

УДК: 528.02; 528.06

Лазерное сканирование при мониторинге объектов транспортной инфраструктуры

Laser scanning for monitoring transport infrastructure facilities

Цветков В.Я., д.т.н., профессор, начальник научного отдела, АО «НИИАС»,
E-mail: cvj7@mail.ru, Москва, Россия

Tsvetkov V.Ya., Doc.ofSci.(Tech), Professor, Head of Scientific Department, JSC "NIIAS",
E-mail: cvj7@mail.ru, Moscow, Russia



Аннотация

В статье исследуется лазерное сканирование, которое применяют при мониторинге объектов транспортной инфраструктуры. Описано применение данного метода. Он применяется если объекты инфраструктуры имеют культурное значение или сложные формы, исключающие контактное нанесение марок для мониторинга. Лазерный мониторинг рассматривается как один из видов геомониторинга. Описаны основные функции мониторинга объектов транспортной инфраструктуры. раскрывается содержание технологической схемы геомониторинга. Показано место лазерного сканирования в этой схеме. Статья вводит термин «лазерный мониторинг», Показаны преимущества и недостатки лазерного мониторинга. В отличие от геодезического, лазерный мониторинг является массовым. Статья раскрывает принципы и содержание лазерных измерений. Рассмотрены импульсный метод измерений и фазовый метод измерений дистанции. Приведена схема и раскрыто содержание технология работ при лазерных измерениях.

Ключевые слова: транспорт, транспортная инфраструктура, лазерный мониторинг, лазерное сканирование, геомониторинг.

Abstract

The article examines laser scanning, which is used in monitoring transport infrastructure facilities. The application of this method is described. It is used if infrastructure objects have cultural significance or complex shapes that preclude contact application of marks for monitoring. Laser monitoring is considered as one of the types of geomonitoring. The main functions of monitoring transport infrastructure facilities are described. The content of the geomonitoring technological scheme is revealed. The location of laser scanning in this diagram is shown. The article introduces the term "laser monitoring". The advantages and disadvantages of laser monitoring are shown. Unlike geodetic laser monitoring, it is widespread. The article reveals the principles and content of laser measurements. The pulse method of measurements and the phase method of distance measurements are considered. A diagram is given and the content of the technology for working with laser measurements is disclosed.

Keywords: transport, transport infrastructure, laser monitoring, laser scanning, geomonitoring.



Введение

Объекты транспортной инфраструктуры (ОТИ) существенно различаются по функциям и размещению. Современное управление ОТИ применяет разные технологии. Основной технологией определения состояния ОТИ является геомониторинг [1-3]. Среди видов мониторинга ОТИ следует выделить: геодезический, спутниковый и лазерный [4, 5]. Все виды мониторинга выполняют функции поддержки управления. Взаимодействие между ОТИ и реальной средой приводит к изменению состояния ОТИ. При мониторинге используют реальное пространство, геоинформационное пространство [6] и пространство параметров. Геоинформационное пространство является формой информационного пространства, предназначенное для решения прикладных задач.

С позиций новых требований к управлению геомониторинг можно рассматривать как часть социальной кибернетики [7, 8]. Геоинформационное пространство при определенных условиях можно рассматривать как киберпространство. Такое пространство использует коммуникации и информационную коммуникативистику. Мониторинг в области ОТИ выполняет ряд важных функций. Первая функция обеспечение безопасности состояния и функционирования ОТИ. Вторая функция – поддержка управления ОТИ. Именно она соотносит геомониторинг с социальной кибернетикой. Третья функция геомониторинга информационное обеспечение органов управления необходимой информацией. Четвертая функция геомониторинга связана с взаимодействием разных технологий для оптимального решения прикладных задач. Геоомониторинг можно организовывать по-разному и применять разные технологии. Четвертая функция помогает выбрать оптимальное технологическое решение реализации геомониторинга.

Принципы геомониторинга ОТИ

На рис.1 дана технологическая схема геомониторинга ОТИ. Наибольшее применение в силу традиции получил геодезический мониторинг. Оно включает установку деформационных марок и наблюдение за ними циклически через выбранные временные интервалы. Основным методом наблюдения в геодезическом мониторинге, является оптический. Другим направлением геомониторинга является геоинформационный мониторинг. В сфере транспорта он модифицирован в геоинформационный мониторинг транспорта. Принципиальное отличие между ними в том, что геодезический мониторинг использует измерения «точка за точкой», а геоинформационный формирует цифровые модели и использует их. Применение навигационных систем в равной степени относится как к геоинформационному, так и к геодезическому мониторингу. Лазерное сканирование иногда относят к геодезическим методам. Иногда его рассматривают как самостоятельное направление [9, 10]. В отличие от геодезического, лазерный мониторинг является массовым.

Транспортная инфраструктура содержит разнообразные объекты. причем некоторые из них имеют

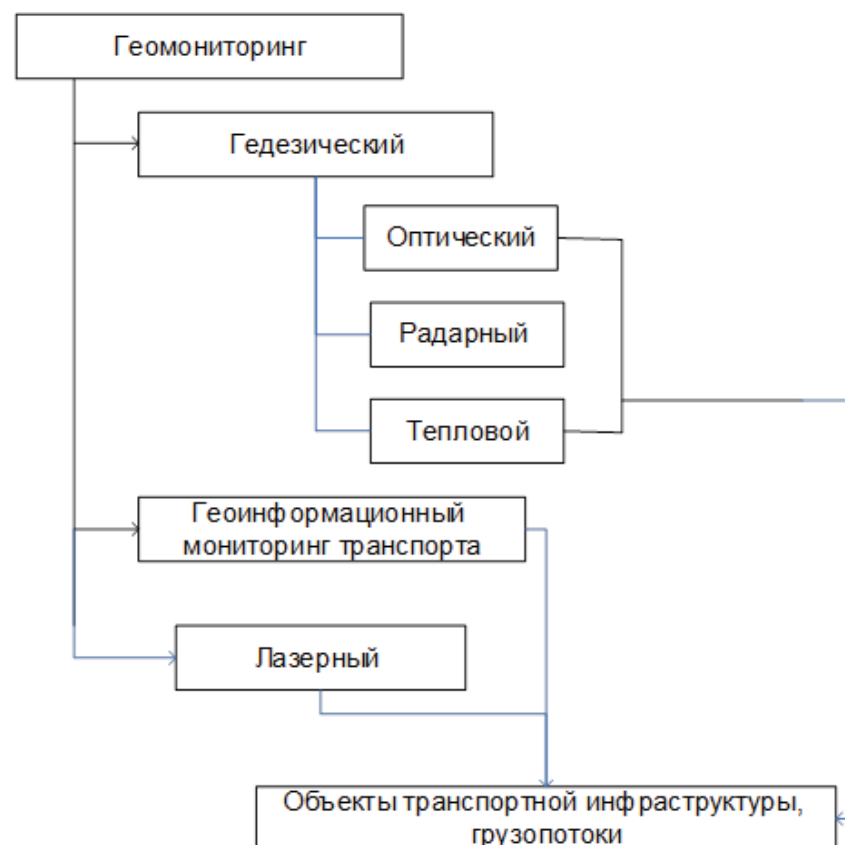


Рисунок 1. Обобщенная технология геомониторинга ОТИ



Рисунок 2. Объект транспортной инфраструктуры со сложной формой



историческое и культурное значение. На рис.2 приведена водонапорная башня в Москве 1901 года постройки. В отличие от чисто технических сооружений с малым количеством деталей, такие объекты требуют детального мониторинга и геодезические методы просто не в состоянии обеспечить мониторинг такого объекта. Напомним, что геодезический мониторинг заключается в установке специальных марок для контроля деформации. Марки устанавливают либо физически (жесткий вариант), забивая металлические штыри в поверхность объекта, либо (мягкий вариант) наносят их краской на поверхность объекта. Если объект представляет собой памятник истории и культуры как на рис. 2, то контактные методы нанесения марок не приемлемы.

В этом случае применимы только бесконтактные методы, к числу которых относится лазерное сканирование. Использование ГНСС для мониторинга во многих случаях не приемлемо из-за низкой точности этой технологии. Дифференциальные измерения обеспечивают погрешность 0,5 – 20 мм. Но они требуют установки базовых станций в зоне объекта. Ухода и поддержки работы этих базовых станций. По финансовым и ресурсным затратам такой метод не является конкурентоспособным. Намного точнее и экономически целесообразней стационарное лазерное сканирование. В отличие от поточечного измерения в геодезическом и навигационном мониторинге лазерное сканирование является сплошным. Оно может измерять точки или профиль.

Принципы лазерных измерений

Технология лазерного измерения дальности приведена на рис.3.

При импульсном методе лазерное сканирование использует измерение времени прохождения прямого лазерного луча, посылаемого лазерным сканером (LS) в сторону объекта наблюдения и отраженного сигнала с помощью фотоприемника. LS являются относительно легкими, что упрощает проведение полевых работ. По существу, схема на рис. 3 есть схема дальномера. Один из принципов измерения есть метод синхронного импульса (МСИ). Работы LS, использующего МСИ основана на измерении: R — горизонтального расстояния, v — скорость электромагнитного излучения, которая является известной величиной. t — измеренный интервал времени. Расстояние определяется по формуле:

$$R = v \cdot t / 2 \quad (1)$$

В выражении (1) двойка обусловлена тем что импульс проходит расстояние туда и обратно поэтому расстояние определяется как половина времени прохождения. Выражение (1) дает основание оценить погрешность измерения дальности с помощью МСИ.

Это дает возможность оценить точность измерения дистанции:

$$\Delta R = (\Delta v \cdot t + v \cdot \Delta t) / 2, \quad (2)$$

где ΔR — погрешность измерения расстояния; Δv — погрешность скорости; Δt — соответствующее значение погрешности измерения времени.

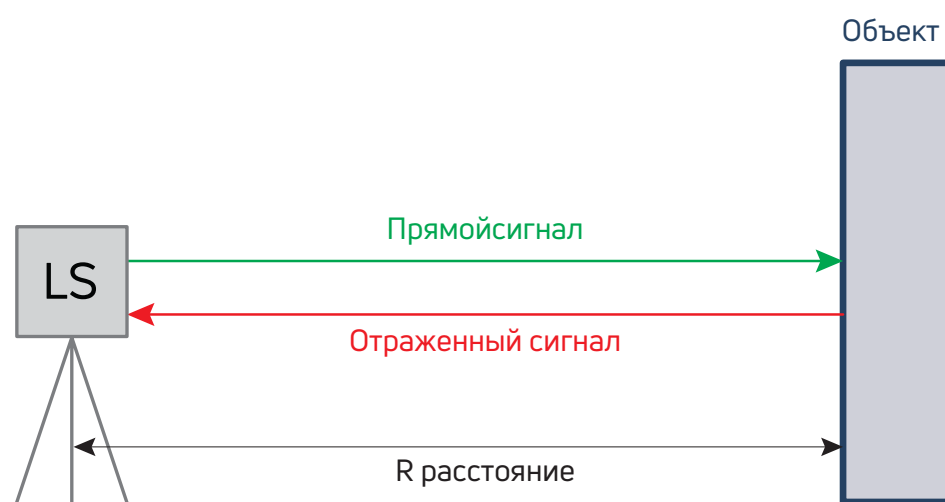


Рисунок 3. Лазерное измерение дальности

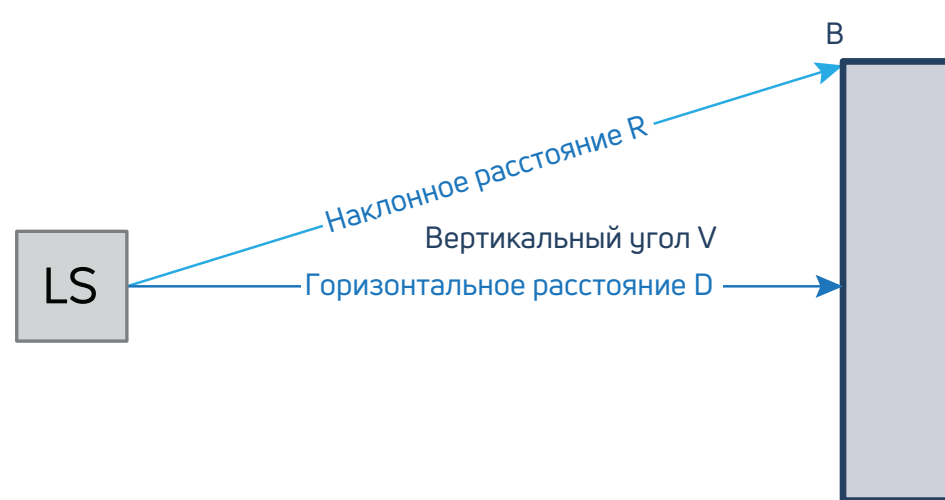


Рисунок 4. Измерение наклонного расстояния фазовым методом

Во втором способе лазер передает непрерывный пучок лазерного излучения вместо импульса [11]. В этом случае измерение дальности определяется за счет сравнения передаваемого и принятого сигнала В анализе используют синусоидальную волновую суперпозицию прямого и отраженного пучка и измерения разности фаз между ними.

Длина волны (λ) несущего сигнала лазерного излучения довольно коротка (обычно около 1 μm) и нет необходимости в такой точности измерения в приложениях транспортного мониторинга.

Сигнал модуляции в виде измерительной волны накладывается на несущий сигнал, и его разность фаз может быть измерена более точно. Таким образом, амплитуда (или интенсивность) лазерного излучения будет модулироваться синусоидальным сигналом, который имеет период T_m и длину волны λ_m . В этом случае можно измерять наклонное расстояние R . Механизм такого измерения приведен на рис. 4.

Наклонные расстояния измеряют по точному измерению разности фаз (ϕ) между излучаемым сигналом в точке А и сигналом, полученным прибором после его отражения либо от самой земли, либо от объекта, присутствующего на земле в точке В. Это измерение фазы обычно проводится с помощью цифрового метода подсчета импульсов. Оно дает дробную часть общего расстояния в длинах волн ($\Delta\lambda$). Изменяя диаграмму направленности, можно определить целое число длин волн (M) и прибавить его к дробным значениям, чтобы получить окончательный наклонный диапазон (R).

$$R = (M\lambda + \Delta\lambda) / 2 \quad (3) \quad \ggg$$



Рисунок 5. Технология работ лазерных измерений

В выражении (3) M – целое число длин волн; λ – известное значение длины волны; $\Delta\lambda$ – дробная часть длины волны $\Delta\lambda = (\varphi/2\pi) \cdot \lambda$, где φ – фазовый угол. Двойка обусловлена прохождением луча туда и обратно.

Для наземного LS возможно измерение профиля ОТИ при перемещении лазерного луча по поверхности объекта. Весь цикл мониторинга выполняется в несколько этапов измерений точек профиля. При этом последовательно измеряют наклонные расстояния и вертикальные углы (V) до каждой сканируемой точки. Результаты измерений записывают и сохраняют в цифровом виде. Горизонтальный профиль объекта (рис.2) вдоль измеренного сечения получают на основе этих измеренных данных путем вычислений с использованием следующих довольно простых соотношений.

$$D = R \cos V \quad (4)$$

Измеренные наклонные расстояния (R) и вертикальные углы (V) используются для вычисления горизонтальных расстояний и разности высот между дальномером в точке А и каждым из наземных объектов в точке В (рис.4). Дополнительно определяют высоту точек Н по формуле по формуле (5).

$$H = R \sin (V) \quad (5)$$

Для обработки используют типовое программное обеспечение, например, *Leica Cyclone REGISTER 360*. Технология работ приведена на рис. 5.

На первом этапе осуществляют инструментальное сканирование. На втором этапе осуществляют геоереференцию, то есть привязку точек сканирования к геосистеме. При лазерном сканировании получатся облако точек содержащие шум. Поэтому на третьем этапе удаляют шум путем математической фильтрации. Количество точек

при лазерном сканировании велико. Поэтому их объединяют в блоки, описывающие части объекта. Эта процедура сжимает информацию. Главное в мониторинге ОТИ построение поверхности объекта. Поэтому следующий этап обработки построение поверхности. В трехмерном облаке точек попадают точки, не лежащие на поверхности, их также необходимо исключить. На предпоследнем этапе выполняют классификацию точек, включая необходимость их покрытия определенными паттернами. На последнем этапе создают трехмерную модель. В геодезических методах последний этап формирование совокупности трехмерных точек.

Заключение.

Стационарное лазерное сканирование необходимо отличать от мобильного лазерного сканирования, которое осуществляют с подвижных объектов. Мобильное лазерное сканирование намного сложнее, в частности, потому что требует предварительной оценки траектории движения лазерного сканера. Лазерное сканирование ОТИ должно стать стандартом в транспортной отрасли. Для этого оно должно быть закреплено на отраслевом или законодательном уровне. Лазерные сканеры зарекомендовали себя как высокоэффективные инструменты мониторинга пространственных объектов. Проведенное исследование дает основание ввести термин лазерный мониторинг, как самостоятельное направление мониторинга ОТИ. Лазерные сканеры и технология лазерного сканирования предоставляют подробную информацию о состоянии и целостности ОТИ. Результаты сканирования дают основание выявлять потенциальные риски и принимать решения по техническому обслуживанию.

Данная технология может генерировать 3D-модели ОТИ, которые применяют также в городском и территориальном планировании. Рассмотренную технологию можно отнести к локальной технологии мониторинга. Современная тенденция глобального мониторинга транспортной инфраструктуры [12] использует лазерное сканирование, но в составе комплексной технологии, включающей дистанционное зондирование и другие технологии. ■

Список литературы

1. Елсуков П. Ю. Развитие геомониторинга // Славянский форум. -2020. – 4(30). - С.55-65.
2. Knoll I. A., Sharapov A. A., Solovieva T. A. Methods of geomonitoring of technogenic objects to determine fast-flowing deformation processes using robotics //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – T. 1661. – №. 1. – С. 012115.
3. Raffl L., Holst C. Including virtual target points from laser scanning into the point-wise rigorous deformation analysis at geo-monitoring applications //5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM 2022). – Editorial Universitat Politècnica de València, 2023. – С.291-297.
4. Tosti F. et al. Integration of remote sensing and ground-based non-destructive methods in transport infrastructure monitoring: advances, challenges and perspectives //2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS). – IEEE, 2021. – С. 1-7.
5. Tosti F. et al. Transport infrastructure monitoring by data fusion of GPR and SAR imagery information //Transportation Research Procedia. – 2020. – T. 45. – С.771-778.
6. Бучкин В. А. Геоинформационное поле и геоинформационное пространство // Славянский форум. 2022, 4(38). С.466-476.
7. Кудж С.А. Цветков В.Я. Развитие социальной кибернетики // Славянский форум. -2020. – 3(29). -С.96-106.
8. Scott B. Cybernetics for the social sciences //Brill Research Perspectives in Sociocybernetics and Complexity. – 2021. – T. 1. – №. 2. – С. 1-128.
9. Roussel J. R. et al. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data //Remote Sensing of Environment. – 2020. – T. 251. – С. 112061.
10. Calders K. et al. Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon //Remote Sensing of Environment. – 2020. – T. 251. – С. 112102.
11. Shan J., Toth C. K. (ed.). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. – CRC press, 2018.
12. Gura D. et al. A complex for monitoring transport infrastructure facilities based on video surveillance cameras and laser scanners //Transportation Research Procedia. – 2021. – T. 54. – С. 775-782.