

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ SLAM-СКАНЕРЫ: НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕОДЕЗИИ И МАРКШЕЙДЕРСКОМ ДЕЛЕ*

В настоящее время геодезические измерения характеризуются стремительным развитием технологий, направленных на ускорение процесса получения и обработки пространственных данных. Одной из наиболее значимых разработок последних десятилетий является SLAM (simultaneous localization and mapping) — метод одновременной локализации и картографирования, который позволяет получать облака точек окружающего пространства в режиме реального времени [1]. В статье рассмотрим теоретические аспекты функционирования лазерных SLAM-систем на примере сканеров XGRIDS, практические случаи их применения и оценку эффективности относительно классических методов съемки.

▼ Принцип работы

Механизм работы SLAM-систем основан на постоянном сравнении текущего положения сканера с данными предыдущих циклов измерений. Сканер автоматически собирает информацию о пространственном положении точек лазерных отражений (ТЛО) и изображений с цифровых фотокамер, формируя облака ТЛО и детализированное изображение окружающего пространства. При его перемещении эти данные непре-

рывно сопоставляются, что позволяет определять пространственное положение прибора относительно неподвижных объектов (угол здания, опора ЛЭП и т. п.). Таким образом достигается высокая плотность и окрашивание ТЛО, реалистично отображается рельеф, структура зданий и сооружений.

Среднее время одного полного цикла съемки для получения качественных материалов варьируется от 25 до 60 минут в зависимости от условий и характеристик объекта. Технически на процесс сканирования для получения облака точек требуется как минимум около 2 минут. Максимальное рекомендуемое время на один трек, например, для сканеров XGRIDS, составляет 60 минут для модели XGRIDS LixelKity K1 и 120 минут для модели XGRIDS Lixel L2 Pro.

Одним из важнейших аспектов технологии является наличие механизма автоматического определения устройством собственного положения в пространстве, что снижает зависимость результатов измерений от человеческого фактора и внешних помех.

▼ Методы съемки

Существует три режима измерений SLAM-системами: автономный, ГНСС RTK и PPK.

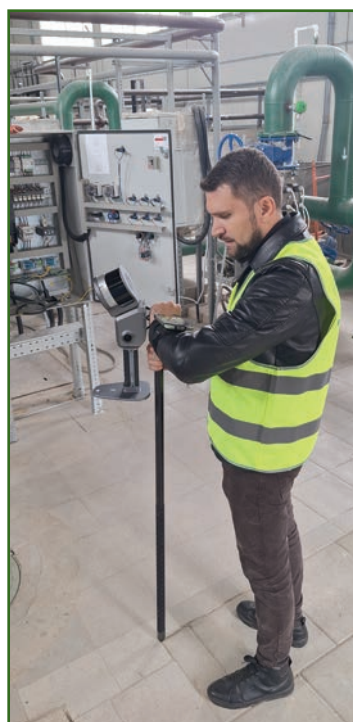


Рис. 1
Измерения внутри помещения

Сканирование в автономном режиме может проводиться внутри зданий и сооружений, в зонах, где отсутствует устойчивый прием сигналов ГНСС (рис. 1), а также на открытых пространствах с надежным приемом сигналов спутников и мобильной связи. Получение данных осуществляется благодаря наличию у SLAM-системы лазерного лидара, цифровых камер и инерциального модуля. Такой

* Статья подготовлена пресс-службой компании «РУСГЕОКОМ».

метод предполагает, что элементы инфраструктуры неподвижны, имеют четкие границы и высокую контрастность, поскольку именно они служат опорными точками для определения пространственного положения прибора и измеренного облака точек. Для получения координат ТЛО в требуемой системе координат после завершения съемки пространственное положение прибора может быть определено от опорных точек, координаты которых были измерены заранее одним из геодезических методов.



Рис. 2
Съемка в режиме ГНСС RTK

Режим сканирования ГНСС RTK применяется на открытых территориях с устойчивым приемом сигналов ГНСС, надежным покрытием мобильной связи GSM и доступом к корректирующей информации от сети постоянно действующих базовых станций (ПДБС), рис. 2.

В этом режиме SLAM-системы XGIRDS дополняются специальным ГНСС-модулем. Он позволяет определять координаты точек лазерных отражений в одной из глобальных систем координат (CGCS2000, ITRF2008 или WGS84) по спутниковым наблюдениям следующих ГНСС: GPS, ГЛОНАСС, Galileo или BeiDou.

Перед началом работы систему необходимо подключить к любой доступной сети ПДБС и получить фиксированное решение. Если в процессе сканирования будут использоваться контрольные точки с определенными ранее координатами в МСК, то можно начинать съемку. Если контрольные точки использовать не планируется, то необходимо провести калибровку района работ. Для этого достаточно измерить не менее 10 точек, находящихся за границей района проведения работ, и создать файл с координатами этих точек в двух системах координат (WGS84 и МСК). Далее в программу для постобработки вводят параметры системы координат и импортируют файл калибровки. Дальнейшую обработку программа выполняет автоматически.

Сканирование в режиме РРК может выполняться при отсутствии доступа к сети постоянно действующих базовых станций и наличии устойчивого сигнала ГНСС. При этом в качестве базовой станции выступает геодезический ГНСС-приемник, установленный над точкой с известными координатами, на котором ведется запись статических наблюдений. Во время постобработки в результаты измерений вносятся поправки от базовой станции, позволяющие повысить точность позиционирования и уменьшить погрешности при длительных наблюдениях. Наличие контрольных точек с известными координатами

позволяет применить эту систему координат и высот к облаку точек, обеспечив его сантиметровую точность.

▼ Применение SLAM-технологии

Практическое значение SLAM-технологии заключается в значительном упрощении процессов сбора и обработки пространственной информации. Среди областей активного внедрения выделяют следующие:

- топографическая съемка земельных участков и сооружений;
- формирование цифровых двойников объектов недвижимости и инфраструктуры;
- мониторинг объемов добытых ресурсов в горнодобывающей промышленности;
- поддержка архитектурного проектирования и реставрационных мероприятий;
- создание виртуальных моделей памятников культуры и туристической инфраструктуры.

Помимо перечисленных направлений технология находит широкое применение в автоматизированных системах управления транспортными средствами (рис. 3), робототехнических комплексах и индустрии развлечений.

▼ Точность измерений

Анализируя существующие публикации и проведенные эксперименты, отметим следующую точность взаимного положения точек лазерных отражений, полученных SLAM-устройствами:

- внутри помещений с контролем в системе координат объекта точность может достигать порядка 0,5–1,5 см (данные оценки получены компанией «РУСГЕОКОМ» в процессе нескольких измерений);
- за пределами помещения в режимах ГНСС RTK и РРК при постобработке погрешность превышает 1,5–2 см.

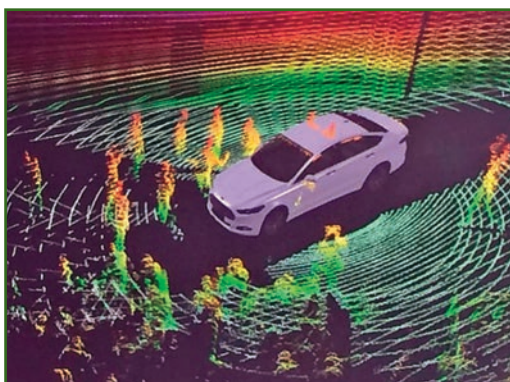


Рис. 3
Пример работы автоматизированной системы управления автомобилем

Эти показатели свидетельствуют о высоком уровне соответствия данной технологии требованиям большинства практических задач, включая топографические съемки застроенных территорий, кадастровые работы и инженерно-геодезические изыскания.

▼ **Производительность SLAM-оборудования**

Ряд проведенных экспериментов показывает значительное увеличение скорости выполнения полевых работ при использовании SLAM-систем.

Например:

— лесные участки местности площадью до 16 га могут быть

обследованы за один рабочий день;

— крупномасштабная топографическая съемка участка размером до 10 га выполняется за один час;

— съемка линейных объектов протяженностью до 4 км и шириной около 100 м занимает около полтора часов.

Производительность полевых геодезических работ с помощью SLAM-систем по сравнению с традиционными методами повышается на 60%. Однако важным фактором при камеральной обработке данных является мощность процессора компьютера и наличие специального программного обес-

печения для обработки больших массивов данных.

▼ **SLAM-сканеры XGRIDS**

В настоящее время на рынке геодезического оборудования РФ представлены лазерные SLAM-сканеры нескольких производителей. XGRIDS Limited — одна из таких компаний, уверенно занимающая свою нишу на российском рынке [2].

Рассмотрим подробнее SLAM-сканеры XGRIDS, внесенные в Государственный реестр средств измерений (регистрационный номер 96274-25) и поставляемые в РФ ООО «РУСГЕОКОМ» — официальным дилером компании XGRIDS [3]. Технические

Технические характеристики SLAM-сканеров XGRIDS, внесенных в Государственный реестр средств измерений [4]

Наименование характеристики	Модель SLAM-сканера и значение характеристики		
	XGRIDS LixelKity K1	XGRIDS Lixel L2	XGRIDS Lixel L2 Pro
Количество каналов	16	16 / 32	16 / 32
Скорость сканирования, точек/с	200 000	320 000 / 640 000	320 000 / 640 000
Дальность измерений, м	От 0,5 до 70	От 0,5 до 120 / 300	От 0,5 до 120 / 300
Относительная точность, см	1,2	1,2	1,2
Длина волны лазера, нм	905	905	905
Поле зрения, °	360x~7~+52	360x270	360x270
Камера для окрашивания ТЛО, Мп / количество	48 / 2	5 / 2	48 / 2
Навигация	Нет ¹	Нет ²	Нет ³
Интерфейсы	USB, Wi-Fi, Bluetooth	USB, Wi-Fi, Bluetooth	USB, Wi-Fi, Bluetooth
Память, тип / объем	MicroSD / 256 Гбайт	SSD /1 Тбайт	SSD /1 Тбайт
Формат экспортных данных в режиме постобработки	RCP, LAS, E57, PLY, LCC	RCP, LAS, E57, PLY, LCC	RCP, LAS, E57, PLY, LCC
Возможности программного обеспечения	Вычисления в режиме реального времени и смешанные	Вычисления в режиме реального времени и смешанные	Вычисления в режиме реального времени и смешанные
ПО для управления и постобработки	Lixel Studio, Lixel CyberColor, LixelGO	Lixel Studio, Lixel CyberColor, LixelGO	Lixel Studio, Lixel CyberColor, LixelGO
Питание, тип аккумулятора / напряжение	Li-Ion / 14,4	Li-Ion / 14,4	Li-Ion / 14,4
Время работы, ч / количество аккумуляторов	3 / 2	4 / 2	4 / 2
Диапазон рабочей температуры, °C	От -20 до +50	От -30 до +50	От -30 до +50
Степень защиты от пыли и влаги	IP54	IP54	IP54
Размер, мм	159x118x127	180x130x217	180x130x400
Вес, кг	1	1,6 / не более 2,5 ⁴	1,7 / не более 2,5 ⁴

Примечания.

Для навигации и работы в режиме ГНСС RTK сканеры могут быть интегрированы со следующими типами ГНСС-модулей XGRIDS:

¹ модуль для LixelKity K1; ² модуль для Lixel L2; ³ модуль для Lixel L2 Pro или модуль для Lixel L2 Pro версии Survey Grade.

⁴ Вес сканера с ГНСС-модулем.



Рис. 4
SLAM-сканер XGRIDS
LixelKity K1

характеристики этих приборов приведены в таблице.

XGRIDS LixelKity K1 — это компактный, производительный и надежный сканер, весом всего 1 кг с аккумулятором (рис. 4). Благодаря легкому корпусу из алюминиевого сплава и эргономичному дизайну, он легко помещается в сумку и удобен в использовании.

В режиме реального времени данная модель позволяет выполнять сканирование со скоростью 200 тыс. точек в секунду, охватывая при съемке следующую рабочую зону: 360° в горизонтальной плоскости и от -7° до $+52^\circ$ (в зависимости от наклона сканера) в вертикальной плоскости. Дальность измерений составляет от 0,5 до 70 м и зависит от отражающей способности поверхности сканирования. Две панорамные камеры с разрешением 48 Мпикселей совместно со сканирующей системой позволяют получать цветные облака точек с высокой точностью и детальностью. Простота интерфейса облегчает освоение функций даже новичкам.

Эта модель с оптимальным соотношением цены и качества доступна для широкой аудитории пользователей.

XGRIDS Lixel L2 представляет собой практичное решение

для сканирования местности (рис. 5). Сочетание лазерного лидара с диапазоном измерения расстояний от 0,5 до 120 (300) м, углами поля зрения 360° в горизонтальной плоскости и 270° в вертикальной плоскости, двух цифровых камер с разрешением 5 Мпикселей для окрашивания ТЛО, одной камеры с разрешением 1 Мпиксель для отслеживания курса и мощного процессора обеспечивает решение большинства задач.



Рис. 5
SLAM-сканер XGRIDS Lixel L2

Оснащение сканера дополнительными устройствами, например, ГНСС-модулем, расширяет его функциональные возможности. Для улучшения качества окрашивания ТЛО, а также для получения фотореалистичных 3D-туров, прибор можно дооснастить внешней камерой Insta360 ONE RS 1-Inch 360.

Применение данной модели оправдано при выполнении крупномасштабной топографической съемки, требующей повышенной точности и надежности данных.

XGRIDS Lixel L2Pro — флагманская модель сканеров компании (рис. 6). Она оснащена мощной системой обработки данных, двумя камерами с разрешением 48 Мпикселей каждая (для окрашивания облака точек) и одной с разрешением



Рис. 6
SLAM-сканер XGRIDS Lixel
L2 Pro

1 Мпиксель (для отслеживания трека движения прибора).

При скорости сканирования до 640 тыс. точек в секунду рабочая зона съемки составляет: 270° в горизонтальной плоскости и 360° в вертикальной плоскости. В результате последующей обработки данных имеется возможность получить облако точек с плотностью до 1 мм. Взаимная точность пространственного положения ТЛО после обработки не превышает 1 см.

Новаторская технология на основе алгоритма Multi-SLAM обеспечивает надежность получения данных в сложных условиях съемки, таких как тоннели и плотная городская застройка [2].

Кроме того, предусмотрена установка сканера на квадрокоптер, например, DJI Matrice 350. Это еще больше расширяет функциональность применения прибора и позволяет совместно обрабатывать массивы информации, полученные при наземной и воздушной съемке (рис. 7).

▼ Метод повышения качества сканирования

Отдельно необходимо остановиться на разработке компании XGRIDS для построения трехмерных моделей на основе нового метода — 3D Gaussian

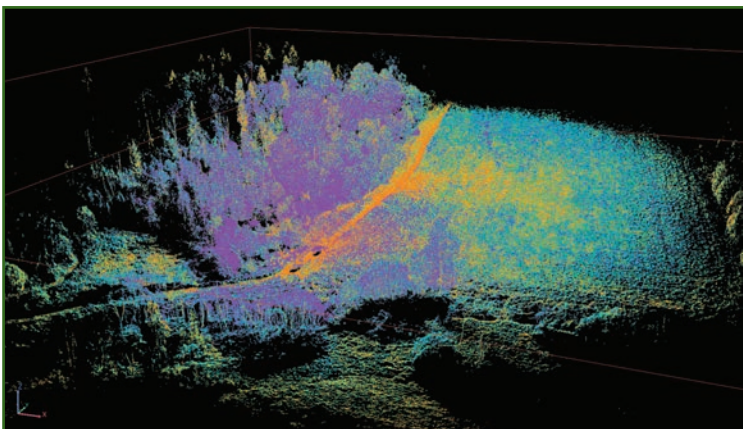


Рис. 7
Облако точек, полученное SLAM-сканером XGRIDS Lixel L2 Pro, установленным на DJI Matrice 350

Splating [2]. Суть метода заключается в объединении данных, полученных традиционным способом лазерного сканирования, с фотоизображениями высокого разрешения, и преобра-

зовании их в детально прорисованные 3D-модели (рис. 8, 9). Это позволяет достичь беспрецедентной степени детализации при визуализации поверхностей трехмерной модели и на-



Рис. 8
Пример фрагмента 3D-модели котельной муниципального здания г. Москвы



Рис. 9
Пример 3D-модели памятника А.С. Пушкину в г. Москве

ходит активное применение в градостроительстве при проектировании городской среды, а также в дизайне интерьеров.

В заключение следует отметить, что опыт использования лазерных SLAM-сканеров XGRIDS демонстрирует значительные преимущества перед традиционными методами геодезических и маркшейдерских работ.

Тем не менее, несмотря на очевидные плюсы, внедрение SLAM-систем сопряжено с рядом проблем, среди которых следующие:

- необходимы значительные финансовые вложения в покупку дорогостоящего компьютерного оборудования для камеральной обработки результатов измерений, полученных SLAM-сканером;

- съемка в режимах ГНСС RTK и PPK невозможна при использовании комплексов РЭБ в районах выполнения работ.

Эти проблемы преодолены, поскольку применение SLAM-технологии позволяет оперативно и точно фиксировать состояние местности и объектов, минимизируя влияние человеческого фактора, и обеспечивает высокую степень автоматизации съемки, сокращая время измерений в полевых условиях. Дальнейшее развитие данной технологии увеличит доступность SLAM-оборудования и расширит сферы его применения.

▼ Список литературы

1. Литвинцев К.А., Милоданов В.Ю., Самойлов А.А. Методы лазерного сканирования в современной практике. Обзор подходов и перспектив применения // Геопрофи. — 2025. — № 3. — С. 8–11.
2. XGRIDS LIMITED. — <https://xgrids.com>.
3. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы СИ. — <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/mits>.
4. ООО «РУСГЕОКОМ». — <https://www.rusgeocom.ru>.