

УДК 528.5

Костылев Вячеслав Юрьевич

Студент

3 курс, «Строительный факультет»

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет

Россия, г. Санкт-Петербург

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ. НАЗЕМНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ КАК АЛЬТЕРНАТИВА УСТОЯВШИМСЯ МЕТОДАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Аннотация: В статье представлен сравнительный анализ традиционных методов фиксации деформаций строительных конструкций и технологии наземного лазерного сканирования (НЛС). Рассмотрены основные ограничения дискретных измерений при оценке напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых объектов. Описаны принципы работы лазерных сканеров, особенности полевого и камерального этапов обработки данных, методы выявления деформаций на основе анализа облаков точек. На основе прямого сопоставления технологий и анализа результатов натурных испытаний выявлены ключевые преимущества и недостатки НЛС. Сформулированы экономические и технологические факторы влияющие на ограничение области применения лазерных сканеров.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование; техническое обследование; облако точек; BIM-технологии; геодезический контроль.

Abstract: The article presents a comparative analysis of traditional methods for measuring structural deformations and terrestrial laser scanning (TLS) technology. The main limitations of discrete measurement techniques in assessing the stress-strain state of existing structures are examined. The principles of laser scanner operation, the specific features of field data acquisition and office data processing, and methods for detecting deformations based on point cloud analysis are described. Based on a direct comparison of the technologies and an analysis of full-scale testing results, the key advantages and limitations of TLS have been identified. Economic and technological factors affecting the applicability and limitations of terrestrial laser scanning in structural inspection are discussed.

Keywords: terrestrial laser scanning; structural inspection; point cloud; BIM technologies; geodetic monitoring.

В настоящее время в строительной отрасли активно внедряются цифровые технологии. Использование информационного моделирования (BIM) и

автоматизация управления жизненным циклом объектов требуют современных подходов к сбору пространственных данных [1]. Традиционные методы технического обследования, основанные на точечных измерениях, не всегда обеспечивают полноту информации, необходимую для работы в цифровой среде.

Данная проблема особенно актуальна при обследовании эксплуатируемых зданий с учетом неравномерности деформаций, возникающих в течение жизненного цикла объекта. В данном случае важными показателями технического состояния зданий и сооружений выступают величины прогибов несущих конструкций, неравномерности осадки фундаментов и кренов фасадов. Возможность получения значений данных деформаций, а также оценка их характера необходима для определения остаточной несущей способности объектов и принятия решений об их усилении или реставрации.

Для измерения деформационных характеристик зданий и их конструкций традиционно применяются геодезические и механические методы, в их числе: геометрическое нивелирование, тахеометрическая съемка и использование прогибомеров [2]. При высокой точности в локальных точках, эти подходы отличаются повышенной трудоемкостью, особенно при работе в стесненных условиях. Основным ограничением данных методов является дискретность измерений. Фиксация данных только в заданных сечениях или контрольных точках снижает точность оценки общего напряженно-деформированного состояния объекта.

Альтернативным подходом, активно внедряемым в практику технического обследования, является наземное лазерное сканирование. Технология обеспечивает сбор сплошного массива пространственных данных, формирующих облако точек, которое представляет собой высокоточную трехмерную модель объекта, состоящую из миллионов отдельных точек с присвоенными им координатами. Формируемое облако точек решает проблему дискретности данных, однако практическое применение НЛС требует решения ряда задач, к которым относятся необходимость в больших вычислительных мощностях для проведения постобработки больших массивов данных, выбор алгоритмов определения величин деформаций по облаку точек и оценка сопоставимости результатов с данными классических методов измерений.

Практика традиционной фиксации геометрических параметров строительных конструкций исторически берет начало с применения простейших механических средств: строительных отвесов, измерительных струн и стрелочных прогибомеров. Так, метод натяжения тонкой стальной струны между опорами изгибаемого элемента до сих пор применяется для локального замера

стрелы прогиба балок или ферм. Привлекательность таких подходов заключается в их простоте и отсутствии необходимости в сложном дорогостоящем оборудовании. Однако их существенным недостатком является высокая чувствительность к внешним факторам, таким как ветровая нагрузка или собственное провисание мерной нити, а также контактный характер работы, требующий непосредственного физического доступа к конструкции, что может повлечь за собой устройство строительных лесов и иных конструкций для обеспечения прямого доступа к измеряемым объектам.

С усложнением конструктивных схем и ростом этажности зданий возникла потребность в более точных и дистанционных измерениях. Это обусловило переход к геометрическому нивелированию. Использование оптических, а впоследствии и высокоточных цифровых нивелиров стало стандартом для фиксации вертикальных перемещений. Данный метод базируется на снятии отсчетов по инварным или телескопическим рейкам и обеспечивает миллиметровую точность при вычислении разности высот. Тем не менее, метод ограничен фиксацией перемещений только по вертикальной оси, требует обеспечения прямой видимости между прибором и рейкой, а также отличается высокой трудоемкостью при необходимости детального обследования большепролетных элементов.

Поэтому следующим этапом эволюции геодезического контроля стало внедрение электронных тахеометров. Объединение функций измерения углов и лазерного дальномера дало возможность фиксировать отклонения в трехмерном пространстве, что позволило решать задачи по определению кренов высотных сооружений, плановых смещений колонн и прогибов конструкций с помощью одного прибора. Появление безотражательного режима кардинально упростило процесс полевых работ, специалисты получили возможность дистанционно снимать координаты точек на высоких сводах или труднодоступных участках фасадов.

Однако несмотря на глубокую технологическую трансформацию измерительных средств от механических приспособлений до оптико-электронных систем со встроенными лазерами традиционные подходы объединяет общая методологическая особенность. Все они базируются на принципе дискретного сбора данных. При их использовании назначается шаг измерений и выбираются конкретные контрольные сечения, после чего полученные данные экстраполируются на весь элемент. Принципиальным отличием технологии НЛС от рассмотренных ранее методов является переход от дискретных измерений к формированию сплошного массива пространственных данных. В основе работы лазерного сканера лежит высокоскоростное измерение

расстояний до объекта с помощью встроенного безотражательного дальномера, сопровождаемое синхронной фиксацией горизонтальных и вертикальных углов. Физически этот процесс базируется на технологии измерения времени полета луча или фиксации сдвига фаз лазерного излучения. Вращающаяся система зеркал внутри прибора позволяет направлять луч во всех направлениях, совершая от сотен тысяч до нескольких миллионов измерений в секунду. Для каждого зафиксированного импульса прибор рассчитывает точные пространственные координаты по трем осям (x , y , z) и сохраняет значение интенсивности отраженного сигнала, формируя высокоплотную цифровую копию окружающего пространства.

Применение НЛС снижает риски пропуска скрытых или локальных дефектов. При сканировании железобетонного перекрытия, фасада или балочной клетки формируемое облако точек позволяет получить исчерпывающую информацию о геометрии всего элемента, а не только о заранее выбранных контрольных сечениях. Это позволяет фиксировать комплексные деформации, такие как кручение элементов, локальные просадки или выпучивания, которые остались бы незамеченными без использования лазерного сканирования.

Процесс фиксации деформаций с помощью НЛС структурно разделяется на полевой и камеральный этапы, причем основная аналитическая нагрузка ложится на постобработку. Главной задачей и сложностью полевого этапа является требование обеспечения взаимного перекрытия сканов с разных станций установки прибора, с которых ведется непосредственная съемка объекта, а также необходимость минимизировать слепые зоны, возникающие из-за наложения конструкций друг на друга или наличия на объекте различного рода препятствий. Скорость сбора данных на данном этапе многократно превосходит традиционную геодезическую съемку.

Камеральный этап представляет собой вычислительно емкую часть работы, состоящую из строгой последовательности действий. В первую очередь выполняется импорт сырых данных и их регистрация, то есть изначально разрозненные облака точек объединяются в единую систему координат. Этот процесс сшивки сканов с разных станций производится программно по заранее расставленным контрольным маркам или по перекрывающейся геометрии самого объекта. Основными трудностями на данном этапе выступают огромный объем получаемых файлов, требующий значительных вычислительных мощностей, а также необходимость очистки массива от цифрового шума. Во время обработки приходится вручную или с помощью алгоритмов фильтровать искажения от бликующих поверхностей, атмосферных осадков и посторонних объектов в кадре [3].

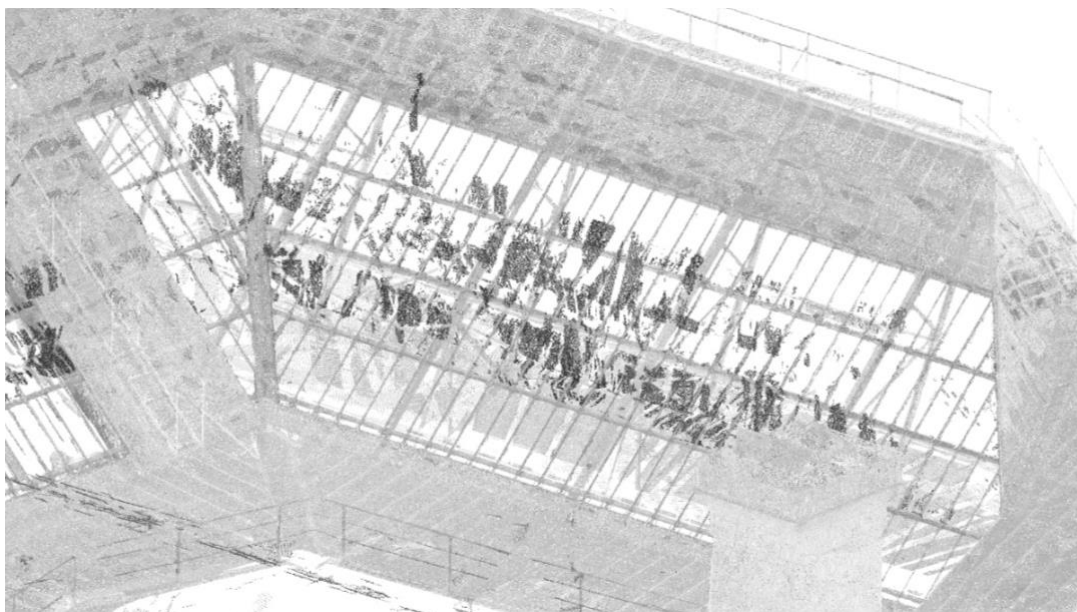


Рис.1 Пример появления цифрового шума от поверхностей окон светового фонаря в CloudCompare



Рис.2 Вид светового фонаря с кровли здания

Анализ деформаций выполняется в специализированных программных комплексах для работы с облаками точек, например CloudCompare, Geomagic Control X, Autodesk ReCap. Одним из классических и широко применяемых инструментов оценки является метод построения опорных геометрий. При его использовании сначала выделяется массив точек, соответствующий исследуемой поверхности. Затем на участках, соответствующих жестким опорам конструкции, программный комплекс строит идеальную аппроксимирующую плоскость. Прогиб или отклонение вычисляется как массив ортогональных

расстояний от каждой фактической отсканированной точки до этой эталонной поверхности. Важным аналитическим преимуществом данного алгоритма является возможность генерации цветовых инспекционных карт. Вместо табличных значений или плоских двумерных эпюр, используются градиентовые карты отклонений. На такой карте каждому диапазону деформаций присваивается свой цвет, что позволяет оценить зоны максимальных прогибов, осадок или кренов на всей площади обследуемого объекта и экспортировать эти данные для проведения дальнейших поверочных расчетов.

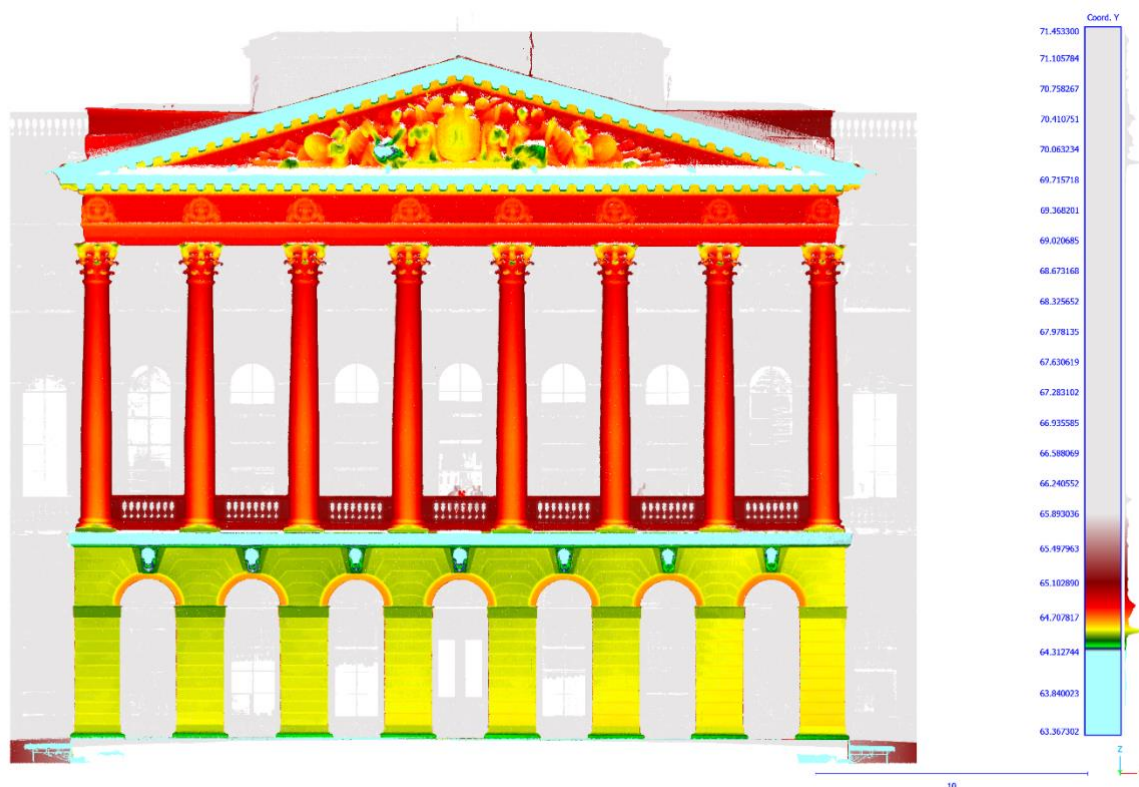


Рис.3 Пример градиентовой контрастной карты распределения точек портика здания относительно оси Y в CloudCompare

Для объективной оценки целесообразности перехода от традиционных измерительных средств к наземному лазерному сканированию необходимо провести их прямое сопоставление. Анализ выстраиваем по трем критериям полнота и точность собираемых данных, экономическая эффективность, а также технологические ограничения.

С точки зрения точности единичного измерения лазерные сканеры не уступают, а в некоторых задачах даже превосходят современные цифровые нивелиры и тахеометры. При этом, когда речь идет о полноте данных, технология НЛС имеет безоговорочное преимущество. Как было отмечено ранее, дискретные методы предоставляют информацию только о сечениях, выбранных на объекте. Если после завершения полевых работ потребуется

узнать прогиб балки в ином, не зафиксированном ранее сечении, потребуется повторный выезд на объект. В свою очередь лазерное сканирование формирует цифровой слепок всей конструкции. Единожды собранное облако точек позволяет извлекать любые геометрические параметры на стадии камеральной обработки, сводя к минимуму необходимость повторных полевых измерений.

В качестве примера рассмотрим результаты натурных статических испытаний железобетонного автомобильного моста, проведенных исследовательской группой во Вьетнаме [4]. В ходе эксперимента решалась задача фиксации вертикальных деформаций пролета моста под воздействием ступенчато возрастающей статической нагрузки, создаваемой колонной грузовых автомобилей. Сбор пространственных данных выполнялся параллельно двумя технологиями, традиционной дискретной съемкой с помощью электронного тахеометра по сети закрепленных на нижних полках балок отражающих призм и методом сплошного некоординатного измерения с использованием наземного лазерного сканера (НЛС). Для камеральной обработки массивов данных применялось специализированное программное обеспечение для регистрации и анализа облаков точек Leica Cyclone и CloudCompare. В автоматизированном режиме выполнялась пространственная сшивка сканов с разных станций по сферическим маркам, фильтрация цифровых шумов и последующее вычисление ортогональных расстояний от загруженных поверхностей до эталонной плоскости незагруженного моста.

Анализ полученных результатов показал, что в местах установки геодезических призм разница между точечными отсчетами тахеометра и координатами, извлеченными из плотного облака точек, составила не более 1–2 мм. Это экспериментально подтверждает, что измерительная точность сканера сравнима с тахеометрической. Однако тахеометрический метод позволил зафиксировать значения прогибов только в нескольких дискретных створах. Использование же технологии НЛС позволило получить непрерывный массив из миллионов координат всей нижней плоскости пролетного строения. Анализ этого сплошного облака точек выявил реальную пространственную картину: исследователи зафиксировали неравномерность прогибов параллельных балок и эффекты их локального кручения, которые полностью выпали из зоны охвата дискретной тахеометрической сети и не могли быть предсказаны стандартным аналитическим расчетом.

Экономическая эффективность применения НЛС напрямую зависит от масштаба и специфики объекта. Капитальные затраты на внедрение технологии лазерного сканирования несоизмеримо выше. Стоимость самого сканера,

специализированного программного обеспечения и мощных графических станций для обработки данных многократно превышает цену комплекта геодезического оборудования. Использование сканера для замера прогиба одной железобетонной балки экономически нецелесообразно. Однако на крупных объектах, обследование целого исторического здания, мониторинг деформаций большепролетных покрытий, высокие начальные инвестиции быстро окупаются за счет снижения операционных затрат и сроков проведения полевых работ [5].

Наконец, необходимо учитывать технологические ограничения. Традиционные оптические приборы, особенно тахеометры, способны работать на значительно больших дистанциях, вплоть до нескольких километров, и менее чувствительны к характеристикам поверхности. Лазерные сканеры имеют ограничения по дальности, обычно до 100-300 метров для архитектурных задач, и крайне чувствительны к физике материалов. Зеркальные, стеклянные или сильно увлажненные поверхности могут отражать или преломлять лазерный луч, образуя дыры или искажения в облаке точек. Кроме того, плотная взвесь пыли на строительной площадке или атмосферные осадки воспринимаются сканером как физические препятствия, что вносит значительный цифровой шум в итоговую модель.

Таким образом, переход строительной отрасли к технологиям информационного моделирования диктует повышенные требования к качеству и полноте собираемых пространственных данных. Однако наземное лазерное сканирование не является абсолютной и универсальной заменой традиционным методам измерения деформаций. Стандартные геодезические и механические подходы сохраняют свою технологическую и экономическую целесообразность при решении локальных задач, а также в условиях, требующих работы на значительных дистанциях, тогда как НЛС становится незаменимым инструментом в более сложных сценариях обследования. Данная технология экономически оправдана при комплексном обследовании, где начальные инвестиции окупаются за счет сокращения сроков полевых работ. Несмотря на высокие требования к вычислительным мощностям и чувствительность оборудования к условиям внешней среды, технология НЛС продолжает активно развиваться и внедряться в практику технического обследования, не вытесняя, а лишь дополняя устоявшиеся методы.

Библиографический список:

1. Фомин Н. И. Применение лазерного сканирования для определения фактического объема бетонных работ: подход Scan-vs-BIM / Н. И. Фомин, Н. С. Исупов // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17. – № 4

2. Поклад Г. Г. Инженерная геодезия: учебное пособие для вузов Поклад Г. Г. Гриднев С. П. – Москва: Академический Проект. – 2013. – 592 с.
3. Ященко С.О. Лазерные технологии в строительной отрасли: преимущества и недостатки / Ященко С.О, Сабитова Т.А, Карпова О.И, Соболева Е.Д, Соболев Д.А. // Инженерно-строительный вестник Дона. – 2023. – № 6.
4. Study on the application of TLS for bridge deflection inspection in Vietnam / Vu Dinh Chieu [et al.] // Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) – HUCE. – 2023. – № 17. – P. 14-25.
5. Юсупов Р.Р. Применение лазерного сканирования при изучении и сохранении исторических памятников / Юсупов Р.Р. Алимов Х.Т. Утегенова М.А. // Universum: технические науки. – 2023. – № 11. – С. 60–64.