

## ПРИНЦИП РАБОТЫ НАЗЕМНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

**А. А. ШЕВЧЕНКО, Р. Е. ГЛАЗКОВ, А. В. ПИЛЮШЕНКО**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул.Московская,2;  
электронная почта: glazalmazrusya@mail.ru*

Пожалуй, самым значительным технологическим новшеством последнего времени в маркшейдерии, геодезии и ряде смежных отраслей стало активное внедрение в практику лазерных сканирующих систем. Лазерно-локационные технологии сочетают в себе точность и конкретность фотограмметрии, а также высокую информативность и производительность методов дистанционного зондирования. Данная статья посвящена знакомству с лазерной сканирующей системой как относительно новой технологией ведения маркшейдерско-геодезических работ. Рассмотрены технологии и методы ведения работ, изучены и обобщены материалы сторонних организаций при ведении работ с использованием наземных лазерных сканирующих систем, изучены основные принципы работы наземной сканирующей системы. Также рассмотрен вопрос эффективности использования лазерной сканирующей системы для проведения периодического мониторинга различных объектов.

**Ключевые слова:** наземное лазерное сканирование, сканирующие системы, сканер, лазерная съемка, координаты, геодезические работы, мониторинг.

Наземное лазерное сканирование является самостоятельным направлением топогеодезических работ и построено практически на тех же принципах производства измерений, что и воздушное лазерное сканирование. Наземное лазерное сканирование позволяет обеспечить большую плотность и точность точек лазерных отражений и, следовательно, более высокий уровень детализации съемки. Ввиду того, что наземная лазерная съемка занимает более продолжительное время, ее целесообразно использовать при необходимости получения детальных планов и трехмерных моделей на локальные территории в несколько десятков гектар, в отличие от воздушной съемки, где речь может идти о сотнях квадратных километров в день [1].

Используя технологии наземного лазерного сканирования можно выполнять съемку внутри инженерных сооружений (цехов, например), что в ряде случаев трудно или просто невозможно сделать традиционными методами [2,3].

Иногда в поле возникают проблемы в получении отдельных характеристик некоторых объектов, например, мостов, путепроводов, эстакад, надземных коммуникаций, (провисание проводов или наземных трубопроводов между опорами), диаметры труб и места смены диаметров труб на эстакадах, линейные размеры объектов, не говоря уже об объектах, имеющих сложные сплайновые поверхности. Трехмерные модели таких объектов, используя традиционные технологии сбора данных, зачастую построить просто невозможно [4,5].

По данным сканирования эти вопросы решаются точно и однозначно, так как все материалы съемок находятся в едином трехмерном координатном поле, благодаря чему взаимное положение моделей объектов определяется с довольно высокой точностью. Точность построения отдельных элементов модели и точность их взаимного положения определяется в основном точностью сканирующей системы.

Наземное лазерное сканирование может быть использовано при съемках и построении моделей рельефа и местности на локальные территории, где применение воздушной локации не оправдано по экономическим соображениям, либо необходимо отразить все микроформы и сложные участки рельефа. Традиционная съемка дает аппроксимированное представление о рельефе местности, и степень этой аппроксимации сильно зависит от опыта и квалификации исполнителя. Лазерное сканирование позволяет зафиксировать абсолютно все формы рельефа, присутствующие в зоне съемки, и в процессе постобработки уточнить необходимость отображения того или иного элемента [6].

Наземное лазерное сканирование на сегодняшний день один из самых оперативных и производительных способов получения точной и наиболее полной информации о пространственном объекте. По полученным данным лазерного сканирования можно осуществлять, например, периодический мониторинг. Так в работе [7] описан процесс мониторинга методами НЛС на

примере здания расположенного в г. Краснодаре, в работе [8] применение лазерного сканирования для целей дорожного строительства.

Наземное лазерное сканирование представляет собой метод определения поверхности различных объектов – зданий, сооружений, рельефа местности [2]. Результатом съемки сканером является совокупность точек объекта, каждая из которых имеет свою прямоугольную координату  $X_n, Y_n, Z_n$ . По принципу работы лазерный сканер представляет собой комбинацию теодолита, лазерного дальномера и сканирующего элемента, последовательно отклоняющего лазерный луч для получения массива точек лазерных отражений – так называемого «облака точек». Рабочее поле зрения сканеров составляет в среднем в горизонтальной плоскости  $360^{\circ}$  и в вертикальной –  $270^{\circ}$  вследствие использования технологии двух окон (рисунок 1).

Если откладывать от горизонта, то через основное окно сканер измеряет на  $45^{\circ}$  вниз и на  $32^{\circ}$  вверх. Через верхнее окно измеряется от  $22.5^{\circ}$  и до зенита. Если выбирается область сканирования, которая находится в областях обоих окон (например,  $-20^{\circ}$  вниз и  $50^{\circ}$  вверх), то будет выполнена следующую последовательность действий:

- сканер начнет работу с области  $-20^{\circ}$  и до  $+32^{\circ}$ ;
- затем сканер развернется на  $180^{\circ}$  по горизонтали;
- продолжит сканирование на участке  $+32^{\circ}$  до  $50^{\circ}$ .



Точка привязки

Рисунок 1 – Рабочее поле зрения сканера

Процесс сканирования реализуется посредством измерения расстояния до всех определяемых точек. По принципу измерения расстояния до объекта, наземные лазерные сканеры подразделяются на две группы: импульсные и фазовые.

Импульсные лазерные сканеры используют принцип расчета времени прохождения лазерным лучом двойного расстояния от сканера до цели.

Для точного измерения времени прохождения лазерного импульса в пространстве используется высокостабильный кварцевый генератор. Измерив время прохождения лазерного импульса, можно вычислить наклонную дальность  $D_i$  по следующей формуле:

$$D_i = T_i / 2c , \quad (1)$$

где  $T_i$  – время прохождения лазерного луча;

$c$  – скорость света.

Импульсный метод измерения расстояний по точности уступает фазовому методу. Это происходит потому, что фактическая точность каждого измерения зависит от ряда параметров, каждый из которых может оказать влияние на точность конкретного измерения. Таковыми параметрами являются:

- длительность и форма зондирующего импульса;
- отражательные характеристики объекта;
- оптические свойства атмосферы;
- текстура и ориентация элементарной поверхности объекта вызвавшей отражение зондирующего луча по отношению к линии визирования.

Фазовые лазерные сканеры.

Принцип их работы состоит в определении количества целых длин волн между локатором и объектом и разности фаз излученной и принятой волны модулирующего колебания. При этом зондирующее излучение должно быть непрерывным, что в общем случае значительно повышает требования по выходной мощности излучающего лазера по сравнению с импульсным методом.

Для того чтобы определить расстояние между источником и объектом, необходимо:

- определить целое количество длин волн  $\lambda$  модуляции  $K$ , приходящихся на это расстояние;
- определить разность фаз между принятой и опорной волной и тем самым оценить дополнительное расстояние, соответствующее «последней» неполной волне.

Если значения  $K$  и  $\Delta\phi$  удалось определить, то искомое расстояние определяется по формуле:

$$D = K\lambda + (\Delta\phi\lambda)/2\pi, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент модуляции;

$\lambda$  – длина волны;

$\Delta\phi$  – разность фаз между принятой и опорной волной.

Главное преимущество фазового метода измерения – более высокая точность, которая может достигать первых миллиметров.

Измерения производятся с очень высокой скоростью – десятки тысяч измерений в секунду. В считанные минуты прибор измеряет несколько миллионов точек, точно повторяющих поверхность сканируемого объекта [2]. На пути к объекту импульсы лазерного дальномера проходят через систему, состоящую из двух зеркал, отклоняющих луч в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Зеркала управляются высокоточными сервомоторами. Именно они обеспечивают точность определения направления луча, сканирующего объект. Зная дальность до точки и угол разворота обоих зеркал, процессор сканера вычисляет точные координаты каждой точки. Технология работы наземной сканирующей системы представлена на рисунках 2 и 3.

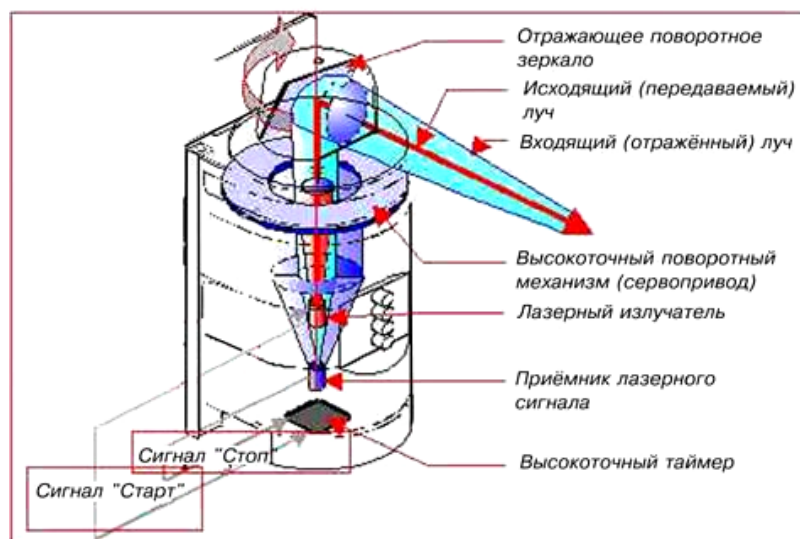


Рисунок 2 – Принцип работы наземного лазерного сканера

В результате одного сеанса сканирования образуется так называемое «облако точек» отражений лазерного луча. Для каждой точки регистрируется 3 координаты ( $X_n Y_n Z_n$ ) и интенсивность принятого сигнала. Интенсивность сигнала зависит от угла между отражающей поверхностью и лазерным лучом, а также от свойств самой поверхности. Белые поверхности дают более сильный отраженный сигнал по сравнению с более темными поверхностями.

Сила сигнала, отраженного от цветных поверхностей зависит от спектральных характеристик лазера в зеленом, красном и ближнем инфракрасном диапазоне. Блестящие поверхности, как правило, затрудняют регистрацию сигналов. Очень часто, для повышения информативности результирующего изображения используется одноэлементный приемник излучения (сенсор), который фиксирует яркость объекта в виде плотности изображения в точке визирования лазерного дальномера. Либо используется цифровая камера высокого разрешения, позволяющая покрыть область сканирования цветными снимками с заранее заданным перекрытием между ними. Это позволит не только опознать объекты, но и произвести их отрисовку в интерактивном режиме.

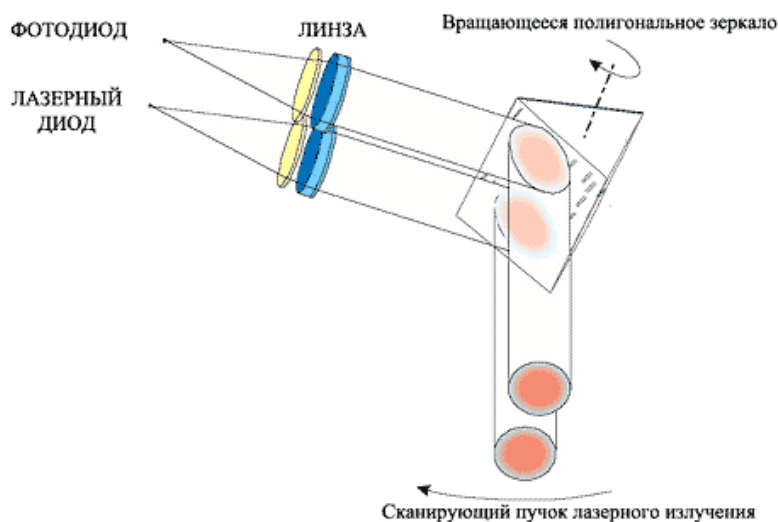


Рисунок 3 – Система вертикальной развертки лазерного сканера

Таким образом, реализуется полярный способ определения пространственных координат точек лазерных отражений, за счет измерения углов  $\varphi$ ,  $\nu$  в комбинации с данными об истинном цвете каждого пикселя (единичного элемента изображения). Задавая диапазон  $(\varphi_{\min}, \nu_{\min})$  и  $(\varphi_{\max}, \nu_{\max})$  и шаг  $(\Delta\varphi, \Delta\nu)$  изменения горизонтальных и вертикальных углов, сканер автоматически с помощью моторов последовательно устанавливает луч лазера и регистрирует параметры  $\varphi$ ,  $\nu$ , расстояние  $D$  и плотность  $d$  для каждой точки объекта в заданных пределах. Координаты точек объекта относятся к прямоугольной системе координат сканера, которая в общем случае произвольно ориентирована в пространстве и определяется по следующей формуле:

$$\begin{cases} X_n = D \cos \nu \sin \varphi, \\ Y_n = D \cos \nu \cos \varphi, \\ Z_n = D \sin \nu. \end{cases} \quad (3)$$

где  $\cos \nu$  – величина горизонтального угла;

$\sin \varphi$ ,  $\cos \varphi$  – значения вертикального угла вычисленного для координаты точки  $X_n$ ,  $Y_n$  соответственно;

$D$  – расстояние от сканера до точки, координаты которой необходимо определить.

Цифровая камера высокого разрешения, закрепляемая на корпусе сканера, также ориентируется в своей собственной системе координат. Съемка ведется с тех же точек, что и лазерное сканирование. Данная камера должна быть предварительно откалибрована.

Во время съемки сканер (система координат сканера) не ориентируется в пространстве и не нивелируется [9-11]. Для трансформации сканов (массивов точек лазерных отражений) в единую систему координат объекта OXYZ, в сканере предусмотрено автоматическое или ручное распознавание специальных маркированных точек (марок), глобальные или проектные координаты которых определяются при помощи тахеометра или GPS [12]. При трансформации сканов используются специальные программные алгоритмы, позволяющие автоматически выполнить данное преобразование, за счет использования матрицы трансформации, включающей в себя шесть параметров (три для положения сканера, и три для вращения). Координаты какой-либо точки в системе координат объекта можно получить через соотношение:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + A \begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где XYZ – координаты точки объекта в системе координат объекта OXYZ;

$X_n Y_n Z_n$  - координаты точки объекта в системе координат сканера  $S_n X_n Y_n Z_n$ , вычисляемые по (3);

$X_0 Y_0 Z_0$  – координаты начала системы координат сканера  $S_n X_n Y_n Z_n$  относительно системы координат объекта;

A – матрица поворота, зависящая от трех углов –  $\omega$ ,  $\alpha$  и  $\kappa$ .

Неизвестные элементы внешнего ориентирования сканера  $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \alpha, \kappa$  можно определить по маркам-отражателям. Из (4) видно, что минимальное число опорных точек равно 2, однако в этом случае может возникнуть неопределенность в определении угловых элементов. Поэтому минимальным



числом опорных точек следует считать 3, не лежащих на одной прямой. Естественно, лучше иметь больше опорных точек, разнесенных по площади.

Преобразование (4) делается для всех съемок одного и того же объекта, выполненных с различных точек стояния  $S_i$ . В результате имеем  $X, Y, Z, d$  для всей совокупности точек объекта в единой системе координат  $OXYZ$ . Затем эта информация может быть использована для последующих вычислений (объемы, площади, модели объекта в виде триангуляции и т.д.). Кроме того, ее можно визуализировать в трехмерном (3D) пространстве с наложением реального изображения объекта под различными углами зрения или в виде обычного двухмерного (2D) цветного (RGB) изображения.

В настоящий момент существует довольно много видов наземных сканирующих систем. Наибольшим спросом пользуются приборы следующих фирм: Innovmetric (Канада), Leica Geosystems (Швейцария), Trimble (США), Riegl Laser Measurement Systems (Австрия), Callidus (Германия), Inus Technology (Япония).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Неволин Трехмерное лазерное сканирование и моделирование объектов // Новосибирск СГГА. – 2012. – С. 4-5.
2. Наземное лазерное сканирование [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://www.giprodor.ru/tech/laserscan/> (Дата обращения: 19.09.2016 г).
3. Гура Д.А., Шевченко Г.Г. Экологический мониторинг деформации сооружений с использованием наземного лазерного сканирования // В сборнике: Строительство-2010. Материалы Международной научно-практической конференции. Дорожно-транспортный институт. Ростов-на-Дону, 2010. – С.152-153.
4. Рудик Е.А., Гура Д.А. Проведение топографической съемки с применением спутниковых систем и электронных тахеометров // В сборнике: Науки о земле на современном этапе Материалы IV Международной научно-практической конференции. Москва, 2012. С. 118-120.

5. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территорий // Методические указания по выполнению контрольной работы для студентов заочной, дистанционной форм обучения и МИППС специальности 120303 Городской кадастр / Краснодар, 2010. – 20с.

6. Е.М. Медведев, С.Р. Мельников Преимущества применения лазерных сканирующих систем наземного и авиационного базирования // Горная промышленность. – 2002. - № 5. – С. 2-4.

7. Кузнецова А.А., Гура Д.А., Алкачев Т.Э. Анализ полученных данных методом лазерного сканирования для выполнения периодического мониторинга на примере здания расположенного в г. Краснодаре // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – 2014. – № 4 – С.77-83.

8. Кравченко Е.С., Будагов И.В. Применение наземного лазерного сканирования для целей дорожного строительства // В сборнике: Молодая наука – 2013. Материалы IV Открытой международной молодежной научно-практической конференции, посвященной Году охраны окружающей среды в Российской Федерации. Туапсе, 2014. – С. 222-224.

9. А.Я. Фрейдин Трехмерный лазерный сканер: принцип работы и область применения // Мир измерений – 2007. – С. 1-2.

10. Желтко Ч.Н., Бердзенишвили С.Г., Корелов С.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г., Пастухов М.А. Учебная геодезическая практика / Методические указания по организации и контролю учебной практики для студентов всех форм обучения направлений 120700 Землеустройство и кадастры, 130500 Нефтегазовое дело, 270800 Строительство, 271101 строительство уникальных зданий и сооружений / Краснодар, 2013. Том Часть 3 Решение геодезических задач. – С. 19

11. Грибкова И.С., Шерстюк Н.А. Лазерное сканирование // В сборнике: Науки о земле на современном этапе. VII Международная научно-практическая конференция. Москва, 2013. – С. 53-55.

12. Наземное лазерное сканирование – общие принципы [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://geotronix.kz/index.php/materialy/scanery/statyi/274-nazemnoe-lazernoe-skanirovanie> (Дата обращения: 19.09.2016 г).

#### REFERENCES

1. A. G. Nevolin Trekhmernoe lazernoe skanirovanie i modelirovanie obektov // Novosibirsk SGGA. – 2012. – S. 4-5.
2. Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Elektronnyy resurs] – Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: <http://www.giprodor.ru/tech/laserscan/> (Data obrashcheniya: 19.09.2016 g).
3. Gura D.A., Shevchenko G.G. Ekologicheskiy monitoring deformatsii sooruzheniy s ispolzovaniem nazemnogo lazernogo skanirovaniya // V sbornike: Stroitelstvo-2010. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Dorozhno-transportnyy institut. Rostov-na-Donu, 2010. – S.152-153.
4. Rudik E.A., Gura D.A. Provedenie topograficheskoy semki s primeneniem sputnikovykh sistem i elektronnykh takheometrov // V sbornike: Nauki o zemle na sovremennom etape Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 2012. S. 118-120.
5. Zheltko Ch.N., Gura D.A., Shevchenko G.G. Fotogrammetriya i distantsionnoe zondirovanie territoriy // Metodicheskie ukazaniya po vypolneniyu kontrolnoy raboty dlya studentov zaочноy, distantsionnoy form obucheniya i MIPPS spetsialnosti 120303 Gorodskoy kadastr / Krasnodar, 2010. – 20s.
6. E.M. Medvedev, S.R. Melnikov Preimushchestva primeneniya lazernykh skaniruyushchikh sistem nazemnogo i aviatsionnogo bazirovaniya // Gornaya promyshlennost. – 2002. - № 5. – S. 2-4.
7. Kuznetsova A.A., Gura D.A., Alkachev T.E. Analiz poluchennykh dannykh metodom lazernogo skanirovaniya dlya vypolneniya periodicheskogo monitoringa na primere zdaniya raspolozhennogo v g. Krasnodare // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2014. – № .4 – S.77-83.

8. Kravchenko E.S., Budagov I.V. Primenenie nazemnogo lazernogo skanirovaniya dlya tseley dorozhnogo stroitelstva // V sbornike: Molodaya nauka – 2013. Materialy IV Otkrytoy mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Godu okhrany okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii. Tuapse, 2014. – S. 222-224.

9. A.Ya. Freydin Trekhmernyy lazernyy skaner: printsip raboty i oblast primeneniya // Mir izmereniy – 2007. – S. 1-2.

10. Zheltko Ch.N., Berdzenishvili S.G., Korelov S.N., Gura D.A., Shevchenko G.G., Pastukhov M.A. Uchebnaya geodezicheskaya praktika / Metodicheskie ukazaniya po organizatsii i kontrolyu uchebnoy praktiki dlya studentov vseh form obucheniya napravleniy 120700 Zemleustroystvo i kadastry, 130500 Neftegazovoe delo, 270800 Stroitelstvo, 271101 stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy / Krasnodar, 2013. Tom Chast 3 Reshenie geodezicheskikh zadach. – S. 19

11. Gribkova I.S., Sherstyuk N.A. Lazernoe skanirovanie // V sbornike: Nauki o zemle na sovremennom etape. VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Moskva, 2013. – S. 53-55.

12. Nazemnoe lazernoe skanirovanie – obshchie printsipy [Elektronnyy resurs] – Elektron. tekstovye dan. – Rezhim dostupa: <http://geotronix.kz/index.php/materialy/scanery/statyi/274-nazemnoe-lasernoe-skanirovanie> (Data obrashcheniya: 19.09.2016 g).

## *THE PRINCIPLE OF OPERATION OF SURFACE SCANNING SYSTEM*

**A. A. SHEVCHENKO, R. E. GLAZKOV, A. V. PILYUSHENKO**

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,  
e-mail: glazalmazrusya@mail.ru*

Perhaps the most significant technological innovation of the last time of surveying, geodesy and a number of related industries have become an active introduction into practice of laser scanning systems. Laser radar technology combine the precision and concreteness of photogrammetry and high information content and the performance of remote sensing techniques. This article is devoted to acquaintance with the laser scanning system as a new

technology for conducting mine surveying and geodetic works. The technology and work practices, reviewed and summarized materials of outside organizations in the conduct of works using terrestrial laser scanning systems, the basic principles of operation terrestrial scanning system. Also addressed the issue of efficiency of use of laser scanning system for periodic monitoring of various objects.

**Key words:** terrestrial laser scanning, scanning systems, scanner, laser shooting, coordinates, geodetic works, monitoring