

УДК 528.721.221.6:625.03

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-98-108

ИССЛЕДОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА «СКАНПУТЬ» ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Владимир Васильевич Щербаков

Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной геодезии, тел. (913)912-86-91, e-mail: vvs@stu.ru

В статье приведены результаты исследований мобильного лазерного сканера (МЛС) «Сканпуть-М», разработанного автором. Сканер отличается от аналогов тем, что в комплект МЛС включены светоотражающие марки, которые обеспечивают автоматизированное определение (идентификацию) в облаке точек рельсовых нитей. Выполнен анализ принципиальных решений по оцифровке оси железнодорожного пути. Показано преимущество портативного мобильного лазерного сканера, снабженного светоотражающими марками, обеспечивающими повышение производительности при обработке данных. Приведены результаты оценки точности, полученные на экспериментальном участке железнодорожного пути.

Ключевые слова: мобильный лазерный сканер, методика калибровки, светоотражающие марки, инженерно-геодезические работы, инфраструктура железных дорог, эталонный экспериментальный участок железной дороги.

Введение

Мобильная лазерная система «Сканпуть», разработанная по техническим требованиям ИЦ «Ямал» для контроля технического состояния железной дороги Лабытнанги – Бованенково [1], успешно применяется для выполнения проектно-изыскательских работ более 10 лет в условиях Заполярья.

При применении мобильного лазерного сканирования для геодезической съемки инфраструктуры железных дорог проблемной задачей является автоматизация обработки данных лазерного сканирования с целью распознавания образов. Некоторые этапы автоматизации обработки данных лазерного сканирования нашли решение в крупных компаниях, например, таких как Bentley. Однако существующие программные комплексы имеют большую стоимость, требуют адаптации, включая развитие специальных реперных сетей и поэтому не нашли широкого применения для решения конкретных задач железнодорожной отрасли Российской Федерации [2, 3].

В МЛС «Сканпуть» для обработки данных лазерного сканирования с учетом того, что все объекты инфраструктуры железных дорог привязаны к оси железнодорожного пути, разработан алгоритм определения геопространственного положения оси железнодорожного пути. Алгоритм включает нахождение в облаке точек в сечении балластной призмы характерных точек с наибольшими высотными отметками (рис. 1). Совокупность данных точек является осно-

вой формирования пространственного положения рельсовых нитей железнодорожного пути.

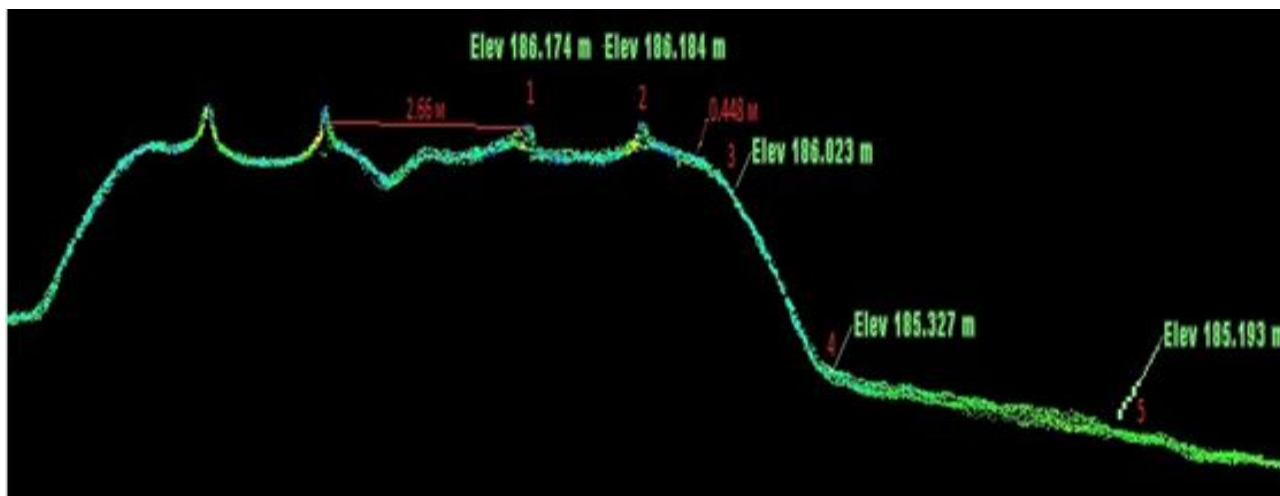


Рис. 1. Оцифровка рельсовых нитей по данным мобильного лазерного сканирования

Алгоритм реализован в программном обеспечении обработки данных лазерного сканирования. Тестирование программного обеспечения показало большое количество неоднозначностей, включая распознавание рельсовых нитей в кривых участках пути, смещение оси (точек) по ширине головки рельса (± 70 мм). Для создания оси пути из облака точек необходимо после автоматизированного выделения оси пути на локальных участках с неоднозначным положением рельсовых нитей вручную корректировать пространственное положение выделенной оси.

Основная часть модернизации мобильного лазерного сканера

Для решения задачи автоматизированного распознавания рельсовых нитей модернизирован мобильный лазерный сканер «Сканпуть». Модернизированный МЛС «Сканпуть-М» [1] включает (рис. 2):

- 1) ходовую тележку;
- 2) инерциальную систему;
- 3) спутниковый приемник;
- 4) контроллер спутникового приемника;
- 5) антенну спутниковую;
- 6) лазерное сканирующее устройство;
- 7) компьютер полевой портативный;
- 8) светоотражающие марки.



Рис. 2. Внешний вид «Сканпуть-М»

На рис. 3 показана структурная схема мобильного лазерного сканера «Сканпуть-М».

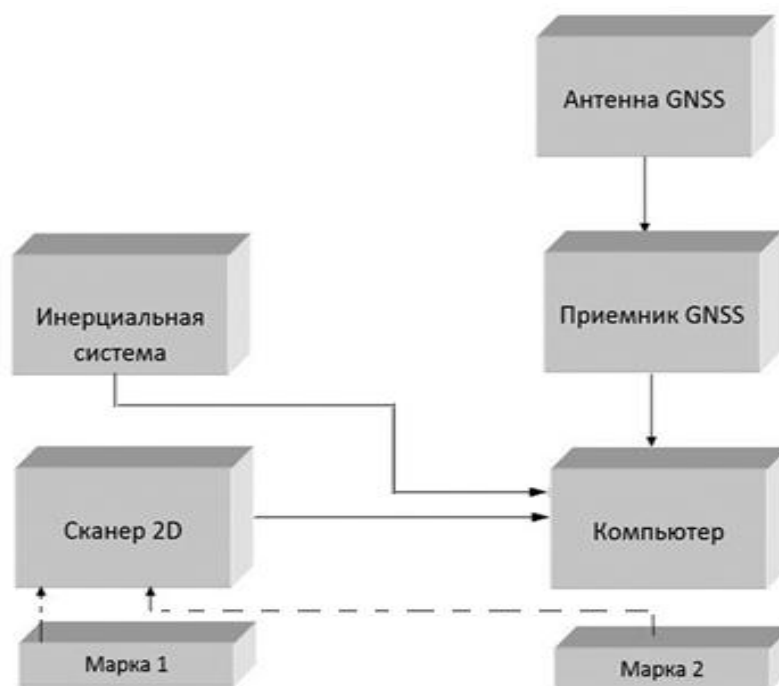


Рис. 3. Структурная схема мобильного лазерного сканирования

Основным отличием МЛС «Сканпуть-М» от известных МЛС является наличие светоотражающих марок 1 и 2, которые конструктивно установлены на ходовой тележке таким образом, что независимо от ширины колеи постоянно находятся над осью головки рельса. Данное решение позволяет с высокой достоверностью и точностью выделять из облака точек ось головки рельса для дальнейшей обработки данных лазерного сканирования железных дорог. На рис. 4 приведена структурная схема обмена данными МЛС «Сканпуть-М». Модернизация МЛС обеспечила расширение функциональных возможностей МЛС «Сканпуть» по отображению рельсовых нитей в облаке точек.

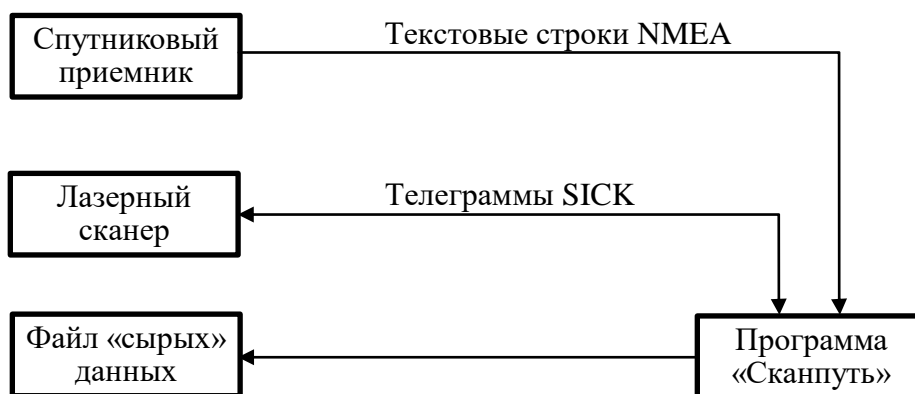


Рис. 4. Структурная схема обмена данными МЛС «Сканпуть»

Способ оцифровки рельсовых путей

Основной задачей выделения из облака точек рельсовых нитей для определения оси пути является использование изменения цвета (тональности) рельсовых нитей при настройках сканирования и оцифровке пути (рис. 5).

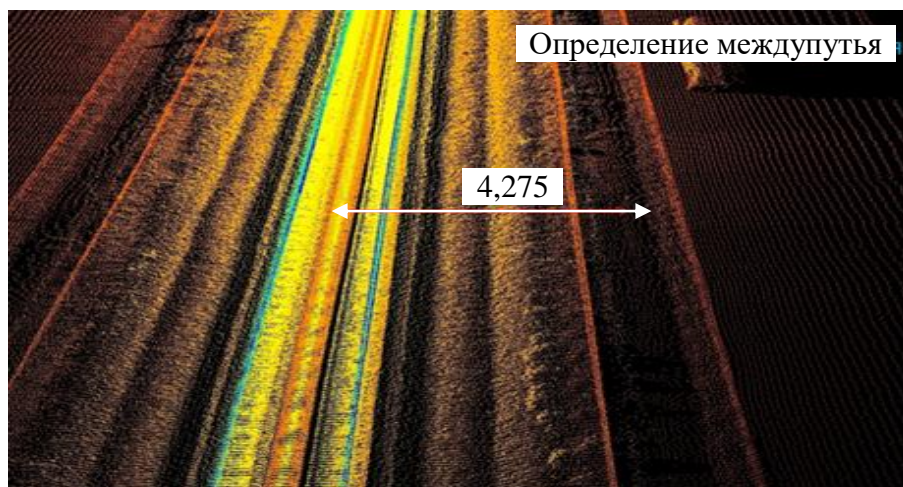


Рис. 5. Облако точек с выделением рельсовых нитей с использованием фотоотражающих марок

Оцифровка рельсовых нитей осуществляется путем определения области поиска и нахождения границ с помощью алгоритма машинного зрения Канны (John F. Canny) [3, 4].

Для усечения области поиска используются данные спутниковых приемников, а также информация о положении светоотражающих марок относительно 2D-сканирующей головки МЛС «Сканпуть-М» с использованием критерия оценки минимального расстояния в области сканирования $L1$ и $L2$. Координаты светоотражающей марки 2 – X_1, Y_1, H_1 и светоотражающей марки 3 – X_2, Y_2, H_2 соответствуют пространственному положению рельсовых нитей (рис. 6). Данный метод по максимальным высотным отметкам H_1, H_2 позволяет определить область поиска границ отображения рельсовых нитей и определение координат X_1, Y_1 и X_2, Y_2 .

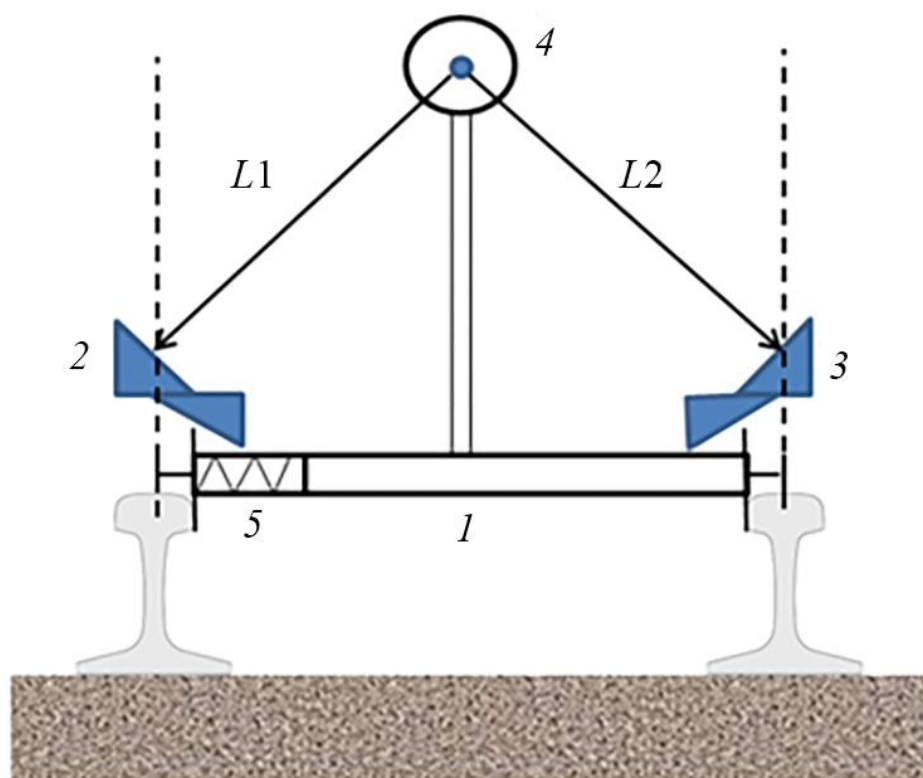


Рис. 6. Схема измерений:

1 – ходовая тележка; 2, 3 – светоотражающие марки; 4 – 2D-сканер;
5 – прижимное устройство

Поиск границ светоотражающих марок производится с помощью детектора Канны на основе градиентного фильтра, оптимального по критериям выделения, локализации и минимизации откликов края изображения. Для того чтобы оценить величину градиента изображения, применяются операторы градиента [5, 6].

$$L_x(x, y) = -1/2 \cdot L(x-1, y) + 0 \cdot L(x, y) + 1/2 \cdot L(x+1, y);$$

$$L_y(x, y) = -1/2 \cdot L(x, y-1) + 0 \cdot L(x, y) + 1/2 \cdot L(x, y+1),$$

где x, y – координата точки;

$L(x, y)$ – градиент в точке x, y ;

L_x, L_y – градиент в точке x, y по осям X, Y .

Для выделения границ выполняется оценка величины градиента с использованием центральных разностей, т. е. значений в соседних точках $+1$ и -1 градиента [4].

Идентификация геометрических элементов выполняется с использованием вычислительного алгоритма Хафа. Он применяется в анализе изображений, цифровой обработке изображений и компьютерном зрении. Классический алгоритм преобразования Хафа связан с идентификацией прямых линий. Преобразование Хафа основывается на представлении искомого объекта в виде параметрического уравнения. В основе теории преобразования Хафа лежит утверждение, что любая точка изображения может быть частью некоторого набора возможных линий [7–9].

Таким образом, усечение области поиска выполняется с использованием пространственных положений рельсовых нитей, полученных по функциональной зависимости координат светоотражающих марок от минимального расстояния $L1$ и $L2$ до 2D-сканера, соответствующих максимальным высотным отметкам в каждом сечении (поперечном профиле) сканирования. Определение границ осуществляется с использованием детектора Канни и идентификации геометрических элементов по данным алгоритма Хафа. Данный набор функций усечения, выделения границ и идентификации поиска обеспечивает возможность автоматизации и получения нормативной [10, 11] точности определения оси железнодорожного пути.

Испытание МЛС «Сканпуть»

Испытания, настройка и калибровка [12] МЛС «Сканпуть-М» проводились на специальном эталонном 500-метровом участке железной дороги Новосибирск – Пашино, включающем одну кривую радиусом 600 м и опорную геодезическую сеть (ОГС), созданную в местной системе координат (МСК) для оценки точности измерений МЛС «Сканпуть-М». Точки ОГС располагались справа и слева на удалении от оси пути 2,5 и 10 м. На ОГС до начала испытаний были установлены марки (мишени) со светоотражающей пленкой. Схема эталонного участка железнодорожного пути приведена на рис. 7.

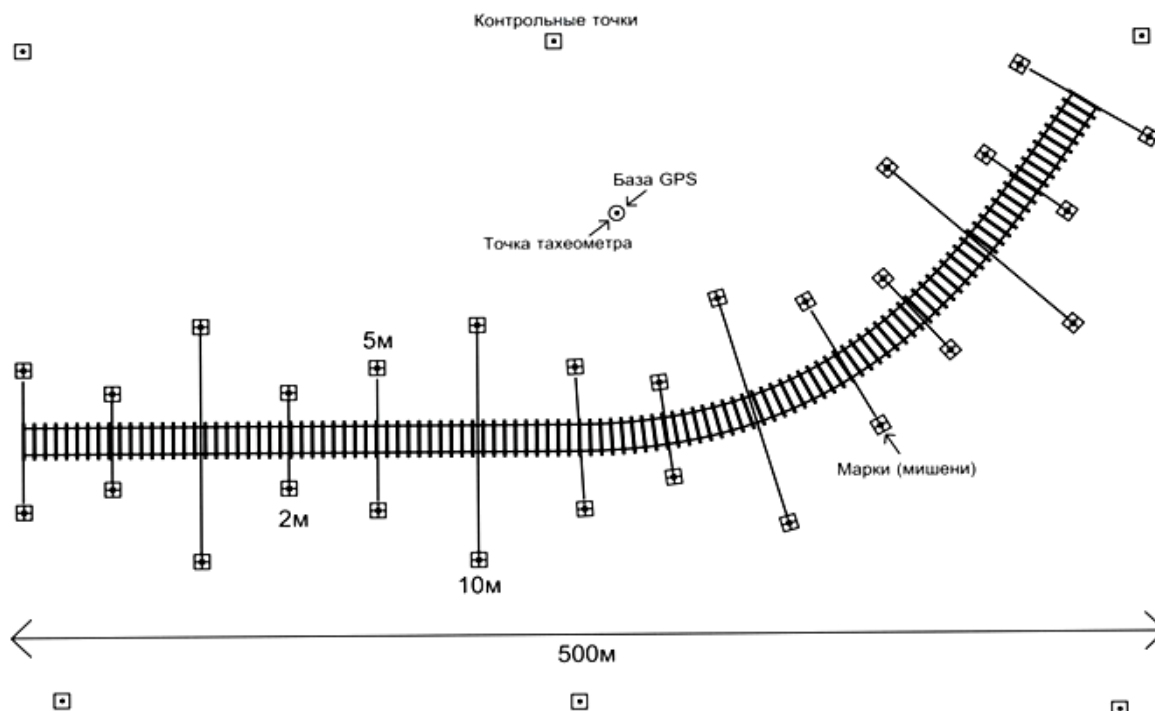


Рис. 7. Схема эталонного участка железнодорожного пути

Преобразование координат лазерного сканирования в систему внешних координат выполнено по формуле [13]

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{INS/ск} = \begin{bmatrix} E \\ N \\ H \end{bmatrix}_{GPS} + A_{\alpha\omega\kappa} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y \\ N \\ H \end{bmatrix},$$

где X, Y, Z – пространственные координаты точки местности, измеренные наземным лазерным сканером;

$A_{\alpha\omega\kappa}$ – матрица направляющих косинусов, характеризующая пространственную ориентацию инерциальной системы относительно внешней;

$E_{GPS}, N_{GPS}, H_{GPS}$ – координаты фазового центра спутниковой антенны во внешней системе координат;

X, Y, Z – координаты положения точки сканируемого объекта в системе координат сканера;

E, N, H – координаты точки объекта во внешней системе координат.

Взаимное положение фазового центра спутниковой антенны относительно инерциальной системы, головки 2D-сканера, установленного на ходовой тележке (см. рис. 2), а также положение 2D-сканера относительно оси левой и правой светоотражающих марок для вычисления элементов матрицы определено электронным тахеометром с точностью (СКО) 1 мм.

По результатам испытаний МЛС «Сканпуть-М» на эталонном участке были определены средние квадратические ошибки определяемых параметров железнодорожного пути по внутренней сходимости и относительно пунктов ОГС (таблица).

Средние квадратические ошибки параметров железнодорожного пути

Объект контроля	Погрешность (СКО)			
	по внутренней сходимости (мм)		относительно ОГС (мм)	
	в плане	высотная отметка	в плане	высотная отметка
Рельс 1	2	2	7	5
Рельс 2	2	3	6	5
Марка 2 м	8	6	16	13
Марка 5 м	12	11	20	18
Марка 10 м	17	15	28	24

Из таблицы видно, что по внутренней сходимости точность определения координат в 1,5–2 раза выше, что свидетельствует о наличии систематических составляющих погрешности определения координат, которые не удалось устранить в процессе калибровки и настроек. При этом точность автоматизированного определения пространственного положения рельсовых нитей с использованием светоотражающих марок, установленных над колесными парами МЛС «Сканпуть-М», соответствует нормативным требованиям [10].

Заключение

Результаты полевых испытаний МЛС «Сканпуть-М» показали высокую эффективность использования светоотражающих марок, жестко связанных с колесными парами ходовой тележки и соответственно рельсовыми нитями. Обеспечивается идентификация при обработке данных МЛС «Сканпуть-М», а также автоматизация процесса оцифровки оси пути.

На рис. 8 показан фрагмент определения высоты контактного провода относительно оси пути и определения геометрических параметров (габариты приближения строений) для создания цифровых моделей пути (ЦМП) [14] с использованием данных лазерного сканирования МЛС «Сканпуть-М» и оцифрованных рельсовых нитей. Выполнив оцифровку рельсовых нитей с использованием программного комплекса ProfilePC, ScannerDispatcher, Curvis, можно решать инженерные задачи, включая определение параметров кривых, определение габаритов приближения строений, выполнять актуализацию проектных данных, определять динамику изменения пространственного положения пути и других объектов [15].

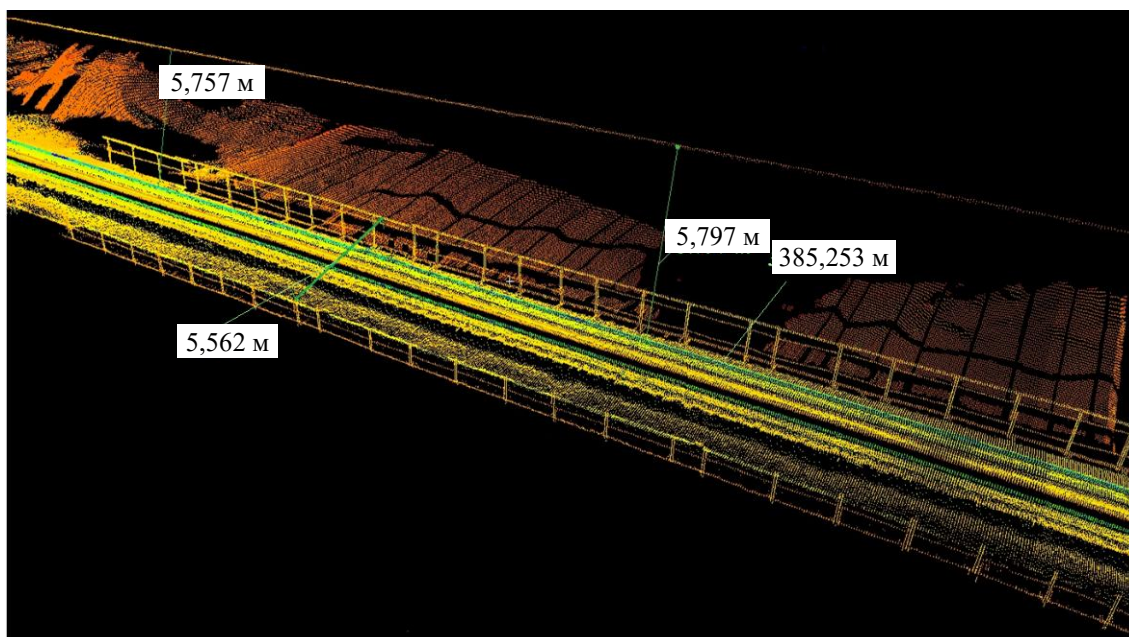


Рис. 8. Определение высоты контактного провода относительно рельсовых нитей (выделены зеленым цветом)

Таким образом, модернизация мобильного лазерного сканера с минимальными затратами по установке над ходовыми колесами светоотражающих марок, ориентированных на 2D-сканер, позволяет автоматизировать процесс распознавания образов, в нашем случае рельсовых нитей и выполнять оцифровку оси пути с высокой надежностью, включая использование прямых и косвенных методов. По отношению к традиционным методам, ранее применявшимся для этих целей, значительно (в 7–8 раз) повышается производительность оцифровки; применение программных комплексов типа Bentley, позволяющих также автоматизировать процесс, может быть рентабельно при больших объемах работ и оправдано (из-за высокой стоимости) при использовании в крупных проектных организациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щербаков В. В., Конкин А. В., Земерова А. А. Обзор разработок НИЛ «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 144–154.
2. Розенберг И. Н., Дулин С. К., Якушев Д. А. Технологии мобильного лазерного сканирования для железнодорожной инфраструктуры // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 8. – С. 32–36.
3. Cloud Compare [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cloudcompare.org>.
4. Sanny John. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986. – Vol. 8, № 6. – P. 679–698.
5. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение = Computer Vision. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с. – ISBN 5-94774-384-1.

6. Форсайт Дэвид, Понс Жан. Компьютерное зрение. Современный подход = Computer Vision: A Modern Approach. – М. : Вильямс, 2004. – 928 с. – ISBN 5-8459-0542-7.
7. Лукьяница А. А., Шишкин А. Г. Цифровая обработка видеоизображений. – М. : Ай-Эс-Эс Пресс, 2009. – 518 с. – ISBN 978-5-9901899-1-1.
8. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / С. Ю. Желтов и др. – М. : Физматкнига, 2010. – 672 с. – ISBN 978-5-89155-201-2.
9. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, В. А. Кревецкий, А. К. Передреев, А. А. Роженцов и др. ; под ред. Я. А. Фурмана. – 2-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 592 с. – ISBN 5-9221-0374-1.
10. Об утверждении и введении в действие откорректированной редакции технических условий на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути [Электронный ресурс] : распоряжение ОАО «РЖД» от 18.01.2013 № 75р (21.01.2015) (с изм. от 19.12.2018). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
11. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: ЦРБ-756 / МПС РФ. – М. : Транспорт, 2002. – 189 с.
12. Войнаровский А. Е., Тихонов С. Г. Калибровка наземного лазерного сканера по сканам испытательного полигона // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 5–18.
13. Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
14. Щербаков В. В., Ковалева О. В., Щербаков И. В. Цифровые модели пути – основа геодезического обеспечения проектирования строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 12–16.
15. Карпик А. П., Никитин А. В. Информационная система построения инфраструктуры геопространственных данных для автомобильных и железных дорог // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 1–7.

Получено 18.03.2020

© В. В. Щербаков, 2020

DEVELOPMENT OF LASER MOBILE SCANNERS WITH THE SYSTEM OF RECOGNITION IN DETERMINATION OF GEOSPATIAL POSITION OF RAILWAY

Vladimir V. Shcherbakov

Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russia, Ph. D., Associate Professor, Head of Department of Engineering Geodesy, phone: (913)912-86-91, e-mail: vvs@stu.ru

The article describes the device of the Scanput-M mobile laser scanner (MLS), developed by the author. The scanner is different from its analogues because it has reflective marks, which provide automated determination of the points of rail threads in the cloud, a description of the software and functionality. The advantages of portable mobile laser scanners equipped with reflective marks, when processing data, are shown. The results of the accuracy assessment obtained on the experimental section of the railway track are presented, an example of constructing a transverse profile according to laser scanning data and comparing data with design values is shown.

Key words: mobile laser scanner, calibration procedure, reflective marks, engineering and geodetic works, railway infrastructure, reference experimental section of the railway.

REFERENCES

1. Shcherbakov, V. V., Konkin, A. V., & Zemerova, A. A. (2019). Review of the development of scientific research laboratory «Diagnostics of road clothes and earthwears» of Siberian State University of Messages. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2019: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1, No. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: International Scientific Conference: Vol. 1, No. 1 [Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 144–154). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
2. Rozenberg, I. N., Dulin, S. K., & Yakushev, D. A. (2018). Mobile Laser Scanning Technologies for Railway Infrastructure. *Zheleznodorozhnyy transport [Railway Transport]*, 8, 32–36 [in Russian].
3. Cloud Compare (n. d.). Retrieved from <http://www.cloudcompare.org>.
4. Canny John. (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679–698.
5. Shapiro, L., & Stokman, Dzh. (2006). *Komp'yuternoe zrenie [Computer Vision]*. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 752 p. [in Russian].
6. Forsayt, Devid, & Pons, Zhan. (2004). *Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod [Computer Vision: A Modern Approach]*. Moscow: Vil'yams Publ., 928 p. [in Russian].
7. Luk'yanitsa, A. A., & Shishkin, A. G. (2009). *Tsifrovaya obrabotka videoizobrazheniy [Digital video processing]*. Moscow: Ay-Es-Es Press Publ., 518 p. [in Russian].
8. Zheltov, S. Yu., & et al. (2010). *Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya [Image processing and analysis in machine vision problems]*. Moscow: Fizmatkniga Publ., 672 p. [in Russian].
9. Furman, Ya. A., Krevetskiy, V. A., Peredreev, A. K., Rozhentsov, A. A., & et al. (2003). *Vvedenie v konturnyy analiz; prilozheniya k obrabotke izobrazheniy i signalov [Introduction to contour analysis; applications for image and signal processing]* (2nd ed.). Ya. A. Furmana (Ed.). Moscow: FIZMATLIT Publ., 592 p. [in Russian].
10. Order of Russian Railways of January 18, 2013 No. 75r (January 21, 2015) (as amended on December 19, 2018). On approval and implementation of the revised version of the technical specifications for reconstruction (modernization) and repair of the railway track. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
11. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznikh dorog Rossiyskoy Federatsii: TsRB-756 / MPS RF [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation: TsRB-756 / Ministry of Railways of the Russian Federation]*. (2002). Moscow: Transport, 189 p. [in Russian].
12. Wojnarowski, A. E., & Tikhonov, S. G. (2019). Laser scanner calibration using scans of test polygon. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 5–18 [in Russian].
13. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). *Nazemnoe lazernoe skanirovanie [Ground laser scanning]*. Novosibirsk: SGGA Publ., 261 p. [in Russian].
14. Shcherbakov, V. V., Kovaleva, O. V., & Shcherbakov, I. V. (2016). Digital track models – the basis of geodetic support for the design of construction (repair) and operation of railways. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 3, 12–16 [in Russian].
15. Karpik, A. P., & Nikitin, A. V. (2016). Information system build geospatial data infrastructure for roads and railways. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 1–7 [in Russian].

Received 18.03.2020

© V. V. Shcherbakov, 2020