Оптический журнал

Лазерная физика и техника

УДК 629.464.47

Особенности использования триангуляционных лазерных сканеров для контроля состояния железнодорожных путей

© 2020 г. А. М. Боронахин, доктор техн. наук; Д. Ю. Ларионов, канд. техн. наук; Л. Н. Подгорная, канд. техн. наук; Р. В. Шалымов, канд. техн. наук; А. В. Большакова, аспирант

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

E-mail: amboronahin@etu.ru

Поступила в редакцию 23.12.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-05-03-12

Измерение геометрических параметров рельсового пути требует знания положения головок левого и правого рельсов, в частности, точки рельса, находящейся на расстоянии 14 мм ниже его поверхности катания. Использование триангуляционных лазерных сканеров для решения этой задачи сопровождается проблемой сильного зашумления получаемых изображений вследствие солнечной засветки и проявления эффекта «лунной дорожки» на гладкой поверхности рельса. Предложен подход к измерению параметров рельсового пути на основе распознавания изображений в условиях железной дороги с использованием дополнительных конструкционных и алгоритмических решений, в том числе привлечения информации от других датчиков системы (бесплатформенной инерциальной навигационной системы, одометра). Предложенные в работе методы в сочетании с приведенным алгоритмом обработки позволяют определить местоположение рельсов с точностью до 0,1 мм.

Ключевые слова: *лазерный сканер, обработка изображений, бесплатформенная инерциальная навигационная система, головка рельса, диагностика рельсового пути.*

Коды OCIS: *100.3008, 100.5010, 100.2000*

ВВЕДЕНИЕ

Контроль состояния рельсового пути является необходимым условием обеспечения безопасности железнодорожных перевозок. Регулярному мониторингу подлежит широкий круг параметров, среди которых можно выделить состояние рельсов (дефекты в головке, шейке, подошве и на поверхности катания) и геометрические параметры рельсового пути (ширина рельсового пути, его наклон в продольной и поперечной плоскостях и др.). Контроль первых традиционно осуществляется с использованием дефектоскопных и магнитометрических систем. Вторые же измеряются путем определения перемещения рельсовых нитей в каждом из проезжаемых сечений относительно нормативного положения. Решение этой задачи традиционно осуществлялось контактным методом, имеющим очевидные недостатки. Поэтому в современных системах мониторинга состояния рельсового пути находит применение бесконтактный (оптический) метод.

Измерение ширины, уровня, просадок (изгиб рельса в вертикальной плоскости) и рихтовок (изгиб рельса в горизонтальной плоскости)

Рис. 1. Определение изгиба рельса *a* хордовым методом как отклонения точки *C* рельса от хорды, проведенной через две находящихся от нее с разных сторон точек *A* и *B*.

рельсового пути требует знания положения головок левого и правого рельсов в каждом из его сечений. Контролируются при этом в первую очередь перемещения в поперечной плоскости точки рельса, находящейся на расстоянии 14 мм ниже его поверхности катания [1]. Так, ширина колеи определяется как расстояние между вертикальными прямыми, проходящими через профили рельсов, в точках, расположенных ниже верхних точек поверхностей катания рельсов на 14 мм. Уровень определяется как расстояние между горизонтальными прямыми, проходящими через профили рельсов в верхних точках поверхностей катания рельсов. Рихтовка — это изгиб в плане (*a* на рис. 1) от несимметричной хорды длиной 21,5 м (*AB* на рис. 1), определяется каждые 0,25 м пути или чаще [2] по каждой рельсовой нити относительно кузова вагона с помощью оптических датчиков, расположенных в трех точках согласно рис. 1: точке первого измерения в серии — *A*, через 4,5 м — точке *C* и через 17 м — точке *B*.

Практически все современные системы мониторинга состояния рельсового пути проводят измерения во всех трех точках (*A*, *B* и *C* на рис. 1) одновременно [3–5]. Такой подход вынуждает устанавливать на путеизмерительном вагоне три комплекта оборудования, зато обеспечивает измерения в трех точках при одной и той же ориентации вагона. Очевидным недостатком в данном случае является дороговизна системы, препятствующая ее массовому тиражированию.

1. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИКО-ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Решением проблемы регулярной диагностики может быть уменьшение числа измерителей: упрощается установка системы и уменьшается стоимость ее производства. Поэтому разработанная коллективом авторов оптико-инерциальная система диагностики рельсового пути (ОИСДРП) [6] располагается целиком в рамках одной из ходовых тележек подвижной единицы. Подобный подход требует специальных конструкционных и алгоритмических решений для обеспечения измерения тех же параметров, что и системы с тремя рабочими сечениями.

В состав ОИСДРП входит система измерения геометрии пути [7], представляющая собой единую моноблочную конструкцию, одномоментно контролирующую одно сечение (рис. 2). Она состоит их двух лазерных сканеров и бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), содержащей триаду оптических гироскопов и акселерометров, предназначенной для определения параметров ориентации и навигации [8]. Система используется для пересчета поворота кузова вагона (базы *AB* на рис. 1) относительно рельсового пути при перемещении моноблочной конструкции с вагоном из точки *A* в точку *B*.

За счет использования БИНС отпадает необходимость проводить одновременные измерения в трех точках и появляется возможность перейти к последовательному измерению при прохождении каждой из них лазерными сканерами. Ориентация измерительной аппаратуры в этом случае в каждый момент своя, но благодаря измерениям БИНС эта ориентация известна. Значит, становится возможным пересчет данных, поступающих от лазерных сканеров при прохождении каждой из трех точек (*A*, *C* и *B*), к единой системе координат. Решение задачи в этом случае переносится с физического уровня (одновременное измерение в трех точках с одинаковой ориентацией

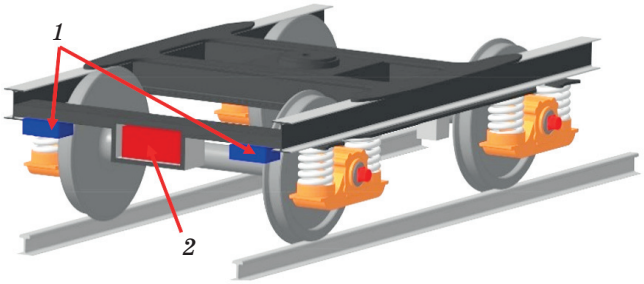

Рис. 2. Система измерения геометрии пути. *1* — лазерные сканеры, *2* — бесплатформенная инерциальная навигационная система.

датчиков) на алгоритмический уровень (три последовательных измерения с разной ориентацией датчиков и последующим пересчетом).

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

2.1. Лазерная триангуляция

Определение положения рельсовых нитей относительно измерительной системы осуществляется с использованием лазерных триангуляционных сканеров [9]. Сканер подсвечивает внутренний профиль головки рельса в текущем сечении, а затем определяет координаты каждой из подсвеченных точек (см. рис. 3а). Однако условия эксплуатации сканеров на железной дороге значительно отличаются от лабораторных. Основными проблемами, усложняющими использование сканеров, являются засветка, вызванная интенсивным солнечным излучением, попадающим в поле зрения сканера, и эффект «лунной дорожки» на поверхности катания рельсов.

(а)

(б)

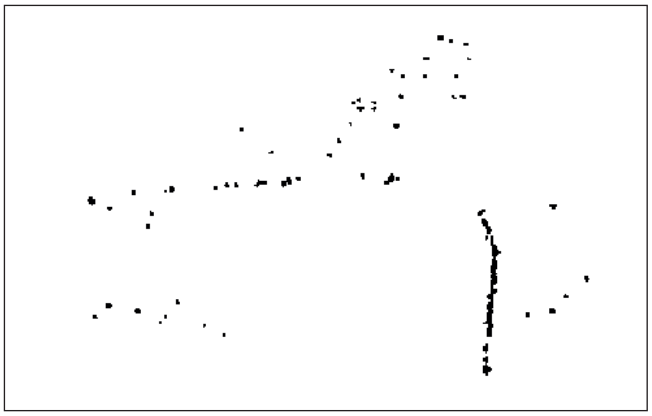

Рис. 3. Профиль рельса, подсвеченный лазером (а), и зашумленное изображение по показаниям сканера (б).

2.2. Внешние факторы

Солнечная засветка вызвана переменным по интенсивности (в зависимости от погодных условий и прохождения областей затенения) излучением во всем оптическом диапазоне длин волн. Эффект «лунной дорожки» является результатом появления бликов от излучения с длиной волны источника.

Борьбу с солнечной засветкой традиционно проводят с использованием оптических фильтров. В рамках этой борьбы сканеры были снабжены узкополосными интерференционными фильтрами, пропускающими лишь излучения с длинами волн, отличающимися на ± 5 мкм от длины волны лазерного излучателя. Подобный подход действительно позволил эффективно подавить солнечную засветку, но в процессе лабораторных испытаний была выявлена проблема, затрудняющая его использование. Вследствие нагрева во время работы (примерно за 30 мин) частота излучения используемого в датчике лазерного диода способна изменяться на столько, чтобы перейти в класс подавляемых таким фильтром сигналов. Окончательным решением, позволившим уменьшить влияние солнечной засветки, стало использование более широкополосного фильтра совместно с системой термостабилизации сканера.

Наличие эффекта «лунной дорожки» и остаточная солнечная засветка все еще оказывали достаточное влияние, делая невозможным прямое использование полученного от сканера изображения в процессе измерения параметров рельсового пути. Поэтому встала задача алгоритмического выявления внутреннего профиля головки рельса в значительно зашумленном сигнале (см. рис. 3б). Особенностями распознавания профиля головки рельса являются высокая скорость перемещения контролируемого объекта (движение современных железнодорожных составов происходит со скоростями в несколько сотен км/ч) и возможность кратковременного пропадания информативной составляющей сигнала (значительная засветка от внешних ис-

точников, прохождение стыков и стрелочных переводов, попадание в поле зрения объектов инфраструктуры и др.).

3. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ОТ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ

3.1. Постановка задачи

Контролю на железных дорогах мира подлежит широкий круг параметров, обязательный перечень которых от страны к стране может разниться. Основные параметры, однако, фигурируют во всех стандартах. К ним можно отнести ширину рельсовой колеи, возвышение одного рельса над другим и рихтовку (изгиб рельса в плоскости железнодорожного полотна). Ширина и рихтовка, согласно правилам технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации, должны контролироваться на расстоянии 13 мм ниже поверхности катания рельса, что соответствует, с учетом подуклонки рельсов, 16 мм ниже линии, соединяющей верхние точки рельсов [10]. В соответствии же с европейскими стандартами контролю подлежит перемещение точки, расположенной на 14 мм ниже этой линии [1]. Поэтому основной задачей, возложенной на лазерные сканеры в составе ОИСДРП, является измерение перемещений точек внутренних поверхностей рельсов, расположенных на 14 (16) мм ниже верхних точек рельсов. Для этого необходимо выявить в зашумленных данных точки, относящиеся к профилю рельса, по ним обнаружить верхнюю точку и определить точку, отстоящую от нее на заданное расстояние.

3.2. Априорные данные

Распознавание заданного изображения на фоне шумов и искажений — не новая задача, успешно решаемая с использованием итеративных алгоритмов ближайших точек [11]. Основой в них является поиск ближайших точек к контрольному образу в массиве и применение преобразования, благодаря которому эти точки в исходном массиве максимально приблизятся к контрольному образу. Эти итерации могут многократно повторяться до достижения приемлемого результата. Очевидной проблемой такого подхода является возможность преобразования исходного массива до локального, а не глобального минимума между сравниваемыми элементами массивов [12].

Исходя из сказанного выше, становится очевидным, что надежная работа алгоритма распознавания, тем более в реальном времени, становится возможной только с использованием априорных данных о приблизительном месте расположения информативных точек в зашумленных данных. Точность априорных данных должна быть не хуже 0,5 мм исходя из требований по точности к определению рихтовки (1 мм). Эти данные можно получить с использованием базы данных предыдущих проездов ОИСДРП по контролируемому участку рельсового пути, содержащей информацию об уровне, ширине и других параметрах пути. Данная информация используется для оценки ожидаемого положения рельсов относительно сканера, а значит, и положения профиля на матрице камеры. С помощью технологий геоинформационных систем (ГИС) по информации от БИНС, которая решает задачу привязки результатов диагностики к путевой координате, можно сказать, на каком участке рельсового пути в текущий момент времени находится измерительное средство, и каково ожидаемое расстояние от сканеров до головок рельсов [13]. Если же данные от ГИС отсутствуют (например, проездов по участку пути не проводилось), то взаимное перемещение подвижной единицы и рельса может быть проконтролировано в случае наличия в составе системы датчиков взаимного положения несущей балки и букс колес вагона. Если же подобная система отсутствует, то при одновременном возникновении двух следующих событий произойдет отбраковка серии кадров как недостоверных, что приведет к отсутствию измерений на данном участке пути. Первое событие — засветка кадра, являющаяся источником зашумленности изображения, которая может быть воспринята как профиль рельса. Вторым событием является изменение положения рельса относительно сканера более чем на 0,5 мм в текущем кадре относительно предыдущего.

Следует также отметить, что для выделения в исходном сигнале лазерного сканера точек, соответствующих профилю головки рельса, необходимо иметь априорные данные о нормативной форме этого рельса.

В зависимости от страны эксплуатации ОИСДРП нормативы на рельсы, используемые на железных дорогах, могут различаться. Это могут быть рельсы типа Р65, эксплуатируемые на Российских железных дорогах (ГОСТ 8161-75 [14]), или используемые в странах Европейского союза рельсы, соответствующие DIN EN 13674-1:2011 [15], или любые другие: главное — иметь возможность их функционального описания.

3.3. Используемый алгоритм

Алгоритм определения положения рельсов по показаниям триангуляционных лазерных сканеров должен в конечном итоге выдавать всего четыре параметра — координаты x и z точек внутренних поверхностей головок левого и правого рельсов, находящихся на 14 мм ниже поверхностей катания рельсов [1]. Предполагается, что первичная обработка сигналов сканеров (выявление пятен с высокой интенсивностью на матрице сканера) была проведена их встроенным программным обеспечением. Тогда каждый кадр оптического профилометра содержит координаты x и z набора точек, попавших в его поле зрения, включая недостоверные точки (зашумление, блики, фрагменты инфраструктуры железнодорожного пути и др.). Координата x показывает, насколько удалена точка от сканера, а координата z — смещение точки по ортогональной оси (см. рис. 4а).

Схематично алгоритм обработки данных от сканера представлен на рис. 5. Первый этап состоит в алгоритмической фильтрации сигнала. Сначала система координат zx трансформируется в систему координат $x'z'$ путем разворота на угол между БИНС и сканером (угол α на рис. 4а). Затем с учетом априорной информации о расположении информативных точек в зашумленных данных (см. п. 3.2) определяется ожидаемое положение рельса относительно сканера. Нормативный профиль описан в стандартах [14, 15], пример — на рис. 4б. Зная нормативную форму рельса, можно описать его аналитически.

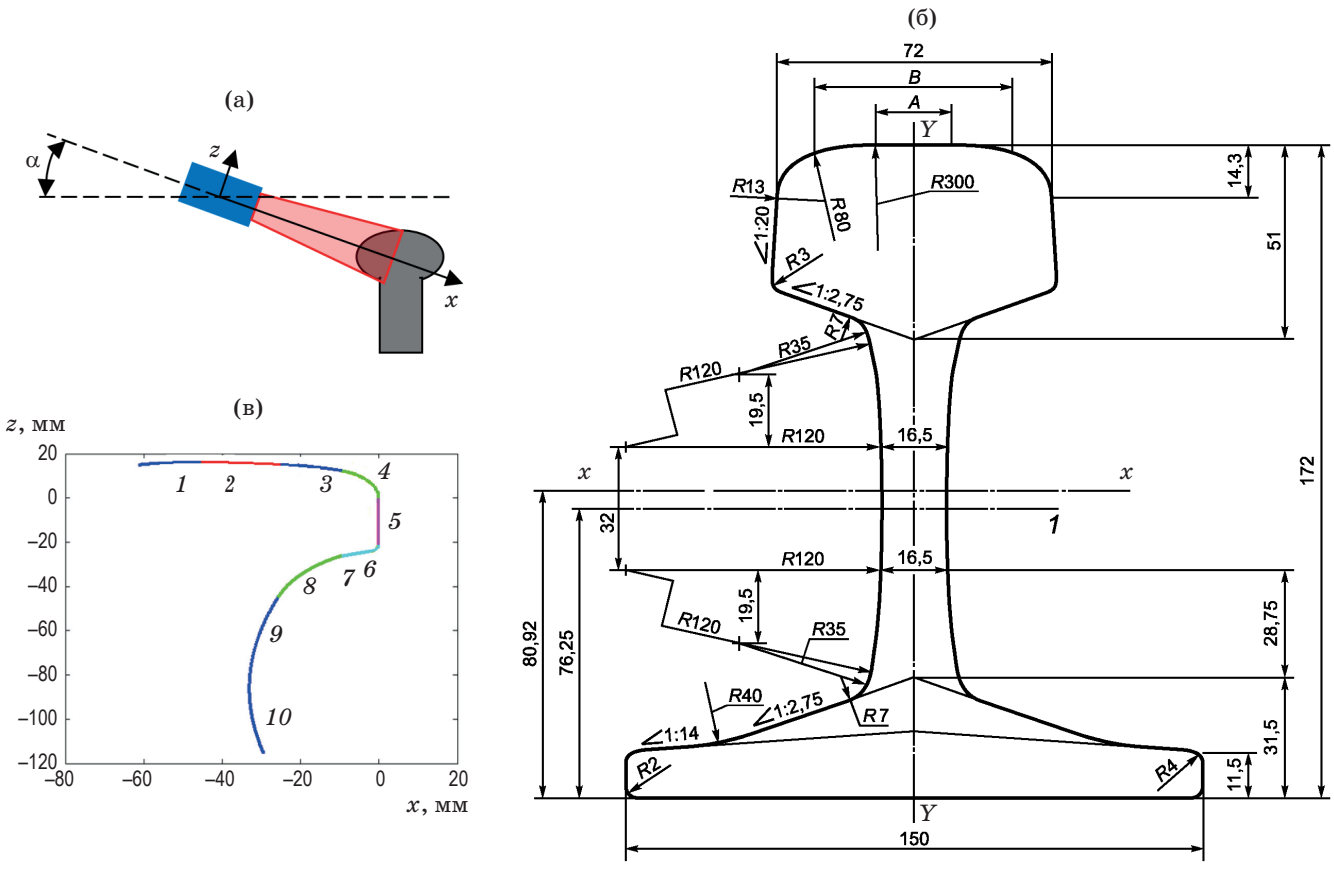

Рис. 4. Описания профиля рельса в системе координат, связанной с лазерным сканером (а), в соответствии с нормативом (б), аналитическое в виде дуг и отрезков (в).

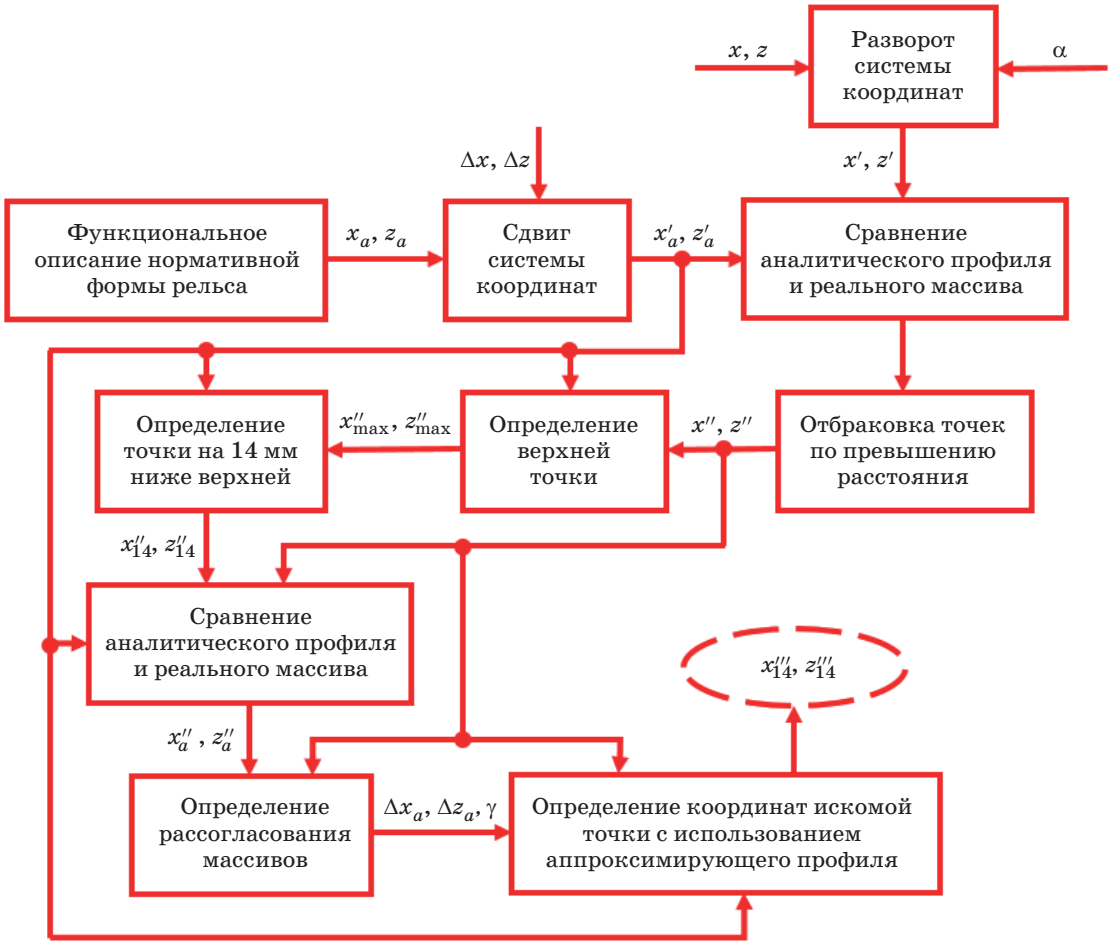

Рис. 5. Схема обработки данных, поступающих от лазерного сканера.

Каждая из двух сторон головки описывается десятью кривыми, восемь из которых являются дугами окружностей и две — отрезками прямой вида $y = kx + b$; соответствующие параметры приведены в табл. 1 и 2. Вид функционально описанного (аналитического) профиля левого рельса представлен на рис. 4в (начало координат $x_a z_a$ лежит в искомой точке на 14 мм ниже поверхности катания).

После аналитический профиль совмещается со сделанным кадром с точностью (примерно 3 мм), с которой получено ожидаемое положение точек (сдвиг на Δx,Δz), соответствующих рельсу на этом кадре (преобразование координат $x_a z_a$ в координаты $x_a' z_a'$). Далее для каждой точки, полученной от сканера (x', z'), находится ближайшая точка на аналитическом профиле (x_a', z_a') и определяется расстояние между ними (r). Точки экспериментального массива, находящиеся на слишком большом рас-

Таблица 1. Центры и радиусы дуг, составляющих номинальный профиль головки рельса

Порядковый номер кривой	x, мм	y, мм	R, мм
1	43,48	−66,13	80
2	35,98	−286,00	300
3	28,48	−66,18	80
4	12,97	−0,95	13
6	1,93	−21,43	3
8	5,75	−33,46	7
9	−10,00	−56,60	35
10	−91,20	−81,75	120

Таблица 2. Коэффициенты отрезков, составляющих номинальный профиль головки рельса

Порядковый номер кривой	k	b, мм
5	20,000	0,07
7	−0,364	−23,92

стоянии от аналитического профиля ($r > 3$ мм), подлежат отбраковке. Прошедшие такую обработку точки формируют новый массив (x'', z'').

Второй этап обработки проходят точки, попавшие в новый массив. По оставшимся точкам определяется верхний край рельса ($x''_{\max}$, $z''_{\max}$) и точка ниже его на 14 мм (x''_{14}, z''_{14}). Координаты точки ($x''_{\max}$, $z''_{\max}$) определяются усреднением координат 11 точек в ее окрестности на данном кадре для снижения случайной составляющей погрешности. Координаты точки (x''_{14}, z''_{14}) определяются аналогичным образом. Следующим шагом становится повторное совмещение аналитического профиля со сделанным кадром, точнее — оставшимся от него массивом (x'', z''), до совпадения найденной точки (x''_{14}, z''_{14}) с соответствующей ей на аналитическом профиле (сдвиг до состояния $x''_a z''_a$). После такого наложения вновь происходит сравнение аналитического и реального профилей рельса: для каждой точки экспериментальных данных (x'', z'') находится ближайшая точка на аналитическом профиле (x''_a, z''_a). Два этих множества обрабатываются до полной привязки одного к другому. Здесь может быть использован как итеративный алгоритм ближайших точек на несколько итераций [11, 12], так и аппроксимация с использованием метода наименьших квадратов. Точность методов сопоставима, однако последний более чувствителен к наличию недостоверных точек на кадре (ошибочно пропущенных на предыдущих этапах отбраковки), но отличается более высоким быстродействием, что становится существенным при работе алгоритма в реальном времени. Методом наименьших квадратов по всей совокупности точек определяются два сдвига (Δx_a, Δz_a) по каждой из координат и угол поворота (γ) одного профиля относительно другого. Полученный таким образом аппроксимирующий профиль используется для окончательного определения координат искомой точки (x'''_{14}, z'''_{14}).

Результаты измерений представлены на рис. 6а. Здесь к единой системе координат приведены аналитический профиль (x'_a, z'_a), прошедшие отбраковку результаты измерений (x'', z'') и полученный на их основе аппроксимирующий профиль. Кружком отмечена верхняя точка поверхности катания рельса, а квадратом — контролируемая точка (x'''_{14}, z'''_{14}). На рис. 6б показано, как выглядит полученный по предложенному алгоритму аппроксимирующий профиль рельса. Измеренное по приведенному кадру отклонение контролируемой точки от нормативного положения в поперечной плоскости рельсового пути (по оси x') — 10,4 мм.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

Испытания работоспособности ОИСДРП проведены на тупиковом отрезке рельсового пути. Выбор конкретных моделей датчиков осуществлен на основании того, что необходимо

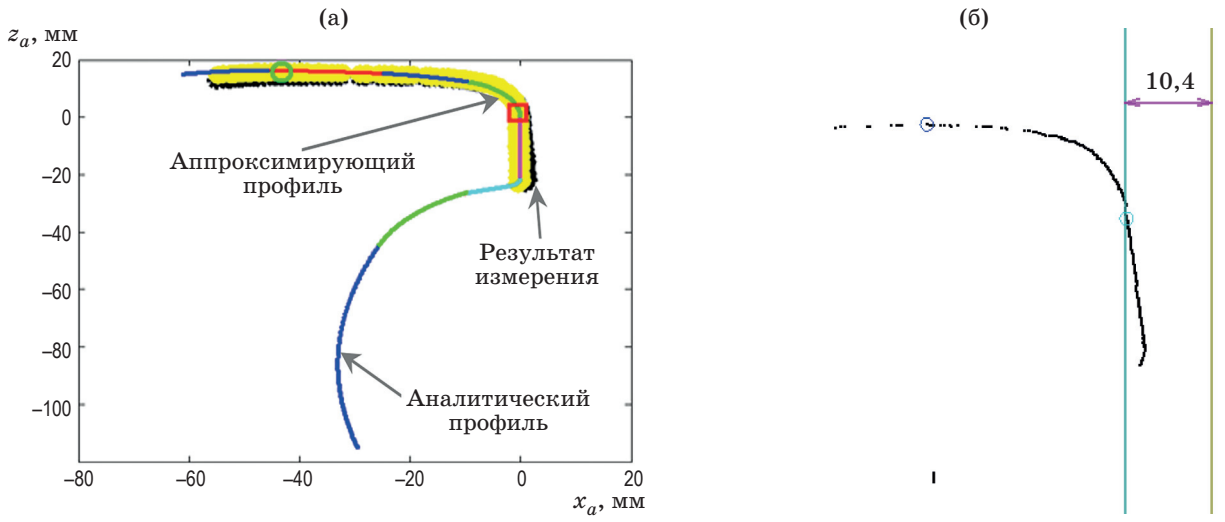

Рис. 6. Результаты обработки показаний оптического профилометра на различных этапах работы алгоритма (а), итоговый аппроксимирующий профиль (б).

выполнить требования стандарта [1] по диапазонам, точности и частоте измерений ранее перечисленных параметров пути. Так, диапазон изменения ширины колеи обуславливает требования к диапазону измерения (область, контролируемая сканером, должна совпадать с областью возможных перемещений головки рельса). Ширина может изменяться в диапазоне –15/+50 мм, т.е. поле зрения сканера должно охватывать не менее 75 мм. В условиях, в которых должны проводиться измерения, вибрации могут достигать 400 Гц с амплитудой до g. При максимальной скорости движения поезда 320 км/ч для обеспечения измерения параметров пути с шагом 25 см [1] частота измерения лазерного сканера должна быть не менее 360 Гц. Рихтовка является самым сложным измеряемым параметром. К ней предъявляют более высокие точностные требования по сравнению с другими геометрическими параметрами. При использовании предлагаемого метода измерения погрешность рихтовки определяется выражением [16]

$$\delta r = 3\delta x + \delta x^{AC} + \delta x^{AB}, \qquad (1)$$

где δx — погрешность измерения горизонтальной координаты x рельса лазерной системой триангуляции сканера, δx^{AC} — погрешность определения с помощью БИНС перемещения моноблока по координате x при его передвижении из начальной точки измерения к средней точке хорды (от A к C на рис. 1); аналогично δx^{AB} — при перемещении к дальней точке хорды. Последние составляющие будут отличаться, так как погрешность БИНС является мультипликативной во времени. В результате анализа каждой из составляющих погрешности выражение (1) примет вид [16]

$$\delta r = 3{,}45\Delta + 1{,}25KS\delta l + 1{,}5S\delta K,$$

где Δ — погрешность измерения дальности сканером, K — курс (двугранный угол между плоскостью истинного меридиана и диаметральной плоскостью вагона [17]), δK — погрешность БИНС в определении курса, S — дистанция, пройденная вагоном и определяемая длиной измерительной хорды (25 м), δl — погрешность одометра в определении пройденной дистанции S. Если максимально допустимый уход параметров ориентации, вырабатываемых БИНС, ограничить в пределах 0,01–0,1 град/ч, собственную погрешность одометра — в пределах 0,001–0,01%, то собственная погрешность сканера (Δ) должна находиться в пределах 0,01–0,1 мм.

Таблица 3. Характеристики сканера *scan*CONTROL 2650-100

Характеритика	Значение
Разрешающая способность, мкм	12
Диапазон измерений, мм ось x ось z	 100 100
Количество точек на профиль	640
Частота измерения (частота следования сканов), Гц	до 4000
Вибрация, Гц	2g/20–500
Длительность скана, мс	0,01–0,25

Для соответствия перечисленным выше требованиям в составе прототипа системы (рис. 7) использовались сканеры *scan*CONTROL 2650-100 фирмы *Micro-Epsilon*. Характеристики сканеров представлены в табл. 3 [18].

Исходя из представленных характеристик, на физический размер облучаемой сканером

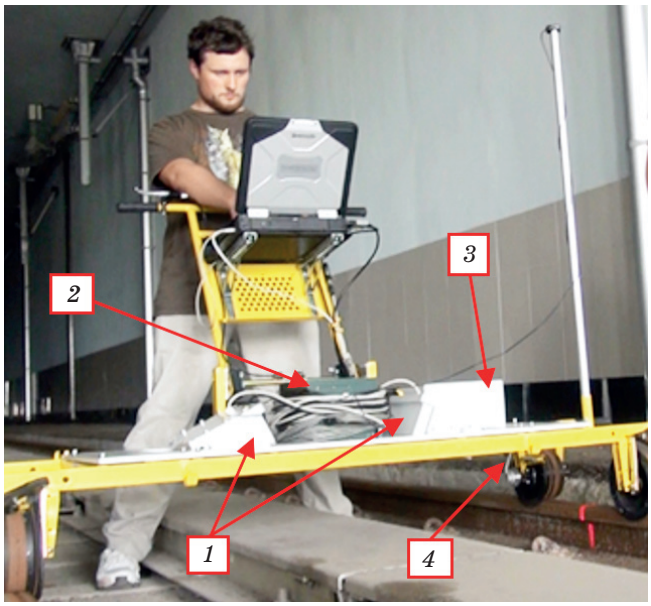

Рис. 7. Прототип системы измерения геометрии пути во время экспериментальных исследований. *1* — лазерные сканеры, 2 — БИНС, *3* — блок питания, *4* — одометр.

области 100 мм приходится 640 точек, следовательно, размер одной точки составляет 0,16 мм, что является достаточным для описания формы рельса. При этом удаление подсвеченного профиля относительно измерительной системы определяется с погрешностью 0,012 мм, что удовлетворяет требования по точности сканера. На максимальной скорости движения вагона 320 км/ч за время осуществления одного снимка (максимальная длительность скана) вдоль рельса проходится расстояние 22 мм. В рамках решаемой задачи это значение является удовлетворительным, так как, во-первых, в течение этого времени разворот измерительной системы относительно оси рельса пренебрежимо мал, во-вторых, на данной дистанции положение и форма рельса могут считаться неизменными.

Датчики устанавливались на специально изготовленный макет ходовой тележки вагона (рис. 7). Угол наклона каждого из сканеров относительно плоскости тележки (α на рис. 4а) составил 30°, расстояние между объективами сканеров — 1000 мм. Таким образом, при ширине колеи 1435 мм профиль рельса попадает в центральную часть поля зрения сканера, размер сканируемой области в которой составляет 100 мм, следовательно, при любых возможных перемещениях измерительного блока в поле зрения сканера попадают поверхность катания рельса и его боковая грань (кривые *1*–*5* на рис. 4в).

Данные всех измерительных подсистем были синхронизированы, а затем привязаны к вырабатываемым значениям пройденной дистанции. Была показана устойчивая работа системы в условиях значительной солнечной засветки.

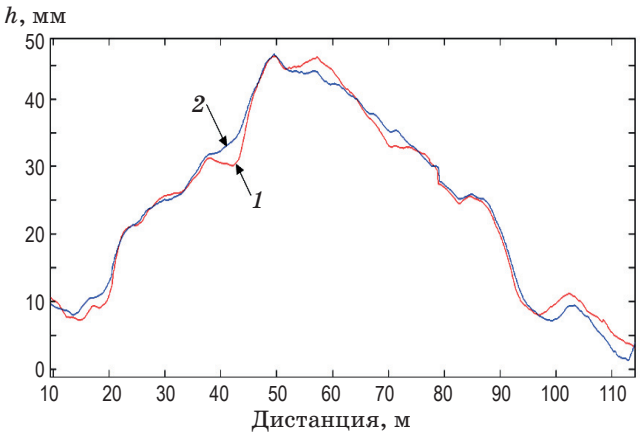

Рис. 8. Изменение возвышения одного рельса над другим при движении туда (*1*) и обратно (*2*).

Ввиду отсутствия возможности проведения измерений на аттестованном участке рельсового пути точность измерений могла быть проконтролирована только по повторяемости результатов. В каждом из заездов система перемещалась по выбранному участку рельсового пути туда и обратно (не меняя своей ориентации).

Повторяемость измеряемых параметров рельсового пути при движении туда и обратно иллюстрируется рис. 8. Было рассчитано изменение возвышения одного рельса над другим h как разница координат z' левого и правого рельсов. Погрешность в течение всего времени находилась в пределах требований стандарта [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регулярный контроль состояния рельсового пути является необходимой мерой для обеспечения безопасности железнодорожных перевозок. Одним из наиболее экономически эффективных путей обеспечения такого контроля является использование мобильных средств диагностики, имеющих возможность установки на неспециализированные железнодорожные подвижные единицы. К таким системам относится оптико-инерциальная система диагностики рельсового пути. Система измерения геометрии пути, входящая в состав разработанной системы, ярко выделяется среди аналогов, так как ее аппаратно-алгоритмическое обеспечение позволяет использовать сокращенную измерительную схему — два лазерных сканера вместо шести.

Применение лазерных триангуляционных сканеров в составе оптико-инерциальной системы диагностики рельсового пути для измерения ширины рельсового пути и других его параметров требует учета специфических условий эксплуатации системы на железной дороге. Распознавание профиля головки рельса в показаниях сканеров становится возможным только при использовании априорной информации о нормативной форме рельса и его предположительном местоположении. Предложенные методы в сочетании

с приведенным алгоритмом обработки позволяют определить положение рельсов с точностью до 0,1 мм. Проведенная апробация показала адекватность использованных решений: получена повторяемость результатов измерения параметров рельсового пути при движении туда и обратно, находящаяся в рамках европейского стандарта EN 13848 [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. EN 13848 Standard: Railway applications - Track - Track geometry quality // CEN. 2010. 94 p.
2. Технические указания по определению и использованию характеристик устройства и состояния пути, получаемых вагонами путеобследовательскими станциями ЦНИИ-4. (ЦПТ — 55/15). М.: Департамент пути и сооружений МПС России, 2003. 100 с.
3. *Кулешов П.Н.* Скоростные путеобследовательские станции ЦНИИ-4 // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. 2013. № 2(6). С. 32–33.
4. *Яковлев П.Г.* Интеллектуальные технологии контроля и диагностики // Железные дороги мира. 2017. № 2. С. 61–67.
5. *Попов Д.* Проверка в Альпах // Гудок. 2019. № 26(26635). С. 2.
6. *Bokhman E.D., Boronahin A.M., Filatov Yu.V., et al.* Optical-inertial system for railway track diagnostics // Proc. Symp. Inertial Sensors and Systems. Karlsruhe, 2014. P. 16.1–16.17.
7. *Boronahin A.M., Kukaev A.S., Larionov D.Yu,. et al.* Optical profilometers for rail track diagnostics // Proc. 2016EIConRusNW. SPb., 2016. P. 440–443.
8. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 114 с.
9. *Демкин В.Н., Степанов В.А., Шадрин М.В.* Системы быстрого прототипирования с лазерным сканированием // Научно-техн. ведомости СПбГПУ. Физико-мат. науки. 2013. № 3(177). С. 136–143.
10. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. М.: Минтранс, 2011. 530 с.
11. *Rusinkiewicz S., Levoy M.* Efficient variants of the ICP algorithm // Proc. 3rd Internat. Conf. 3-D Digital Imaging and Modeling. Quebec, 2001. P. 145–152.
12. *Велижев А.Б.* Разработка и исследование алгоритмов автоматического взаимного ориентирования трехмерных дискретных моделей объектов, полученных в результате лазерного сканирования // Автореф. канд. дис. М.: Моск. гос. ун-т геодезии и картографии, 2008. 20 с.
13. *Боронахин А.М., Бохман Е.Д., Ларионов Д.Ю.* и др. Методы и средства диагностики рельсового пути на основе инерциальных и геоинформационных технологий // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». 2012. № 5. С. 28–38.
14. ГОСТ Р 51685-2013: Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 108 с.
15. Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above; German version EN 13674-1:2011 // CEN. 2011. 114 p.
16. *Ларионов Д.Ю.* Разработка инерциально-оптической системы диагностики рельсового пути // Автореф. канд. дис. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 18 с.
17. *Бабич О.А., Доброленский Ю.П., Козлов М.С. и др.* Авиационные приборы и навигационные системы. М.: ВВИА им проф. Н.Е. Жуковского, 1981. 648 с.
18. https://www.micro-epsilon.ru/download/manuals/man--scanCONTROL-26xx--en.pdf