

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО СКАНЕРА В ЦЕЛЯХ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОДОРОЖНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ

А.М. Пация («Проектно-изыскательский институт ГЕО», Екатеринбург)

В 2002 г. окончил Полоцкий государственный университет (Белоруссия) по специальности «прикладная геодезия». С 2000 г. работает в ЗАО «Проектно-изыскательский институт ГЕО», в настоящее время — начальник центра дистанционного зондирования.

М.Д. Мухлынина («Проектно-изыскательский институт ГЕО», Екатеринбург)

В 2013 г. окончила физический факультет Уральского федерального университета им. первого Президента РФ Б.Н. Ельцина по специальности «информационные системы». С 2012 г. работает в ЗАО «Проектно-изыскательский институт ГЕО», в настоящее время — инженер-аэрофотогеодезист.

А.Л. Ясашных («Проектно-изыскательский институт ГЕО», Екатеринбург)

В 2014 г. окончил физический факультет Уральского федерального университета им. первого Президента РФ Б.Н. Ельцина по специальности «информационные системы». С 2012 г. работает в ЗАО «Проектно-изыскательский институт ГЕО», в настоящее время — инженер-геодезист.

В.Г. Шуляковский («АртГео»)

В 1994 г. окончил гидрографический факультет Высшего военно-морского училища им. М.В. Фрунзе (Морской корпус Петра Великого — Санкт-Петербургский военно-морской институт) по специальности «инженер-гидрограф». После окончания училища до 2000 г. проходил военную службу в частях Гидрографической службы Черноморского флота РФ и Федеральной службы охраны РФ. С 2010 г. работает в компании «АртГео», в настоящее время — директор департамента лазерных сканирующих систем.

Задача оперативного управления транспортными потоками становится все более острой в современных условиях постоянно растущего автомобильного парка. В связи с этим, своевременный ремонт и оперативное проектирование автомобильных дорог являются приоритетными направлениями в развитии дорожной отрасли и оказывают непосредственное влияние на улучшение дорожной ситуации. Указанные причины предъявляют новые требования к разработке методик проведения инвентаризации дорог и применению для этих целей высокотехнологичного оборудования. Сбор информации о состо-

янии дорожного полотна, разметке, придорожной инфраструктуре и прочих элементах для дальнейшего использования в различных направлениях дорожного хозяйства должен проводиться с помощью методов, наиболее рациональных с точки зрения скорости и качества получаемых материалов. Одним из таких методов является мобильное лазерное сканирование (МЛС).

В 2013 г. специалистами ЗАО «Проектно-изыскательский институт ГЕО» была выполнена инвентаризация дорог в Свердловской области и в Республике Башкортостан общей протяженностью 520 км. Примечательно,

что автодороги находились как в населенных пунктах, так и на межселенной территории. Также было выполнено лазерное сканирование 86 км автодорог для проектирования с целью их дальнейшей реконструкции.

В конкурсной документации не был предусмотрен конкретный метод топографической съемки масштаба 1:1000. Его выбор всецело лежал на подрядной организации, исходя из ее технической оснащенности и численного состава.

Рассматривалось три возможных метода топографо-геодезических работ, для выполнения которых институт располагал собственным парком оборудо-

дования без привлечения суб-подрядных организаций:

- аэрофотосъемка с применением воздушного лазерного сканера;

- тахеометрическая съемка (традиционный метод);

- мобильное лазерное сканирование.

Аэросъемочные работы в большинстве случаев несут большую финансовую нагрузку за счет оплаты аренды воздушного судна, а также дополнительных расходов на топливо, необходимое на полет к объекту с места базирования воздушного судна и перелет обратно. В данном случае существенные финансовые затраты приходились на дополнительные расходы, поскольку на перелет к объекту и обратно требовалось гораздо больше времени, чем непосредственно на аэрофотосъемку объекта. По предварительным экономическим расчетам, которые базировались на общей стоимости договора, такой метод съемки объекта оказался экономически не эффективным. Также после всестороннего анализа геометрических параметров, которые необходимо было отобразить на топографическом плане автодороги, был сделан вывод, что не все элементы дорожной инфраструктуры будут однозначно дешифрироваться по материалам аэросъемки, выполненной даже с высоким (5 см) разрешением на местности.

Традиционный метод съемки, с использованием электронных тахеометров рассматривался как более дешевый и простой метод получения данных в отличие от аэросъемки и мобильного лазерного сканирования. Однако временные затраты, потеря полноты и качества собираемых данных за счет такой технологии съемки, а также субъективного восприятия элементов дорожной инфраструктуры конкретным исполнителем и разроз-

ности групп исполнителей, вынудили данный метод отнести на второй план. Кроме того, себестоимость работ в современных условиях в большей степени зависит от затрат на заработную плату персонала, которая часто составляет большую часть расходов при выполнении инженерных изысканий. По финансовым показателям съемка традиционным методом оказалась сопоставима с аэрофотосъемкой.

Применение мобильного лазерного сканирования в данном проекте по предварительным расчетам представлялось наиболее эффективным как по стоимости, по срокам выполнения работ, так и по полноте и качеству получаемых данных. В результате чего было принято решение первый этап проекта выполнить именно этим методом.

▼ Полевые работы

Рассмотрим результаты выполненных работ по проекту на автодороге Екатеринбург — Невьянск (Свердловская область), включающей участки дорог 2-й и 3-й категории общей протяженностью 88,03 км, проходящие через 10 населенных пунктов, один из которых состоял из смешанной многоэтажной и одноэтажной (индивидуальной) застройки. Согласно техническому заданию ширина поло-

сы съемки, в пределах которой необходимо было получить пространственную информацию, составляла 100 м, то есть по 50 м с обеих сторон от оси автодороги.

Полевые работы проводились мобильным лазерным сканирующим комплексом RIEGL VMX-450 (рис. 1). Он состоит из измерительного блока, четырех фотокамер с разрешением 5 Мпикселей каждая, датчика отсчета пути (DMI — Distance Measuring Indicator) и блока управления. Измерительный блок включает: два сканера RIEGL VQ-450, работающих в режиме профилографа (2D), антенну приемника ГЛОНАСС/GPS (ГНСС) и интегрированную систему инерциальной навигации (ИНС).

Параметры сканирования были подобраны из расчета скорости движения автомобиля 60 км/ч и частоты выполнения измерений 550 кГц для каждого сканера, 1100 кГц для всего измерительного блока. Благодаря этому плотность измерений составила 100 точек лазерных отражений на 1 м² на расстоянии 50 м от оси движения автомобиля. Важно отметить, что при приближении к оси автодороги плотность точек значительно возрастает (до 2400 точек на 1 м²), что позволяет получать очень подробные данные обо всех элементах дороги в непосред-



Рис. 1

Мобильный лазерный сканирующий комплекс RIEGL VMX-450, установленный на автомобиле

редственной близости к автомобилю. Высокая плотность съемки дает возможность оценить и четко зафиксировать текущее состояние дорожного покрытия, превосходя все существующие в настоящее время методы получения данных. Важно понимать, что скорость движения автомобиля с системой сканирования зависит от качества поверхности дороги, знаков и светофоров, ограничивающих скорость, и других условий. При этом ни скорость движения, ни состояние дороги не влияют на точность получения пространственных данных. На точность конечного результата больше всего оказывают влияние условия приема сигналов от спутников ГЛОНАСС и GPS и расположение базовых станций ГНСС (их удаленность и конфигурация).

Технология мобильного лазерного сканирования основывается на применении систем спутникового позиционирования и лазерной локации. Причем для МЛС геометрия расположения созвездия спутников ГНСС и качество приема их сигналов являются критичными, поскольку в отличие от аэросъемки условия приема сигналов спутников ГНСС могут сильно меняться в ходе всего процесса измерений.

Поэтому важными составляющими при МЛС являются датчик DMI и система ИНС, которые входят в состав RIEGL VMX-450 и в комплексе позволяют получить предварительную (в режиме реального времени) траекторию движения автомобиля, обеспечивающую сохранение параметров траектории даже при полной потере сигналов спутников ГНСС (например, при движении под мостами и эстакадами, в тоннелях и т. п.).

Надежность и точность определения пространственного положения траектории движения МЛС обеспечивается спутнико-

выми измерениями в дифференциальном режиме. Поэтому достаточно важным моментом планирования работ является выбор мест расположения базовых станций ГНСС, составляющих основу наземной инфраструктуры для формирования дифференциальных поправок. При выборе места для базовой станции необходимо исключить отрицательные факторы, влияющие на качество прохождения сигнала от спутников ГНСС и его приема антенной базовой станции. К таким факторам относятся препятствия, ограничивающие прием сигнала, многолучевость, активные радиопомехи, мощные электромагнитные поля и т. д. [1]. На объекте работ были установлены три базовые станции на расстоянии друг от друга до 30 км.

Как отмечалось выше, точность спутниковых определенных пространственных координат также зависит от конфигурации созвездия спутников ГНСС и количества видимых спутников в период выполнения работ. Эту информацию можно получить с помощью программного обеспечения блока ИНС, задав планируемое время и место измерений МЛС. В результате планирования был определен период времени, в ходе которого условия выполнения работ были наиболее благоприятными. В итоге на полевые работы по сканированию всех участков автодороги в прямом и обратном направлении потребовалось всего 8 часов.

В соответствии с техническим заданием результаты топографической съемки необходимо было представить в местной системе координат Свердловской области — МСК–66, в которой ведется кадастровый учет [2]. Поскольку измерения пространственных координат выполняются с помощью глобальных спутниковых систем позиционирования, то координаты

точек лазерных отражений определяются в глобальной системе координат WGS–84. Для преобразования данных лазерного сканирования из WGS–84 в МСК–66 на 5 пунктах ГГС II и III классов (с известными координатами в МСК–66) были выполнены измерения геодезическими приемниками ГНСС и вычислены параметры перехода из одной системы координат в другую.

▼ Обработка данных

Процесс вычисления пространственных координат каждой точки лазерного отражения, полученной в результате МЛС, можно представить как совместную обработку следующих данных: пространственных координат (X, Y, Z) траектории движения измерительного блока МЛС, углов наклона измерительного блока по крену, тангажу и рысканью (ω , φ , κ), времени прохождения лазерного импульса от момента его излучения до приема отраженного сигнала сканером и угла поворота сканирующего зеркала.

Первым этапом обработки являлось вычисление пространственных координат траектории движения измерительного блока МЛС с учетом дифференциальных поправок в программе Arplanix POSpacMMS по данным приемников ГНСС на базовой станции, и подвижного, установленного в измерительном блоке системы сканирования. После этого траектория движения МЛС импортировалась в программное обеспечение RiPROCESS компании RIEGL, в котором вычислялись и уравнивались в единое «облако точек» координаты точек лазерных отражений двух сканеров МЛС. В этой программе также вычислялись и уравнивались в единое «облако точек» координаты точек лазерных отражений, полученные по нескольким траекториям — двух, трех, четырех и более проходов.

Контроль пространственных координат X, Y, H «облаков точек» проводился двумя независимыми методами:

1) «По сходимости» четких контуров сканов одного и того же участка объекта съемки в прямом и обратном направлениях. Результирующая погрешность совмещения не превысила 20 мм по всему объекту съемки.

2) «По контрольным точкам», координаты которых получены независимым способом с достаточной точностью одним из традиционных методов. На объекте координаты контрольных точек были определены спутниковыми геодезическими приемниками. Результаты оценки приведены в табл. 1.

Безусловно, итоговые результаты напрямую зависят от используемого оборудования.

Точность системы инерциальной навигации, применяемой в RIEGL VMX-450, по крену и тангажу (ω , φ) составляет $0,005^\circ$, а рысканью (k) — $0,015^\circ$, что на расстоянии в 100 м соответствует в плане 0,017 м и 0,052 м.

Средняя квадратическая погрешность (СКП) измерения расстояния дальномером сканера RIEGL VQ-450 в диапазоне до 50 м составляет 8 мм, а СКП раз-

ности повторных измерений не превышает 5 мм.

Ключевым фактором выбора того или иного метода топографической съемки в большинстве случаев является время, затрачиваемое на получение конечной продукции. Временные показатели выполнения данного проекта по лазерному сканированию, начиная с подготовки полевых измерений до выдачи готового материала в виде цифрового топографического плана масштаба 1:1000, приведены в табл. 2.

Справедливости ради следует отметить, что с помощью лазерного сканирования можно получать только данные об объектах, расположенных выше уровня земли (рис. 2). Что касается подземных коммуникаций, то для сбора информации о них необходимо полевое обследование с использованием специального оборудования для поиска инженерных сетей, а также определения их местоположения. Однако этот вид работ в данном проекте не требовался и в расчет трудозатрат не включался.

В результате мобильного лазерного сканирования было получено порядка 8 млрд точек лазерных отражений и свыше

Разность координат и высот в контрольных точках

Таблица 1

Номер точки	dX, мм	dY, мм	dH, мм
1	35,0	32,5	41,0
2	24,5	28,0	39,0
3	31,5	29,5	40,5
4	37,5	38,0	47,0
5	29,5	30,5	38,0
6	29,0	33,5	37,5
7	31,0	34,0	43,0
8	33,0	31,0	45,0



Рис. 2
Пример поперечного сечения «облака точек» автодороги

14 тыс. фотоизображений с четырех цифровых камер. Фото съемка камерами системы МЛС проводилась параллельно с лазерным сканированием практически все время выполнения работ. Объединение изображений цифровых камер с данными лазерного сканирования позволило получить «облака точек», окрашенные в естественные цвета. Такой материал значительно облегчает процесс идентификации и классификации объектов из всего массива данных лазерных отражений.

Следующим важным шагом являлась классификация лазерных данных, чтобы облегчить дальнейшую задачу их оцифровки. По большому счету, описываемый метод служит для решения более широкого круга

Затраты времени по видам работ на создание цифрового топографического плана методом МЛС

Таблица 2

Наименование работы	Продолжительность, ч
Планирование работ	5–8
Полевые работы	8
Обработка траектории МЛС	1
Распаковка данных и конвертация. Вычисление координат точек лазерных отражений (создание «облаков точек»)	8–10
Уравнивание и калибровка данных сканирования, корректировка траектории	12
Присвоение «облаку точек» истинных цветов	6
Классификация данных лазерных отражений	10
Составление цифрового топографического плана масштаба 1:1000 (количество исполнителей — 11)	100



Рис. 3

Пример классифицированных элементов придорожной инфраструктуры

задач, однако классификация является самым важным и принципиальным в теории обработки данных лазерного сканирования, включая наземное, воздушное и мобильное.

Не вдаваясь в детали классификации, отметим, что из общего количества точек в работу была принята каждая третья, что составило 2 655 517 732 точек, из которых значительная часть была отнесена к классу «земля» — 1 169 474 931 точек.

Таким образом, одной из основных задач стала оптимизация работы с большим массивом точек лазерных отражений, а также организация эффективного взаимодействия между сотрудниками, привлеченными к проекту на разных этапах. Отметим, что качественная классификация данных сканирования является достаточно трудозатратным, но необходимым процессом, требующим высокой квалификации персонала. Поиск ошибок исполнителя на данном этапе занимает существенно большее время, чем выполнение той же задачи заново. Для классификации элементов каждого объекта в «облаке точек» требуется также достаточно много времени, однако в данном проекте при создании топографического плана в таких

работах необходимости не было. Оцифровка точек в двухмерном пространстве и присвоение им семантической информации проводилось в полуавтоматическом режиме. В этом случае из класса объектов «не земля» достаточно несложно распознавались линии электропередачи и связи, объекты правильной геометрической формы, такие как здания и сооружения, дорожные знаки, светофоры, отбойники, километровые столбы и пр. (рис. 3). Общее количество классифицированных элементов придорожной инфраструктуры составило 1970 единиц. Учитывая размер и расположение некоторых элементов, следует отметить, что распознавание их на аэрофотоснимках было бы или затруднительно, или невозможно вовсе. Это еще раз подтвердило правильность выбора метода мобильного лазерного сканирования для выполнения данного проекта.

Основным преимуществом метода МЛС является минимизация затрат на полевые работы и отсутствие человеческого фактора при сборе данных. По нашим оценкам 95% информации в виде трехмерной модели можно получить непосредственно из массива точек лазерных отражений и фотоизображений. В частности, из «облака точек» были получены количественные характеристики растительности: высота деревьев, расстояния между ними и толщина стволов. Полученные данные являются даже избыточными, но при необходимости на их основе можно подсчитать в том числе и объем кроны деревьев.

Цифровые фотоизображения несут важную информацию о характеристиках объектов, таких как назначение, огнестойкость зданий и сооружений, материал, характеристика опор ЛЭП, наименование населенных пунктов, номера домов, тип до-

рожных знаков, характеристики тех или иных коммуникаций.

Результатом проделанной работы стал цифровой топографический план масштаба 1:1000 в форматах ПО MapInfo и AutoCAD. Каждый из этих форматов решает свои задачи, однако база данных в виде «облака точек» в естественных цветах позволяет получить необходимую информацию как по всему объекту, так и по его отдельным элементам. Собранные один раз высокоточные данные о состоянии дорожного полотна, элементах дороги, пересекаемых коммуникациях и прочем, могут быть использованы многократно для разных задач и до тех пор, пока не устареют, вследствие объективных изменений обстановки на объекте съемки.

Также эта информация может быть использована в дорожном хозяйстве при проектировании автодорог и их реконструкции, согласовании технических условий при прокладке инженерных сетей вблизи дорог, паспортизации дорог, моделировании дорожной обстановки при транспортировке крупногабаритных грузов и многом другом.

▼ Список литературы

1. Паця А.М., Молганов С.М., Дмитриев Д.Н. Безальтернативные методы геодезических изысканий для зеленых территорий // Инженерные изыскания. — 2010. — № 6.
2. Герасимов А.П., Назаров В.Г. Местные системы координат. — М.: Издательство «Проспект», 2010.

RESUME

Results of the inventory and executive survey of roads stretching over 600 km in the Sverdlovsk region and the Republic of Bashkortostan, fulfilled in 2013 with the help of mobile laser scanner RIEGL VMX-450 are considered. High efficiency of the mobile laser scanning in terms of the both survey rate and quality of the obtained materials, which can then be used to solve various problems in the road sector, is noted.