

## Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений

*В.И. Куштин, А.А. Ревякин, В.А. Соколова, Н.Ф. Добрынин*

*Ростовский государственный университет путей сообщения*

**Аннотация:** В статье представлены основные современные способы мониторинга объектов строительства с применением электронных тахеометров, систем лазерного сканирования, глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), которые позволяет решать задачи мониторинга в процессе строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

**Ключевые слова:** мониторинг, здания, сооружения, инженерно-геодезические изыскания, лазерное сканирование, ГНСС приемники, проектирование, строительство, наблюдения, геодезические измерения.

На каждом этапе строительства зданий и сооружений одной из актуальных задач в современном мире является представление данных в объемных моделях, которые с большой точностью описывают взаимное расположение частей конструкции, а также местоположение и рельеф местности, на которой находится здание либо сооружение [1]. Применение новейших технологий, методов и приборов, таких как: электронные тахеометры, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), лазерное сканирование, позволяет решать задачи мониторинга в процессе строительства и эксплуатации инженерных сооружений [2].

В данной статье рассматриваются два распространенных современных метода мониторинга за деформациями: лазерное сканирование и глобальные навигационные спутниковые системы.

Лазерное сканирование по сравнению с другими методами мониторинга имеет ряд преимуществ: высокую скорость определения, а также точность и плотность всех измерений, наличие специального двигателя, автоматически вращающего измерительную часть прибора в горизонтальной и вертикальной плоскостях. С помощью лазерного

---

сканирования создаётся цифровая модель пространства в виде набора точек с координатами в этом пространстве [3,4].

Результатом всех измерений является модель объекта, которая состоит из большого набора точек, каждая точка имеет координаты с точностью до миллиметров. Смысл данного метода содержится в нахождении координат точек в пространстве с помощью лазерного безотражательного дальномера посредством измерения расстояния от уже известных точек.

Лазерный сканер (рис.1) позволяет реализовать поставленную задачу, т.е. результатом его применения является так называемое облако точек или скан, которые состоят из большого количества точек в пространстве. Контролируется данная работа специальным портативным компьютером с разработанным программным обеспечением [5]. Все значения координат точек передаются в этот компьютер и автоматически сохраняются в определенных базах данных.

Лазерное сканирование подразделяется на наземное, мобильное и воздушное. Предметом данной статьи является наземное лазерное сканирование, которое считается самым быстрым и наиболее эффективным способом получения точной и полной информации о пространственном объекте сложной формы: крупногабаритных зданиях, промышленных сооружениях, архитектурных памятниках и т.д. По принципу определения координат в пространстве лазерные наземные сканеры разделяют на импульсные, фазовые и триангуляционные.

Принцип действия импульсных сканеров состоит в измерении расстояния путем точного определения времени, которое необходимо импульсу для выполнения задачи. Главное преимущество – большой диапазон измерения.

Действие фазовых сканеров ограничено 100 метрами. Расстояние рассчитывается с погрешностью в несколько миллиметров путем определения сдвига фазы сигналов, которые излучаются и наоборот, отражаются. Это обуславливается тем, что в отличие от импульсного сканера применяется модулированный световой сигнал, и, в связи с этим, высокая мощность лазера не требуется. Также такой сканер отличается от импульсных большей скоростью измерения [4].

В высокоточных сканерах используется триангуляционный метод, который отличается от других методов разделением передатчика и приемника сигнала основанием (т.е. определенным расстоянием). Триангуляционные сканеры дают возможность проводить измерения с точностью 0,1 – 0,01 мм, но на расстоянии не более нескольких метров.



Рис. 1. - Лазерный сканер Trimble TX8

Сканирование работает с нескольких точек (станциями сканирования) для получения полной информации о форме объектов, поскольку сложный

---

объект обычно не виден полностью с одной точки наблюдения. На этапе полевых работ необходимо предусмотреть участки для взаимного перекрытия сканов [6].

Кроме того, перед запуском анализа в этих местах часто ставятся специальные точки - цели. Чтобы объединить сканирование, выполненное из разных точек, используется обработка точек, выполняемая с помощью их координат.

Сканирование дает всю необходимую информацию об объекте, касающуюся его геометрической структуры. Итогом являются облака точек и трехмерные модели с высоким уровнем детализации (пространственное разрешение - до нескольких миллиметров), которая показана на рисунке 2.

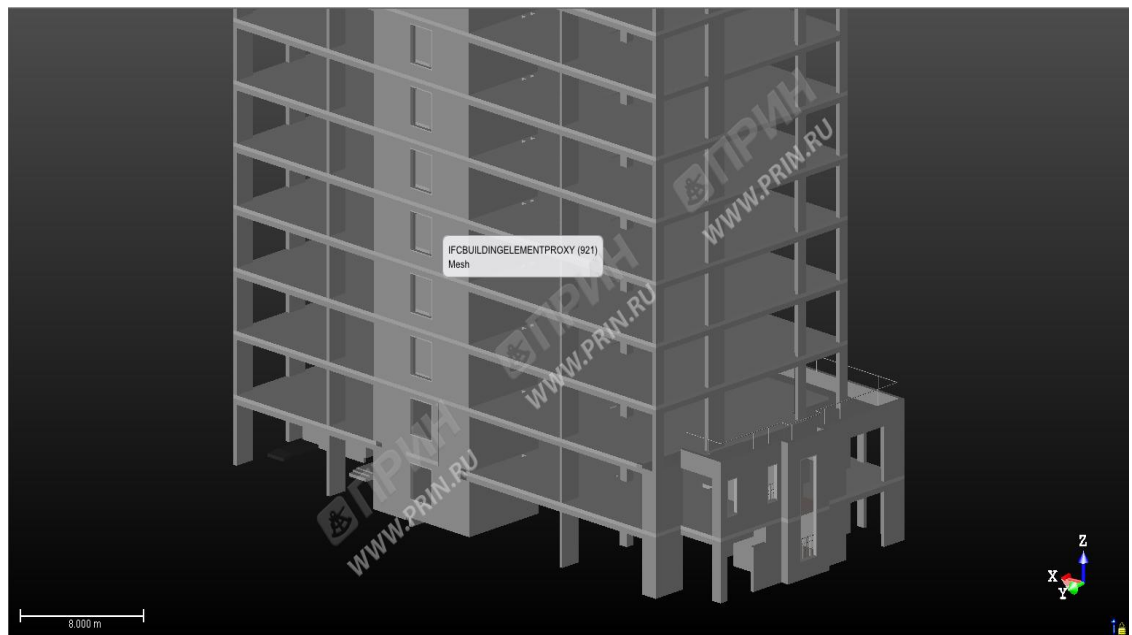


Рис. 2. - Трёхмерная модель здания

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что наземное лазерное сканирование существенно отличается от других методов сбора пространственной информации из-за универсальности и высокой степени автоматизации измерительных процессов. В тоже время, лазерный сканер –

это инструмент оперативного решения большого количества прикладных инженерных задач [6].

Усовершенствование методик мониторинга необходимо для минимизации трудоемкости и стоимости инженерно-геодезических работ, повышения точности и качества измерений, а также сведения к минимуму точек съемки.

В то же время работа современных приборов мониторинга должна быть направлена на упрощение построения пространственных моделей при неполном объеме данных.

В основном сканирование отдаленных объектов строительства имеет некоторые осложнения, так как полное облако точек невозможно получить при расположении сооружений на большой высоте. Решением данной задачи является использование аппроксимирующих линий, которые проходят через центр тяжести трехмерного изображения облаков точек. Такие линии не могут пересекаться в одной точке, вследствие чего получается условное положение конструкции [4].

Основные стадии усовершенствования методов мониторинга с помощью лазерного сканирования имеют следующие пункты:

- 1) создание опорной сети;
- 2) сканирование максимально возможных точек пространства для определения геометрии и положения в пространстве рассматриваемого объекта;
- 3) обработка полученных данных с помощью специальных программ;
- 4) определение состояния объекта [5].

Современный метод, который используется для мониторинга за деформациями зданий и сооружений любой сложности и структуры – это

---

применение глобальных навигационных спутниковых систем [7,8]. С его помощью путем обработки спутниковых сигналов получают координаты на поверхности Земли. ГНСС основывается на работе трех сегментов: космический, наземный и пользовательский.

Наземный сегмент состоит из космодрома, командно-измерительного комплекса и центра управления, которые контролируют, в каком состоянии находятся спутники, а также их точные координаты. Пользовательский – из аппаратуры потребителей, то есть использования навигационных систем в повседневной жизни для определения своего местоположения. Главная задача: прием сигналов от навигационных спутников, измерение и обработка измерений. Космический сегмент включает 24 спутника, излучающих непрерывные радионавигационные сигналы, которые формируют сплошное радионавигационное поле на поверхности Земли и околоземном пространстве [9]. Они передают информацию о своих координатах в каждый момент времени. Расстояние до спутника измеряется по времени прохождения сигнала от спутника до приемника:

$$S = c \times t,$$

где  $c$  - скорость прохождения радиосигнала ( $300000 \text{ км/с}$ );

Спутниковые определения по точности делятся на 3 группы:

1- Автономный способ предполагает абсолютные определения координат кодовым методом, включающим автономный способ. Точность – 15-30 метров.

2- Дифференциальный способ предполагает проведение наблюдений не менее, чем двумя приемниками (точность 1-5 метров). Один приемник расположен на контрольной точке с заранее известными координатами, а

второй – на точке, которую надо определить. Пример одного из приемников изображен на рисунке 3.

3- Относительный способ. Реализован в двух режимах функционирования: статический (точность 5-10 мм) и кинематический (10-20мм). В первом случае приемники работают одновременно на двух станциях – базовой (с известными координатами) и определяемой (координаты необходимо получить). Далее после всех измерений выполняется совместная обработка информации, которая была собрана двумя спутниками. Точность определения плановых координат – 5-10 мм, высотных - в 2-3 раза ниже [10].

Кинематические измерения позволяют получать координаты за короткие промежутки времени, что является большим преимуществом. Точность кинематического способа 2-3 см в плане и 6-8 см по высоте [9].



Рис. 3. - Базовый приемник Leica GR10 GNSS

Точность обработки информации ГНСС зависит от многих факторов: количества спутников в обработке, геометрического фактора (расположения спутников), времени наблюдений, точности эфемерид, воздействия ионосферы и др.

Приведенные ниже погрешности приемника Leica GMX902 Series (рисунок 4) указаны как средние квадратические ошибки.

**Дифференциально-  
кодовое решение**

0,25 м

**Дифференциально-  
фазовое решение.  
Постобработка**

**С обычными антеннами (AR10, AS10, AX1201 и т.д.)**

Режим <b>статика</b>		Режим <b>кинематки</b>	
В плане	По высоте	В плане	По высоте
5 мм + 0,5 ррм	10 мм + 0,5 ррм	10 мм + 1 ррм	20 мм + 1 ррм

**С антенной Choke Ring (AR25)**

Режим <b>статика</b>	
В плане	По высоте
3 мм + 0,5 ррм	6 мм + 1 ррм

**Дифференциально-  
фазовое решение.  
Режим реального  
времени (RTK)**

**С обычными антеннами (AR10, AS10, AX1201 и т.д.)**

Режим <b>статика</b>		Режим <b>кинематки</b>	
В плане	По высоте	В плане	По высоте
5 мм + 0,5 ррм	10 мм + 0,5 ррм	10 мм + 1 ррм	20 мм + 1 ррм

Рис.4. - Точностные характеристики GNSS приемника Leica GMX902 Series

Основным преимуществом мониторинга с использованием ГНСС является его работа в режиме реального времени, а также после обработки информации. С помощью ГНСС возможен не только мониторинг состояния конструкций. В настоящее время методы спутниковых координатных определений широко применяются для решения ряда других задач: развитие опорных геодезических сетей, кадастровые работы, обеспечение работ по землеустройству, съемка и картографирование всех видов, сбор материала для ГИС, обеспечение инженерно-прикладных работ и так далее [10,11].



### Литература

1. Соколова В.А., Морковская С.А., Науменко В.С., Куштин В.И. Создание высотного геодезического обоснования для наблюдения за осадками сооружений // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт-2019), Том 3. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2019. с.176-179.
2. Бюхлер В., Бордас Винсент М., Марбс А. Анализ точности лазерных сканирующих систем // Информационный бюллетень ГИС-ассоциации. - 2004.-№1(43). - с.2.
3. Аникушин М.Н. Наземные системы лазерного сканирования. Опыт работ // Геопрофи. -2005.-№1.-с. 49-50.
4. Akhras, G. Smart Materials and Smart systems for the future // Canadian Military Journal - Civil Engineering at Royal Military College of Canada and President of CANSMART Group, 2000.- pp. 25-33.
5. Alzawa S., Kakizawa T., Higasino M. Case Studies of Smart Materials for Civil Structures // Research and development Institute, Takenaka Corporation, Smart Mater, Struct. 7. Japan. – 1997.-pp. 617-626.
6. Коргин А.В., Ермаков В.А. Мониторинг пространственных деформаций сооружений с помощью лазерного сканирования // Научные труды XXIV международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и докторантов / Моск.гос.строит ун-т.-2011. с. 41-47.
7. Прокопова М.В., Чивчян А.С. Возможности применения автоматизированных систем мониторинга технического состояния зданий и сооружений / Транспорт: наука, образование, производство. Сборник научных трудов. Ростов н/Д, 2019. с. 204-207.

8. Гура Т.А., Ивлев М.Г. Сравнение современных геодезических приборов для выполнения деформационного мониторинга // International innovation research. Сборник статей победителей V Международной научно-практической конференции. Пенза, 2016. с. 182-186.

9. Генике А.А., Побединский Г.Е. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии. - М.: Картгеоцентр - Геоиздат, 1999 – 272 с.

10. Куштин И.Ф., Куштин В.И. Геодезия: учебн.-практ. пособие. - Ростов н/Д: Феникс, 2009 - 418 с. - ISBN 5-222-02134-3.

11. Куштин В.И., Ревякин А.А., Колошина Г.В., Петренко А.М. Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта // Инженерный вестник Дона, 2019, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6211.

### References

1. Sokolova V.A., Morkovskaya S.A., Naumenko V.S., Kushtin V.I. Sbornik nauchny`x trudov «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo» (Transport-2019), Tom 3. Texnicheskie nauki. Rost. gos. un-t. putej soobshheniya. Rostov n/D, 2019. pp.176-179.

2. Byuxler V., Bordas Vinsent M., Marbs A. Informacionny`j byulleten` GIS-associacii. 2004. №1 (43). p.2.

3. Anikushin M.N. Geoprofi. 2005. №1. pp. 49-50.

4. Akhras, G. Canadian Military Journal - Civil Engineering at Royal Military College of Canada and President of CANSMART Group, 2000. pp. 25-33.

5. Alzawa S., Kakizawa T., Higasino M. Research and development Institute, Takenaka Corporation, Smart Mater, Struct. 7. Japan.1997. pp. 617-626.



6. Korgin A.V., Ermakov V.A. Nauchny`e trudy` XXIV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molody`x ucheny`x, aspirantov i doktorantov Mosk.gos.stroit un-t. 2011. pp. 41-47.

7. Prokopova M.V., Chivchyan A.S. Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo. Sbornik nauchny`x trudov. Rostov n/D, 2019. pp. 204-207.

8. Gura T.A., Ivlev M.G. International innovation research. sbornik statej pobeditelej V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Penza, 2016. pp. 182-186.

9. Genike A.A., Pobedinskij G.E. Global`naya sputnikovaya sistema opredeleniya mestopolozheniya GPS i ee primenenie v geodezii. [Global SATELLITE GPS Location System and its use in geodesy]. M. Kartgeocentr Geoizdat, 1999. 272 p.

10. Kushtin I.F. Kushtin V.I. Geodeziya: uchebn.-prakt. posobie [Geodesy: training practical benefit]. Rostov n/D. Feniks, 2009. 418 p.

11. Kushtin V.I., Revyakin A.A., Koloshina G.V., Petrenko A.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №9. URL [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6211](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2019/6211).