

ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ С АЛГОРИТМОМ SLAM ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГНСС

П.П. Куклина (Филиал ППК «Роскадастр» «Аэрогеодезия», Санкт-Петербург)

В 2022 г. окончила Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета с присвоением квалификации «бакалавр» по направлению «картография и геоинформатика», в 2024 г. — с присвоением квалификации «магистр» по направлению «картография и геоинформатика». С 2022 г. работает в филиале ППК «Роскадастр» «Аэрогеодезия», в настоящее время — ведущий специалист.

Современные требования к материалам картографо-геодезических работ предполагают оперативное получение пространственных данных, сочетающих высокую метрическую точность и визуальную наглядность. Традиционные методы съемки с использованием исключительно ГНСС-оборудования оказываются малоэффективны или неприменимы в условиях отсутствия стабильных сигналов ГНСС или их подмены, а также на городских территориях с многоэтажной застройкой. Технология мобильного лазерного сканирования (МЛС) с алгоритмом SLAM (Simultaneous Localization and Mapping — одновременная локализация и картографирование) позволяет существенно снизить зависимость от сигналов ГНСС, обеспечивая при этом сбор детальных и точных пространственных данных. Эта технология представляет собой интеграцию лазерного сканера (SLAM-сканера) и инерциального измерительного устройства (ИИУ, IMU) с интеллектуальным SLAM-алгоритмом обработки, что делает ее незаменимым инструментом для решения задач крупномасштабного топографического картографирования, кадастро-

вых работ и цифрового моделирования в условиях нестабильных сигналов ГНСС.

▼ Технология МЛС со SLAM: принцип работы и преимущества

Технологический процесс мобильного лазерного сканирования с алгоритмом SLAM основан на объединении данных лазерного сканера и инерциального измерительного устройства. МЛС обеспечивает высокоточные измерения расстояний до объектов, формируя облако точек лазерных отражений (ТЛО), а ИИУ отслеживает ускорения и угловые скорости сканера, позволяя прогнозировать маршрут его перемещения между сканами (фрагментами облака ТЛО за определенный промежуток времени) [1]. Алгоритм SLAM решает две взаимосвязанные задачи: построение трехмерного облака точек неизвестного пространства и одновременное определение положения сканера относительно объектов расположенных в этом пространстве. Это достигается за счет методов оптимизации графов и фильтров частиц, которые минимизируют накапливающуюся погрешность, непрерывно сопоставляя геометрию текущего скана с уже по-

строенной трехмерной моделью местности [2].

Основным практическим преимуществом является полная автономность алгоритма. Технология не требует предварительной маркировки опорных и контрольных точек планово-высотной подготовки (ПВП) или стабильных сигналов ГНСС. Эта особенность, в отличие от спутниковых геодезических методов, позволяет использовать при мобильном лазерном сканировании SLAM-сканер: внутри помещений, в подземных сооружениях, в лесных массивах, в городских «каньонах» и в ситуациях с отсутствием или подменой сигналов ГНСС. Более того, алгоритм SLAM способен эффективно компенсировать систематический дрейф инерциального измерительного устройства, что обеспечивает сохранение точности даже в ходе продолжительных сеансов сканирования.

Совокупность ключевых преимуществ технологии мобильного лазерного сканирования с алгоритмом SLAM формирует ее уникальное конкурентное преимущество. Во-первых, технология позволяет снизить зависимость от ГНСС, что кардинально расширяет географию ее

применения в условиях, где спутниковые методы оказываются неэффективны. Во-вторых, она дает возможность повысить производительность полевых работ по сравнению с традиционным тахеометрическим методом за счет съемки сканером, установленным на платформе (автомобиле или электросамокате), которая может двигаться со скоростью до 15 км/ч. При этом мобильность и адаптивность технологии проявляются в возможности оперативно снять сканер, установленный на автомобиле, и закрепить его на рюкзаке. Немаловажным является и то, что алгоритм SLAM гарантирует высокую плотность и наглядность данных, благодаря параллельной работе панорамной камеры. Наконец, многозадачность технологии позволяет использовать собранный массив данных для решения различных задач: от создания цифровой модели рельефа (ЦМР) и цифровой модели местности (ЦММ), генерации фотосхем до выполнения крупномасштабной топографической съемки, включая подеревную съемку, моделирования фасадов зданий, паспортизации дорог и др.

Технология мобильного лазерного сканирования с алгоритмом SLAM не просто альтернатива традиционным методам сбора пространственных данных, а перспективный, универсальный инструмент для решения широкого круга многих прикладных задач как в картографо-геодезической отрасли, так и в области строительства, транспорта, экологического мониторинга и управлении городским хозяйством.

▼ **Опыт и компетенции филиала ППК «Роскадастр» «Аэрогеодезия» как основа для внедрения МЛС**

Многолетний и многопрофильный опыт филиала ППК «Роскадастр» «Аэрогеодезия» в

сфере геодезии, картографии, инженерных изысканий и кадастровых работ стал фундаментом для успешного внедрения технологии мобильного лазерного сканирования в производственные процессы. Компания применяет наземное лазерное сканирование для создания топографических планов, исполнительных съемок инженерных сооружений и детального моделирования объектов. Также филиал является одним из лидеров в области воздушного лазерного сканирования, выполняя аэрофотосъемочные работы как с пилотируемых воздушных судов, так и с использованием беспилотных авиационных систем для создания цифровых ортофотопланов, ЦМР и ЦММ. Вклад компании в развитие картографо-геодезической отрасли подтверждается и ее активным участием в научно-исследовательских проектах. Филиал ППК «Роскадастр» «Аэрогеодезия» является участником научно-исследовательской работы «Геокарта-2030», в рамках которой ведутся исследования в области лазерного сканирования. Опыт коллектива также был полезен в ходе разработки национальных стандартов РФ (ГОСТ Р), регламентирующих при-

менение технологии лазерного сканирования [3].

Накопленный компанией опыт в воздушном и наземном лазерном сканировании стал прочным фундаментом для внедрения мобильного лазерного сканирования. Это позволило не просто освоить новую технологию, а быстро и эффективно интегрировать ее в существующие производственные процессы. Мобильное лазерное сканирование уже активно используется специалистами филиала на практике для решения широкого круга задач: оперативное получение материалов для обновления цифровых планов городов, создание цифровых моделей зданий с поэтажными планами, выполнение работ по определению границ земельных участков и контуров объектов капитального строительства.

▼ **Оборудование и программное обеспечение**

В филиале ППК «Роскадастр» «Аэрогеодезия» мобильное лазерное сканирование с алгоритмом SLAM выполняется с помощью комплекса GreenValley LiGrip H300 (рис. 1). Его ключевыми компонентами являются: сканирующий блок, инерциаль-



Рис. 1
Комплекс GreenValley LiGrip H300

ное измерительное устройство, панорамная камера и ГНСС-приемник. Комплекс может быть установлен на автомобиль или закреплен на рюкзаке [4]. Основные технические характеристики оборудования приведены в таблице. Комплекс прошел испытания на определение типа средств измерений и включен в Государственный реестр СИ под № 89936-23. Срок действия свидетельства об утверждении типа СИ — до 08.09.2028 г.

В технологической цепочке обработки данных, полученных SLAM-сканером, предварительный этап выполняется в специализированном программном обеспечении Lidar360MLS. Дальнейшая работа с облаками точек лазерных отражений ведется в ПО TerraSolid и Lidar360MLS и включает: классификацию ТЛО, фильтрацию шумов, построение цифровых моделей и другой производной продукции.

Эффективное применение данной технологии невозможно без заранее подготовленного технологического цикла, охватывающего все этапы — от постановки задачи до получения итоговой продукции. Его можно разделить на четыре основных группы: подготовка и планирование работ, выполнение съемки, первичная и камеральная обработка данных (рис. 2).

▼ Подготовка и планирование работ

Первым важным шагом является постановка задачи на основе технического задания (ТЗ) заказчика. Требования ТЗ, а также положения действующих нормативных документов определяют все последующие технологические и метрологические параметры. Проектирование работ ведется с опорой на актуальные ключевые национальные стандарты РФ, которые регламентируют как общие принципы, так и отраслевые особен-

Технические характеристики комплекса GreenValley LiGrIP H300

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерения расстояний, м	0,5–300
Предельная допустимая абсолютная погрешность измерений расстояний:	
— от 0,5 до 60 м включительно, мм	±10
— от 60 до 120 м включительно, мм	±20
— от 120 до 300 м включительно, мм	±30
Частота (скорость) сканирования, точек/с	640 000
Поле зрения сканирования, °	360x285
Точность измерения углов наклона ИИУ, °	0,05
Формат выходных данных	Las, Ply, LiData, E57
Камера	Insta360 One RS 1-Inch
Разрешение камеры, пиксель	6528x3264 (фото) 6144x3072 (видео)
Поддержка ГНСС	GPS / BDS / ГЛОНАСС / Galileo / QZSS
Точность RTK, см	1 + 1 ppm
Хранилище, Гбайт	512 (расширение до 1 Тбайт)
Работа от одной батареи, ч	4
Диапазон рабочих температур, °С	от –30 до +60
Размер сканера, мм	195x125x350
Масса сканера, кг	1,3 (без камеры) 1,7 (с камерой и вехой)
Степень защиты сканера	IP 65

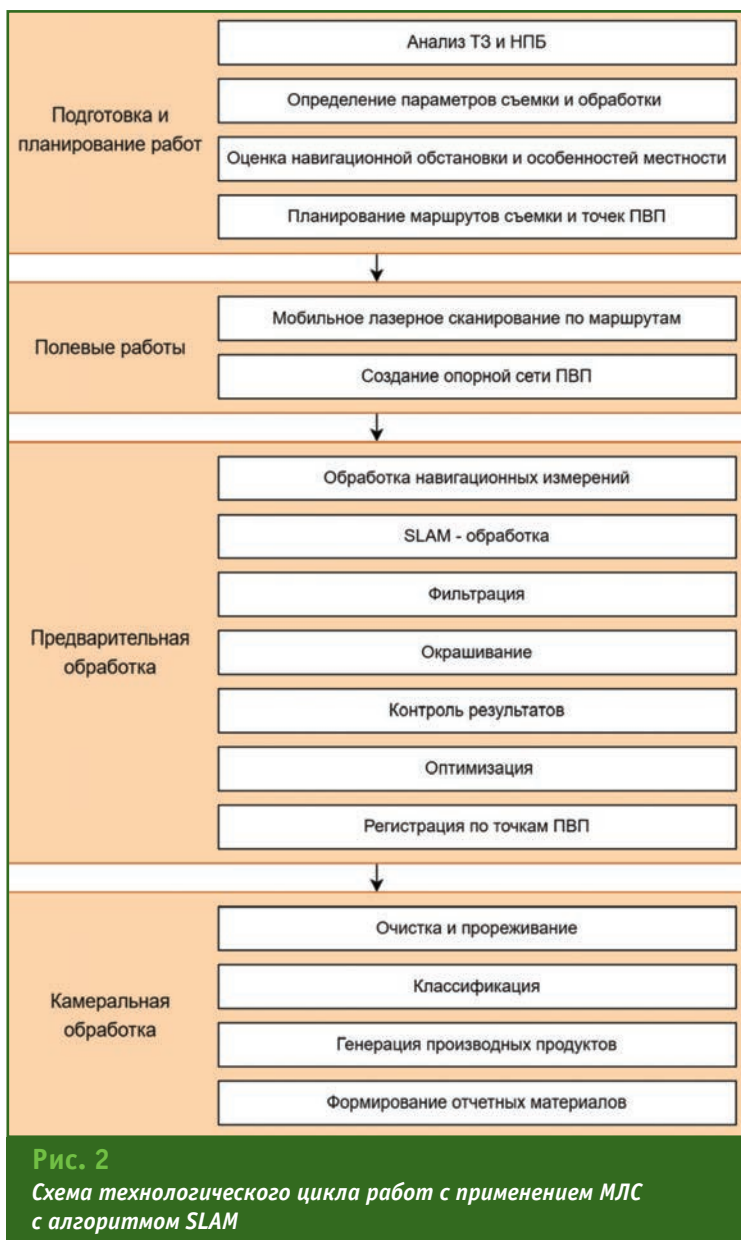
ности лазерного сканирования [5–9].

Цели проекта (например, крупномасштабное картографирование, кадастровые работы, паспортизация дорог или моделирование фасадов зданий) напрямую влияют на выбор платформы и крепление сканера (автомобиль или рюкзак), требуемую плотность и точность ТЛО, необходимость и количество точек плано-высотной подготовки, а также на стратегию обработки данных.

Ключевым элементом подготовки является оценка наличия и стабильности сигналов ГНСС и доступности территории. Она проводится на основе картографических материалов и веб-сервисов, что позволяет прогнозировать и оптимизировать траекторию движения сканера, минимизировать «слепые» зоны и спланировать количество и место расположения опорных и контрольных точек ПВП.

▼ Выполнение съемки

Мобильное лазерное сканирование выполняется по запланированному маршруту как на автомобиле, так и на электросамокате (рис. 3). Контроль за работой оборудования осуществляется оператором дистанционно с помощью смартфона с предварительно установленным специализированным программным обеспечением GreenValley App International. Информация от сканера передается по беспроводному каналу связи Wi-Fi (вайфай) в режиме реального времени. На экране смартфона отображается предварительное облако точек и состояние всех систем: сканирующего блока, инерциального измерительного устройства, приемника ГНСС и камеры. Это позволяет выявлять и устранять потенциальные проблемы во время съемки, такие как потери ГНСС-сигналов или сбой в работе оборудования.



В ходе производственных работ были выявлены основные требования к мобильному лазерному сканированию с алгоритмом SLAM:

— *плавность движения и скорость*. Для обеспечения высокой плотности точек и минимизации ошибок инерциального измерительного устройства скорость сканирования должна быть адаптирована к условиям съемки. Рекомендуемая скорость в городах — до 10 км/ч, в условиях малоэтажной частной застройки — около 6 км/ч, на открытых трассах — до 20 км/ч. Резкие ускорения, торможения и движение задним ходом должны быть минимизированы, так как они негативно влияют на работу алгоритма SLAM;

— *замыкание траектории и перекрытия*. Важно, чтобы маршрут движения образовывал замкнутые контуры (возвращение в точку старта или пересечение траектории). Это позволяет, благодаря алгоритму SLAM, эффективно корректировать накопленную погрешность и необходимо для улучшения геометрии сети ходов и обеспечения объединения («сшивку» отдельных облаков ТЛО в единое) при комбинировании нескольких маршрутов или проектов;

— *калибровочные маневры*. На точке начала съемки и перед ее завершением, при наличии ГНСС-сигналов, выполняются калибровочные «восьмерки» диаметром более 2 м. Эта процедура улучшает начальную инициализацию и финальную привязку данных.

Для повышения эффективности и безопасности работ при сканировании была проведена модернизация крепления сканера на автомобиль, предоставляемого производителем. Оно было дополнено штангой с механическим подъемником, позволяющим оперативно изменять высотное положение сканера в диапазоне от 2 до 5 м (см. рис. 3).



Рис. 3
 Пример использования комплекса для МЛС с алгоритмом SLAM, установленного на автомобиле и закрепленного на рюкзаке

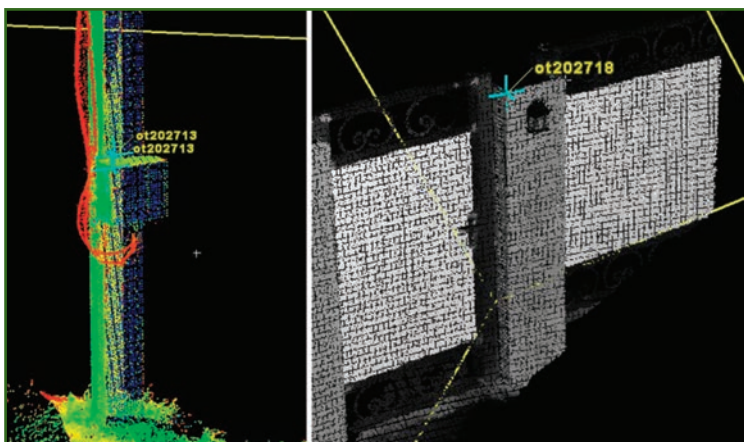


Рис. 4

Контрольные точки плано-высотной подготовки в облаке ТЛО

Это дает существенное преимущество: возможность поднимать оборудование выше уровня легковых автомобилей, ограждений и кустарника для получения обзора или опускать при проезде под низкими ветками деревьев, проводами и эстакадами для снижения риска повреждения оборудования.

Несмотря на то, что алгоритм SLAM не требует предварительной маркировки точек плано-высотной подготовки, для контроля точности и последующей геодезической привязки облака точек необходимо использовать опорные и контрольные точки. В качестве таких точек могут применяться не специальные марки, а характерные элементы местности. Важно отметить, что определение координат таких точек нередко выполняется уже после завершения этапа сканирования: они выбираются в облаке непосредственно в процессе камеральной обработки. Такой подход позволяет обеспечить равномерность распределения и однозначную идентификацию точек ПВП в облаке.

Особенностью технологии МЛС являются специфические требования к точкам плано-высотной подготовки:

— *идентификация в облаке*. Точка ПВП должна быть однозначно определяемой в трехмерном облаке точек. Поэтому

приоритет отдается объектам с четкой геометрией, контрастной отражательной способностью и стабильным положением: углы бетонных конструкций, металлические столбы, выступающие элементы постаментов (рис. 4);

— *обязательная фотофиксация*. Для каждой точки ПВП создается фотоабрис — серия фотографий с привязкой к ориентирам с разных ракурсов, для идентификации точки в облаке на этапе камеральной обработки;

— *распределение и количество*. Точки ПВП должны быть равномерно распределены по всему участку работ, особенно в зонах со слабыми сигналами ГНСС и на границах маршрутов.

▼ Первичная обработка данных

Первичная обработка выполняется в специализированном программном обеспечении Lidar360MLS. Именно на этом этапе данные измерений, полученные сканирующей системой, преобразуются в облако точек, от него зависит их точность, целостность и пригодность.

В ходе работ была выявлена необходимость создания логичной структуры проекта, чтобы обеспечивались порядок, воспроизводимость и возможность последующего переуровнивания.

Под исходными данными, загружаемыми в проект Lidar360MLS, понимаются:

— данные, измеренные сканирующим блоком;

— данные бортового приемника ГНСС и инерциального измерительного устройства;

— дифференциальные поправки от базовых станций при наличии стабильных сигналов ГНСС;

— видео или материалы панорамной камеры для последующего окрашивания облака ТЛО и создания панорамных изображений.

В программном обеспечении гибкие настройки, позволяющие адаптировать обработку под конкретные условия съемки. Есть возможность использовать предустановленные сценарии, они автоматически устанавливают ключевые параметры под типовые условия. Доступна и ручная настройка, например, определение размера фрагмента для анализа алгоритмом SLAM, ограничение рабочей области, отсечение избыточных данных на дальних расстояниях, где точность снижается.

Загрузка исходных данных и настройка параметров обработки выполняются для каждого отдельного маршрута, при этом имеется возможность использовать конвейер: маршруты обрабатываются последовательно без участия оператора по ранее выбранным параметрам.

Конвейер включает следующие этапы:

1. *Обработка ГНСС-измерений*. Выполняется уточнение траектории движения сканера (платформы) методом кинематики в постобработке, при наличии данных базовых станций.

2. *Обработка с помощью алгоритма SLAM* (наиболее ресурсоемкий этап). Используя уточненную траекторию или данные инерциального измерительного устройства, последовательные сканы связываются

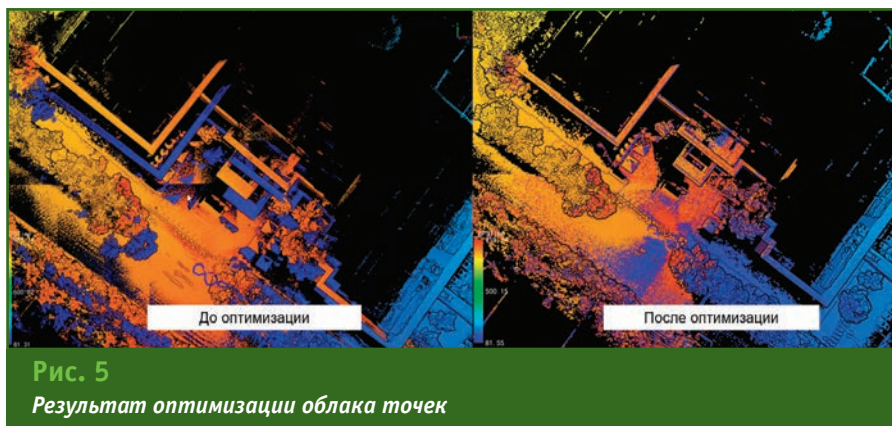


Рис. 5
Результат оптимизации облака точек

(объединяются) между собой и создается единое облако ТЛО.

3. **Фильтрация.** Автоматическое удаление ТЛО, принадлежащих элементам платформы, а также явных выбросов («шумы»).

4. **Окрашивание.** Точкам облака присваиваются значения RGB из панорамных изображений.

После этого облако точек готово для визуального просмотра, проверки по точкам ПВП и последующей первичной оценки с помощью встроенных визуальных инструментов. Окрашивание ТЛО по времени позволяет наглядно оценить целостность траектории и выявить возможные разрывы или смещения в местах замыкания маршрута. Для выполнения детального анализа метрических расхождений необходимо выполнить построение профилей и сечений. Сечения используются для обнаружения плановых несоответствий (например, «завоение» фасада здания), а профили — для возможных расхождений рельефа или объектов по высоте.

Несмотря на эффективность алгоритма, на длинных маршрутах, особенно в условиях отсутствия сигналов ГНСС, может накапливаться погрешность, проявляющаяся в несовпадении точек в местах перекрытия облаков. Для их устранения применяется оптимизация (рис. 5). В зонах расхождения создаются

или корректируются связи между фрагментами облака как с использованием инструментов «ручной регистрации» (сдвиг, поворот), так и автоматические с помощью алгоритма для выравнивания и объединения двух облаков точек ICP (Iterative Closest Point).

Для привязки итогового облака ТЛО к системе координат, а также для уточнения его положения, выполняется регистрация по контрольным точкам ПВП, координаты которых получены высокоточными геодезическими методами. Оператор вручную идентифицирует контрольные точки в облаке, используя фотоабрисы и характерные признаки местности. Вычисляются параметры трансформации, и выполняется преобразование всего облака в требуемую систему координат.

▼ Камеральная обработка данных

В результате первичной обработки данных создаются панорамные изображения и центры их проекций. Для организации интерактивного просмотра, позволяющего использовать панорамные изображения для анализа и получения семантических характеристик, выполняется автоматизированное построение геопривязанного слоя центров проекций.

Работа с облаком точек после первичной обработки направлена на структурирование данных и их подготовку для

решения прикладных задач. Этот этап включает в себя процедуры очистки, классификации и создания производных материалов.

Исходное облако точек, особенно полученное в городских условиях, часто содержит «шумы» и избыточные данные (наличие растительности, транспортных средств и др.). Для их удаления применяется фильтрация на основе геометрических характеристик. Анализируется пространственное распределение точек и исключаются те, которые находятся на значительном удалении от своих «соседей». Прореживание ТЛО выполняется для уменьшения плотности облака, оптимизации объема данных без потери ключевых геометрических характеристик.

Классификация — это важная процедура для семантического разделения облака на смысловые классы, открывающая возможности для автоматизированной обработки. Она может выполняться как автоматически на основе геометрических алгоритмов или машинного обучения, так и с ручной коррекцией. Классификация позволяет изолированно работать с определенными типами объектов. Так, точки класса «земля» служат основой для построения цифровой модели рельефа.

Итоговое облако точек в естественных цветах, полученное по результатам МЛС, служит основой не только для визуального анализа, измерений и трехмерного моделирования, но и для создания производных материалов (ЦМР, ЦММ, фотосхем, горизонтальных сечений, групп растительности) (рис. 6).

Основными производными материалами являются цифровые модели рельефа и цифровые модели местности. ЦМР отражает только естественную земную поверхность и является основой для инженерных рас-

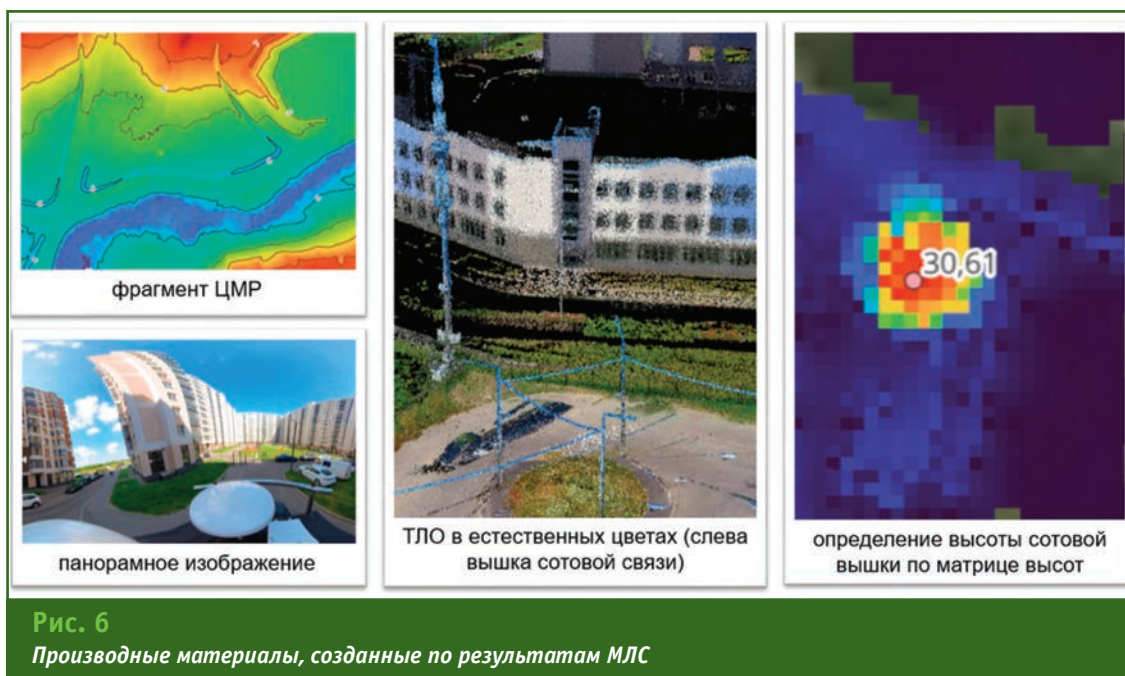


Рис. 6

Производные материалы, созданные по результатам МЛС

четов, гидрологического анализа и построения горизонталей. ЦММ, включающая земную поверхность и все объекты (здания, растительность), используется для проектирования и создания топографических планов. Особое значение имеют срезы (горизонтальные сечения) — плоские изображения, получаемые путем виртуального рассеяния облака ТЛО плоскостью на заданной высоте. Этот метод эффективно устраняет визуальные помехи от растительности и временных объектов. Например, срезы на уровне цоколя (0,5 м) однозначно выявляют контуры зданий и ограждений (рис. 7), а срезы на высоте 1–2 м служат для выделения опор линий электропередачи, элементов освещения и дорожных знаков.

Таким образом, комплексная камеральная обработка данных МЛС позволяет преобразовать исходное облако точек в структурированный, семантически обогащенный набор пространственных данных, готовый к непосредственному использованию в геоинформационных системах, системах автоматизированного проектирования и

для решения широкого круга задач пространственного анализа и моделирования (рис. 8).

▼ Вызовы, адаптация и перспективы применения МЛС со SLAM

Несмотря на высокую эффективность, практическое внедрение мобильного лазерного сканирования с использованием алгоритма SLAM сопряжено с определенными трудностями. Одна из них — значительные временные и вычислительные ресурсы, необходимые для камеральной обработки данных. Для преодоления этих огра-

ничений в филиале ППК «Роскадастр» «Аэрогеодезия» внедрены методы оптимизации обработки больших данных (Big Data): использование пакетной обработки в специализированном ПО, разработка автоматизированных конвейеров на основе связки скриптов (Bash, Python) и открытых библиотек (PDAL, LAStools).

Экономическая целесообразность данного технологического решения подтверждается его многозадачностью. Возможность многократного использования единого массива данных для решения различных задач



Рис. 7

Срез на уровне первого этажа по данным МЛС, наложенный на цифровой ортофотоплан



Рис. 8

Параметрическая трехмерная модель, полученная стационарной системой лазерного сканирования и SLAM-сканером

(от картографии до кадастра) в долгосрочной перспективе компенсирует первоначальные затраты на их обработку.

Перспективы развития алгоритмов SLAM связаны с их интеграцией в более широкий технологический контекст и повышением уровня автоматизации. Применение SLAM-сканеров при воздушном лазерном сканировании с беспилотных авиационных систем позволит выполнять съемку труднодоступных территорий (залесенная или горная местность). А использование алгоритмов машинного обучения для автоматизированного дешифрирования и векторизации объектов по облакам точек и срезам позволит радикально сократить трудозатраты.

Ключевой инициативой филиала является передача материалов лазерного сканирования в Федеральный фонд пространственных данных (ФФПД). Создание национальной базы облаков точек откроет возможности для их многократного, многоотраслевого использования, в том числе для создания

цифровых двойников — основы для систем «умного города».

Следует отметить, что мобильное лазерное сканирование с алгоритмом SLAM доказало свою эффективность как технология, ускоряющая полевые работы и обеспечивающая сбор метрически точных и визуально наглядных пространственных данных в условиях, где традиционные методы съемки на основе ГНСС-измерений неприменимы. Она успешно преодолевает ограничения, связанные с навигацией в сложных условиях, позволяет получить не просто набор координат, а полноценную цифровую трехмерную модель местности. Накопленный опыт позволил эффективно использовать МЛС для решения широкого спектра задач: от создания и обновления карт крупных масштабов до выполнения кадастровых работ и детального цифрового моделирования. Преимуществом технологии является многозадачность собранных данных. Один массив информации служит основой для создания разнообразной цифровой продукции и

решений, что значительно повышает экономическую целесообразность работ. Дальнейшее развитие связано с усилением автоматизации обработки, интеграцией с беспилотными авиационными системами и, что особенно важно, с формированием отраслевой практики передачи материалов лазерного сканирования в Федеральный фонд пространственных данных.

▼ Список литературы

1. Karam S., Lehtola V., Vosselman G. Strategies to Integrate Imu and Lidar Slam for Indoor Mapping // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2020. — Vol. 5, № 1. — P. 223–230.
2. Yu P., Wang M., Chen H. Integration and evaluation of SLAM-based backpack mobile mapping system // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy and Development, Advanced Materials (SEDAM 2020). — 2020. — Vol. 206. — Art. 03014.
3. Нехин С.С., Ядрихинская Ю.С. Предложения по проекту национального стандарта, устанавливающего требования к воздушному лазерному сканированию // Геопрофи. — 2023. — № 2. — С. 14–19.
4. LiGrip H300 Rotating Handheld SLAM LiDAR System. — www.greenvalleyintl.com/LiGripH300.
5. ГОСТ Р 71863–2024 «Фототопография. Лазерное сканирование. Общие положения».
6. ГОСТ Р 72225–2025 «Фототопография. Сканирование лазерное наземное. Технические требования».
7. ГОСТ Р 70689–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Общие требования к проведению работ».
8. ГОСТ Р 70690–2023 «Дороги автомобильные общего пользования. Лазерное сканирование. Требования к данным лазерного сканирования на различных этапах жизненного цикла автомобильной дороги».
9. ГОСТ Р 70172–2022 «Геодезия и картография. Требования к техническому контролю геодезической и картографической продукции и процессов ее создания. Основные положения».