

— ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ —

УДК 528.7+528.8

DOI 10.25587/SVFU.2022.25.1.009

А.А. Ковров

ФГБУ "Центр геодезии, картографии и ИПД", г. Москва, Россия

**О ПУТЯХ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ
МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

Аннотация. В настоящее время технология мобильного лазерного сканирования все чаще используется при выполнении крупномасштабной топографической съемки автодорог и прилегающих к ним территорий и при обследовании дорожного полотна. Достоинства технологии мобильного лазерного сканирования – оперативность и точность получаемых результатов. В статье рассмотрены основные источники погрешностей, возникающих при съемке с использованием мобильных сканирующих систем. Проанализированы имеющиеся и предложены новые способы повышения точности результатов мобильного лазерного сканирования, а также приведена методика оценки их точности. На основе анализа показателей точности съемки с использованием мобильных сканирующих систем сделан вывод о возможности их применения для выполнения крупномасштабной топографической съемки автодорог и прилегающей территории. Установлено, что основным источником погрешностей является аппаратура глобальной навигационной спутниковой системы (далее – ГНСС), с использованием которой вычисляется траектория мобильного сканера. Показаны способы, с использованием которых возможно повысить точность съемки в условиях слабого или отсутствующего сигнала ГНСС. Рассмотрены вопросы оценки точности результатов мобильного лазерного сканирования. Показано, что если выставочные параметры компонентов мобильной системы сканирования были тщательно откалиброваны, то основной источник ошибок будет связан с работой навигационного блока и лидаров.

В частности, при полной или частичной потере сигнала ГНСС, а также при значительной величине эффекта многопутности, точность определения положения и ориентации мобильной платформы будет снижаться.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, инерциальная навигационная система, глобальная спутниковая навигационная система, топографическая съемка, облако точек, лидар.

А.А. Kovrov

Center of Geodesy, Cartography and SDI, Moscow, Russia

**ABOUT THE WAYS TO IMPROVE THE ACCURACY
OF MOBILE LASER SCANNING RESULTS**

Abstract. Currently, mobile laser scanning technology is increasingly used in large-scale topographic surveys of roads and adjacent areas and in the inspection of the roadway. The advantages of mobile laser scanning technology are the efficiency and accuracy of the results obtained. The article considers the main sources of errors that occur when shooting with the use of mobile scanning systems. The existing and proposed new ways to improve the accuracy of the results of mobile laser scanning are analyzed, as well as a technique for assessing their accuracy. Based on the analysis of survey accuracy indicators using mobile scanning systems, it was concluded that they can be used to perform large-scale topographic surveys of roads and the surrounding area. It was established that the main source of errors is the equipment of the global navigation satellite system (hereinafter referred to as GNSS), which is used to calculate the trajectory of a mobile scanner. Methods are shown by which it is possible to improve

КОВРОВ Александр Александрович – н.с., ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД». E-mail: kovrov_aa@nsdi.rosreestr.ru

KOVROV Aleksander Aleksandrovich – Researcher, Center of Geodesy, Cartography and SDI. E-mail: kovrov_aa@nsdi.rosreestr.ru

the accuracy of shooting in conditions of a weak or absent GNSS signal. The issues of evaluating the accuracy of the results of mobile laser scanning are considered. It is shown that if the exhibition parameters of the components of the mobile scanning system were carefully calibrated, then the main source of errors will be associated with the operation of the navigation unit and lidars.

In particular, with a complete or partial loss of the GNSS signal, as well as with a significant multipath effect, the accuracy of determining the position and orientation of the mobile platform will decrease.

Keywords: mobile laser scanning, inertial navigation system, global navigation satellite system, topographic survey, point cloud, lidar.

Введение

Мобильное лазерное сканирование (далее – МЛС) – это одна из современных технологий сбора геопространственных данных, которая на протяжении многих лет успешно используется в нашей стране и за рубежом для съемки автомобильных и железных дорог, а также для инвентаризации дорожной инфраструктуры. Основными преимуществами данной технологии является ее высокая точность и оперативность получения данных – всего за один рабочий день можно отсканировать несколько десятков и более километров автомобильных и железных дорог и получить исчерпывающую и точную информацию о них в виде точечной модели высокого разрешения.

Согласно ГОСТ 32869-2014 лазерное сканирование можно использовать при выполнении топографической съемки автодорог наряду с традиционными способами [1]. При этом заявленная заводами – изготовителями точность получаемой модели в виде облака точек лежит в пределах 5 сантиметров для большинства систем геодезического класса, чего вполне достаточно для топографической съемки крупных масштабов. Однако такая точность может быть получена не всегда. В частности, в условиях плотной городской застройки или въезде сканирующей системы в тоннели, сигналы глобальной навигационной спутниковой системы, позволяющей вычислить траекторию мобильного сканера, становятся недостаточными либо вовсе пропадают. В этом случае точность съемки быстро ухудшается, до нескольких дециметров и более, что делает результаты сканирования непригодными для составления топографических планов крупных масштабов [2]. Для решения возникающих проблем с потерей точности были предложены различные методы. Например, для повышения точности внешнего ориентирования сканов при съемке городских кварталов предлагалось проводить видеофиксацию реперных точек, координаты которых получены независимым способом [2]. Для съемки в тоннелях и внутренних помещениях зданий, когда сигналы ГНСС вовсе отсутствуют, разработана технология SLAM (англ. – Simultaneous Localization And Mapping) [3], которая позволяет выполнять геопривязку сканов по характерным точкам. Однако у технологии SLAM есть принципиальный недостаток, который потенциально может препятствовать ее использованию в крупных дорожных проектах – это отсутствие контроля точности с использованием независимых высокоточных измерений. Также при съемке с применением МЛС присутствуют проблемы при съемке участков поворотов дороги [4].

В статье проанализированы существующие методики повышения точности результатов сканирования и предложены новые способы, такие как использование наземного статического лазерного сканирования для съемки поворотов дороги и использование реперных точек с известными координатами в тоннелях для привязки данных мобильного лазерного сканирования. Предложенные способы основаны на использовании независимых измерений с использованием традиционных технологий, что обеспечит дополнительный контроль и повысит точность уравненных данных лазерного сканирования.

Источники погрешностей мобильной сканирующей системы

По сравнению с тахеометрической съемкой и спутниковой съемкой в реальном времени (RTK – Real Time Kinematic), мобильное сканирование (далее – МЛС) отличается большей оперативностью и независимостью точности измерений от человеческого фактора – все полевые измерения максимально автоматизированы. Для съемки протяженных участков автодорог и городских кварталов данная технология представляется наиболее предпочтительной.

Для получения наиболее точных и достоверных результатов съемки необходимо проанализировать все источники погрешностей, влияющих на окончательные результаты мобильного лазерного сканирования.

Погрешность измерений с применением мобильной сканирующей системы можно разделить на две основные категории: 1) погрешность, связанная с качеством траекторной привязки мобильной платформы, и 2) инструментальную точность работы системы, качество привязки облака точек к опорным точкам (реперным объектам), качество уравнивания отдельных проходов сканирования между собой. Под уравниванием проходов понимается совмещение точек лазерного сканирования, полученных мобильной сканирующей системой, проехавшей по одному и тому же маршруту (туда и обратно), как правило во встречных направлениях.

Погрешности первой группы связаны с качеством ГНСС измерений, выполненных на базовых станциях, работающих непрерывно в течении всего сеанса съемки, и с качеством ГНСС измерений, полученных роверным приемником, входящим в состав навигационного модуля сканирующей системы. Также на погрешности первой группы оказывают влияние ошибки: а) работы инерциальной измерительной системы, б) внешние условия окружающей среды, в) качество нахождения оптимальной траектории движения носителя сканера (строгость математического решения, заложенного в программном обеспечении), г) перемещение носителя с той или иной скоростью и характер поверхности, по которой он перемещается, д) ошибка определения элементов редукции сканирующей системы относительно спутниковой аппаратуры и инерциальной системы [5]. На ошибки группы а) – в) пользователь МЛС повлиять не может. Ошибки, получаемые в ходе спутниковых наблюдений хорошо известны и описаны в различной литературе [6-7]. Присутствие данного рода ошибок приводит к несовпадению траекторий движения мобильной платформы, полученным в разные циклы измерений и как следствие – несовпадению между собой облаков точек. Для уменьшения ошибок, получаемых в ходе спутниковых наблюдений применяются различные приемы. В частности, необходимо: а) заблаговременно рассчитывать благоприятную ГНСС – обстановку, б) обеспечивать наличие базовых станций на протяжении всего маршрута съемки, в) проводить анализ результатов сразу после съемочных работ с определением участков с плохим траекторным решением и пропуском данных ГНСС.

Ошибки группы д), а именно определение элементов редукции сканирующей системы выполняется самими исполнителями полевых работ либо на заводе-изготовителе.

При анализе второй категории ошибок, которые иногда в литературе называются относительными [5] необходимо учесть, что результаты измерений, получаемых с помощью МЛС, имеют более низкую точность в сравнении с традиционной тахеометрией и RTK. Ошибка определения точки лазерного отражения увеличивается с удалением от траектории движения мобильного сканера. Таким образом, максимальная точность (та, что обычно бывает заявлена производителем) достигается при сканировании в непосредственной близости от прибора, например, дорожного полотна. Чем дальше рассматриваемый участок отстоит от дороги, тем ниже точность, с которой определяется пространственное положение точки. Причем это правило одинаково верно, как для лидаров импульсного, так и фазового типа. Например, для сканера АГМ-МС7 [8] абсолютная погрешность определения координат точек лазерных отражений составляет 3 см в плане и 3 см по высоте (на удалении 50 м от траектории), несмотря на то что погрешность измерения расстояния фазовым лидаром PENTAX S2100, входящим в систему АГМ-МС7, составляет 3,1 мм. На удалении 119 м (максимальная дальность для сканера АГМ-МС7) погрешность определения координат точек лазерных отражений не превысит 5 – 7 см. Таким образом, абсолютная погрешность получения координат точек лимитируется точностью навигационного блока. Однако, такой точности достаточно для построения топографических планов 1:500 и 1:1000, так как согласно инструкции [9] средние погрешности съемки составляют $\frac{1}{4}$ от принятой высоты сечения рельефа (минимальная высота сечения рельефа составляет 0,5 м для масштабов 1:500 и 1:1000), а предельно допустимые погрешности измерений для данных масштабов составляет $0.25 * 0.5 = 0.125$ м. Таким образом, система АГМ-МС7 позволяет выполнять топографическую съемку автодорог с зоной отвода до 100 м. При использовании мобильных сканеров с большим радиусом действия, например RIEGL VMX-450, ошибка

определения координат пикетов также будет расти с увеличением расстояния от траектории мобильной платформы, и при расстоянии в 300 м (дальность измерения лидаром RIEGL VMX-450) превысит нормативную точность топосъемки. Следовательно, необходимо использовать специальные приемы, повышающие точность конечных результатов сканирования.

Существующие способы повышения точности МЛС и их анализ

Г.А. Шануровым [2] был предложен способ повышения точности МЛС при съемке в городских кварталах, суть которой заключается в видеофиксации легко различимых реперных точек, которые совмещаются с облаками точек на этапе уравнивания. Видеофиксация обычно проводится параллельно с мобильным сканированием. На этапе предварительной обработки результатов съемки фиксируют плановые координаты легко опознаваемых на видеокадрах, и по возможности удаленных от трассы движения МЛС реперных точек. Такими точками могут быть углы зданий, столбы, специально установленные на этапе рекогносцировки трассы, вехи. Реперные точки не координируют ни одним из традиционных способов. Далее оператор вводит в программу обработки команду «зафиксировать координаты реперных точек и использовать значения этих координат как неизменные».

Оказалось, что СКП координат точек лазерных отражений, определенных с использованием предложенного метода в основном на один сантиметр превышают СКП этих же точек, определенных с использованием способа с твердыми точками. Однако у способа, предложенного Г.А. Шануровым, есть один принципиальный недостаток, заключающийся в том, что его затруднительно использовать на участках открытых автострад, за пределами городской застройки, где практически отсутствуют дома, углы и крыши которых можно было бы использовать для выделения реперных точек. В этом случае представляется целесообразным применение твердых, закрепленных на местности и легко различимых опорных точек, координаты которых получают с использованием РТК. Важно при этом, чтобы твердые точки располагались как вдоль самой дороги, так и на участках за пределами дорожного полотна, что обеспечит дополнительный контроль при уравнивании траектории мобильной платформы.

Важным фактором, влияющим на точность съемки дороги, является количество лазерных сканеров, установленных на мобильной платформе, а также их взаимное расположение. Также точность съемки зависит от типа сканирующей системы и в определенной степени – от используемых алгоритмов обработки данных, которые реализованы в программном обеспечении. Относительно выбора типа лазерных сканеров достаточно сказать, что импульсные сканеры обеспечивают сантиметровый уровень точности измерений в пределах границ дорожного полотна, чего вполне достаточно для выполнения большинства съемочных работ. Для выявления мелких дефектов поверхности целесообразно применение фазовых сканеров, что совместно с применением эффективных алгоритмов фильтрации и уравнивания позволит получить максимальную точность модели дорожного полотна.

При установке сканера перпендикулярно траектории движения мобильной платформы, расстояние между точками в профиле сканирования будет существенно больше расстояния между самими профилями, которое будет еще больше при увеличении скорости движения мобильной сканирующей системы. Поэтому чаще всего на мобильной платформе устанавливают два сканера, расположенные под углом друг к другу, что с одной стороны дает облако точек в виде равномерной сетки, а с другой позволяет покрыть измерениями автодорогу и прилегающие объекты с минимальным числом мертвых зон, см. рис. 1 [10].

Таким образом, выбор места расположения системы МЛС на мобильной платформе, а также траектория движения самой платформы влияют на информативность облаков точек. Чем выше расположена система, тем меньше образуется теневых участков на откосах и за барьерным ограждением.

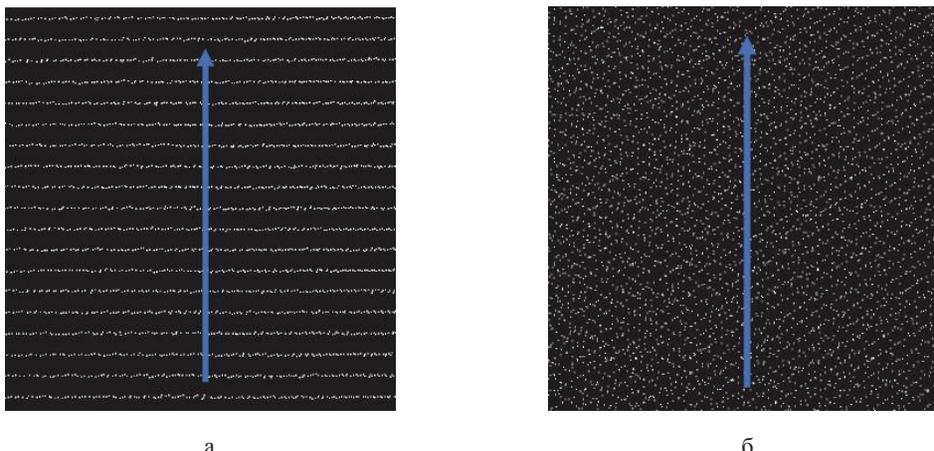


Рис. 1. Облако точек лазерного сканирования: а – при одном сканере, установленном перпендикулярно траектории движения; б – при двух сканерах, установленных под углом друг к другу

Данные мобильного лазерного сканирования используются не только для выполнения топографической съемки автодорог, но и для создания цифровой модели дорожного полотна (ЦМП). Фактором, влияющим на качество создаваемой ЦМП, является снижение точности результатов сканирования на участках с резкими поворотами дороги. В статье [4] рассматривается влияние предварительной обработки данных МЛС на точность построения цифровых моделей поверхности дорог. Как показала практика, в местах разворотов наблюдается резкое падение точности, и поэтому, как предполагают авторы статьи, единственным решением повышения точности построения цифровой модели поверхности дорожного покрытия на участках с разворотами является удаление им принадлежащих точек лазерных отражений.

Предложение по повышению точности МЛС при сканировании поворотов дороги

Для устранения эффекта падения точности, помимо удаления точек лазерных отражений можно предложить другой способ: использование наземного статического лазерного сканирования. В этом случае, не удаляя данные МЛС на участках резких поворотов, дополнительно выполняется сканирование наземным статическим сканером на этих участках, с последующим объединением облаков точек в единый точечный массив данных. При этом координирование сканов, полученных статическим способом, необходимо выполнить с использованием оборудования ГНСС, по маркам или путем ориентации сканера на известный объект. В этом случае, в дополнение к опорным точкам, располагаемым вдоль трассы, появится дополнительный контроль точности по независимым измерениям, полученным наземным статическим лазерным сканированием, инструментальная точность которого выше точности мобильных лидаров. Вообще, описанный прием вполне может быть применим и на контрольных, прямых участках трассы, где отсутствуют вертикально расположенные объекты, такие как дома, что является одним из факторов снижения точности.

Предложение по повышению точности МЛС при частичной или полной потере сигнала ГНСС

Как известно, при выполнении МЛС на застроенных территориях, а также при заезде системы в тоннель, сигналы ГНСС полностью или частично пропадают. При отсутствии сигналов ГНСС в течение 1 минуты точность определения пространственного положения точек облака упадет до дециметровой. В этой связи, актуальной становится задача уравнивания траектории по опорным точкам, координаты которых известны из независимых измерений. Традиционно, для внешнего ориентирования сканов при съемке линейных объектов используют координированные реперные марки, устанавливаемые с интервалом около 50 метров. Однако такая технология является достаточно трудоемкой в плане проведения полевых работ. Можно уменьшить число необходимых реперных точек и повысить точность съемки в условиях слабого сигнала ГНСС, если «принудительно» совмещать точки облака, ближайшие к распознаваемым в облаке реперным объектам. Суть возможной методики заключается в следующем. После выполнения

сканирования рассчитывается траектория МЛС обычным способом. Получаем облако точек, в котором каждая точка облака (пикет в обычном определении) имеет метку времени ГНСС. Затем отыскиваем реперные марки по облаку точек и выделяем их центры. Центры реперных марок могут совпасть, но могут и не совпасть с каким-либо пикетом. Координаты реперных марок должны быть получены заблаговременно с использованием спутниковой съемки или тахеометрии, если съемка ведется в тоннеле. После чего на облаке точек отыскиваем пикет, имеющий наиболее близкую к центру реперной точки метку времени. Формируем невязки, т.е. расхождения между этими двумя точками. С учетом полученных невязок выполняем переуровнивание траектории. После уравнивания центры марок должны практически совпадать по координатам с традиционной съемкой. Таким образом, при плохом или отсутствующем сигнале ГНСС возможно повысить точность уравнивания сканов и уменьшить количество реперных марок.

Предложение по оценке точности данных МЛС

В заключение рассмотрим возможную методику оценки точности измерений, получаемых с использованием системы МЛС, которая позволит независимо от установленных предприятием – изготовителем паспортных значений характеристик сканирующей системы, определить погрешности измерений в плане и по высоте.

Для реализации методики необходимо вдоль маршрута движения сканирующей системы в поле зрения сканеров определить четко видимые цели, которые должны быть расположены как в непосредственной близости от трассы, так и на максимальном удалении от нее, при котором возможна регистрация отраженных импульсов. В качестве целей можно использовать как вехи, дорожные знаки, так и углы зданий, углы кровли или какие-либо хорошо различимые на сканах объекты. Все выбранные цели координируются с использованием спутникового метода RTK с высокой точностью, которые принимаются в качестве исходных. После чего результаты, полученные мобильным лазерным сканированием, сравниваются с исходными. Процедура будет включать следующие три шага: Первоначально данные ГНСС и инерциальной системы совместно обрабатываются для получения траектории мобильной платформы (например, в ПО POSPac Mobile Mapping Suite Applanix). Получают «сырые» данные лазерного сканирования. На втором шаге данные по траектории мобильного сканера объединяются с «сырыми» данными сканирования и получают облако точек в координатах WGS-84 (например, в программах Optech LMS Pro или RIEGL RiPROCESS). На третьем шаге по облаку точек выделяют целевые объекты и сравнивают их координаты с координатами этих же объектов, полученных независимым способом с использованием RTK.

Погрешности определения координат целей, полученных с применением МЛС можно определить по формулам:

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_r)^2}{n}}$$

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_p - y_r)^2}{n}}$$

$$\sigma_h = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_p - h_r)^2}{n}}$$

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \tag{1}$$

где x_p, z_p, h_p – координаты целей, полученных по облаку точек, x_r, z_r, h_r – координаты тех же точек, полученных методом RTK, σ_h – точность по высоте, σ_p – точность в плане, n – общее число целевых объектов.

Однако метод оценки точности данных МЛС только по контрольным точкам, координированным с использованием RTK недостаточно точен по причине частого несоответствия одиночных контрольных точек и пикетов облака точек лазерного сканирования. По этой причине более эффективным методом оценки точности материалов МЛС станет их сравнение с данными статического наземного сканирования, выполненного для тестовых участков, включающих проезды сканирующей системы. Данные статического наземного сканирования имеют большую точность и полноту в сравнении с МЛС, и также как традиционная съемка не коррелируют с данными мобильного сканирования.

Для выполнения оценки данных МЛС можно использовать хорошо известный метод наименьших квадратов. Суть возможной методики оценки точности заключается в следующем.

Рассмотрим основное уравнение, определяющее положение пикета $r_p^m(t)$ в момент времени t в некоторой глобальной системе координат (m):

$$r_p^m(t) = r_b^m(t) + R_b^m(t) \{ a_{IMU/s}^b + R_s^b r_p^s(t) \} \quad (2)$$

где $r_b^m(t)$ – начало системы координат инерциальной системы (b), $R_b^m(t)$ – матрица поворота от системы координат (m) к системе координат (b), $a_{IMU/s}^b$ – вектор смещения начала координат системы сканера (s) от начала координат (b), R_s^b – матрица разворота от системы координат сканера к системе координат инерциальной системы, r_p^s – положение пикета в системе координат сканера.

Координаты пикета p , определяемые в уравнении (2) имеют различные погрешности. Если выставочные параметры компонентов мобильной системы сканирования были тщательно откалиброваны, то основной источник ошибок будет связан с работой навигационного блока и лидаров. В частности, при полной или частичной потере сигнала ГНСС, а также при значительной величине эффекта многопутности, имеющего место в городских кварталах, точность определения положения и ориентации мобильной платформы будет снижаться. В этой связи перспективным методом оценки точности результатов мобильного лазерного сканирования может оказаться сравнение данных, полученных мобильным сканером с данными, полученными статическим наземным сканированием, то есть без использования навигационного блока. Как известно, данные мобильного лазерного сканирования не одинаковы по точности в пределах одной съемочной миссии по причине различных условий ГНСС – наблюдений – сигнал может быть сильнее или слабее. Также точность зависит от того, насколько инерциальная система эффективно рассчитывает положение и ориентацию мобильной платформы. В мобильных системах картографического класса используются дешевые инерциальные модули MEMS, которые не способны в течение продолжительно времени отсутствия сигнала ГНСС поддерживать требуемый уровень точности. Напротив, в системах геодезического класса используются инерциальные системы максимальной точности, что позволяет в течение первых минут отсутствия ГНСС – сигнала сохранять высокую точность съемки.

Данные по статическому наземному сканированию равнозначны, так как при данном виде сканирования не используется навигационный блок. Поэтому нахождение расхождений в облаках точек, полученных статическим и мобильным методами, позволит судить о величине погрешностей в данных мобильного лазерного сканирования.

Для выполнения сравнения статического и мобильного сканирования можно использовать различные итеративные процедуры, известные из вычислительной математики. Одной из таких процедур является итеративный алгоритм поиска ближайшей точки (ICP – iterative closest point) созданный в 1992 году для определения пространственного положения произвольной трехмерной формы. Результатом работы алгоритма является вычисление шести параметров преобразования Гельмерта (три параметра положения и три – поворота), которые будут использованы

для оценки точности результатов мобильного сканирования. Масштабный коэффициент при этом не используется в расчете, так как в мобильном лазерном сканировании он всегда равен единице.

Перед выполнением уравнивания по методу наименьших квадратов облако точек МЛС разделяется на небольшие блоки, соответствующие малому интервалу лазерного сканирования. Эти отдельные блоки последовательно уравниваются с облаком точек статического сканирования. Математическая связь между точками МЛС блока k и соответствующими точками облака статического сканирования следует из соотношения:

$$\mathbf{r}^{TLS} = \mathbf{R}_k \mathbf{r}^{MLS} + \mathbf{t}_k \quad (3)$$

где \mathbf{r}^{TLS} – массив данных статического сканирования, \mathbf{r}^{MLS} – массив данных мобильного сканирования, \mathbf{R}_k – матрица разворота между двумя облаками точек, \mathbf{t}_k – вектор смещения. Тогда по методу наименьших квадратов из решения системы уравнений (3) получим невязки:

$$\varepsilon^2 = \|\mathbf{R}_k \mathbf{r}^{MLS} + \mathbf{t}_k - \mathbf{r}^{TLS}\|^2 \quad (4)$$

Заключение

В процессе исследований проанализированы существующие способы повышения точности съемки с применением мобильной сканирующей системы. Показано, что заявленная производителями мобильных сканирующих систем геодезического класса точность позволяет выполнять с их использованием топографическую съемку автомобильных дорог в случае наличия достаточного сигнала ГНСС. Рассмотрены и проанализированы существующие способы повышения точности данных, полученных с использованием МЛС, и предложены новые. Показано, что использование независимых результатов измерений с использованием традиционных методов для повышения точности мобильного лазерного сканирования на данный момент является необходимым условием при производстве топографической съемки автодорог, особенно на участках с недостаточным покрытием ГНСС.

Предложена методика оценки точности результатов лазерного сканирования с использованием целевых объектов.

Литература

1. ГОСТ 32869-2014 // (режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118889>) дата обращения: 02.11.2021.
2. Шануров Г.А. Способ обработки результатов топографической съемки, выполненной с использованием мобильного сканирующего комплекса / Шануров Г.А., Половнев О.В., Манилова А.Д. // Известия вузов, Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 3. – С. 42-47.
3. Fransson J. Increasing the accuracy of positioning in mobile mapping systems, a method supported by simultaneous localization and mapping. // Report 6B, 2017, NTNU // (режим доступа: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2459948>) дата обращения: 01.11.2021.
4. Алтынцев М.А. Влияние результатов предварительной обработки данных мобильного лазерного сканирования на точность построения цифровых моделей поверхности автодорог / М.А. Алтынцев, Х.М. Сабер // Интерэкспо Гео-сибирь. – 2020. – № 1. – С. 74-85.
5. Дулин С.К. Точность геопространственных данных железнодорожной инфраструктуры, полученных методом мобильного лазерного сканирования / Дулин С.К., Якушев Д.А. // Наука и технологии железных дорог, сетевое издание. – 2017. – № 4. – С. 54-62.
6. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. – 360 с.
7. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.
8. Система мобильного сканирования АГМ-МС7 (2021) // (режим доступа: <https://www.agmsys.ru/mscan/ms7-2100>) дата обращения: 12.10.2021.

9. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. – М.: Недра, 1982. – 160 с.

10. Кузнецов А.О. Современные системы мобильного лазерного сканирования и особенности их применения на автомобильных дорогах (2019) // (режим доступа: <https://dorndi.org.ua/files/upload/Дороги и мосты № 42 с 56-76.pdf>) дата обращения: 02.11.2021.

11. Paul J. Besl A method for registration of 3-D shapes, 1992 // (режим доступа: http://graphics.stanford.edu/courses/cs164-09-spring/Handouts/paper_icp.pdf) дата обращения: 24.11.2021.

References

1. GOST 32869-2014 // (режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118889>) дата обращения: 02.11.2021.

2. SHanurov G.A. Sposob obrabotki rezul'tatov topograficheskoy s'emki, vypolnennoj s ispol'zovaniem mobil'nogo skaniruyushchego kompleksa / SHanurov G.A., Polovnev O.V., Manilova A.D. // Izvestiya vuzov, Geodeziya i aerofotos'emka. – 2016. – № 3. – С. 42-47.

3. Fransson J. Increasing the accuracy of positioning in mobile mapping systems, a method supported by simultaneous localization and mapping. // Report 6B, 2017, NTNU // (режим доступа: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2459948>) дата обращения: 01.11.2021.

4. Altyncev M.A. Vliyanie rezul'tatov predvaritel'noj obrabotki dannyh mobil'nogo lazernogo skanirovaniya na tochnost' postroeniya cifrovyyh modelej poverhnosti avtodorog / M.A. Altyncev, H.M. Saber // Interekspo Geosibir?. – 2020. – № 1. – С. 74-85.

5. Dulin S.K. Tochnost' geoprostranstvennyh dannyh zheleznodorozhnoj infrastruktury, poluchennyh metodom mobil'nogo lazernogo skanirovaniya / Dulin S.K., YAKushev D.A. // Nauka i tekhnologii zheleznyyh dorog, setevoye izdanie. – 2017. – № 4. – С. 54-62.

6. Antonovich K.M. Ispol'zovanie sputnikovyyh radionavigacionnyh sistem v geodezii. V 2 t. T. 2. Monografiya. – М.: FGUP «Kartgeocentr», 2006. – 360 с.

7. Genike A.A., Pobedinskij G.G. Global'nye sputnikovye sistemy opredeleniya mestopolozheniya i ih primeneniye v geodezii. – М.: Kartgeocentr, 2004. – 355 с.

8. Sistema mobil'nogo skanirovaniya AGM-MS7 (2021) // (режим доступа: <https://www.agmsys.ru/mscan/ms7-2100>) дата обращения: 12.10.2021.

9. Instrukciya po topograficheskoy s'emke v masshtabah 1:5000, 1:2000, 1:1000 i 1:500 / Glavnoye upravleniye geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR. – М.: Nedra, 1982. – 160 с.

10. Kuznecov A.O. Sovremennyye sistemy mobil'nogo lazernogo skanirovaniya i osobennosti ih primeneniya na avtomobil'nyh dorogah (2019) // (режим доступа: <https://dorndi.org.ua/files/upload/Dorogi i mosty № 42 с 56-76.pdf>) дата обращения: 02.11.2021.

11. Paul J. Besl A method for registration of 3-D shapes, 1992 // (режим доступа: http://graphics.stanford.edu/courses/cs164-09-spring/Handouts/paper_icp.pdf) дата обращения: 24.11.2021.