

М. А. Алтынцева^{1}, А. В. Комиссаров¹*

Методика автоматизированного определения провесов и габаритов проводов на железных дорогах по данным мобильного лазерного сканирования

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: als.mm@yandex.ru

Аннотация. Для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта необходимо выполнять периодический контроль геометрических параметров различных объектов железнодорожной инфраструктуры, среди которой наибольшую важность представляют рельсовая колея и контактная сеть. Для контроля положения рельсовой колеи и контактной сети особый интерес представляет технология мобильного лазерного сканирования, позволяющая представить результаты измерений в виде массива точек. По массиву точек возможно выполнить автоматизированное построение цифровой модели рельефа, векторизацию рельсовых нитей и элементов контактной сети, таких как провода. Достоверная информация о положении проводов необходима для контроля их натяжения, от которого зависят значения расстояний до рельсовых нитей и поверхности земли, а также стрел провеса. В статье предложена методика автоматизированного определения значений габаритов проводов и стрел провеса. Представлены результаты их измерения на примере тестового участка протяженностью 800 м.

Ключевые слова: мобильное лазерное сканирование, массив точек лазерных отражений, габарит провода, стрела провеса, автоматизированное распознавание проводов

М. А. Altyntseva^{1}, A. V. Komissarov¹*

The technique of automated determining conductor clearance and sag for railways based on mobile laser scanning data

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: als.mm@yandex.ru

Abstract. To ensure the safety of railway traffic, it is necessary to monitor the geometric parameters of various railway objects, among which a rail track and a catenary are of the greatest importance. To control the position of rails and catenaries, the mobile laser scanning technology is of particular interest, which makes it possible to receive the measurement results in the form of a point cloud. It is possible to automatically produce a digital elevation model, vectorize rails and catenary elements, such as wires, using a point cloud. Reliable information on the position of the wires is necessary to control their tension. Conductor clearance to the rails or ground surface depend on the tension as well as sag. The technique for automated determining conductor clearance and sag is proposed. The results of their measurement on the example of a test section with a length of 800 m are presented.

Keywords: mobile laser scanning, point cloud, conductor clearance, wire deflection, automated extraction of wires

Введение

Важнейшей отраслью промышленности в любой стране является электроэнергетика. Электроэнергетика – это ведущая отрасль энергетики, которая позволяет электрофицировать большинство областей жизнедеятельности человека за счет рационального производства и потребления электрической энергии. Электрическая энергия передается через электрические сети, которые включают воздушные и кабельные линии электропередач (ЛЭП), трансформаторные подстанции, электропроводки, токопровода и распределительные устройства [1].

Передача и распределение электрической энергии является основной задачей воздушных и кабельных ЛЭП. В случае, если электрическая сеть дополнительно используется для питания транспортных средств, то ее относят к особой группе – контактные сети.

Одним из значимых параметров, который контролируется на ЛЭП и контактных сетях – это натяжение провода, от которого зависит бесперебойное электроснабжение. Изменение в натяжении проводов может происходить под влиянием температуры, наклона опор, увеличении нагрузки, под воздействием упавших на них предметов [2]. В этом случае происходит изменение в значении стрелы провеса, представляющей собой расстояние по вертикали от линии, которая соединяет точки подвеса на соседних опорах, до низшей точки провода. Такая точка располагается в середине пролета. Значение стрелы влияет на габарит провода – расстояние от низшей точки провода в пролете до поверхности земли или пересекаемого инженерного сооружения [3, 4].

Габариты проводов могут наноситься на топографические планы. В этом случае частота их подписи составляет в среднем 6–8 см. Измерения выполняют до уровня земли в местах предполагаемого проезда транспорта и техники [5].

На железных дорогах габариты проводов контролируются на каждом пролете контактной сети. В этом случае они измеряются до уровня верха головок рельс [6]. На железнодорожных переездах габариты определяются до проезжей части автомобильной дороги [7].

Для измерения стрел провеса и габаритов проводов применяются различные методы [2, 8]:

- геодезический с применением теодолитов, тахеометров, рулеток, реек, различных видов лазерных сканеров;
- фотограмметрический, основанный по обработке фотоснимков;
- применение различных датчиков с системами онлайн-мониторинга.

Среди этих методов наиболее производительным является мобильное лазерное сканирование (МЛС), которое позволяет получать полностью метрическую модель объектов окружающего пространства в виде массива точек лазерных отражений (ТЛО). На его основе выполняют распознавание рельсовых нитей, проводов и других железнодорожных объектов.

В свое очередь, по распознанным объектам возможно определить все геометрические характеристики, в частности стрелы провеса и габариты проводов [9, 10].

Особое внимание в задаче распознавания уделяют процессу автоматизации. Железные дороги обладают большой протяженностью. Автоматизированное распознавание объектов способно значительно сократить затрачиваемое время на определение всех геометрических характеристик.

К настоящему времени был разработан ряд методик автоматизированного определения геометрических характеристик объектов железнодорожной сферы. Наибольшие успехи достигнуты в решении задачи распознавания рельсовых нитей [11]. Распознавание проводов ЛЭП и контактной сети представляет собой более сложную задачу из-за их более непостоянного пространственного положения и различного количества. Определение стрел провеса и габаритов проводов требует осуществления распознавания только самого низкого провода.

Методика автоматизированного определения стрел провеса и габаритов проводов

Для разработки методики автоматизированного определения стрел провеса и габаритов проводов были использованы данные МЛС, полученные с помощью системы Riegl VMX-250 на территорию железной дороги. Средняя скорость движения транспортного средства на участке составила 40 км/ч при частоте сканирования 200 Гц и частоте зондирующих импульсов 300 кГц для каждого из двух сканеров, входящих в состав системы МЛС. На рис. 1 показан тестовый участок протяженностью 800 м. Съемка осуществлялась в прямом и обратном направлении.

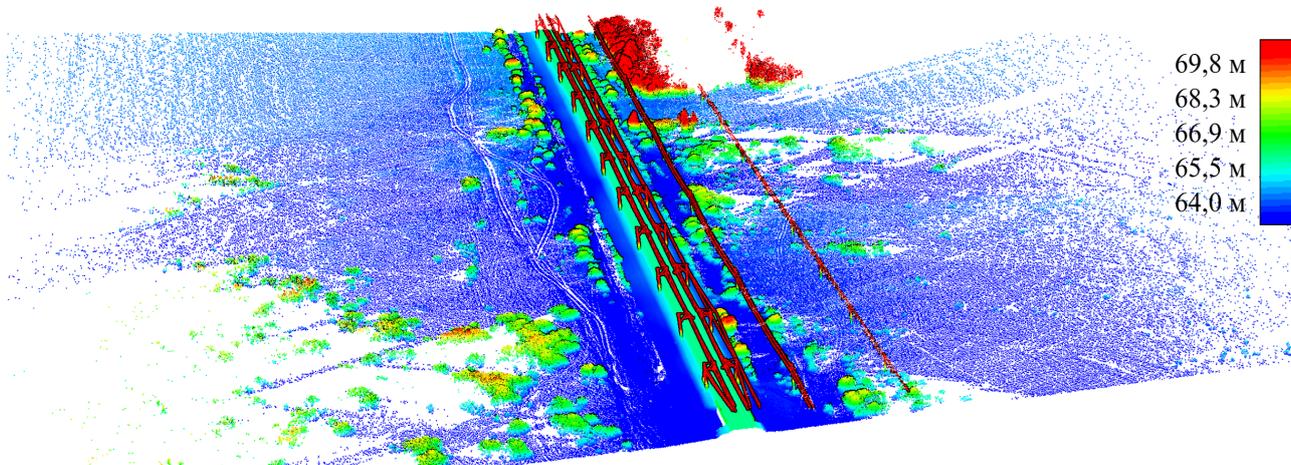


Рис. 1. Данные МЛС территории железной дороги с отображением по высоте

На рис. 2 показана разработанная методика автоматизированного определения стрел провеса и габаритов проводов, согласно которой предварительно была выполнена фильтрация ложных точек в массиве ТЛЮ, то есть представляющих собой ошибочные измерения в результате переотражений и находящихся ниже уровня поверхности земли, а затем взаимное ориентирование данных двух противоположных маршрутов по зонам их перекрытия.



Рис.2. Методика автоматизированного определения стрел провеса и габаритов проводов

Затем были удалены группы изолированных точек (рис. 3). Изолированными считаются группы точек, если в пределах указываемого радиуса поиска

находится число других точек, меньшее заданного значения. Для параметров съемки, использованных при получении тестовых данных, радиус поиска составил 0,1 м, а число точек в группе – 10.

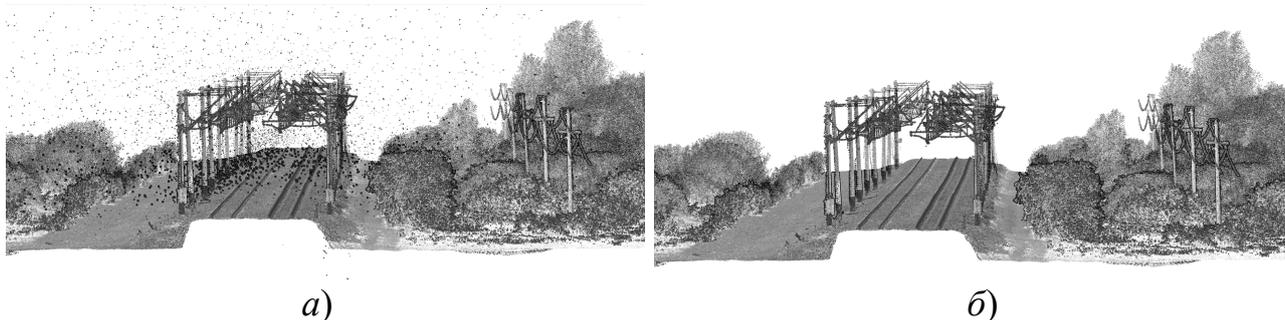


Рис. 3. Результат фильтрации изолированных точек
а) до фильтрации; б) после фильтрации

На следующем этапе выполнялось автоматическое распознавание точек поверхности земли с помощью метода Аксельсона [12] и разделение массива ТЛО по уровням от этой поверхности (рис. 4).

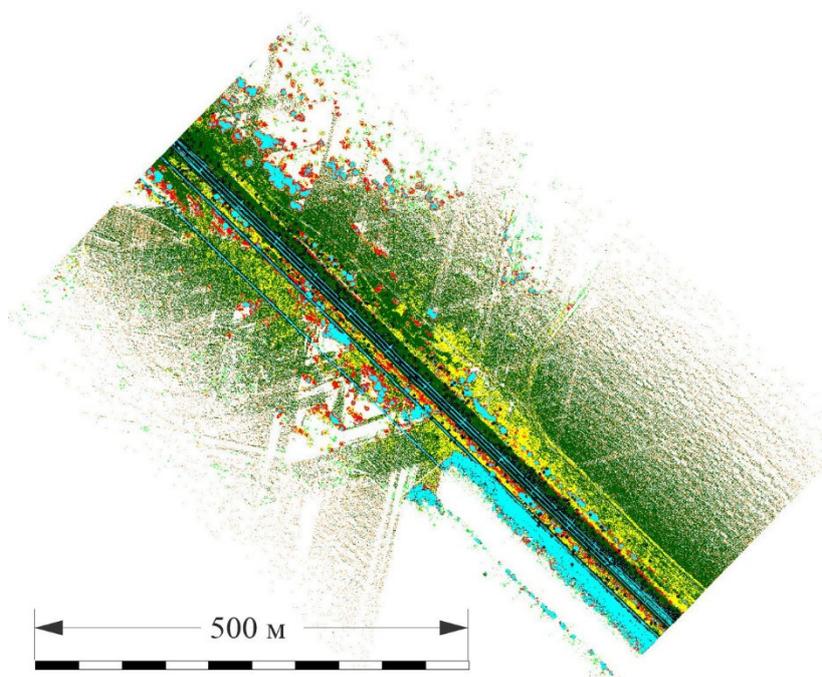


Рис. 4. Данные МЛС (вид сверху):

■ – точки земли; ■ – 0–0,3 м над землей; ■ – 0,3–1 м ■ – 1–2,5 м; ■ – 2,5 м и выше

Распознавание точек поверхности земли необходимо для определения габаритов проводов до земли и для решения задачи распознавания опор, используемых при идентификации этих проводов. В свою очередь, фильтрация изолированных точек позволила удалить все лишние точки в воздухе, которые существенно влияют на точность распознавания проводов контактной сети (рис. 5).

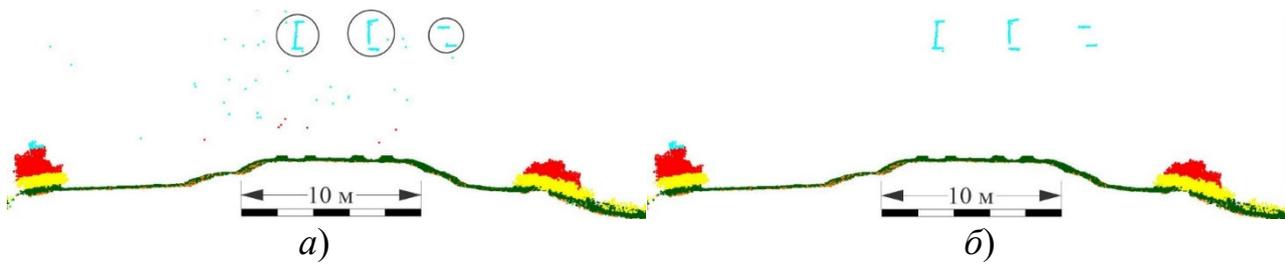


Рис. 5. Поперечное сечение данных МЛС:

- а) до фильтрации изолированных точек;
- б) после фильтрации изолированных точек;
- – местоположение элементов контактной сети

Дальнейший этап методики заключается в распознавании групп точек вдоль траекторий МЛС (рис. 6). Применение траекторий позволяет ограничить зону поиска этих групп.

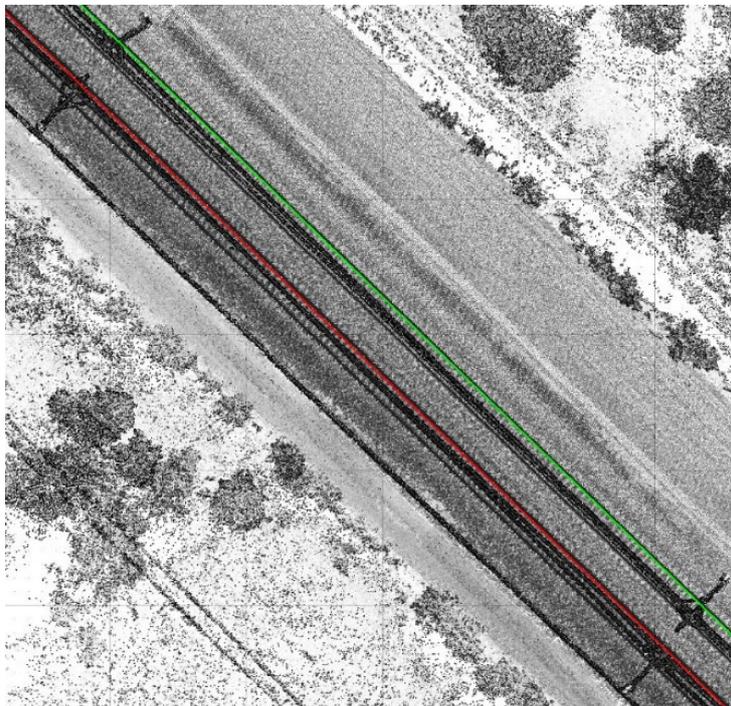


Рис. 6. Фрагмент массива точек по интенсивности с отображением траектории движения системы МЛС:

— в прямом направлении; — в обратном направлении

На рис. 7 показан результат распознавания групп точек на опорах. Группы точек вдоль траектории МЛС соответствуют горизонтальному сечению опор ЛЭП глубиной 30 см ниже уровня проводов. Были определены оптимальные параметры смещения: выше траектории МЛС на 1,2 м и правее от нее – до 6 м. Параметры смещения подбираются индивидуально для каждой установки си-

стемы МЛС. Точки объединяются в группу по их минимальному числу – для исследуемых данных МЛС не менее 100.

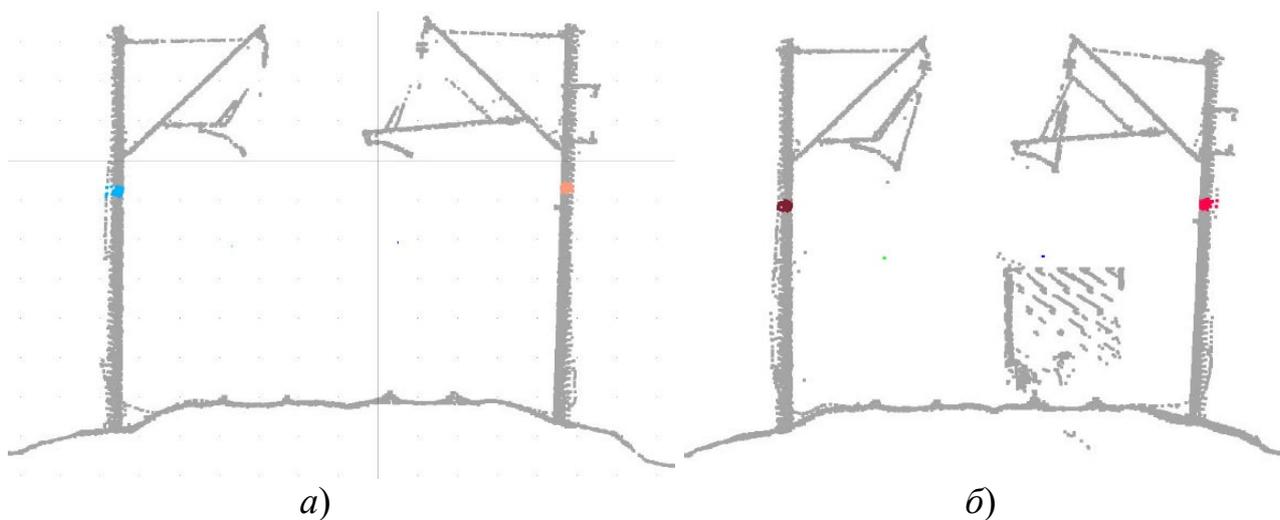


Рис. 7. Пример сечения результат поиска групп точек опор:

а) без вагона поезда; б) с вагоном поезда;

□ – ТЛО, не принадлежащие группам;

■ ■ ■ ■ – ТЛО, принадлежащие группам

Не тестируемом участке располагалось 26 опор контактной сети. Группы точек были распознаны на каждой из этих опор (рис. 8.)

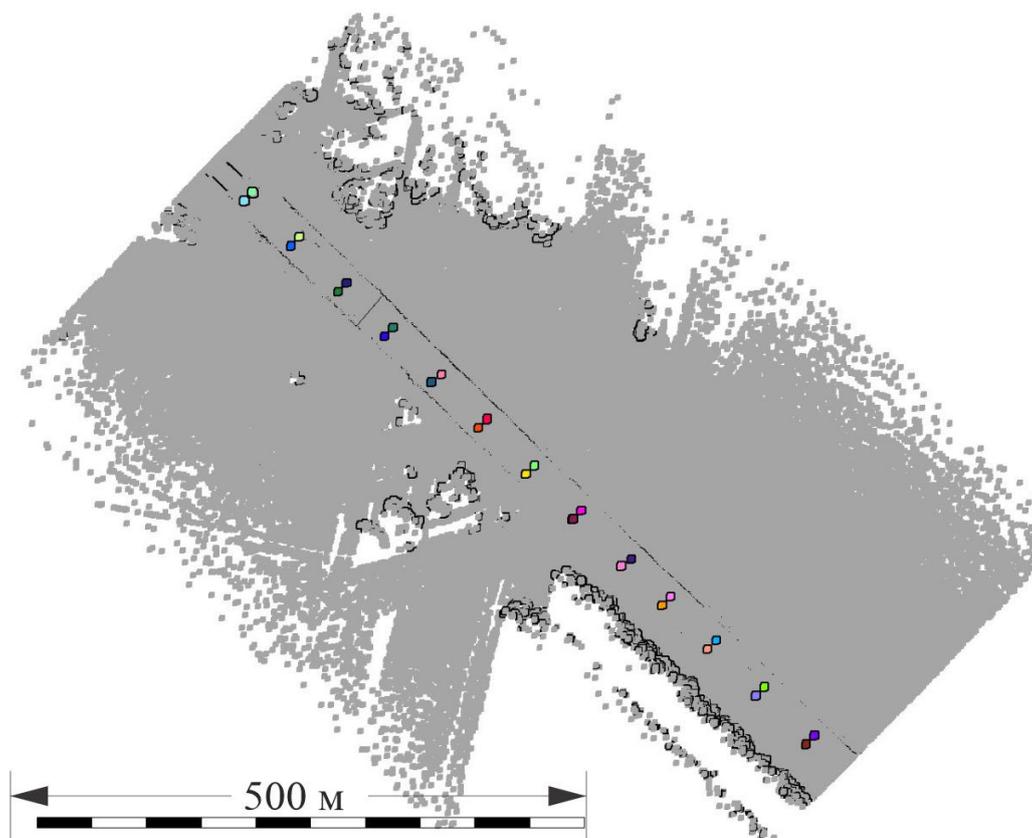


Рис. 8. Результат поиска групп точек на опорах

Затем выполняется вычисление координат центра каждой группы и создание новой точки:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n Z_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где X_2, Y_2, Z_2 – координаты центра группы;

n – число точек в группе;

i – номер точки в группе;

Пример результата определения центра группы показан на рис. 9.

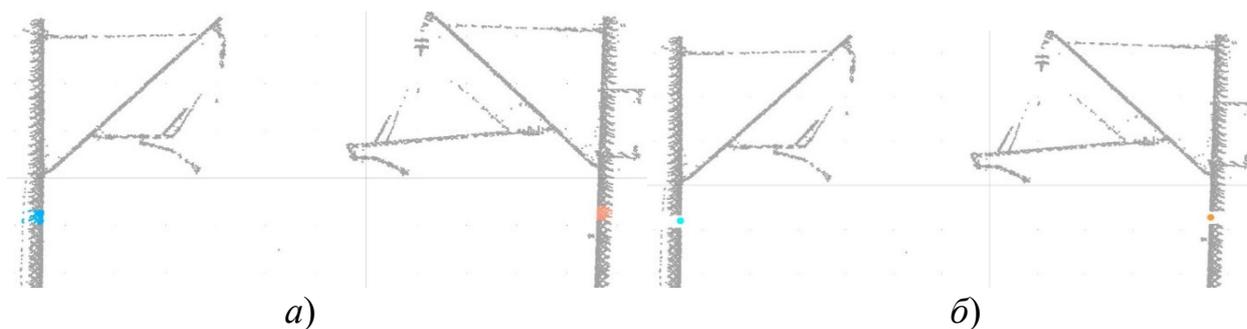


Рис. 9. Определение центра группы:
а) до определения; б) результат определения

Точки центров групп используются для отрисовки полилиний. Количество узлов в полилиниях совпадает с количеством групп.

Соединение точек может быть выполнено инетрактивно или с помощью инструментов, основанных на применении системы полевого кодирования, когда каждой точке назначается код и описывается способ их соединения. Полученные полилинии параллельно смещаются к месту расположения нижних проводов контактной сети (рис. 10).

Далее выполняется распознавание полосы точек заданной ширины над полилинией как класс проводов, и существующие узлы смещенных полилиний поднимаются по высоте на значение, соответствующее минимальной отметке ТЛО этого класса в пределах радиуса в плане 1,2 м по сечению и глубины 20 см (рис. 11). Для этого применяется метод вписывания векторных элементов в массив ТЛО по высоте, реализованный в [13].

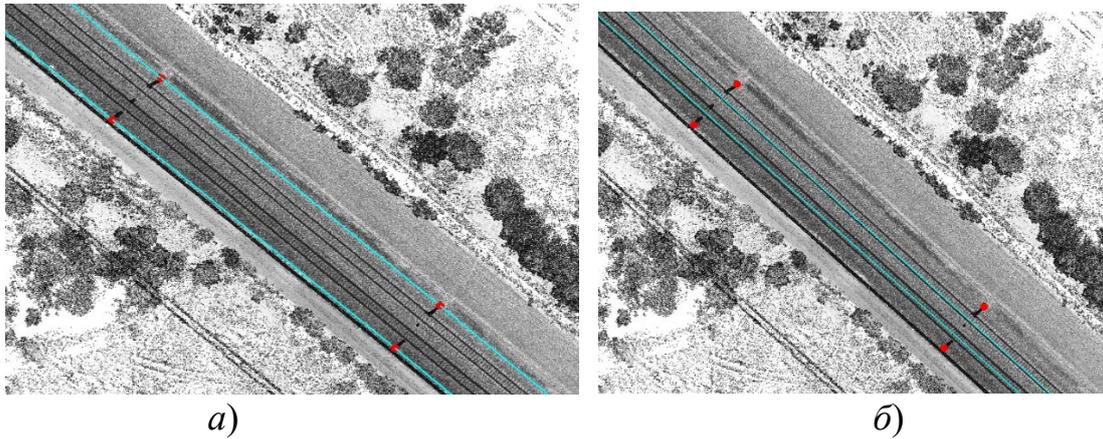


Рис. 10. Пример результата создания полилинии для определения стрел провеса:

а) по точкам центров групп; б) результат параллельного копирования линий; – ТЛО, не принадлежащие группам; ● – точки центров групп; — созданные линии

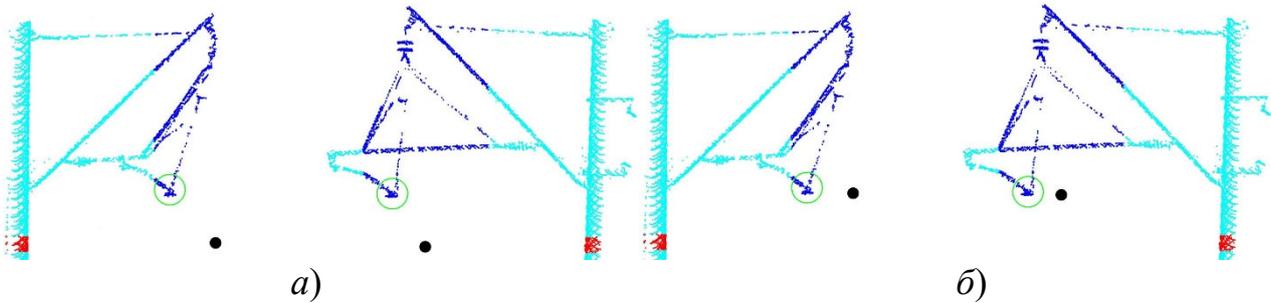


Рис. 11. Вписывание полилинии по высоте в место крепления провода:

а) до вписывания; б) после вписывания; ● – вписываемые линии; – ТЛО, распознанные вдоль вписываемой линии; ○ – местоположение точек крепления проводов

Затем с применением аналогичного метода происходит вписывание узлов полилиний в плановом положении. Итогом этого этапа являются полилинии, узлы которых соответствуют точкам подвеса проводов (рис. 12).

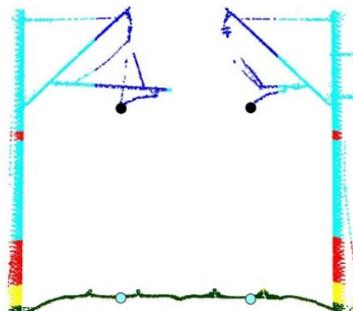


Рис. 12. Результат вписывания полилиний:

● – по высоте к месту крепления провода; ● – в точки поверхности земли

Чтобы вычислить стрелы провеса, вписанные в точки подвеса полилинии проецируются с определенным шагом на точки проводов, имеющих минимальное значение отметки. На основе исследуемых данных был подобран оптимальный шаг вписывания, который составил 5 м (рис. 13).

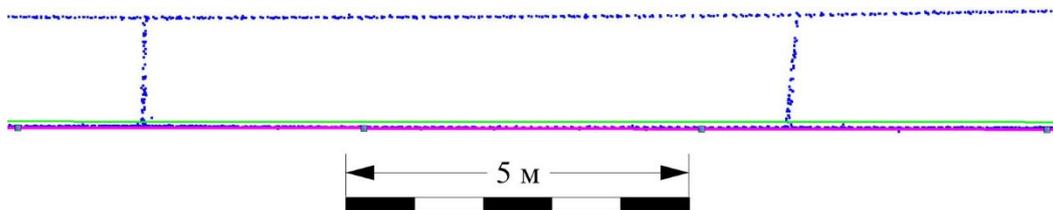


Рис. 13. Результат вписывания полилиний в нижние точки проводов:

— линия до вписывания; — линия после вписывания; ■ — узлы полилинии

Для автоматического вычисления значений стрел провеса, количество узлов в полилинии, соединяющих по прямой точки подвеса, должно быть таким же, как и в полилинии, представляющей собой векторизованный провод. Для этого выполняется автоматическое добавление узлов в полилинии до вписывания с тем же шагом, использованном при распознавании нижних проводов (рис. 14).

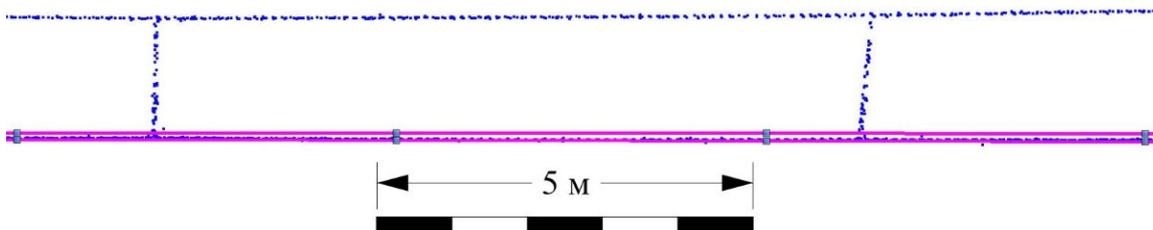


Рис.14. Результат добавления узлов в полилинию до вписывания в соответствии с полилинией после вписывания:

■ — узлы полилиний

Для вычисления габаритов распознанные полилинии проводов автоматически вписываются по высоте в точки поверхности земли. При наличии векторизованных рельсовых нитей полилинии опускались бы на построенную по ним поверхность.

Результаты определения стрел провеса и габаритов проводов

Вычисление стрел провеса и габарита проводов выполняется на основе координат узлов полилиний:

- соединяющих точки подвеса по прямой;
- распознанных полилиний проводов;
- полилиний, вписанных в точки поверхности земли;
- полилиний, вписанных в построенную по рельсовым нитям поверхность.

Из значений координат узлов полилиний, соединяющих точки подвеса по прямой, вычитаются координаты узлов полилиний, соответствующих распознанному нижним проводам. В каждом пролете значение стрелы провеса выбирается по максимальной разнице отметок двух полилиний. Габариты проводов вычисляются в точке, соответствующей этой максимальной разнице, аналогично по разнице отметок. В табл. 1 приведены результаты измерения стрел провеса и габаритов до земли.

Таблица 1

Результаты измерения стрел провеса и габаритов проводов до земли

№ пролета	Контактная сеть № 1			Контактная сеть № 2		
	Длина пролета, м	Стрела провеса, м	Габарит провода до земли, м	Длина пролета, м	Стрела провеса, м	Габарит провода до земли, м
1	59,7	0,065	6,424	60,1	0,075	6,349
2	69,2	0,098	6,425	60,4	0,112	6,339
3	59,4	0,073	6,351	58,9	0,094	6,358
4	61,8	0,109	6,367	60,1	0,107	6,502
5	58,2	0,107	6,36	59,5	0,094	6,518
6	60,7	0,107	6,344	60,9	0,138	6,376
7	59,4	0,074	6,401	59,9	0,101	6,392
8	64,1	0,129	6,552	61,5	0,155	6,383
9	49,9	0,08	6,552	52,1	0,036	6,41
10	57,8	0,063	6,405	57,8	0,134	6,362
11	61,3	0,059	6,334	61,4	0,133	6,252
12	64,0	0,111	6,419	64,2	0,118	6,932

Заключение

Методика автоматизированного определения стрел провеса и габаритов проводов была разработана на примере участка железнодорожного перегона протяженностью 800 м, но дополнительно была протестирована и на других территориях. Она подходит для данных, полученных любыми съемочными системами. Если плотность данных МЛС отличается от тех, что использованы при разработке методики, необходимо заново выполнить подбор минимального числа точек для объединения в группу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михеев В. П. Контактные сети и линии электропередач: учебник для вузов ж.-д транспорта. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
2. Бошкарёва Т. В., Евграшин Е. А., Мязитов Р. Р. Контроль провеса контактного провода // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 231–234.
3. Магидин Ф. А., Берковский А. Г. Устройство и монтаж воздушных линий электропередачи: Учеб. пособие для проф.-техн. учеб. заведений и подгот. рабочих на производстве. – М.: Высш. школа, 1973. – 255 с.
4. Соловой П. И., Переварюха А. Н., Волощук О. В., Овчаренко Е. Ю. Геодезический контроль стрелы провеса и габарита проводов лэп с большими перепадами высот / Вестник

- донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – № 4 (138). – С. 10–14.
5. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500: Утв. ГУГК 25 нояб. 1986 г. – М.: Недра, 1989. – 284 с.
 6. ГОСТ 32679–2014. Контактная сеть железной дороги. Технические требования и методы контроля. – М.: Стандартиформ, 2015. – 16 с.
 7. СП Пересечения железнодорожных линий с линиями транспорта и инженерными сетями. – Изд. офиц. – М., 2014. – 57 с.
 8. Лозовой Н. М., Лозовая С. Ю., Мартынова Н. С., Козлова Е. Р., Празина Е. А. Геодезические методы при ведении работ по возведению и реконструкции линий электропередач // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2015. – № 20-2. – С. 29–34.
 9. Середович В. А., Алтынцев М. А. Применение данных мобильного лазерного сканирования для создания топографических планов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013: IX Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апр. 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 3. – С. 96–100.
 10. Якушев Д. А. Трехмерное моделирование технического состояния техногенных объектов железнодорожного транспорта с помощью ПО Bentley Systems // Машинное обучение и анализ данных. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 44–51.
 11. Щербаков В. В. Исследование мобильного лазерного сканера «Сканпуть при определении пространственного положения железнодорожного пути // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 98–108.
 12. Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models // International Archives of ISPRS. – 2000. – Vol. XXXIII-4. – P. 111–118.
 13. TerraScan User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://terrasolid.com/guides/tscan/index.html> (дата обращения 10.05.2023).

© М. А. Алтынцева, А. В. Комиссаров, 2023