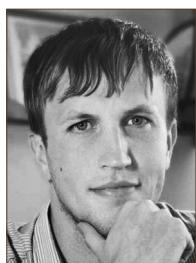


Моделирование архитектурных объектов:

лазерное сканирование и цифровая фотограмметрия



Андрей Будо,
старший преподаватель
кафедры геодезии
и аэрокосмических
геотехнологий
Белорусского
национального
технического
университета

Архитектурные памятники различных эпох и стилей подвержены непрерывному воздействию природных и антропогенных факторов. В связи с этим возникает необходимость разработки и внедрения прецизионных методов метрической фиксации и мониторинга их состояния для реставрации и создания цифровых архивов. Традиционные архитектурные обмеры, основанные на использовании рулеток, лазерных дальномеров и тахеометров, обладают рядом ограничений: они трудоемки и не позволяют детально зафиксировать сложные пространственные криволинейные поверхности (деформации стен, своды, элементы декора). Переход к цифровым инструментам пространственного документирования открыл новые возможности в деле сохранения культурно-исторического наследия. Ведущие технологии в этой области – наземное лазерное сканирование (НЛС) и цифровая фотограмметрия, основанная на алгоритмах сопоставления изображений.

Наземное лазерное сканирование формирует плотное облако точек с высокой точностью, почти не зависящей от условий освещения, однако на практике имеет свои ограничения. Сканер не всегда способен запечатлеть кровельные конструкции, купола или верхние ярусы фасадов, а сложные архитектурные формы неизбежно создают теневые «мертвые зоны». В таких случаях целесообразно обратиться к фотограмметрии. Аэрофотосъемка с БПЛА и наземное фотографирование обеспечивают охват труднодоступных участков и получение детальных текстур. Но и этот прием требует строгого контроля. Без надежного геодезического обоснования модель неизбежно подвержена систематическим ошибкам масштабирования и пространственным деформациям. Особенно ярко этот эффект проявляется на протяженных объектах и гладких, лишенных текстуры поверхностях, например на оштукатуренных стенах, которые алгоритмам сложно корректно сопоставить.

Несмотря на широкое использование обеих технологий в мировой практике, вопросы их оптимальной интеграции применительно к специфике архитектурного наследия Республики Беларусь остаются недостаточно изученными. К осо-

бенностям отечественных сооружений относится преобладание смешанных строительных материалов (красный кирпич, известняковая кладка, дерево), частое нахождение памятников в зонах с густой растительностью, а также необходимость привязки результатов к местным системам координат (МСК) в соответствии с национальными техническими требованиями.

В области цифрового документирования историко-культурных ценностей за последние два десятилетия сформировался устойчивый консенсус относительно взаимодополняемости НЛС и цифровой фотограмметрии. В работах ведущих зарубежных ученых подчеркивается, что, задевствовав лишь одну схему, зачастую нельзя достичь требуемого баланса между геометрической точностью модели и реалистичностью ее визуального представления. Интеграция сенсоров рассматривается в международной практике как наиболее надежный способ преодоления ограничений каждого из приемов. Исследования показывают, что лазерное сканирование выступает в качестве высокоточного геометрического каркаса, минимизирующего деформации масштаба, в то время как фотограмметрия на основе



алгоритмов SfM и др. позволяет детально реконструировать элементы со сложной текстурой и заполнить теневые зоны сканирования. Современным вектором развития зарубежной науки является переход от простых полигональных трехмерных моделей к историческому информационному моделированию. В работах последних лет рассматриваются подходы к автоматической и полуавтоматической сегментации облаков точек, однако сложность нерегулярной геометрии исторических объектов по-прежнему оставляет эту задачу дискуссионной.

В нашей стране вопросы применения современных геодезических технологий в архитектурно-археологических работах также находятся в фокусе внимания ученых и практиков. Значительный вклад в инженерно-геодезическое обеспечение и фотограмметрию внесли сотрудники Белорусского национального технического университета, Полоцкого государственного университета им. Евфросинии Полоцкой и Белорусского государственного университета.

В современных отечественных публикациях, и в частности в профильных трудах ученых ПГУ последних лет, активно обсуждается наземная фотограмметрия для фиксации архитектурных памятников Полоцкого региона. Параллельно совершенствуются алгоритмы геодезического мониторинга деформаций несущих конструкций исторических зданий. В прикладной сфере специалисты ОАО «Белреставрация» и других профильных организаций успешно внедряют приемы наземного лазерного сканирования (в том числе на высокоточном оборудовании). Данный подход позволяет получать детальные обмерные данные при работе с масштабными сооружениями, среди которых Несвижский и Мирский замковые комплексы, а также Коссовский дворец.

Для геодезического обоснования и координатной привязки применяется двухступенчатая схема. Это необходимо для достижения пространственного единства данных при построении трехмерных моделей, что гарантирует корректную интеграцию полученных результатов с государственными картографическими материалами. На первом этапе создается опорная геодезическая сеть (ОГС) в непосредственной близости от исследуемых зданий. Координатная привязка пунктов ОГС выполняется через спутники посредством многочастотных ГНСС-приемников в режиме кинематики реального времени (RTK). Корректирующая информация может быть получена от Спутниковой системы точного позиционирования Республики Беларусь (ССТП РБ). Определение координат, как правило, проводится в местной системе координат и Балтийской системе высот 1977 г.

Среднеквадратическая погрешность (СКП) планового положения объектов не превышает ± 15 мм, высотного – ± 25 мм. На втором этапе с пунктов ОГС ведется прокладка замкнутых тахеометрических ходов с помощью электронного тахеометра. От точек тахеометрического хода производится координирование жестких элементов конструкции здания (угла цоколя, карнизов) и специальных плоских контрастных точек (марок), используемых в качестве опорных для лазерного сканирования и фотограмметрии.

Методика наземного лазерного сканирования

Прецизионные геометрические данные собираются наземным лазерным сканером импульсного или фазового типа с погрешностью измерения расстояния не более ± 2 мм на 100 м. При планировании мест его установки учитываются следующие критерии: минимизация зон затенения («мертвых зон»), вызванных сложной архитектурой фасадов; обеспечение взаимного перекрытия смежных сканов на уровне не менее 30–40% для надежной сшивки; угол падения лазерного луча на исследуемые поверхности фасадов должен составлять не менее 45° для исключения шума и повышения точности. Сканирование ведется со средним пространственным разрешением (шагом точек) 5 мм на удалении 10 м от объекта.

Взаимное ориентирование сканов осуществляется по одному из следующих методов:

- **маркировочный** – по специальным сферическим или плоским высококонтрастным маркам, равномерно распределенным в поле зрения сканера (не менее 3 общих марок для каждой пары смежных станций), используется для жесткой увязки сканов в единую сеть по координатам, полученным из тахеометрической съемки;
- **безмарочный** – точная доводка взаимного положения облаков точек реализуется посредством итерационного алгоритма ближайших точек по перекрывающимся плоскостям. Допустимая невязка взаимного положения сканов после оптимизации составляет не более ± 5 мм.

Методика цифровой фотограмметрии

Фотограмметрическая съемка включает наземный и воздушный циклы с целью получения непрерывного фотопокрывания всех поверхностей объекта. Воздушная – с квадрокоптером, оснащенным камерой с разрешением не менее 20 Мп и фиксированным фокусным расстоянием (для исключения нестабиль-

ности параметров внутренней калибровки в процессе полета). Полетное задание может проектироваться по следующей схеме: надирная съемка (вертикально вниз) – для фиксации общей геометрии кровли и прилегающей территории; перспективная (косоугольная) съемка с углами наклона оптической оси камеры 45° – для съемки карнизов, куполов и верхних ярусов стен.

Наземная съемка полнокадровой камерой с фиксированным объективом (например, с фокусным расстоянием 24 мм или 35 мм) совершается по периметру здания с шагом 1–1,5 м. При работе с высотными элементами с земли применяется телескопическая вежа. Для внешнего ориентирования фотограмметрической модели задействуют марки ОГС (GCP), равномерно распределенные по фасадам здания. Координаты центров проекции снимков БПЛА определяются по бортовым ГНСС-данным.

Интеграция разнородных пространственных данных

Массивы данных НЛС и фотограмметрии объединяются по определенному алгоритму (рисунок). Импортированное в фотограмметрическое программное обеспечение облако точек НЛС используется в качестве жесткой метрической основы. Фотограмметрические снимки ориентируются относительно этого облака по координатам общих опорных точек. Далее выполняется совместный фототриангуляционный расчет, в котором облако точек лазерного сканирования выступает в роли опорной геометрической поверхности, ограничивающей накопление деформаций фотограмметрической модели. Это снижает СКП фотограмметрического выравнивания до сантиметрового уровня.

На основе объединенного облака точек строится единая триангуляционная сетка. Для участков со сложной геометрией и четкими гранями приоритет отдается геометрии НЛС, а для труднодоступных высотных элементов – фотограмметрическому плотному облаку точек.

Текстурирование полигональной модели воплощается путем проецирования наземных и полетных (с БПЛА) снимков на геометрию объекта. Чтобы избавиться от резких перепадов освещенности и видимых швов на стыках кадров, применяются алгоритмы ортотрансформирования. Финальное выравнивание яркости в зонах перекрытия осуществляется путем расчета взвешенного среднего значения для пикселей смежных кадров.

Описанный подход к интеграции лазерного сканирования и цифровой фотограмметрии показал

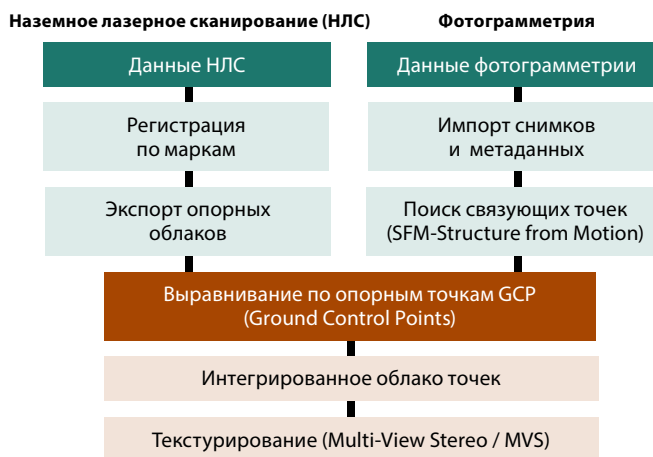


Рисунок. Блок-схема технологического процесса интеграции данных

свою эффективность для задач сохранения историко-культурного наследия. Создание единой опорной сети, привязанной к ССТП Республики Беларусь, решает проблему координации разнородных массивов данных, что исключает вероятность геометрических сдвигов при объединении облаков точек и обеспечивает точность, удовлетворяющую требованиям к точности архитектурных обмеров.

За счет гибридного сбора данных удастся компенсировать технологические недостатки каждого сенсора. Съемка с БПЛА полностью закрывает «белые пятна» на кровле и высотных конструкциях, куда не дотягивается луч наземного сканера. В свою очередь плотное облако точек от НЛС выступает жестким каркасом, предотвращающим искажения фотограмметрической модели. Совместное уравнивание данных в общей программной среде позволяет спроецировать текстуру высокого разрешения на полигональную модель без потери пространственной точности, в результате чего итоговые погрешности остаются в пределах первых сантиметров. Внедрение таких комбинированных моделей автоматизирует подготовку чертежей, сечений и ортофотопланов, что существенно сокращает полевой этап работ по сравнению с традиционной тахеометрической съемкой и сводит к минимуму субъективные ошибки исполнителя.

Полученные трехмерные данные могут служить координационной основой для информационного моделирования в белорусской реставрационной практике, облегчая мониторинг деформаций несущих конструкций и повышая точность расчета объемов необходимых материалов. Описанная методика обеспечивает создание достоверных цифровых двойников памятников архитектуры. Наличие таких моделей гарантирует сохранение точных метрических данных об историко-культурных объектах на случай их повреждения или утраты. ■