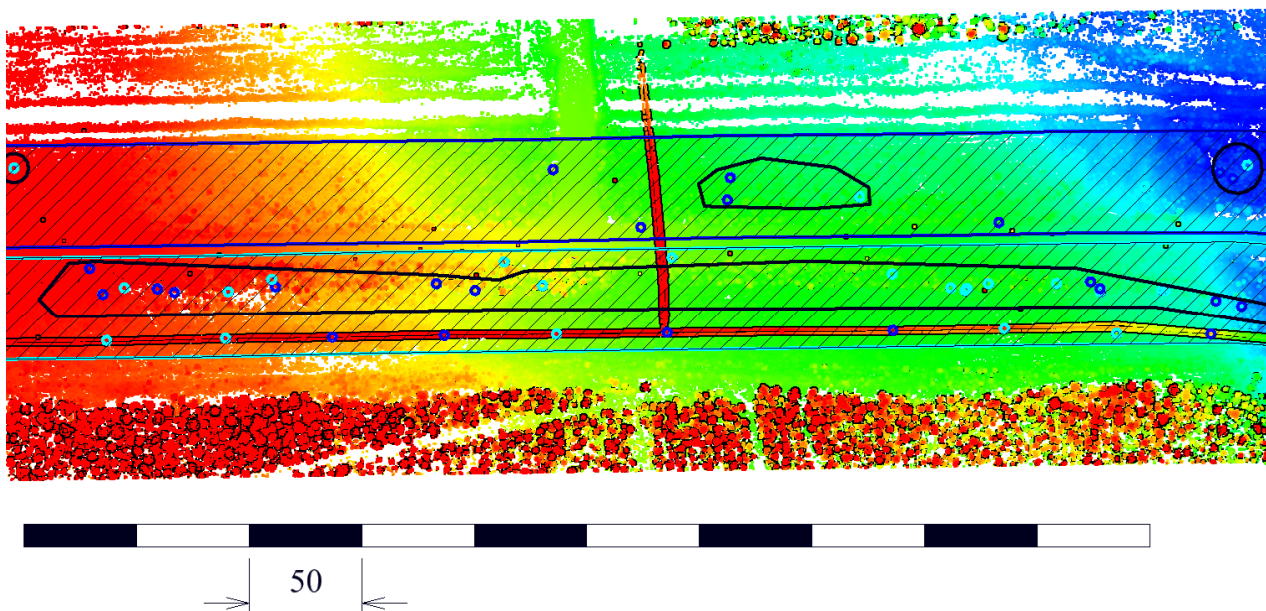


Рис. 1. Пример данных МЛС с результатами поиска соответственных точек

Чтобы определить степень влияния неверно идентифицированных соответственных точек на общий результат взаимного уравнивания, поиск локальных поправок во взаимное положение массивов ТЛО был осуществлен без применения фильтров сглаживания и с помощью одномерного фильтра Гаусса [22]:

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

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

σ – стандартное отклонение распределения Гаусса.

При выборе фильтра Гаусса исследовалось, какое значение переменной x является наиболее оптимальным при уравнивании планового положения массивов ТЛЮ. Максимальное допустимое значение переменной x ограничено программным обеспечением уравнивания массивов ТЛЮ и составляет 100 м.

На рис. 2 показана зависимость ошибки взаимного планового положения массивов ТЛЮ на одном из дорожных знаков исследуемого фрагмента после уравнивания от значений переменной x . Расстояние между соответственными точками этого дорожного знака и ближайшими неверно идентифицируемыми точками кустарников составило 18 м. Так как локальные поправки рассчитываются не для каждой ТЛЮ отдельно, а для ТЛЮ каждой сканерной линии необходимо учитывать продольное расстояние по ходу направления лазерного сканирования. Данное расстояние составило 14 м.

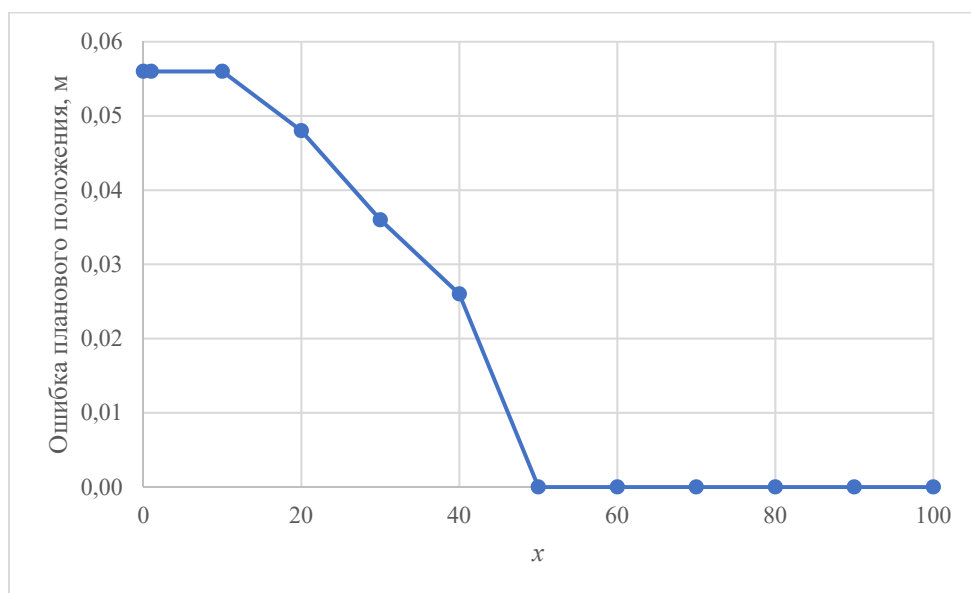


Рис. 2. Пример зависимости ошибки планового положения на дорожном знаке от значения переменной x

Согласно рис. 2 при значениях $x > 50$ м двоение на рассматриваемом дорожном знаке устраняется полностью. Пример двоения массивов ТЛЮ в месте расположения дорожного знака показан на рис. 3, а на рис. 4 изображено положение массива ТЛЮ после уравнивания.

На рис. 5 показан еще один пример уравнивания положения ТЛЮ в месте расположения другого дорожного знака. Расстояние между его соответственными точками и ближайшими неверно идентифицируемыми точками кустарников составило 51 м, а расстояние в продольном направлении – 3 м. Двоение на этом дорожном знаке полностью устраняется при значениях $x > 60$ м.

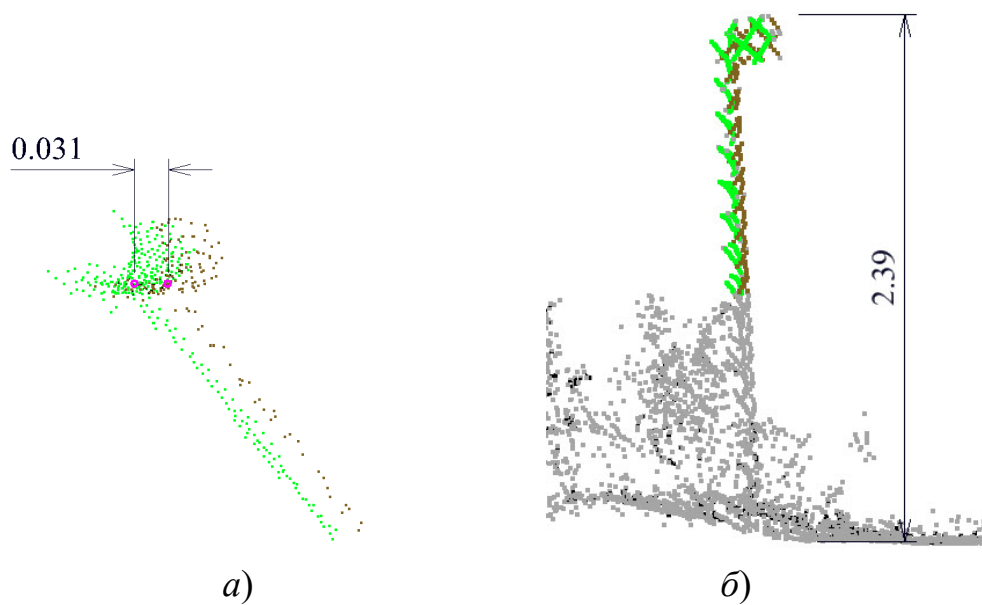


Рис. 3. Дорожный знак до уравнивания:
a) вид сверху; *б)* вид сбоку

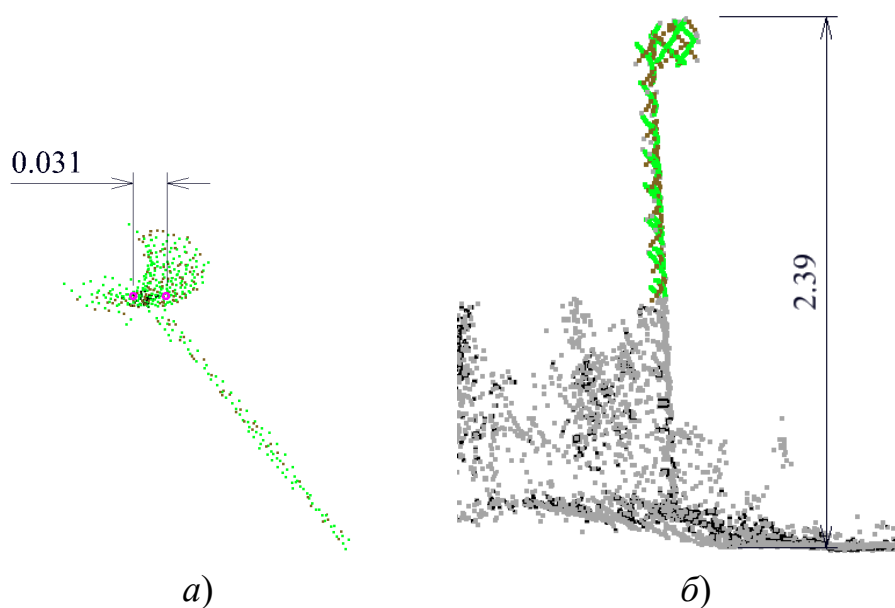


Рис. 4. Дорожный знак после уравнивания:
a) вид сверху; *б)* вид сбоку

В результате анализа нескольких других фрагментов территории, где рядом с автомобильной дорогой располагались линейно-протяженные объекты с опорами, такие как ЛЭП и наземные трубопроводы, а также другие промышленные сооружения, было определено, что наиболее оптимальным является значение x , равное 100. В этом случае неверно идентифицируемые соответственные точки практически не снижают точность взаимного уравнивания.

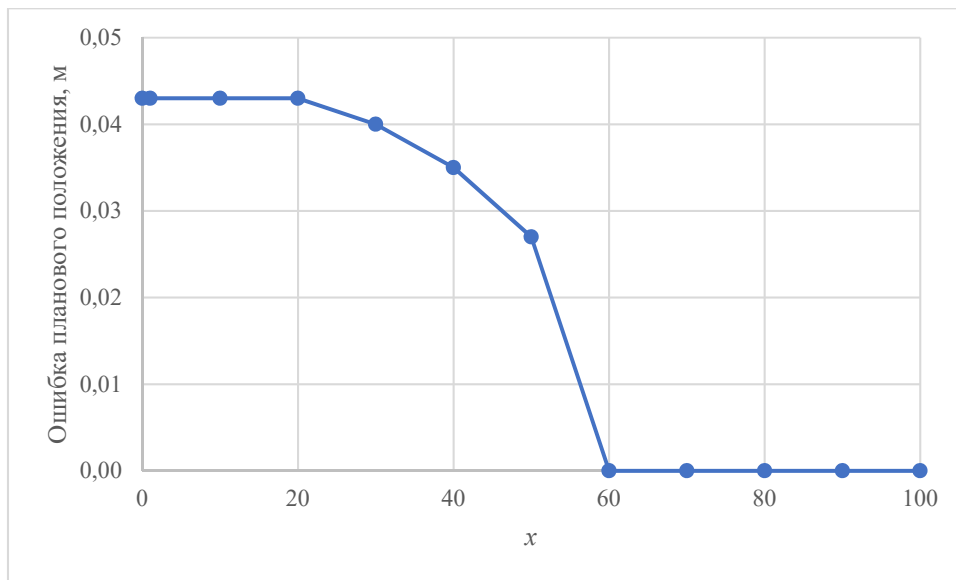


Рис. 5. Второй пример зависимости ошибки планового положения на дорожном знаке от значения переменной x

Рассмотрим теперь ситуацию, когда вдоль автомобильной дороги располагается только растительность и небольшое количество дорожных знаков. На рис. 6 в виде розовых окружностей показан результат автоматического поиска соответственных точек на участке такого типа. На представленном фрагменте всего было найдено 7 точек, из которых 4 – на дорожных знаках, а 3 – на кустарниковой растительности. Соответственные точки, найденные на кустарниковой растительности, обведены черными окружностями.

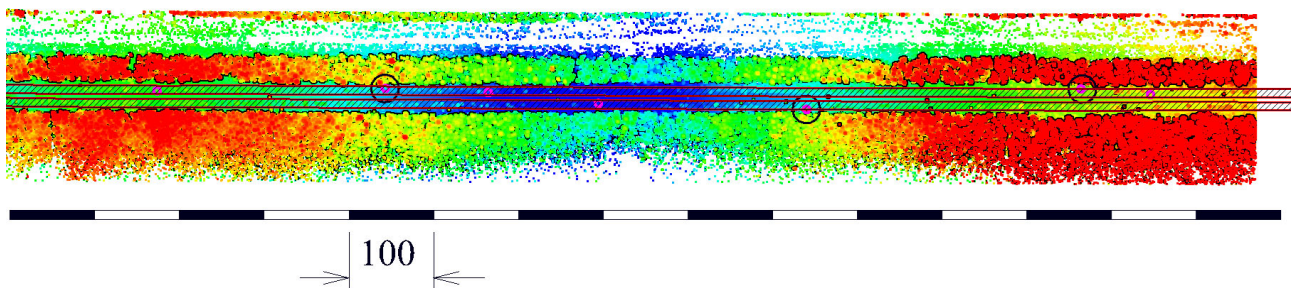


Рис. 6. Второй пример данных МЛС с результатами поиска соответственных точек

На рис. 7 показана увеличенная справа часть этого фрагмента, где правильно найденные на дорожном знаке соответственные точки обведены зеленой окружностью. Соответственные точки на кустарниковой растительности этого участка найдены с большой ошибкой планового положения – 0,150 м. Реальная ошибка в этом месте составляет всего 0,017 м, измеренная по двоению массива ТЛЮ на дорожном знаке.

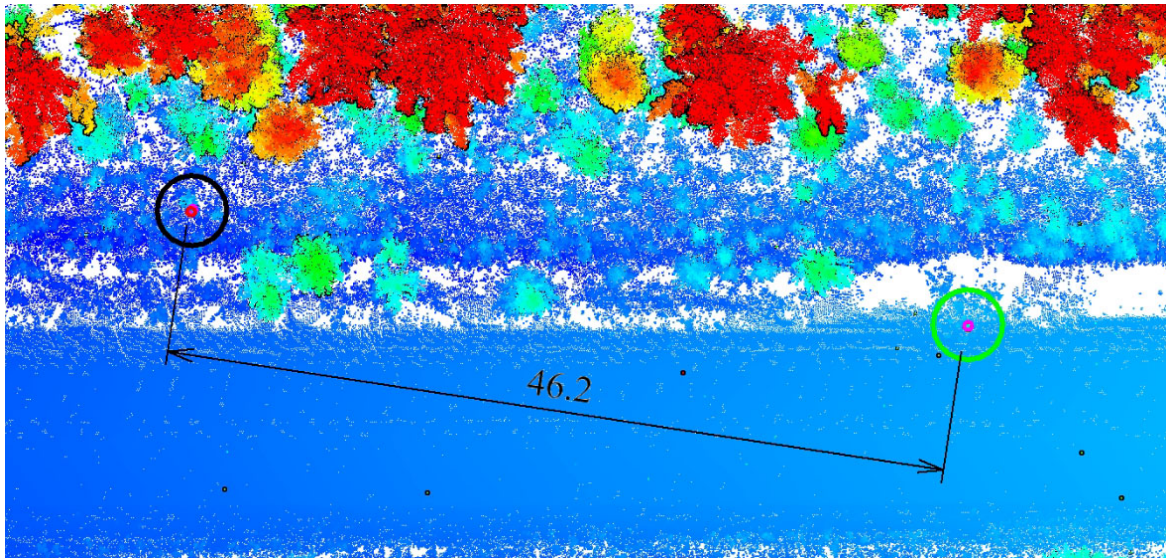


Рис. 7. Взаимное положение правильно и неверно идентифицируемых соответственных точек

На рис. 8 показана зависимость ошибки взаимного планового положения массива ТЛЮ после уравнивания на рассматриваемом дорожном знаке от значения переменной x , применяемого при поиске локальных поправок. График получился диаметрально противоположным выше исследуемой ситуации. Двоение на этом дорожном знаке полностью устраняется при значениях $x < 40$ м. Из-за низкой плотности расположения соответственных точек значение ошибки на отмеченной точке кустарниковой растительности перестает влиять на правильно идентифицируемые соответственные точки, если значение расстояния между точками превышает значение переменной x .

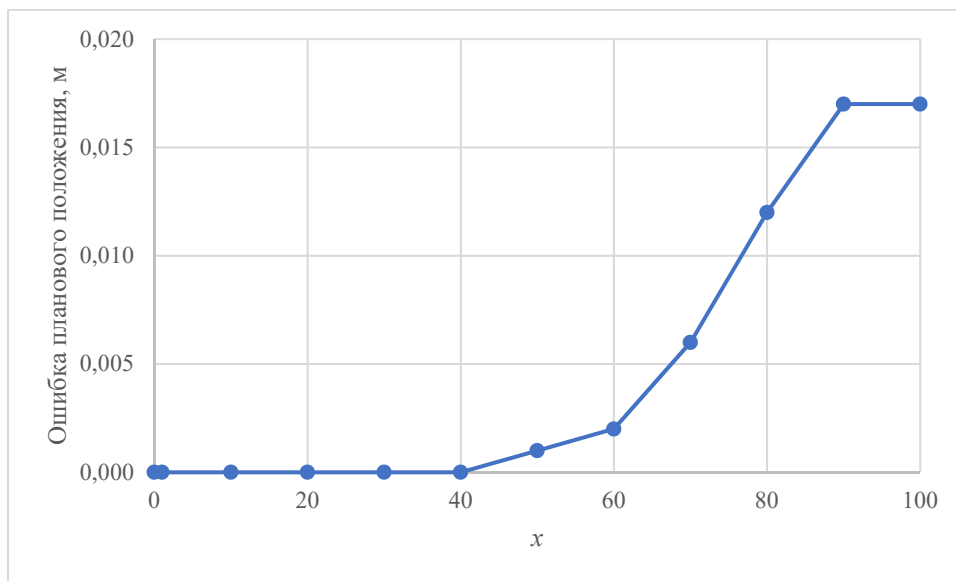


Рис. 8. Третий пример зависимости ошибки планового положения на дорожном знаке от значения переменной x

На основе анализа рис. 8 видно, что без применения сглаживающих фильтров или с минимальной степенью сглаживания можно добиться минимальных двоений на мелких вертикальных объектах при низкой плотности соответственных точек. Но тогда вблизи со всеми неверно идентифицируемыми точками будут наблюдаться наибольшие ошибки, которые, например, могут выражаться в двоении границ асфальтового покрытия – там, где соответственные точки не могут быть идентифицированы. То есть массив ТЛО после уравнивания будет искажен в наибольшей степени. Избежать таких искажений позволяет применение в процессе уравнивания сглаживающего одномерного фильтра Гаусса со значением $x = 100$ м.

Таким образом, можно сделать вывод, что найденные на растительности соответственные точки следует интерактивно удалять только при ситуациях, когда полоса их поиска ограничена расстоянием 10 м в сторону от траектории движения системы МЛС. Данное низкое значение полосы выбирается по причине отсутствия каких-либо других мелких вертикальных объектов, кроме дорожных знаков, на большем расстоянии от дороги. Если вблизи с дорогой на расстоянии не более 45 м проходят другие линейно-протяженные объекты, то полоса поиска увеличивается и неверно идентифицируемые точки на растительности не удаляются.

Заключение

Взаимное ориентирование массивов ТЛО на территории с плотной застройкой выполняется автоматически в ПО от компаний-производителей лазерных сканеров. В случае, если осуществляется съемка загородных территорий, когда количество плоских и других вертикальных объектов минимально, автоматические алгоритмы начинают работать с более низкой точностью. Территории с невысокой плотностью застройки требуют разработки дополнительных методик и алгоритмов уравнивания. Для достижения наилучших результатов взаимного ориентирования массивов ТЛО таких территорий, включающих большое количество растительности, предложено применять одномерный фильтр Гаусса со значением переменной $x = 100$ м. Интерактивно удалять неверно соответственные точки предложено только в случае их низкой плотности размещения – когда нет проходящих рядом с дорогой других линейно-протяженных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. – 03010. – 5 p.
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. Алтынцев М.А. Автоматизированное определение характерных линий автомобильных дорог по данным мобильного лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – С. 109-117.

4. Шануров Г.А., Половнев О.В., Манилова А.Д. Способ обработки результатов топографической съемки, выполненной с использованием мобильного сканирующего комплекса // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2016. – №3. – С. 42-47.
5. 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.
6. Комиссаров А. В., Алтынцев М. А. Метод активного дистанционного зондирования: лазерное сканирование : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. – 254 с.
7. Рыльский И. А. Уравнивание данных лазерного сканирования в RIPROCESS // Вестник науки и образования. – 2020. – № 15-1(93). – С. 65–69.
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. 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.
10. 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.
11. Levinson J., Montemerlo M., Thrun S. Map-Based Precision Vehicle Localization in Urban Environments // Robotics: Science and Systems. – Vol. III. – 2007.
12. Zhao Y. GPS/IMU integrated system for land vehicle navigation based on MEMS // KTH Royal Institute of Technology. – 2011. – 85 с.
13. 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.
14. TerraScan User Guide. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (дата обращения 28.04.2021).
15. 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.
16. 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.
17. 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), 1540.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models // International Archives of ISPRS. – 2000. – Vol. XXXIII-4. – P. 111–118.
22. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение: 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с.