

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СКАНЕРА TRIMBLE X7*

Впервые лазерный сканер Trimble X7 был представлен на выставке INTERGEO 2019 в Штутгарте (Германия) (см. Геопрофи. — 2019. — № 5. — С. 28-29). Это профессиональная высокоскоростная система наземного лазерного сканирования, оснащенная множеством инновационных технологий, позволивших снизить стоимость эксплуатации прибора и обеспечить его быструю окупаемость (рис. 1).

В защищенном по стандарту IP55 центральном блоке интегрированы высокоскоростной

привод зеркала развертки, встроенные датчики наклона, импульсный лазерный дальномер, три цифровых камеры и лазерный указатель. Двойной привод X-Drive позволяет автоматически устанавливать и контролировать положение измерительного блока сканера в горизонтальной плоскости (горизонтировать), выполнять калибровку углов между главными осями прибора и расстояний в процессе измерений. При калибровке отслеживаются состояние окружающей среды, температура инструмента и вертикальная скорость перемещения, при необходимости автоматически вносятся поправки в углы и расстояния, гарантируя высокое качество данных каждого скана.

В обычных условиях полная автоматическая калибровка занимает около 25 секунд, а в сложных условиях (высокая освещенность окружающей среды или колебания и вибрации прибора) — до 45 секунд. Также узлы измерительного блока эффективно стабилизируются при изменениях температуры, в результате чего время калибровки может увеличиться, а может и не потребоваться вовсе. Инструмент успешно калибруется даже после тряски и вибраций, которые могут происходить во время его перевозки. Внутренние и внешние условия непрерывно отслеживаются, и при необходимости система безопасности дает команду выполнить повторную

калибровку для обеспечения точности измерений. Автоматическая калибровка углов и расстояний обеспечивает высокое качество данных без дополнительных затрат и простоев, вызываемых необходимостью регулярной калибровки прибора в сервисном центре.

Три калиброванные соосные цифровые камеры с оптическими осями, согласованными с центром зеркала развертки, обеспечивают минимизацию параллакса между изображениями и сканами. Благодаря встроенному инерциальному блоку, в процессе автоматической регистрации сканов отслеживается местоположение сканера, что позволяет автоматически совмещать текущий скан с последним или выбранным заранее, обеспечивая контроль полученных результатов непосредственно на объекте. Как при установке сканера, так и при сканировании исполнитель имеет возможность контролировать пространственное положение прибора по пяти многоцветным светодиодным индикаторам на подставке сканера или с помощью звуковых сигналов.

Управлять работой сканера можно с внешних устройств: планшета с операционной системой Windows 10 и программой Trimble Perspective или мобильного устройства с операционной системой iOS или Android и бесплатным приложением Trimble Perspective Mobile (рис. 2). Связь с прибором осу-



Рис. 1
Общий вид сканера Trimble X7

* Статья подготовлена по материалам статей «Inside the Trimble X7: Deep Dive into Trimble X7 Auto-Calibration» и «Inside the Trimble X7: Deep Dive into Trimble X-Drive Technology», перевод которых выполнил М.Ю. Караванов. Оригинальный текст перевода и ссылки на исходные материалы размещены на сайте <https://trimble.club>.

ществляется по Wi-Fi или с помощью USB-кабеля.

Программа Trimble Perspective позволяет управлять работой сканера на станции автоматически или вручную. При сканировании можно регистрировать сканы в двухмерном или трехмерном виде, добавлять комментарии и изображения, а также записывать и экспортировать файлы данных в типовых форматах (LAS, PTX, E57, RCP, POD и др.). Обработка данных сканирования проводится в программном обеспечении Trimble (TRW, TBC, Tekla, SketchUp) или в программах других производителей (Autodesk, Bentley Systems и др.).

Рассмотрим подробнее конструктивные особенности и возможности сканера Trimble X7, которые выделяют его среди других наземных лазерных сканеров за счет:

- наличия защищенного центрального блока и двойного вертикального привода X-Drive;
- возможности автоматической калибровки углов между главными осями прибора;
- возможности автоматической калибровки измеряемых расстояний;
- возможности автоматического самогоризонтирования;
- наличия соосных калиброванных цифровых камер.

▼ Защищенный центральный блок и двойной вертикальный привод X-Drive

Уникальная конструкция центрального блока делает Trimble X7 больше похожим на тахеометр, чем на сканер. В действительности, благодаря двойному вертикальному приводу X-Drive, сканер получил возможности, общие для инструментов обоих типов.

Множество технических инноваций в Trimble X7 заключаются в уникальной защищенной конструкции центрального

блока (рис. 3). В нем расположены: лазерный источник излучения дальномера, встроенные датчики наклона, высокоскоростной привод с зеркалом развертки, сервопривод геодезического класса, три камеры и лазерный указатель.

Двойной вертикальный привод X-Drive — первая в мире система, объединившая сервопривод геодезического класса точности с высокоскоростным приводом зеркала развертки (рис. 4). Двойной привод сделал возможным выполнение автокалибровки трех соосных цифровых фотокамер, предназначенных для быстрого получения изображений. Встроенные датчики наклона обеспечивают автоматическое приведение измерительного блока ска-

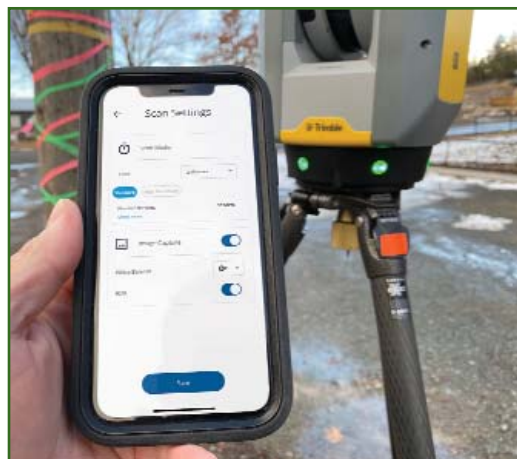


Рис. 2
Мобильное устройство с приложением Trimble Perspective Mobile

малое энергопотребление и бесшумен настолько, что во время измерений его не слышно. Продолжительный срок



Рис. 3
Защищенный центральный блок

нера в горизонтальное положение. Наличие лазерного указателя позволяет выполнять измерение координат отдельных точек и осуществлять геодезическую привязку сканов.

В высокоскоростном приводе зеркала развертки используется технология, специально разработанная для Trimble экспертами в области создания приводов высококачественных жестких дисков. Привод имеет низкое трение и вибрацию,

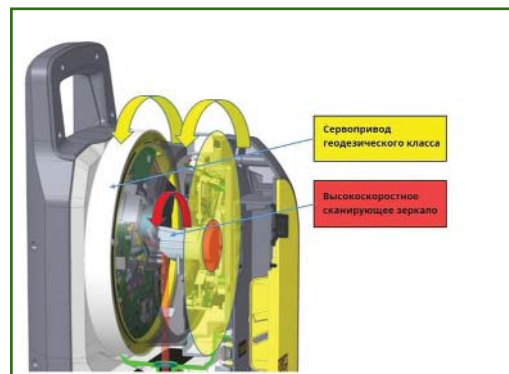


Рис. 4
Двойной привод X-Drive

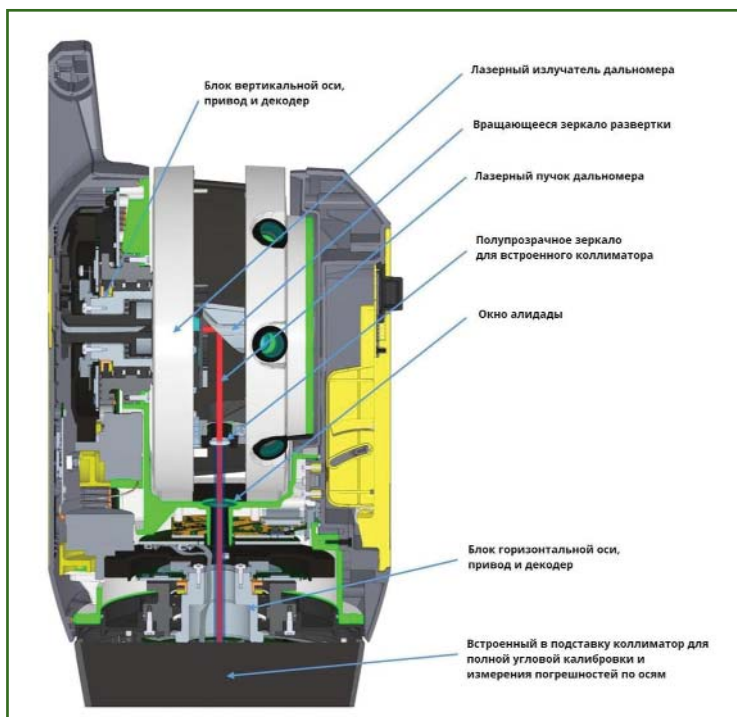


Рис. 5
Конструктивные особенности сканера Trimble X7

службы привода сокращает стоимость обслуживания и является одной из причин, по которой Trimble X7 получил стандартную гарантию в 2 года.

Другая особенность — это окно в центральном блоке, изготовленное из поликарбоната для защиты зеркала развертки от механических повреждений. Материал окна оптимизирован для длины волны дальномера, защищает от солнечного света и не снижает дальности и точности измерений. Окно обладает прозрачностью стекла, но устойчиво к механическим воздействиям и изменению температуры, отлично подходит для сложных погодноклиматических условий. Кроме того, конструкция окна защищает от проникновения пыли и воды по стандарту IP55 и обеспечивает безопасную работу зеркала развертки.

Сервопривод вертикального круга и система декодирования угла интегрированы в алиаду, поэтому весь центральный блок, включающий привод с

зеркалом развертки и лазер дальномера, может вращаться вокруг горизонтальной оси таким же образом, как блок зрительной трубы с вертикальным кругом в традиционных тахеометрах (рис. 5).

▼ Автоматическая калибровка углов между главными осями сканера

Для калибровки современных сканеров требуется использовать специализированное сервисное оборудование больших габаритов весом до 200 кг и стоимостью в несколько сотен тысяч долларов. В Trimble X7 размещен миниатюрный вариант этого оборудова-



Рис. 6
Коллиматор, встроенный в подставку сканера

ния, которое автоматически калибрует углы между главными осями, подобно тому, как это делает стандартное оборудование для калибровки, но с немного меньшими требованиями.

Впервые в подставку оптического инструмента встроен коллиматор, позволяющий автоматизировать процесс калибровки всех углов между главными осями вращения сканера (рис. 6). При этом для измерения погрешностей между главными осями не требуются наведение на цель и вмешательство пользователя.

Положение оси лазерного пучка, излучаемого дальномером, фиксируется с помощью цифровой камеры, размещенной в коллиматоре, в то время как привод алиады поворачивает центральный блок в различные положения. Традиционный процесс измерения коллимационных погрешностей горизонтальной и вертикальной осей тахеометра выполняется по одному направлению визирования. В данном случае, благодаря объединению сервопривода вертикального круга Trimble X-Drive и высокоскоростного привода зеркала развертки, выполняется большое число измерений по множеству направлений визирования — по всему диапазону в 360° в горизонтальной плоскости.

Такая процедура автоматической калибровки предоставляет ряд преимуществ.

Во-первых, поскольку система декодирования на алиаде заимствована из тахеометров, то ее погрешность не превышает 3" и гарантирует, что сканер будет правильно откалиброван в каждом точно известном положении зеркала развертки для надежного определения коллимационной ошибки и места нуля.

Во-вторых, эта процедура также учитывает все остаточные рассогласования главных

осей сканера, а также погрешности декодера привода развертки и влияние скорости вращения. Например, в случае, когда ось лазерного пучка дальногомера и ось вращения зеркала развертки не совпадают, плоскость сканирования будет не идеальной, а слегка наклонена.

При таком эффекте данные распределяются по закону синуса/косинуса. Кривая может быть откалибрована благодаря встроенному коллиматору и сервоприводу внутри алидады вертикального круга. В полевых условиях такая автоматическая калибровка может быть выполнена с помощью измерений нескольких контрольных точек при различных вертикальных углах и количестве измерений, достаточном для получения характеристик оценки заявленной точности.

Благодаря двойному вертикальному приводу X-Drive выполняется калибровка угловой точности вращающегося зеркала. Определяются и учитываются величины коллимационных погрешностей, т. е. отклонения горизонтальной, вертикальной и визирной осей.

В идеальном случае все оси перпендикулярны друг другу (рис. 7), но на практике такое невозможно, поэтому требуется вводить поправки.

Автоматическая калибровка выполняется в следующей последовательности.

1. Определяется погрешность горизонтальной оси вращения. Если горизонтальная ось не перпендикулярна вертикальной оси, то плоскость, образованная множеством направлений оси лазерного пучка (Scan fan), становится наклонной.

2. Определяется погрешность установки зеркала развертки. Если угол зеркала развертки не соответствует 45° , то плоскость становится наклонным конусом.

3. Определение погрешности согласования оси привода зеркала развертки. Если ось привода не совпадает с осью лазерного пучка, то наклонный конус получает дополнительное искажение.

При выполнении автоматической калибровки встроенный коллиматор используется в двух различных режимах.

Режим автоколлимации — камера встроенного коллиматора измеряет положение зеркала развертки с передней и задней сторон для определения погрешности горизонтальной оси вращения.

Режим коллимации — камера встроенного коллиматора выполняет измерения при различных положениях для определения коллимационных погрешностей горизонтальной и вертикальной оси.

Определение коллимационных погрешностей горизонтальной и вертикальной оси вращения — это автоматический процесс перемещения лазерного пучка в вертикальной плоскости, чтобы его ось была направлена в наadir. Положение центра лазерного пучка будет распознано камерой встроенного коллиматора в подставке и измерено. Не меняя вертикального положения, инструмент начнет выполнять полный поворот в горизонтальной плоскости с непрерывными точечными измерениями центра лазерного пучка на матрице камеры. Полученная по точкам фигура образует окружность, представляющую положение центра вертикальной оси.

Требуется как минимум два измерения при постоянном горизонтальном угле и нескольких направлениях по вертикали. Эта пара точек определяет линию, на которую будет спроецирован центр окружности. Отклонение равно коллимационной ошибке по вертикаль-

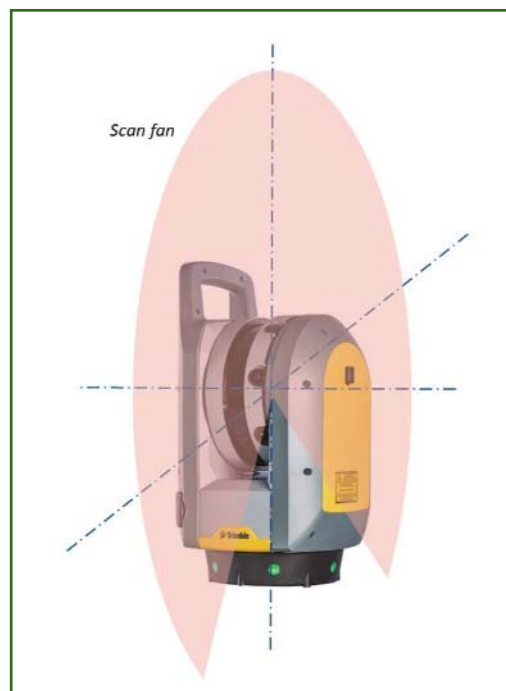


Рис. 7
Идеальный случай, когда все оси перпендикулярны друг другу

ному кругу. Расстояние между центром окружности и ее проекцией определяет слепую зону или сумму погрешностей горизонтальной оси вращения инструмента «к» и коллимационной ошибки «с». В случае, если погрешность горизонтальной оси известна, вычисляется коллимационная ошибка по вертикальному кругу.

▼ Автоматическая калибровка измеряемого расстояния

Точный электронный дальномер — ключевая составляющая качества данных, получаемых сканером. Качество определения пространственных координат точек скана зависит от надежности работы дальногомера в самых сложных условиях. Одним из основных требований является гарантия точности измерения расстояний на всем диапазоне рабочей дальности сканера, при любых температурах и любых условиях отражения. Для этого в дальномер интегрирована собственная инновационная технология Trimble, позволяющая перед

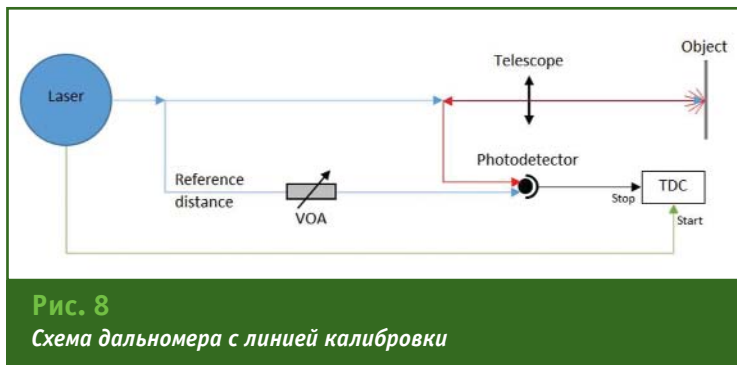


Рис. 8
Схема дальномера с линией калибровки

началом измерений облака точек проводить процедуру калибровки измеренного расстояния, что обеспечивает определение расстояний до любой точки скана с геодезической точностью.

В Trimble X7 дальномер импульсного типа (рис. 8), поэтому лазер дальномера при измерении расстояния по команде отправляет мощный импульс. В это же время отправляется сигнал в блок TDC для запуска секундомера. Лазерный импульс распространяется до объекта, и его небольшая величина, отражаясь от объекта, возвращается, проходит через оптическую систему (Telescope) и передается на фотоприемник (Photodetector). Фотоприемник измеряет уровень сигнала и отправляет команду в TDC, который останавливает секундомер. По времени распространения сигнала вычисляется расстояние.

Сканер работает в расширенном температурном диапазоне от -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Кроме того, он имеет значительный динамический диапазон. Это означает, что он может обнаруживать отраженные сигналы как очень слабого, так и очень высокого уровня. Для достижения высокой точности измерения расстояний в Trimble X7 используется инновационная методика за счет введения в схему дальномера калибровочной линии (Reference distance) (см. рис. 8). Перед началом измерений, копия лазерного

импульса направляется в калибровочную линию. Она имеет исключительно стабильное опорное расстояние и встроенный регулируемый оптический аттенуатор (VOA), позволяющий изменять уровень сигнала импульса. Поскольку точно известно расстояние в линии калибровки, то можно построить график поправок, которые необходимо вводить в полученные данные в зависимости от уровня принятого сигнала. Благодаря этому при измерении расстояния до каждой точки скана автоматически вводится поправка.

Такой инновационный подход обеспечивает высокое качество измерения расстоя-

ния до каждой точки скана при любых внешних условиях.

▼ Автоматическое самогоризонтирование

Точное автоматическое горизонтирование — одно из важнейших условий для быстрой регистрации сканов, обеспечения высокого качества результатов измерений, исключения ошибок и сокращения затрат времени на измерения, вызванных вмешательством пользователя.

Обычно сканеры с точными датчиками автоматического горизонтирования, как правило, имеют ограниченный диапазон компенсации, что приводит к необходимости предварительной установки инструмента пользователем в горизонтальное положение. Этот процесс требует навыков и времени. Другие — имеют датчики с широким диапазоном, но с низкой точностью автоматической установки в горизонтальной плоскости.

Перед измерением каждого скана измерительный блок Trimble X7 автоматически гори-

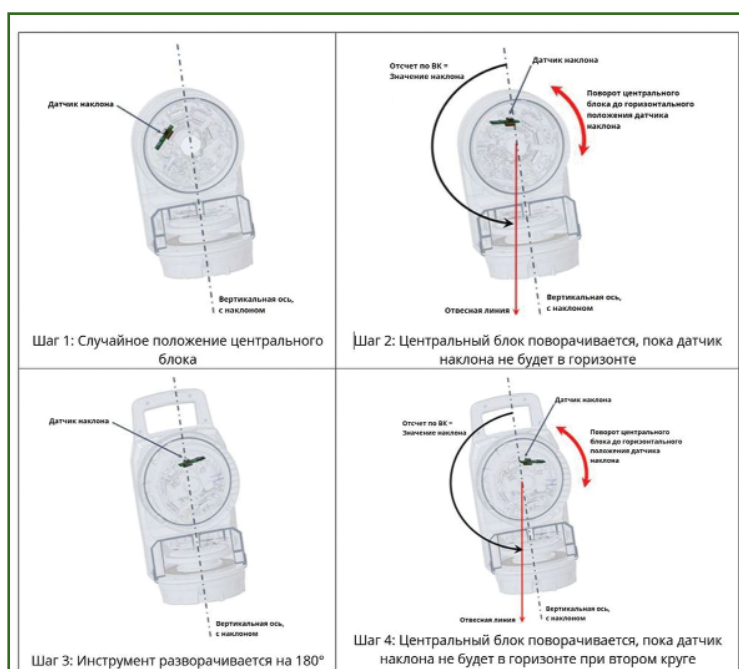


Рис. 9
Процесс автоматической компенсации наклона

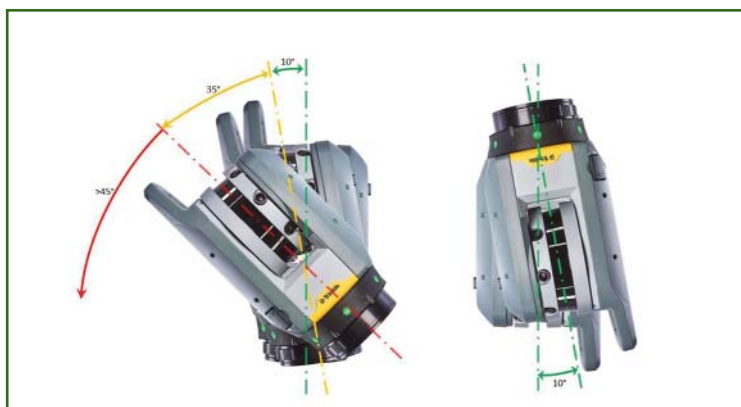


Рис. 10

Ориентировка корпуса сканера для автоматической компенсации наклона измерительного блока

зонтируется (процесс показан на рис. 9).

Высокоточная компенсация наклона измерительного блока обеспечивается, если сканер установлен на штативе с отклонением по любому направлению от вертикальной оси в диапазоне до 10° , причем, как в прямом, так и перевернутом (на 180°) состоянии (рис. 10). В этом случае сканы горизонтируются с высокой точностью — менее $3''$, что соответствует $0,3$ мм на 20 м.

Хотя установку сканера на штативе в горизонтальном положении в диапазоне до 10° легко выполнить на глаз, в Trimble X7 на помощь приходят пять многоцветных индикаторов на подставке, которые подскажут, длину какой ножки штатива необходимо увеличить, а какой уменьшить. Этот процесс очень быстр и не требует особых навыков.

Самогоризонтирование — это процесс измерения наклона измерительного блока, вызванного отклонением корпуса инструмента от горизонтали (или вертикали). По умолчанию функция самогоризонтирования включена для поддержки автоматической регистрации.

Автоматическое самогоризонтирование измерительного блока гарантирует качество измерений с геодезической

точностью, под которой понимается:

— погрешность измерения в вертикальном направлении не более $0,14$ мм на 10 м;

— погрешность измерения в горизонтальном направлении не более $0,3$ мм на 20 м.

Например, при определении вертикальности стены в 10 м дополнительная погрешность, вызванная только неточностью автоматического горизонтирования, составит $0,14$ мм, а при измерении горизонтальности пола дополнительная погрешность на 20 м — $0,3$ мм.

Если Trimble X7 имеет наклон в любую сторону от вертикальной оси в пределах 10° , то сканы, записываемые на такой станции, автоматически помечаются как «Горизонтировано».

Если сканер имеет наклон более чем на 10° , но менее 45° , то записываемые сканы будут примерно отгоризонтированы, но без гарантии точности в $3''$. Такой скан будет помечен как «Не горизонтирован», однако программа Perspective попытается автоматически зарегистрировать и его, если зона перекрытия будет достаточной.

Если инструмент наклонен более чем на 45° по любому направлению от вертикальной оси, то программа Perspective выдаст сообщение об ошибке и

не позволит начать сканирование.

Если сканер находится в перевернутом состоянии и имеет наклон в пределах 10° от вертикальной оси, то скан также будет приведен в горизонтальное положение с геодезической точностью, а затем будет автоматически перевернут.

Кроме того, автоматическая калибровка контролирует точность горизонтирования измерительного блока в режиме реального времени и остановит процесс измерения в случае превышения допустимого наклона инструмента в ходе сканирования.

▼ Система соосных калиброванных цифровых камер

В Trimble X7 интегрирована система из трех соосных калиброванных цифровых 10-мегапиксельных камер с индивидуальным полем зрения для оптимизации покрытия и производительности. Размер изображения каждой камеры составляет 3840×2746 пикселей. Соосная механическая конструкция и согласование оптических осей камер минимизируют параллакс между изображениями и сканами (см. рис. 5).

Время съемки зависит от выбранного режима. Можно выбрать режим, предусматривающий получение 15-ти или 30-ти изображений (рис. 11). В нормальных условиях освещения на запись 15-ти изображений требуется одна минута, а 30-ти — 2 минуты с автоэкспозицией. В режиме с 15-ю изображениями фотографии делаются в шести положениях (с интервалом в 60° в горизонтальной плоскости), в режиме с 30-ю изображениями — в 12-и положениях (с интервалом в 30° в горизонтальной плоскости). При использовании режима с получением 30-ти изображений улучшается общее окрашивание сканов и качество

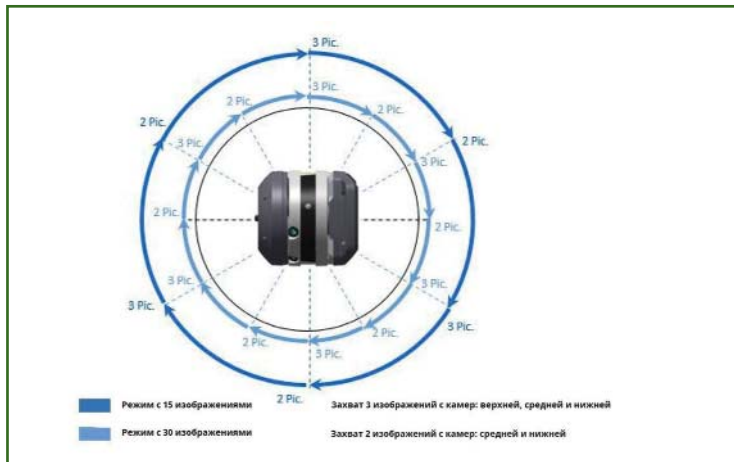


Рис. 11

Положения и число изображений при съемке в режимах с 15-ю и 30-ю изображениями

панорам, особенно в сложных условиях с преобладанием окклюзии (когда один из объектов съемки закрывает видимость на другой). Большое число изображений позволяет получить снимки с лучшим окрашиванием, но увеличивается время записи и обработки. В случае с режимом с 15-ю изображениями обеспечивается хорошее качество в обычных условиях с малой окклюзией.

Имеется также режим получения изображений с расширенным динамическим диапазоном (HDR), при котором в

каждом положении записывается два дополнительных изображения с различной экспозицией, в результате чего при их слиянии достигается оптимальный уровень яркости для наилучшей передачи цветов и деталей в очень светлых или темных зонах. В режиме HDR требуется 3 минуты для записи 15-ти изображений и 6 минут — для записи 30-ти изображений.

Для устранения нереалистичных оттенков цвета имеется настройка с поправкой баланса белого, поэтому объ-

екты белого цвета будут визуализироваться на изображении как белые. Правильный баланс белого также принимает в расчет цветовую температуру источника, которая соответствует относительно теплomu или холодному оттенку. Автоматическая поправка баланса белого вводится в программу, а предустановленные настройки для сканирования внутри и снаружи помещений — непосредственно в самом сканере. Ниже приведены общие правила, которые рекомендуется использовать для каждой настройки:

- авто — когда условия освещения трудноопределимы;
- солнечно — снаружи помещений на ярком солнечном свете;
- облачно — снаружи помещений в пасмурную погоду;
- люминесцентное белое — внутри помещений при ярком холодном люминесцентном освещении;
- лампа накаливания — внутри помещений при более естественном освещении ламп накаливания.

Окрашивание сканов и создание качественных панорам выполняется при экспорте проекта из программы Trimble Perspective (рис. 12, 13). Отдельные сканы из списка могут быть также обработаны при измерении. При создании панорамы реальные расстояния из облака точек будут использоваться для минимизации несоответствий, а плавное сопряжение — устранять разрывы между изображениями и дублирование объектов.

Таким образом, не только внешний вид и стандартная гарантия 2 года отличают лазерный сканер Trimble X7 от других сканеров, но и удобство работы, а также высокое качество результатов сканирования за счет принципиально новых конструктивных решений.

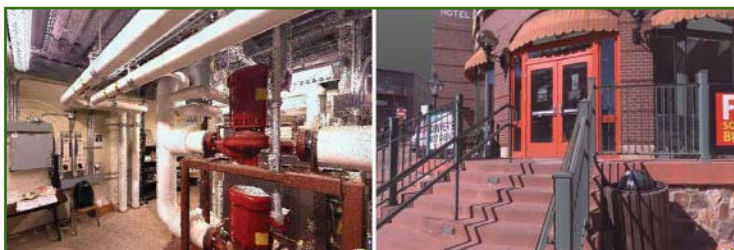


Рис. 12

Окрашенные сканы



Рис. 13

Качественные панорамы