

На правах рукописи

Щербаков Иван Владимирович



Разработка автоматизированной системы геодезического обеспечения
строительства, реконструкции и эксплуатации железных дорог

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Карпик Александр Петрович.

Официальные оппоненты:

Брынь Михаил Ярославович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Бударова Валентина Алексеевна, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», доцент кафедры землеустройства и кадастра.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (г. Екатеринбург).

Защита состоится 21 декабря 2017 г. в 15-30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/shcherbakov-ivan-vladimirovich/>

Автореферат разослан 1 ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е. И. Аврунев

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Подписано в печать 18.10.2017. Формат 60 × 84 1/16.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 161.
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железные дороги – сложнейшие инженерные сооружения, подверженные воздействию динамических нагрузок и природно-климатических факторов. Для обеспечения их функционирования и безопасности движения в соответствии с регламентами выполняется контроль технического состояния, ежегодно проводятся работы по текущему содержанию, различным видам ремонта и модернизации. Все виды работ от контроля состояния рельсовой колеи до модернизации предусматривают измерения геометрических параметров рельсовой колеи, габаритов приближения строений, состояния земляного полотна, инженерных сооружений.

В связи с повышением скоростей движения, объемов перевозки грузов ужесточились требования к геометрии рельсовой колеи, в том числе к методам геодезического обеспечения проектирования, ремонтов (строительства) и содержания железных дорог.

Российские железные дороги (РЖД) в настоящее время осуществляют около 20 % грузооборота и 10 % пассажирооборота всех железных дорог мира. Для обеспечения эффективности железных дорог Российской Федерации (РФ) разработана стратегия развития до 2030 г. (распоряжение правительства № 877-р от 17.06.2008 г.), в соответствии с которой необходимо провести модернизацию существующих объектов инфраструктуры. Одной из важнейших задач является переход на координатные (цифровые) методы проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог (распоряжение открытого акционерного общества (ОАО) «Российские железные дороги» № 2511 от 03.12.2010 г.). В основе перехода на координатные (цифровые) методы лежит автоматизация геодезических работ при проектировании, строительстве и эксплуатации железных дорог.

Для определения геометрических параметров в настоящее время используются путеизмерительные станции, диагностические лаборатории, системы управления выправкой пути путевых машин, обеспечивающие «шаг» съемки

(0,2–0,5 м), в основе работы которых лежит определение стрел изгиба и других параметров с использованием линейных и угловых датчиков на ограниченной длиной вагона (17–22 м) измерительной базе. Кроме того, в процессе строительства и эксплуатации железных дорог широкое распространение получили различные шаблоны и специализированные приборы. Такие относительные системы измерений имеют функциональные ограничения, не позволяющие измерять длинные неровности пути в плане и профиле, особенно при повышении скоростей движения, когда необходимо измерять неровности на хорде длиной до 200 м, при этом геометрические параметры не связаны с геопространственными системами координат, что ограничивает применение цифровых технологий. При этом применение геодезических методов позволяет определять пространственные данные и геометрические параметры в одной системе координат с возможностью преобразования в другие системы координат и главное – получать в любой точке по пространственным данным геометрические параметры, в том числе, применяющиеся в 3D-системах автоматизированного управления выправкой пути. При этом применение традиционных геодезических методов для съемки в сечениях пути с «шагом» 0,2–0,5 м неэффективно из-за высокой трудоемкости. Для использования геодезических данных при определении геометрических параметров необходимо автоматизировать процесс съемки и расчета геометрических параметров в стандартах ОАО «РЖД», что позволяет перейти на использование цифровых технологий. Кроме того, автоматизация расчета геометрических параметров дает возможность повысить производительность работ при выполнении операционного контроля, исполнительных съемок и контроля качества ремонтных работ, а также определения динамики изменения геометрических параметров в процессе эксплуатации железнодорожного пути. Поэтому тема диссертационного исследования «Разработка автоматизированной системы геодезического обеспечения строительства, реконструкции и эксплуатации железных дорог» является актуальной.

Степень разработанности темы. Важную роль в развитие теории и практики геопространственных данных внесли следующие деятели отечественной и зарубежной науки: Антонович К. М., Лисицкий Д. В., Карпик А. П., Уставич Г. А., Брынь М. Я., Хорошилов В. С., Gross P., Blewitt G., Langley R., Leick A., Teunissen P. В развитие теории и практики геодезического обеспечения железных дорог внесли существенный вклад отечественные ученые: Матвеев С. И., Круглов В. М., Каугия М. Я., Левин К. М., Оккерман Г. Л., Ермаков В. М., Никитин В. Г.

Цели и задачи исследования. Целью исследований является разработка автоматизированной системы геодезического обеспечения строительства, реконструкции и эксплуатации железных дорог.

Основные задачи исследований:

- выполнить анализ существующих методов геодезического обеспечения проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог;
- разработать автоматизированную систему определения геометрических параметров рельсового пути по геопространственным данным;
- разработать программно-аппаратный комплекс для обработки данных, определения пространственного положения и геометрических параметров рельсовой колеи;
- разработать методику создания цифровых моделей пути (ЦМП) и электронных проектов строительства и ремонта железных дорог с использованием систем автоматизированного управления строительной техникой на базе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС);
- выполнить экспериментальные исследования автоматизированной системы и внедрить на сети железных дорог РФ.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований являются средства и методы геодезического обеспечения железнодорожной инфраструктуры.

Предметом исследований является технические и методические решения по геодезическому обеспечению строительства, реконструкции и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработана система, обеспечивающая определение геометрических параметров рельсовой колеи в стандартах ОАО «РЖД», которая отличается от существующих тем, что исходными данными для расчета геометрических параметров являются пространственные данные, полученные с использованием мультисистемных приемников ГНСС;

– разработана методика геодезического обеспечения реконструкции (строительства) железных дорог с применением автоматизированной системы определения геометрических параметров на базе ГНСС, отличающаяся от известных высоким уровнем автоматизации измерений и обработки данных в стандартах ОАО «РЖД».

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследований заключается в получении геометрических параметров рельсовой колеи по пространственным данным ГНСС в стандартах ОАО «РЖД».

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный аппаратно-программный комплекс (АПК) позволил автоматизировать процесс натурной съемки рельсовой колеи, заменить ранее применявшиеся на железной дороге традиционные инструментальные (электронные тахеометры, нивелиры, теодолиты) и гироскопические системы (аппаратно-программный комплекс) «Профиль», «Ручной путевой измеритель» (РПИ) (Россия) Amberg, Swisstrolleys (Швейцария) и др., требующие калибровки датчика пути, датчика ширины колеи, скорости ухода оси гироскопа, а при обработке – синхронизации гироскопических и спутниковых измерений.

Методология и методы исследования. Эмпирической базой исследования являются выполненные ранее исследования в области разработки методики из-

мерений АПК «Профиль» геометрических параметров рельсовой колеи, опыт, полученный при разработке и эксплуатации данных приборов на сети железных дорог ОАО «РЖД». При выполнении исследований использованы методы математического анализа, теории вероятностей и математической статистики, математической обработки геодезических измерений и моделирования. В качестве программного обеспечения для расчета точности и обработки полученных результатов использовались программные продукты ArcView GIS, Microsoft Office Excel, Trimble Geomatic Office.

Положения, выносимые на защиту:

– технические решения по созданию аппаратно-программного комплекса для определения пространственного положения и геометрических параметров рельсовой колеи;

– методические решения для автоматизации геодезического обеспечения реконструкции (ремонта) железных дорог при создании цифровых моделей пути и электронных проектов для систем автоматизированного управления железнодорожными строительными машинами.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует области исследования: 5 – Методы, технические средства и технологии геодезического обеспечения строительномонтажных, кадастровых, землеустроительных, проектно-изыскательских, маркшейдерских, геолого-разведочных и лесоустроительных работ; освоения шельфа; монтажа, юстировки и эксплуатации технологического оборудования паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и представлялись на следующих конференциях:

– на VIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012» (17–19 апреля 2012 г., г. Новосибирск);

– на IX Международном научном конгрессе «ИнтерэкспоГЕО-Сибирь-2013» (24–26 апреля 2013 г., г. Новосибирск).

Исследования выполнялись в рамках выполнения контрактов № Д-210/ЦДРП от 29.08.2014 г. с ОАО «РЖД», № 1636074 от 06.10.2015 г., № 2112299 от 25.10.2016 г. с ОАО «РЖД» и т. д.

Результаты исследований внедрены в ОАО «РЖД», Центральной дирекции по ремонту пути (ЦДРП), структурных подразделениях ЦДРП ЗСЖД (ПМС-20, ПМС-22, ОПМС-19, ПМС-177), ВСЖД (ПМС-66), ЗабЖД (ПМС-11, ПМС-247), а также в учебный процесс Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС) (кафедра «Инженерная геодезия», Институт перспективных транспортных технологий и переподготовки кадров, кафедра «Путь и путевое хозяйство»), Московского государственного университета путей сообщения (МГУПС), Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУП) и в акционерное общество «Казахстан темиржолы» (КТЖ) (Республика Казахстан).

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 13 научных работах, в том числе три статьи опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. По результатам исследований получено четыре патента (три – на полезную модель, один – на изобретение).

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 125 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, включающего 73 наименования, содержит 11 таблиц, 54 рисунка, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование темы диссертации и обозначена цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первом разделе выполнен анализ существующих методов геодезического обеспечения железных дорог, современного состояния автоматизации геодезического обеспечения, средств и методов измерений в России и за рубежом, показаны достоинства и недостатки средств и методов геодезического обеспечения железных дорог. Детальный анализ средств и методов измерений для определения пространственных данных и геометрических параметров на железной дороге основан на применении традиционных методов, включающих разбивочные работы с использованием электронных тахеометров, нивелиров, теодолитов и различных шаблонов. Анализ контроля геометрии рельсовой колеи показал, что геодезические средства и методы широко представлены путеизмерительными тележками: Tachy Rail фирмы «GEO-METRIKAG» (Германия); АПК «Профиль» – СГУПС (Россия, г. Новосибирск); Swisstrolleys фирмы «Terra Vermessungenag» (Швейцария); GRP System FX фирмы «Amberg Technologies» (Швейцария); РПИ (Россия, г. Самара, НПЦ ИН «Инфотранс»). Результаты анализа показали общие недостатки существующих методов геодезического обеспечения железных дорог.

Во втором разделе приведены технические решения по разработке автоматизированной системы для определения геопространственного положения и геометрических параметров рельсовой колеи.

При создании автоматизированной системы решено несколько принципиальных технических задач, обеспечивающих возможность определения геометрических параметров рельсовой колеи: разработка системы углового согласования оси ходовой тележки и вектора движения; разработка системы углового согласования геометрической оси тележки и оси железнодорожного пути; раз-

работка устройства ходовой тележки; исследования двух антенных спутниковых приемников позиционирования Global Navigation Satellite System (GNSS) с измерительными системами различных разработчиков для выбора оптимального спутникового приемника, разрабатываемой системы; разработка структурной схемы аппаратно-программного комплекса, включая работу со спутниковой референц-сетью и временными базовыми станциями; исследования точности измерений геометрических параметров, в RTK, на стенде, в полевых условиях, на эталонном участке железнодорожного пути.

Разработка, настройка и калибровка ходовой тележки, обеспечивающей угловое положение оси тележки относительно вектора движения, выполнялись на специально разработанном СГУПС совместно с Сибирским научно-исследовательским институтом метрологии (СНИИМ) стенде – имитаторе рельсовой колеи (Свидетельство в Госреестре № 29465-05).

Выполнялись исследования только двух антенных спутниковых приемников позиционирования GNSS, одна из которых является базовой для второй антенны, обеспечивая дифференциальные поправки. Приемники с одной антенной не позволяют получить пространственную ориентацию, а два приемника не обеспечивают точность взаимного положения фазовых центров антенн для определения геометрических параметров. Поэтому исследования выполнялись только по двум антенным приемникам с функцией взаимной ориентации антенн в соответствии с критериями наличия доступных протоколов обмена данными, соответствующих работе с референц-сетью и временными базовыми станциями, синхронизации и точности измерений, надежности и функциональным возможностям аппаратуры (скорость обмена данными, частота и др.). Всего исследования были выполнены по четырем фирмам, в которых имеется двухантенная аппаратура для взаимного определения их положения: Trimble (SPS855; SPS555H), Leica (ICON 80), Javad (Sigma), Topcon (OEM-1). Оборудование Sigma (Javad) при исследовании из-за ограниченных функциональных возможностей и не соответствующего требованиям протокола обмена аппаратно-программной реализации было забраковано, а из остальных по обозначен-

ным критериям выбран ICON 80. По результатам исследований разработана и создана автоматизированная система для определения геометрических параметров рельсовой колеи по пространственным данным, полученным мультисистемными приемниками ГНСС, которая получила название АПК «Профиль-М». Кинематическая схема аппаратно-программного комплекса приведена на рисунке 1.

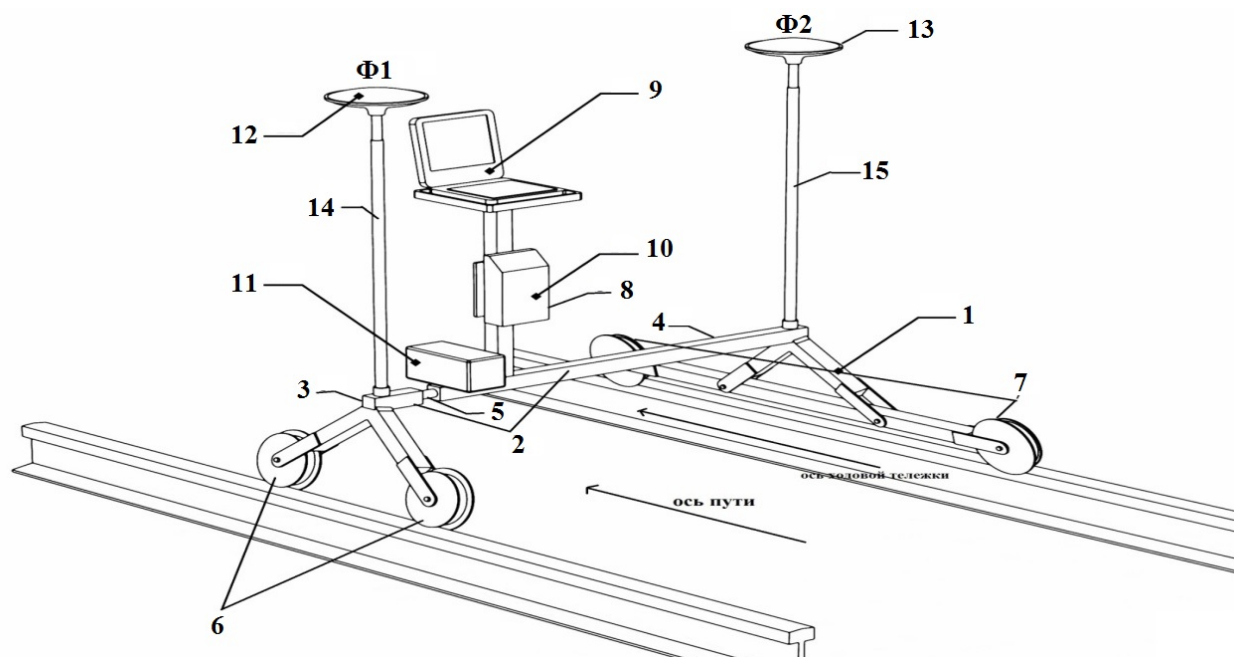


Рисунок 1 – Кинематическая схема АПК «Профиль-М»

Устройство (Пат. 2628541) (см. рисунок 1) содержит ходовую тележку 1, выполненную в виде разборной рамы 2, состоящей из подвижной части 3 и неподвижной части 4, соединенных между собой с возможностью перемещения подвижной части относительно неподвижной в зависимости от ширины колеи – направляющей 5. На подвижной части 3 установлены колесная подвижная пара 6, опирающаяся на первую рельсовую нить. На неподвижной части рамы 4 ходовой тележки 1 установлена колесная неподвижная пара 7. Рама 2, опирающаяся с помощью колесных пар 6 и 7 на рельсы, установлена перпендикулярно (под углом 90°) относительно направления движения по рельсовой колее. На раме 2 установлена платформа 8, на которой установлен бортовой компьютер 9, соединенный со спутниковым приемником 10, связанным с модемом 11. В оконечных частях ука-

занной опорной рамы 2 над соответствующими рельсовыми нитями установлены первая и вторая спутниковые антенны 12 и 13, фазовые центры Ф1 и Ф2 которых лежат на одной прямой в плоскости, перпендикулярной направлению движения ходовой тележки. Спутниковые антенны 12 и 13 связаны соответственно с первым и вторым входами спутникового приемника 10, вход-выход которого связан с модемом 11, принимающим сигналы базовой спутниковой станции 16. Выход указанного спутникового приемника 10 соединен с бортовым компьютером 9. Спутниковые антенны 12 и 13 установлены в оконечных частях рамы 2 на стойках 14 и 15 соответственно. Структурная схема АПК «Профиль-М» приведена на рисунке 2. АПК «Профиль-М» с использованием радиомодемов и (или) GSM связан с базовой спутниковой референц-станцией 16 ГНСС, включающей спутниковый приемник 17, связанный с модемом 18 и антенной 19.

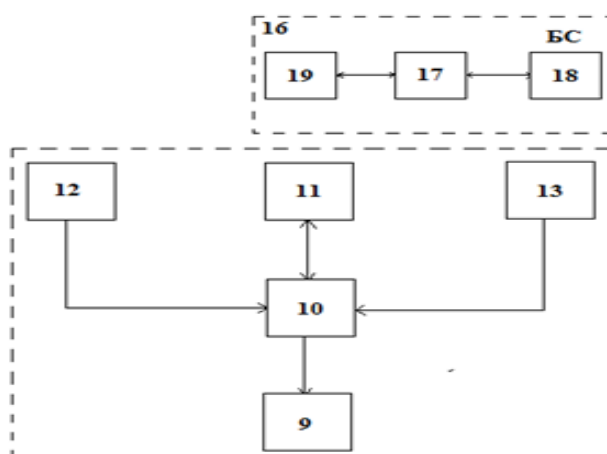


Рисунок 2 – Структурная схема АПК «Профиль-М»

Наличие двух и более антенн позволяет определять пространственную ориентацию осей ходовой тележки и соответственно вектора ее движения в двух плоскостях. Такой подход позволяет отказаться от гироскопов и акселерометров и, в конечном итоге, и от дорогостоящих инерциальных систем, работа с которыми требует калибровок и настроек как в процессе подготовки к измерениям, так и в процессе натуральных измерений.

Поэтому в основе расчета геометрии рельсовой колеи лежат координаты правой и левой рельсовых нитей, полученные мультисистемными приемниками ГНСС.

Геометрические параметры рельсовой колеи (ширина колеи, возвышение рельса, рихтовка, просадка) с использованием координатных методов определяются по соответствующим алгоритмам.

Ширина колеи (шаблон) определяется по формулам

$$\begin{cases} \Delta X = X_2 - X_1; \\ \Delta Y = Y_2 - Y_1, \end{cases} \quad (1)$$

$$l = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}, \quad (2)$$

где l – ширина колеи; X_1, Y_1, X_2, Y_2 – координаты фазового центра первой и соответственно второй спутниковой антенны.

Схема измерения показана на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема измерения ширины колеи

Возвышение рельса (уровень) ΔH определяется по формуле

$$\Delta H = H_2 - H_1, \quad (3)$$

где H_1, H_2 – высоты фазового центра первой и соответственно второй спутниковой антенны;

Схема определения приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема определения возвышения рельса

Положение рельсовых нитей в вертикальной плоскости (просадка) определяется по формулам

$$H_B = \frac{H_{i-1} + H_{i+1}}{2}, \quad (4)$$

$$\Delta H' = H_B - H_i, \quad (5)$$

где $\Delta H'$ – амплитуда рельсовой нити (просадка) в вертикальной плоскости на длине хорды $(i-1) - (i+1)$; H_i , H_{i-1} , H_{i+1} – высотные отметки фазового центра спутниковой антенны в i точках пути; H_B – средняя высотная отметка на хорде $(i-1) - (i+1)$.

Схема определения приведена на рисунке 5.

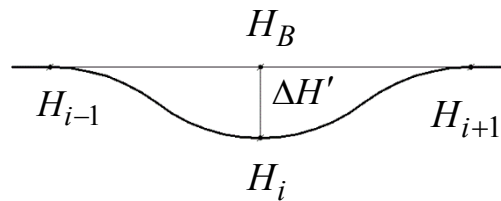


Рисунок 5 – Схема расчета неровностей рельсовой колеи в вертикальной плоскости (просадки в стандарте ЦП 515)

Положение рельсовых нитей в горизонтальной плоскости (рихтовка) определяется по формулам

$$\begin{cases} X_B = \frac{X_{i-1} + X_{i+1}}{2}; \\ Y_B = \frac{Y_{i-1} + Y_{i+1}}{2}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta X' = X_i - X_B; \\ \Delta Y' = Y_i - Y_B, \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta = \sqrt{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2}, \quad (8)$$

где δ – амплитуда рельсовой нити в плане (рихтовка) в i точке на хорде $(i-1) - (i+1)$.

Схема определения рихтовки приведена на рисунке 6.

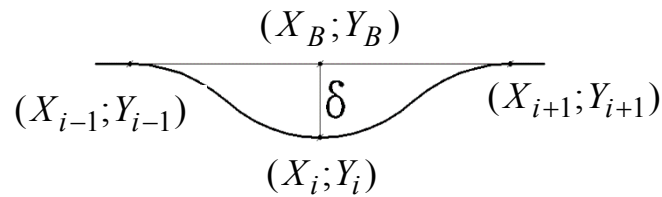


Рисунок 6 – Схема расчета неровностей рельсовой колеи в горизонтальной плоскости (рихтовка в стандарте ЦП 515)

Текущие координаты точек i фазовых центров спутниковых антенн предварительно (до расчета геометрических параметров) редуцируются на головки рельсов с учетом требований стандартов ОАО «РЖД». Например, ширина колеи определяется на 13 мм ниже верха головки рельса и т. д.

Стендовые испытания полностью подтвердили правильность выбора GNSS Leica ICON 80. Определение взаимного углового положения обеспечивалось с точностью 1,5'. Исследования точности измерения пространственных данных и геометрических параметров проводились в поле на эталонном полигоне (участок 2–3 км железнодорожного пути Новосибирск – Пашино).

Оценка точности АПК «Профиль-М» выполнялась в сравнении с данными АПК «Профиль», вагона-путеизмерителя ЦНИИ-4 и путевым шаблоном ЦУП-3. Данные оценки точности измерений геометрических параметров АПК «Профиль-М» приведены в таблице 1.

Процесс обработки пространственных данных для получения геометрических параметров выполняется в два этапа. На первом этапе исключаются грубые ошибки, на втором этапе выполняется фильтрация с использованием скользящего среднего.

Для исключения грубых ошибок разработаны критерии, в основе которых лежат геометрические особенности рельсовой колеи. Критериями фильтрации являются:

- диапазон неровностей (геометрических отклонений в плане и профиле) рельсовой колеи на ограниченном (5–10 м) отрезке железнодорожного пути;
- кривизна рельсовых нитей в плане и профиле с учетом минимальных значений радиусов, принятых на железных дорогах, в том числе ОАО «РЖД»;
- точность и диапазон измерения взаимного положения фазовых центров спутниковых антенн;
- дискретности измерений пространственных данных и определения геометрических параметров.

Таблица 1 – Данные оценки точности измерений геометрических параметров АПК «Профиль-М»

| Система контроля геометрических параметров, полученных АПК «Профиль-М» | Положения рельсовых нитей в плане | | Положения рельсовых нитей в верт. плоскости | | Ширина колеи | | Возвышение рельса | |
|--|-----------------------------------|---------|---|---------|-----------------|---------|-------------------|---------|
| | Циклы измерений | СКО, мм | Циклы измерений | СКО, мм | Циклы измерений | СКО, мм | Циклы измерений | СКО, мм |
| АПК «Профиль»* | 24 | 1 | 24 | 0,5 | 24 | 1 | 24 | 1 |
| ЦНИИ-4** | 10 | 2 | 10 | 1 | 10 | 1 | 10 | 1 |
| Путевой шаблон-ЦУП-3*** | - | - | - | - | 16 | 1 | 16 | 1 |

* АПК «Профиль» разработан в СГУПС в 2002 г. (патент № 2261302) и в настоящее время является наиболее высокоточным прибором (сертификат RU.E 27.007A № 45843) для определения геометрических параметров рельсовой колеи в стандарте ЦП 515.

** ЦНИИ-4 – вагон-лаборатория, предназначенная для контроля геометрических параметров рельсовой колеи в стандарте ЦП 515 при приемке законченных ремонтных работ железных дорог в эксплуатацию в соответствии с регламентом ОАО «РЖД».

*** Путевой шаблон (ЦУП-3) – дорожного мастера, позволяет в статике измерять ширину колеи и возвышение рельса с погрешностью 1 мм, работа регламентирована ОАО «РЖД» при текущем содержании и ремонте железных дорог.

Расчеты величин, которые необходимо исключить из процесса расчета геометрических параметров выполняются по стрелам изгиба на хорде заданной длины с учетом заданной точности, геометрических дефектов, допустимых радиусов кривизны в плане и профиле. Итогом является интегральное значение

стрелы изгиба, величина которой учитывается при обработке данных и вычисляется по формуле

$$\delta = L^2 / 8R. \quad (9)$$

Для сглаживания данных использован сглаживающий фильтр Хэппинга скользящего среднего по трем точкам ряда

$$\bar{X}_i = (0,25 X_{i-1} + 0,5 X_i + 0,25 X_{i+1}). \quad (10)$$

С учетом практической реализации использовался фильтр с общим множителем

$$\bar{X}_i = \frac{1}{4} (X_{i-1} + 2X_i + X_{i+1}), \quad (11)$$

где i – порядковый номер;

\bar{X}_i – значение скользящего среднего для порядкового номера i ;

X_i – фактическое значение в интервале сглаживания.

В третьем разделе представлена автоматическая система для определения геометрических параметров рельсовой колеи по геопространственным данным.

Автоматизированная система включает аппаратно-программный комплекс «Профиль-М» (рисунок 7), методическое программное обеспечение по обработке данных и подготовке отчетных форм в стандартах ОАО «РЖД».



Рисунок 7 – Аппаратно-программный комплекс «Профиль-М»

Технические характеристики АПК «Профиль-М» приведены в таблице 2.

АПК «Профиль-М» предназначен для автоматизации процессов определения геопространственных данных, геометрических параметров рельсовой колеи и габаритов приближения строений. На основании созданной системы автоматически получается отчетный документ в стандартах ОАО «РЖД» – карточка (паспорт) кривой, формат ФП-5.

Таблица 2 – Технические характеристики АПК «Профиль-М»

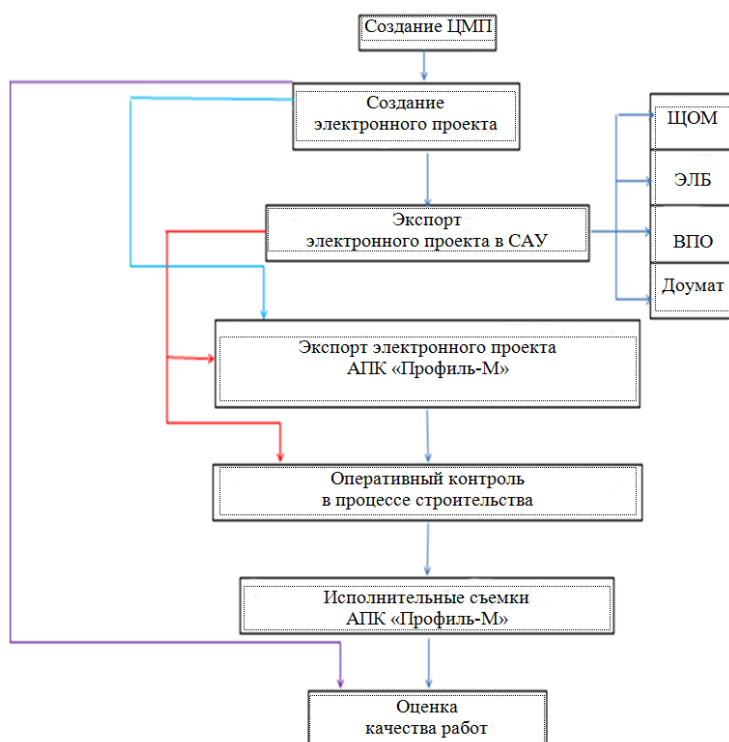
| Наименование параметра | Параметры | |
|------------------------|--------------------|-----------------------|
| | Диапазон измерения | Погрешность измерения |
| Координаты | 25 км | 10 мм + 1 ммD |
| Расстояние | 25 км | ± 0,01 % |
| Высота | 25 км | 20 мм + 1 ммD |
| Ширина колеи | 1 505–1 560 мм | ± 2 мм |
| Уровень | 0–300 мм | ± 2 мм |
| Рихтовка | ± 160 мм | ± 2 мм |
| Просадка | ± 50 мм | ± 2 мм |

В четвертом разделе представлена методика создания цифровых моделей пути и электронных проектов для систем автоматизированного управления (САУ) строительной железнодорожной техникой (САУ-3D) на базе ГНСС.

В результате диссертационного исследования создана инструкция «Геодезическое обеспечение ремонта (модернизации) железнодорожного пути с применением ГНСС и систем автоматизированного управления на их базе», которая была утверждена и введена в действие распоряжением № 3214р ОАО «РЖД» от 31.12.2015 г. Нормативная база позволяет создавать цифровые модели пути на железных дорогах, обеспечивающие создание единой координатной среды для всех потребителей информации на железной дороге, единство измерений для различных средств и методов измерений, представление и пересчет данных в новые системы координат с использованием ключей перехода (преобразований), внесение изменений в базы данных инфраструктуры после завершения ремонтов, паспортизации, инвентаризации, решение инженерных

задач (продольный профиль, габариты приближения строений, тяговые нагрузки, непогашенное ускорение и т. д.).

В основе методики создания ЦМП и электронных проектов для САУ на базе ГНСС лежит структура геодезического обеспечения ремонта (модернизации) железных дорог с использованием САУ на базе ГНСС, включающая следующие основные этапы (рисунок 8).



ЩОМ – щебнеочистительные машины типа ЩОМ-1200, RM-2002;

ЭЛБ – электробалластер типа ЭЛБ-4С; ВПО – выправочно-рихтовочно-подбивочная машина типа ВПО-3000, Доумат 09-32-CSM

Рисунок 8 – Структурная схема геодезического обеспечения ремонта участков железных дорог с применением АПК «Профиль-М»

Выполнение натуральных съемок является основным этапом и включает натурную съемку пространственного положения оси пути и геометрических параметров рельсовой колеи с использованием АПК «Профиль-М», натурную геодезическую съемку инфраструктуры – опор контактной сети (ОКС), плат-

форм, светофоров, линий связи. В процессе натурной съемки выполняется привязка объектов инфраструктуры с использованием кодов в диапазоне 01-99. Камеральные работы выполняются с применением программных продуктов: ArcView Gis 13, Trimble Business Centre, Auto CAD, Microsoft Office, а также программного обеспечения (ПО), разработанного в научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) «Диагностика дорожных одежд и земляного полотна» СГУПС: «Карточка кривой», way, Duo, Profile Duo и др.

В пятом разделе выполнены экспериментальные исследования разработанной автоматизированной системы геодезического обеспечения строительства, реконструкции и эксплуатации железных дорог на реальных объектах ОАО «РЖД». Аппаратно-программные комплексы поставлены по контрактам и успешно эксплуатируются для оперативного решения комплекса задач по геомониторингу железных дорог на Западно-Сибирской железной дороге в ПМС-№ 22, г. Омск, в ОПМС-№ 19, г. Новосибирск, на Восточно-Сибирской железной дороге в ПМС ПМС-№ 66 (станция Вихаревка), Забайкальской железной дороге и ПМС-№ 247 (г. Борзя). Оборудование, САУ-3D и аппаратно-программные комплексы «Профиль-М» поставлены по контрактам в путевую машинную станцию № 11 (г. Чернышевск Читинской области), система автоматизированного управления строительными машинами – в опытную путевую машинную станцию № 19 (г. Новосибирск), путевую машинную станцию № 20 (г. Новосибирск), путевую машинную станцию № 177 (станция Алтайская Алтайского края). Всего оборудовано 15 машин на Западно-Сибирской железной дороге (ЗСЖД), Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД), Забайкальской железной дороге (ЗабЖД), с поставкой АПК «Профиль-М» для создания электронных проектов и выполнения исполнительных съемок. В период с 2014 по 2016 г. с использованием АПК «Профиль-М» выполнена натурная съемка более 30 железнодорожных станций. Результаты внедрения показали, что применение АПК «Профиль-М» обеспечивает повышение производительности в четыре-шесть раз и сокращение затрат в три-четыре раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель достигнута. Сформулированные задачи для реализации поставленной цели решены.

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ существующих автоматизированных средств геодезического обеспечения железных дорог с использованием цифровых технологий, который показал, что средства и методы, традиционно применяемые для геодезического обеспечения железных дорог, значительно уступают в производительности и функциональных возможностях специальным измерительным системам, созданным под конкретные стандарты и технические требования, на основании анализа сформулированы задачи диссертационного исследования;

– разработана автоматизированная система для определения геодезического пространственного положения и геометрических параметров рельсовой колеи, включающая двухантенный спутниковый приемник с синхронизацией измерений и конструктивными решениями, позволяющая выполнять измерения геопространственного положения оси пути. Данная разработка позволила отказаться при создании средств измерений от дорогостоящих инерциальных систем, требующих проведения периодического контроля за уходом оси гироскопа и другими линейными и угловыми датчиками;

– разработан программно-аппаратный комплекс для определения геопространственного положения и геометрических параметров рельсовой колеи на основе автоматизированной обработки данных измерений и создания отчетных документов в стандартах ОАО «РЖД», который обеспечивает высокий уровень автоматизации геодезических измерений и получения геометрических параметров рельсовой колеи на основе геопространственных данных, вместо традиционных относительных методов в стандартах ОАО «РЖД»;

– разработана методика создания цифровых моделей пути и электронных проектов строительства и ремонта железных дорог с использованием систем

автоматизированного управления строительной техникой на базе ГНСС, позволяющая минимизировать затраты на создание ЦМП и электронных проектов. В основу методики положена жесткая связь геопространственных данных и геометрических параметров рельсовой колеи в одной системе координат и возможность преобразовывать традиционные проекты на ремонт железных дорог в форматы 3D;

– аппаратно-программные средства и методика создания цифровых моделей и электронных проектов на базе ЦМП внедрены на сети дорог ОАО «РЖД» на ЗСЖД, ВСЖД, ЗабЖД, что подтверждено актами о внедрении. Объем выполненных работ при внедрении АПК «Профиль-М» в 2015–2016 гг. составил около 3 000 км, производительность труда повысилась в четыре-шесть раз по отношению к традиционным технологиям, в зависимости от сложности объекта ремонта. Доказано, что чем сложнее объект, тем выше эффективность. Результаты диссертационного исследования успешно применяются также в образовательном процессе ФГБОУ ВО «СГУПС» при преподавании дисциплины «Инженерная геодезия».

Результаты диссертационного исследования могут использоваться при строительстве, реконструкции и эксплуатации автомобильных дорог. Перспективы дальнейших исследований должны быть направлены на внедрение результатов исследований на всей сети железных дорог ОАО «РЖД», что является основной задачей на перспективу.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Щербаков, В. В. Глобальные навигационные спутниковые системы при реконструкции пути [Текст] / В. В. Щербаков, А. С. Пикалов, И. В. Щербаков // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 5. – С. 25–27.

2 Разработка систем автоматизированного управления выправкой пути на базе ГНСС [Текст] / В. В. Щербаков, А. И. Пименов, И. В. Щербаков, О. В. Ковалева // Транспортное строительство. – 2015. – № 9. – С. 16–17.

3 Щербаков, В. В. Цифровые модели пути – основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог [Текст] / В. В. Щербаков, О. В. Ковалева, И. В. Щербаков // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 12–16.

4 Пат. 136048 Российская Федерация. RUU 1МПК Е 01 В 29/04. Устройство для выправки железнодорожного пути и способ выправки железнодорожного пути [Текст] / В. В. Щербаков, И. В. Щербаков, А. Н. Модестов, И. А. Бунцев, В. П. Славкин; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2013134278 ; заявл. 22.07.2013 ; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36. – 10 с.

5 Пат. 147033 Российская Федерация. RUU 1МПК Е 01 В 29/04 Система для управления выправкой железнодорожного пути [Текст] / В. В. Щербаков, А. И. Пименов, А. Н. Модестов, И. В. Щербаков, И. А. Бунцев, В. П. Славкин; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2014120965 ; заявл. 23.05.2014 ; опубл. 24.09.2014, Бюл. № 30. – 8 с.

6 Пат. 151873 Российская Федерация. RUU 1МПК G 01 С 21/00. Устройство для спутниковой навигации подвижного объекта железнодорожного транспорта [Текст] / В. В. Щербаков, И. А. Бунцев, И. В. Щербаков; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2014134543 ; заявл. 22.08.2014 ; опубл. 26.03.2015, Бюл. № 11. – 7 с.

7 Пат. 2628541 Российская Федерация. RUC 1МПКВ61 К9/08Е 01В 35/00. Способ определения пространственных координат и геометрических параметров рельсового пути и устройство для его осуществления [Текст] / В. В. Щербаков, И. В. Щербаков, И. А. Бунцев ; заявитель и патентообладатель В. В. Щербаков. – 2016106560 ; заявл. 24.02.2016 ; опубл. 18.08.2017, Бюл. № 23. – 7 с.

8 Щербаков, В. В. Анализ способов постановки железнодорожного пути в проектное положение при реконструкции (модернизации) и эксплуатационной

работе [Текст] / В. В. Щербаков, И. В. Щербаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 87–92.

9 Разработка систем автоматизированного управления выправкой пути на базе ГНСС [Текст] / В. В. Щербаков, И. А. Бунцев, И. В. Щербаков, О. В. Ковалева, А. И. Пименов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 113–118.

10 Опыт эксплуатации систем автоматизированного управления выправкой пути на ЗСЖД ОАО «РЖД» [Текст] / В. В. Щербаков, И. А. Бунцев, О. В. Ковалева, И. В. Щербаков, А. И. Пименов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 119–124.

11 Щербаков, И. В. Геодезические методы определения геометрических параметров рельсовой колеи [Текст] / И. В. Щербаков // XLI Междунар. науч. конф. на тему «Инновационные технологии на транспорте : образование, наука, практика», 3–4 апр. 2017 г., Алматы : сб. материалов в 1 томе. – Т. 1. – Алматы : КазАТК, 2017. – Т. 1. – С. 366–371.

12 Щербаков, И. В. Геодезические методы определения геометрических параметров рельсовой колеи [Текст] / И. В. Щербаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 17–23.

13 Щербаков, В. В. Применение ГНСС и ГИС технологий в ОАО «РЖД» [Текст] / В. В. Щербаков, И. В. Щербаков, А. А. Земерова // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 38–40.