

# ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ RIEGL ДЛЯ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ\*

В конце 1990-х гг. в области методов получения картографических материалов высокой детальности (масштаб 1:5000 и крупнее) произошли значительные изменения. В основном они были связаны с появлением новых методов дистанционного зондирования Земли с использованием авиационных носителей. Вместо классической аэрофотосъемки потребителям картографической информации была предложена высокоточная лазерно-локационная съемка в сочетании с цифровой аэрофотосъемкой. Такой вид съемки в дальнейшем будем называть «воздушное лазерное сканирование» или ВЛС, что подразумевает использование тандема «лазер + фото», поскольку лазерная съемка без аэрофотосъемки применяется крайне редко.

Постепенное распространение данного метода в мире и прогресс в производстве цифровых камер и лазерных сканеров привели к повышению точности и подробности, создаваемых по этим материалам топографических планов — от масштаба 1:5000 в конце 1990-х гг. до масштаба 1:500 к 2010 г. Появились также отдельные ветви этого направления — наземное и мобильное лазерное сканирование (выполняемое с транспортных средств, движущихся по земле или воде), а также батиметрическое лазерное сканирование, обеспечивающее проникновение лазерного импульса в воду на глубину до нескольких десятков метров и его отражение от поверхности дна.

Лазерное сканирование (локация) является разновидностью активной съемки. Установленный на авиационном носителе (самолете, вертолете, БПЛА) полупроводниковый лазер, работающий в импульсном режиме, проводит дискретное сканирование поверхности Земли и объектов, расположенных на ней, регистрируя направление отраженного лазерного луча и время его прохождения. Текущее положение лазерного сканера определяется с помощью высокоточного приемника ГНСС, работающего в дифференциальном режиме совместно с инерциальной системой (IMU). Зная углы разворота и относительные смещения между компонентами этой системы, можно однозначно определить абсолютные координаты каждой точки лазерного отражения (ТЛО) в пространстве.

Современный лазерный сканер передает сотни тысяч импульсов в секунду, перемещая луч из стороны в сторону и смещаясь вместе с носителем. Информация, получаемая в результате совместной обработки дальномерных измерений, данных инерциальной системы и приемников ГНСС, представляет собой массив нерегулярно расположенных точек, для которых известны пространственные координаты, интенсивность отраженного сигнала, номер отражения (первое отражение — от самого высокого объекта, в который попал луч, последнее — от земли или промежуточное).

Одновременно с лазерным сканированием ведется пассивная съемка — цифровое фото-

графирование с использованием камер, регистрирующих излучение в видимом, ближнем или среднем инфракрасном, ультрафиолетовом и тепловом диапазонах излучения электромагнитных волн.

Как правило, любая система воздушного лазерного сканирования, представленная в настоящее время на рынке, имеет подобный функционал. Совокупность данных, полученных такой системой, позволяет создавать:

- картографические материалы в виде топографических карт или отдельных слоев ГИС в масштабах от 1:10 000 до 1:500 включительно;

- цифровые модели местности и рельефа (независимо от наличия растительности);

- трехмерные и виртуальные модели городов и ландшафтов;

- ведомости обследования ЛЭП, автодорог, железных дорог и т. п.;

- ортофотопланы в различных спектральных диапазонах.

С помощью аппаратных решений можно выполнять работы в широком диапазоне скоростей, высот и климатических условий, в том числе зимой, ночью, в условиях дымки, с высот вплоть до 7–8 тыс. м, со скоростью съемки до 500 км/ч.

## ▼ Системы воздушного лазерного сканирования RIEGL

Первые системы компании RIEGL (Австрия) появились в России в 2006 г., хотя опыт создания подобных приборов компания ведет с 1996 г. Именно тогда компания RIEGL анонсировала свой первый прибор, пред-

\* Статья подготовлена пресс-службой компании «АртГео».



Рис. 1

Воздушный сканер RIEGL LMS-Q780

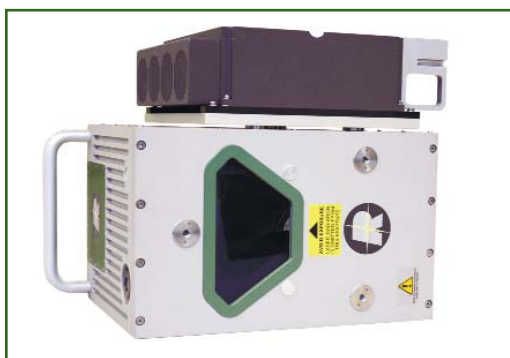


Рис. 2

Воздушный сканер RIEGL VQ-820-G



Рис. 3

Воздушный сканер RIEGL VQ-480i



Рис. 4

Беспилотная система RiCOPTER, оснащенная воздушным сканером RIEGL VUX-1

назначенный для воздушного лазерного сканирования — LMS-Q140. За 18 лет компания прошла долгий и сложный путь к почти полному технологическому лидерству в области создания ВЛС. В наши дни оборудование RIEGL, ориентированное на применение с летательных аппаратов, представлено во всех сегментах промышленных приложений.

В настоящее время компания RIEGL имеет офисы в США, Китае и Австрии, привлекая к работе несколько десятков региональных дилеров и представителей [1]. Более 400 систем воздушного сканирования RIEGL ежедневно выполняют задачи на всех континентах Земли. Высокая производительность, надежность и неприхотливость, устойчивость к вибрации, повышенной влажности, отрицательной и положительной температуре воздуха — все это является визитной карточкой авиационных съемочных решений RIEGL.

Основное кредо компании заключается в выпуске приборов, способных гарантировать соответствие одновременно всем характеристикам, заявленным в технической документации, с существенным запасом.

В настоящее время аэросъемочная продукция компании RIEGL представлена следующими моделями.

**LMS-Q1560** — воздушная лазерная сканирующая система, являющаяся полностью готовым интегрированным решением для топографической съемки земной поверхности. Эта система имеет технические характеристики, максимально достижимые на данный момент в области лазерного сканирования.

**LMS-Q780** (рис. 1) и **LMS-Q680i** — воздушные лазерные сканеры для топографической съемки земной поверхности. Так же как и воздушная лазерная сканирующая система LMS-Q1560 характеризуются максимальными техническими характеристиками.

**VQ-820-G** (рис. 2) и **VQ-880-G** — воздушные лазерные сканеры для топографической съемки земной поверхности и батиметрической съемки (съемка рельефа дна водоема или прибрежных зон морских акваторий). Сканирование поверхности дна водоема может выполняться, как правило, на глубину до 20 м при прозрачности воды по диску Секки в 1–1,5 м (глубина исчезновения из вида диска Секки — белого или черно-белого плоского диска диаметром 20–40 см. — Прим. ред.).

**VQ-580**, **VQ-480i** (рис. 3) и **VQ-380i** — воздушные лазерные сканеры для широкого круга аэросъемочных работ. Они обладают высокой скоростью и средней дальностью сканирования.

**VUX-1**, **VQ-480-U**, **LMS-Q160** — воздушные лазерные сканеры для топографической съемки земной поверхности с небольших высот с использованием малой авиации и БПЛА. Они характеризуются небольшим весом и габаритами, высокой (кроме LMS-Q160) скоростью сканирования и возможностью применения на БПЛА среднего класса с полетной массой 25–50 кг.

**RiCOPTER** — новая беспилотная система в виде октокоптера (восьмимоторной летающей платформы с 4-мя соосными винтами), оснащенного малогабаритным воздушным лазерным сканером VUX-1, легкой высокоточной инерциальной системой и фотокамерой (рис. 4). Это законченное решение, которое позволяет в автономном режиме осуществлять топографическую съемку небольших участков местности с высокой плотностью точек лазерных отражений.

#### ▼ Технология воздушного лазерного сканирования RIEGL

**Схема сканирования.** Одной из наиболее ярких черт, отличающих сканеры RIEGL от других

систем, является механизм отклонения лазерного луча [1, 2].

Существующие в настоящее время системы имеют два варианта реализации этого механизма: наиболее старый из них — качающееся зеркало (Oscillating Mirror), а наиболее новый — вращающаяся четырехгранная призма (Rotating Prism). Компания RIEGL во всех своих системах использует механизм Rotating Prism.

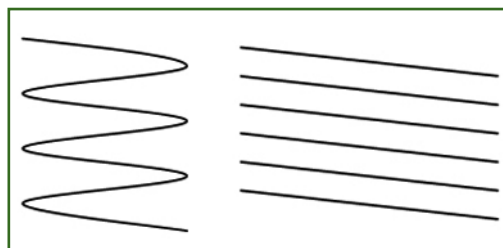
Решение на базе качающегося зеркала более простое в техническом исполнении, однако создает массу проблем пользователям и имеет ряд серьезных недостатков, не окупающихся ничем. Одним из них является то, что в ходе сканирования строки точек лазерных отражений образуют линию, схематично показанную на рис. 5, слева (носитель движется сверху вниз). Это обусловлено принципом работы качающегося зеркала — начало новой строки начинается от конца предыдущей со сменой направления на 180°. За счет движения носителя каждая последующая точка в линии оказывается смещенной «вперед». В дальнейшем будем именовать такую схему расположения точек лазерных отражений «зигзагообразной». Нетрудно видеть, что плотность точек при этом весьма далека от равномерной.

Сканеры с вращающейся призмой работают иначе. В ходе вращения призмы грань, от которой отражается луч, поворачивается и отклоняет лазерный луч. При достижении определенного угла падения луч перестает отражаться от призмы («мертвая зона» грани), доходя при этом до ребра между двумя соседними плоскостями пирамиды. После прохождения ребра новая плоскость призмы оказывается ориентирована в пространстве так же, как была ориентирована ее предшественница в начале поворота. Подобное свойство призмы позволяет по-

лучать строки точек лазерных отражений, расположенных на параллельных линиях, всегда «рисующиеся» в одну сторону (скажем, слева направо). В дальнейшем будем именовать такую схему расположения точек «параллельной» (рис. 5, справа).

К чему приводит подобное расположение точек? Как видно, в «зигзагообразной» схеме плотность точек неравномерна. Если точки идут через однородные промежутки в линии, то на краях «зигзага» плотность точек оказывается то очень высокой (там, где кончается одна линия и начинается вторая), то очень низкой (где линии расходятся). Более того, даже в самой строке плотность точек минимальна в надири и максимальна по краям, где зеркало «замирает» перед сменой направления движения. Однородность наблюдается только вдоль оси полета. «Параллельная» схема лишена этого недостатка, и плотность точек по полосе съемки однородна на всей площади сканирования. Подобная схема применяется во всех системах RIEGL, что является их объективным достоинством (рис. 6).

Кроме того, отметим, что системы, использующие механизм Rotating Prism, не испытывают знакопеременных нагрузок и в ходе эксплуатации не требуют

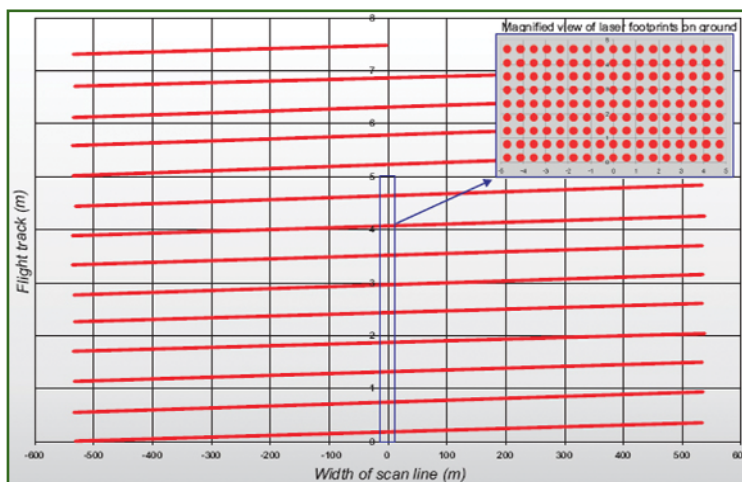


**Рис. 5**  
Схема расположения строк точек лазерных отражений: «зигзагообразная» (слева) и «параллельная» (справа)

частой калибровки в заводских условиях, более стабильны по точности определения координат.

Еще в системах с вращающейся призмой скорость вращения не зависит от угла отклонения и может быть любой. Для сканеров RIEGL пользователь может вычислить оптимальное число строк сканирования в секунду и задать любое значение.

**МТА-зоны.** Как известно, скорость света в воздухе близка к 300 000 км/с. Это означает, что если мы работаем в режиме, когда в воздухе находится один лазерный импульс, т. е. новый импульс не посылается, пока не принят отраженный сигнал от предыдущего импульса, то максимальная частота сканирования (точек в секунду)  $\leq 300\,000/2H$ , где H — высота полета над поверхностью съемки в км.



**Рис. 6**  
Пример равномерного распределения точек при «параллельной» схеме сканирования (RIEGL LMS-Q680i)

Отсюда следует, что при высоте 1 км частота сканирования даже теоретически не может быть выше 150 кГц при сохранении принципа «один импульс в воздухе».

Нетрудно видеть, что для того, чтобы при той же частоте сканирования летать выше, необходимо иметь в воздухе одновременно не 1, а 2 импульса, а при еще большей высоте понадобится 3 и более импульсов. Диапазон высот от минимальной до максимальной, в пределах которого нет необходимости менять количество импульсов, одновременно находящихся в воздухе, называется МТА-зоной. МТА (MultipleTurn-Around) — множественность импульсов в воздухе. Техническая реализация принципа съемки в режиме МТА-зон является непростой задачей из-за постоянного изменения высоты полета носителя над сканируемой поверхностью. Кроме того, чем выше частота сканирования, тем меньше «толщина» МТА-зоны. Поэтому при высоких частотах сканирования обычно не удается выбрать одну МТА-зону и работать в ней. Так, при частоте сканирования в 800 кГц «толщина» МТА-зоны составляет 187 м, и вероятность выхода отдельных участков зоны съемки из выбранной для полета МТА-зоны становится почти гарантированной. Поэтому необходима автоматизация процесса выбора правильной МТА-зоны для каждого участка съемки.

Для этого во всех сканерах RIEGL используется единый аппаратно-программный метод, позволяющий использовать до 10 МТА-зон. В ходе съемки переход из одной МТА-зоны в другую происходит автоматически, без разрывов и пауз. При камеральной обработке автоматизированными программными средствами RIEGL для каждой точки лазерных отражений определяется корректная МТА-зона. Этот подход позволяет существенно экономить летное время, не сни-

жая частоту сканирования при увеличении высоты.

**Безопасность для зрения человека.** Безопасность лазерных сканеров для зрения является одним из приоритетов компании RIEGL и потому весьма высока.

Безопасная высота для зрения для различных моделей лазерных сканеров RIEGL приведена в таблице. Во втором столбце таблицы класс безопасности лазера указан при следующих условиях:

- лазер работает на полную мощность;
- лазер работает в импульсном режиме (единичное попадание в глаз);
- дистанция до лазера нулевая («в упор»).

Естественно, последнее условие на практике нереализуемо. Кроме того, для мощных лазеров компанией RIEGL в обязательном порядке предусмотрено использование функции снижения мощности лазера при работе на малых высотах. Поэтому правильнее говорить о безопасной высоте полета, при которой случайный наблюдатель не имеет шанса попасть под второй лазерный импульс (носитель сместится вперед, а луч в сторону).

Нетрудно видеть, что для лазерных систем VUX-1, VQ-380i, VQ-480i, VQ-580 и LMS-Q680i безопасная дистанция для зрения человека составляет более 1,5 м, т. е. эти приборы в принципе не могут быть опасны.

Для LMS-Q780 и LMS-Q1560 безопасная дистанция для зрения составляет 25 и 45 м, соответственно. На практике съемка с таких высот технически невозможна ввиду крайней опасности авиакатастрофы, поэтому де-факто эти устройства безопасны для зрения на всех практически реализуемых высотах.

С лазерами с длиной волны в 532 нм (зеленый лазер) дело обстоит несколько по-другому. Эти устройства батиметрического назначения не могут быть маломощными, поскольку иначе не будет получен отклик от дна водоема. Поэтому минимальные эксплуатационные высоты для VQ-820-G и VQ-880-G составляют 100 и 300 м, соответственно. На практике для VQ-820-G это накладывает ограничения, так как работы со столь малых высот крайне редки. Для VQ-880-G ограничение по высоте актуально, однако рекомендованная и технически позволяющая снимать дно водоема высота сос-

#### Безопасная для зрения человека высота полета различных моделей лазерных сканеров RIEGL

Модель	Длина волны / Класс безопасности лазера*	Безопасная высота, м
LMS-Q1560	1064/3B	45
LMS-Q780	1064/3B	25
LMS-Q680i	1550/3R	>1,5
VQ-580	1064/3B	>1,0
VQ-480i	1550/1	0
VQ-380i	1550/1	0
VQ-880-G	532/4	300
VQ-820-G	532/3B	100
VQ-480-U	1550/1	0
VUX-1	1550/1	0
LMS-Q160	1550/1	0

\* Согласно требованиям EN 60825-1:2007 Безопасность лазерных устройств. Часть 1. Классификация и требования к аппаратуре.

тавляет 600 м, что не снижает функциональности данного прибора и не требует особых мер предосторожности.

▼ **Технические особенности систем воздушного лазерного сканирования RIEGL [1, 2]**

**Оцифровка формы сигнала.**

Все модели сканеров компании RIEGL аппаратно регистрируют полную форму отраженного сигнала, что позволяет более точно определять координаты точки отражения. Также это дает возможность иметь неограниченное количество зарегистрированных отражений, вызванных одним сигналом, например в лесу.

**Длина волны лазера.** В сканерах используются лазеры с различными длинами волн, что определяет ряд особенностей отражения испускаемого сигнала. Так, для работы на небольших высотах применяют сканеры с лазерами малой мощности (1-й класс безопасности), с длиной волны 1550 нм, что позволяет сделать их полностью безопасными для зрения. Сканеры, работающие на значительных высотах и с высокими мощностями (3-й класс безопасности), оснащены лазерами с длиной волны 1064 нм. Это позволяет добиться более высокой отражательной способности от объектов при работе в условиях большой влажности. В моделях сканеров VQ-820-G и VQ-880-G используются зеленые лазеры с длиной волны в 532 нм.

**Система снижения мощности.** Все лазеры класса безопасности 3В, 3R и 4 (см. таблицу) оснащены системой понижения мощности испускаемого сигнала, что позволяет использовать их даже на малых высотах без риска для зрения.

**Температурные характеристики.** Для всех без исключения сканеров компании RIEGL заявленная допустимая температура эксплуатации соответствует температуре, поддерживаемой внутри корпуса сканера. На

практике это означает, что если сканер находится в обогреваемой кабине самолета (или вертолета) и/или расположен в обогреваемом корпусе, то он может эксплуатироваться при температуре «за бортом», существенно ниже заявленной допустимой температуры. Именно поэтому опыт эксплуатации приборов серии LMS (LMS-Q680i и LMS-Q780) на территории России показывает, что при съемке с самолета Ан-2 с недостаточно обогреваемой кабиной система сохраняет работоспособность до  $-20^{\circ}\text{C}$  (на уровне земли), а при съемках с вертолета Ми-8 (с хорошо обогреваемой кабиной) и до  $-28^{\circ}\text{C}$ .

**Законченное решение в едином корпусе.** Основные модели сканеров RIEGL поставляются в РФ не в виде лазера как отдельного элемента, а в виде готового решения в едином корпусе для быстрой установки на авиационном носителе.

Это позволяет решать следующие задачи:

— поддерживать температуру сканера в заданных эксплуатационных пределах за счет нескольких блоков обогрева (вентиляции). Это существенно расширяет температурный диапазон применения системы, а также снижает эффект от температурного расширения (сжатия) элементов конструкции, что ведет к раскалибровке системы;

— быстро и надежно устанавливать оборудование на борту Ан-2 и Ан-28 в люки для аэрофотосъемки, а для Ми-8 — в люк тросовой внешней подвески с помощью настраиваемых креплений к полу;

— обеспечивать высокую механическую жесткость всех компонентов системы, в первую очередь, стабильность углов взаимного ориентирования инерциальной системы и лазерного сканера;

— гарантировать сохранность оборудования от вибраций, поскольку все оборудование устанавливается на металлической плите, подрессоренной относительно внешнего корпуса платформы;

— крепить дополнительные устройства (фотокамеру, тепловизор, видеокамеру и др.) внутри единого корпуса с сохранением стабильности угловых калибровочных параметров;

— обеспечивать защиту при работе, монтаже и транспортировке.

Следует отметить, что системы LMS-Q1560 и VQ-880-G уже выполнены в виде подобного решения и не требуют использования дополнительного корпуса (рис. 7). Габариты корпуса этих систем позволяют установить их на гиросtabilизированную платформу или разместить в круглом люке авиационного носителя.



**Рис. 7**

Внешний вид RIEGL LMS-Q1560 (слева) и вариант установки RIEGL VQ-880-G на гиросtabilизированную платформу (справа)

Опыт эксплуатации таких решений в России показал их удобство и эффективность при использовании на пилотируемых летательных аппаратах среднего класса. Кроме того, можно воспользоваться вариантами интеграции системы для размещения оборудования на борту малых летательных аппаратов внутри кабины или на внешней подвеске, например таких, как Теспат ММА или Diamond DA 42.

Данный подход особенно актуален для российских климатических условий, поскольку часто приходится выполнять съемки при отрицательной температуре окружающей среды.

**Управление съемкой.** Для проведения съемочных работ во

время залета предназначено программное обеспечение RiACQUIRE. Оно используется и при мобильном сканировании, что позволяет без значительных затрат времени переподготовить оператора, работающего с воздушным сканером, на работу с мобильным и наоборот. Интерфейс RiACQUIRE интегрирован с навигационной системой, что обеспечивает полную автоматизацию включения и выключения лазера и камер при заходе на маршрут съемки без вмешательства оператора. Фактически, роль оператора состоит в смене маршрута в нужной последовательности и коррекции возможных нештатных ситуаций. При необходимости можно задействовать и ручное управление процессом съемки.

**Углы обзора.** Основные модели систем воздушного лазерного сканирования компании RIEGL имеют углы обзора в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси полета,  $60^\circ$ , т. е.  $+30^\circ$  или  $-30^\circ$  от отвесной линии (линии надира). Однако для специфических задач предназначен ряд моделей сканеров с необычными решениями. Рассмотрим их подробнее.

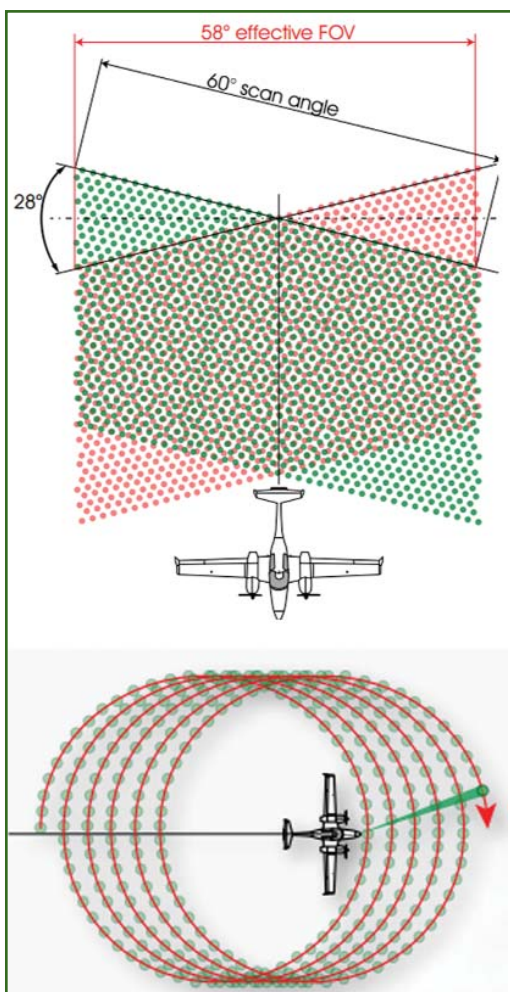
VQ-380 имеет несимметричный угол обзора ( $+60^\circ/-40^\circ$ ), что позволяет отклонять луч в сторону на дистанцию в 1,73 раза больше высоты полета. Это особенно важно при ограничениях на полеты (приграничные территории, горные склоны, низкая облачность, ограниченный маневр).

LMS-Q1560 имеет два лазера с углами обзора по  $60^\circ$  каждый, которые при этом наклонены относительно вертикальной плоскости на  $8^\circ$  (один — вперед, другой — назад). Кроме того, лазеры развернуты в горизонтальной плоскости относительно оси полета: один — на  $+14^\circ$ , а другой — на  $-14^\circ$  (рис. 8, вверху). Такой подход позволяет выполнять съемку объектов всегда под углом к вертикали,

что важно при съемке городов и ЛЭП.

Сканер последнего поколения VQ-880-G обладает круговой разверткой сканирования (рис. 8, внизу). Это новый подход для компании RIEGL. Подобное решение позволяет максимально эффективно использовать время сканирования. Кроме того, в ходе съемки каждый объект в зоне съемки (даже при одностороннем сканировании) сканируется дважды (сзади и спереди) — исключение составляет только узкая полоса по краю зоны охвата. Однако основной целью подобного решения является приведение угла касания воды лучом к одинаковым значениям ( $20^\circ$ ), что позволяет повысить точность определения глубины. В предыдущей модели сканера VQ-820-G с параллельной разверткой луча это значение было переменным (от  $0^\circ$  до  $21^\circ$ ) и при небольших глубинах, для которых был предназначен VQ-820-G, не являлось существенным. В случае с VQ-880-G, который рассчитан на большую глубину, важность неизменности угла касания возросла, что привело к применению «круговой» развертки.

VUX-1 имеет угол обзора в  $330^\circ$ , что теоретически позволяет ему снимать почти полную сферу. Данный сканер не имеет призмы или зеркала: его приемный и передающий модули находятся на одной оси, вращающейся с постоянной скоростью. В целом этот сканер относится к системам с «параллельной» разверткой. Небольшая «мертвая зона», около  $30^\circ$ , обусловлена технологическими особенностями изготовления сканера. На практике, будучи установленным на нижней поверхности авиационного носителя, он может вести сканирование стен или склонов, находящихся как под ним, так и на одном уровне с ним или даже чуть выше (в зависимости от ширины корпуса но-



**Рис. 8**

Схема расположения строк сканирования (в плане) у RIEGL LMS-Q1560 (вверху) и у RIEGL VQ-880-G (внизу)

сителя и положения съемочной головки).

VQ-820-G обладает двумя углами режимами. В режиме батиметрической съемки его максимальный угол обзора составляет  $40^\circ$  ( $+20^\circ/-20^\circ$ ), а в режиме обычной съемки по наземным объектам —  $60^\circ$  ( $+30^\circ/-30^\circ$ ).

**«Шум» данных сканирования.** Под «шумом» понимается не погрешность измерения дистанции, а общая интегральная неоднородность данных на заведомо плоских поверхностях. Такая неоднородность является комплексным следствием погрешности определения дальности лазером, точности определения угла отклонения лазерного луча внутри лазера, точности IMU и ГНСС-решения, качества калибровки системы, наличия в ней люфтов, подвижек во время съемки, вносимых аппаратурой поправок (за состояние внешней среды, температуру и пр.) и служит итоговой мерой качества той или иной сканирующей системы в целом. Все сканеры компании RIEGL традиционно имеют очень низкие значения «шума» данных сканирования (облака точек).

**Накопители данных.** Наиболее производительные системы LMS-Q1560 и LMS-Q780, а также, по желанию заказчика, и любые другие сканирующие системы комплектуются накопителем данных RIEGL DR1560. В его состав включены три твердотельных диска, объемом 512 Гбайт каждый. Скорость записи данных составляет до 150 Мбайт/с, продолжительность записи — до 10 часов при работе с наиболее производительной системой LMS-Q1560.

▼ **Программное обеспечение для систем воздушного лазерного сканирования RIEGL [1, 2]**

Программное обеспечение для обработки данных воздушного и мобильного лазерного сканирования является одним

из наиболее необычных и продуктивных решений. В целом оно состоит из следующих модулей:

- RiACQUIRE (съемка);
- RiANALYZE (первичная обработка сигнала);
- RiMTA (автоматизированное определение корректной MTA-зоны);
- RiWORLD (геопозиционирование и введение поправок);
- RiPROCESS (общее управление, визуализация и уравнивание).

Также существует большое количество утилит и специализированных приложений, анализ которых выходит далеко за рамки данной статьи.

Общими чертами программных решений компании RIEGL являются низкие требования к аппаратной части (компьютеру), небольшое количество занимаемого дискового пространства, дружелюбный интерфейс, разумно сочетающийся с богатым инструментарием пользовательских настроек (но без излишней перегруженности опциями и кнопками), уникальность системы хранения и обработки данных, специфичность и высокая продуктивность используемых подходов к уравниванию и визуализации данных.

**Оцифровка и обработка полной формы сигнала.** Выполняется модулем RiANALYZE. Все сканеры RIEGL аппаратно регистрируют полную форму отраженного сигнала, что впоследствии используется для более точного определения времени, когда имело место отражение от поверхности объекта. Кроме того, подобный подход позволяет разделить сигнал, отраженный от двух близкорасположенных объектов, получив от них два сигнала с разными координатами вместо одного, с некими средними значениями координат, не имеющими ничего общего с действительностью.

**Автоматизированное определение корректной MTA-зоны**

**для каждой точки.** Выполняется модулем RiMTA, который позволяет пользователю не задумываться о выставлении, соблюдении и смене MTA-зон в процессе съемки либо обработки данных. Программное обеспечение самостоятельно определяет необходимый номер MTA-зоны, выводя итоговые точки в соответствующей системе координат.

**Неограниченный размер проектов.** В модуле RiPROCESS применяется идеология хранения данных в структуре квадродерева — динамической, иерархически упорядоченной системы сегментации пространства на элементарные ячейки-клетки. Каждая ячейка, в свою очередь, хранит ссылку на массив точек, попадающих в нее. Как правило, размер ячейки равен 1–2 м, и в ней хранится не более нескольких десятков точек. Базовый пространственный и статистический анализ данных сканирования ведутся по правилам и законам растровой графики. Это происходит до тех пор, пока в ходе запроса не будут выбраны только те ячейки, которые требуются для текущей операции, после чего модуль считывает необходимый объем информации о точках и выполняет соответствующее действие.

Таким образом, в памяти компьютера никогда не хранится не то что весь объем данных лазерного сканирования, но даже сколько-нибудь их значимая часть. Это существенно снижает системные требования к компьютерам для камеральной обработки, а также позволяет практически неограниченно масштабировать проекты. Так, в практике пользователей имелись случаи совместного уравнивания и обработки результатов сканирования, выполненных в течение 12 дней, в ходе которых было получено около 6 млрд точек лазерных отражений без заметного изменения скорости работы компьютера.

**Система отображения.** Поскольку при создании каждой ячейки для нее автоматически вычисляются статистические показатели, то они могут быть визуализированы в любой момент времени без дополнительных расчетов в модуле RiPROCESS. Так, программа позволяет (путем простой смены режима отображения) увидеть на всей площади проекта плотность точек, разброс по высоте в пределах каждой ячейки, зоны покрытия каждой полосы съемки (strip), разницу высот, полученную с разных проходов, рельеф в виде отмывки и т. п. Конечно, не забыты инструменты профилирования, интерактивного выбора части данных и просмотра их в режиме реального времени в двухмерном и трехмерном видах. Все это дает возможность быстро оценить качество данных (плотность, покрытие), степень их однородности, а также взаимосвязанность, т. е. отклонения по высоте и в плане при разных проходах по одному и тому же месту.

**Система калибровки и уравнивания ТЛО.** При необходимости, модуль RiPROCESS помогает выполнить калибровку угловых элементов разворота лазерного сканера относительно ИМУ. Эти параметры могут вычисляться как для всего залета в целом, так и для каждой полосы маршрута съемки. Обработка проводится после залета (калибровочного, съемочного), при этом нет необходимости измерять контрольные наземные точки или указывать вручную связующие точки или опознаки.

Ключевым принципом уравнивания является поиск наклонных плоских объектов (в терминологии RIEGL — observations). Так, если некоторая область пространства покрыта съемкой более чем 2 раза и удовлетворяет нужным критериям, то для нее вычисляется уравнение плоскости, наиболее точно вписывающейся в данное облако

точек. Вычисляются также и векторы нормали к данным плоскостям. Если вычисленные плоскости удалены и развернуты относительно друг друга незначительно (может регулироваться пользователем), то они считаются одним объектом, и для них вычисляются углы взаимного разворота и дистанция по нормали.

Основной причиной подобного случая является некорректно вычисленные (или изменившиеся после последней калибровки) угловые параметры разворота лазерного сканера относительно ИМУ. Это происходит из-за вибрации, толчков при посадке, температурного изменения размеров агрегатов, перестановки блоков и т. п. Для того, чтобы аналитически вычислить оптимальные углы поправки, необходимо иметь, как минимум, 3 наклонные пары плоскостей, у которых не совпадают векторы нормалей. На практике количество подобных плоскостей, находимых модулем RiPROCESS в фактических данных, измеряется от десятков тысяч до миллионов. Это позволяет с высокой статистической точностью не только определить истинные углы разворота в системе «лазерный сканер — ИМУ» аналитическим методом, но и подсчитать остаточные некомпенсированные погрешности после введения оптимальных параметров.

Если в ходе полета существенно менялось качество траектории, работы велись на разных высотах либо при разных температурах, для каждой группы (вплоть до отдельных полос съемки) можно вычислить индивидуальные поправки в угловые элементы, минимизирующие взаимные искажения данных и повышающие итоговую однородность облака точек лазерных отражений. Сюда же могут быть добавлены и опорные точки, позволяющие без использования дополнительного програм-

многo обеспечения получить итоговое облако точек, обладающее максимальной точностью позиционирования.

Все вышеописанные действия (кроме введения опорных точек) не требуют вмешательства оператора. Ему необходимо только указать параметры калибровки (на практике обычно используется 3–4 варианта) и запустить полностью автоматизированный процесс. Типовое время автоматического вычисления угловых калибровочных параметров для калибровочного полигона составляет около 2 минут, для крупного проекта — 0,5–3 часа. Кроме того, в один и тот же проект может быть подгружено (и взаимно уравнено) неограниченное количество данных, полученных за несколько летних дней, что позволяет полностью избежать влияния человеческого фактора при уравнивании и ускорить работу в десятки раз.

Таким образом, в данной статье были рассмотрены базовые особенности лазерных технологий и методов обработки лазерных импульсов, реализованных в системах воздушного лазерного сканирования производства компании RIEGL. Более подробную информацию о моделях аэросъемочного оборудования RIEGL можно получить в компании «АртГео», которая является официальным эксклюзивным дистрибьютором воздушных, мобильных, наземных и промышленных лазерных сканирующих систем RIEGL в России [2].

#### ▼ Список литературы

1. RIEGL. — [www.riegl.com](http://www.riegl.com).
2. «АртГео». — [www.art-geo.ru](http://www.art-geo.ru).

#### RESUME

Basic features are considered for the RIEGL airborne laser scanning systems, which allowed combining these scanners into five independent groups. The main technical characteristics are given for these systems. The software is described also.