

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-15-23

УДК 681.786

Анализ дополнительных погрешностей оптико-электронной системы контроля положения железнодорожного пути

Нгок Туан Фам¹, Александр Николаевич Тимофеев²,
 Валерий Викторович Коротаев³, Виктория Александровна Рыжова⁴,
 Жозл Жозе Пуга Коэльо Родригеш⁵

^{1,2,3,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁵ Федеральный университет Пиауи, Терезина, 64049-550, Бразилия

⁵ Институт телекоммуникаций, Ковилья, 6201-001, Португалия

¹ NgocTuan1301@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4045-1933>

² timofeev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>

³ vvkorotaev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

⁴ victoria_ryz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-1894>

⁵ joeljr@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена дополнительная погрешность контроля положения железнодорожного пути стереоскопическими методами и оценка степени влияния составляющих погрешности на результат измерения линейных смещений пути в профиле и плане. **Метод.** Предложен метод оценки дополнительных погрешностей стереоскопической оптико-электронной системы контроля положения пути по активным реперным меткам, расположенным на опорах контактной сети. На основе компьютерного моделирования исследована степень влияния составляющих погрешности системы на суммарную величину дополнительной погрешности. Выводы сформулированы на основе анализа диаграмм, полученных на компьютерной модели, и результатов экспериментального исследования технологических образцов системы. **Основные результаты.** Получена взаимосвязь линейных смещений пути в профиле и в плане с координатами реперных меток, а также параметров элементов системы с информативными параметрами сигнала. Предложено математическое описание составляющих дополнительных погрешностей стереоскопической системы при изменениях температуры среды, амплитуды вибрации, вертикального градиента температуры воздушного тракта и скорости перемещения. Показано, что наибольшее влияние на суммарную дополнительную погрешность по степени убывания оказывают составляющие погрешности, обусловленные вибрациями, инерционностью системы, температурной деформацией корпуса. Теоретические, экспериментальные и натурные испытания показали, что оценка случайной составляющей погрешности контроля смещений при измерениях положения пути не превышает в продольном профиле 0,8 мм, а в плане — 1,8 мм. **Практическая значимость.** Разработана методика исследования дополнительных погрешностей определения смещения пути в профиле и в плане средствами стереоскопической системы контроля. Предложены рекомендации для снижения наиболее сильно влияющих составляющих дополнительной погрешности. Созданы стенд и программное обеспечение для статических и динамических испытаний физических моделей. Предложенные решения направлены на достижение полной автоматизации контроля фактического положения железнодорожного пути при обслуживании технологий непрерывной выправки высокопроизводительными путевыми машинами с использованием стереоскопических оптико-электронных систем. Полученные результаты могут быть использованы разработчиками высокоточных оптико-электронных систем обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Ключевые слова

стереоскопическая оптико-электронная система, оптоэлектронные элементы, изменения температуры, вибрации, градиент температуры, воздушный тракт, измерения координат метки, фотоприемное матричное поле, погрешность измерения

Благодарности

Работа финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант 08-08); ФСТ/МСТЭС за счет национальных фондов и софинансируемых фондов ЕС в рамках проекта UIDB/50008/2020; и Бразильским национальным советом по научному и технологическому развитию — CNPq, грант № 309335/2017-5.

© Нгок Туан Фам, Тимофеев А.Н., Коротаев В.В., Рыжова В.А., Родригеш Ж.Ж.П.К., 2021

Ссылка для цитирования: Нгок Туан Фам, Тимофеев А.Н., Коротаев В.В., Рыжова В.А., Родригеш Ж.Ж.П.К. Анализ дополнительных погрешностей оптико-электронной системы контроля положения железнодорожного пути // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 15–23. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-15-23

An analysis of additional errors of the optical-electronic system for monitoring the railway track position

Ngoc Tuan Pham¹, Aleksandr N. Timofeev², Valery V. Korotaev³✉, Victoria A. Ryzhova⁴, Joel Jose Puga Coelho Rodrigues⁵

^{1,2,3,4,5} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁵ Federal University of Piauí, Teresina, 64049-550, Brazil

⁵ Instituto de Telecomunicações, Covilhã, 6201-001, Portugal

¹ Ngoc Tuan Pham, NgocTuan1301@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4045-1933>

² Aleksandr N. Timofeev, timofeev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>

³ Valery V. Korotaev, vvkorotaev@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

⁴ Victoria A. Ryzhova, victoria_ryz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-1894>

⁵ Joel Jose Puga Coelho Rodrigues, joeljr@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>

Abstract

Subject of research. The paper considers an additional error in the railway track position control by stereoscopic methods and examines how the components of the error influence on the measurement results of linear displacements of the track in the profile and plan. **Method.** The authors propose to use active reference marks located on the supports of the contact network and describe a method for assessing additional errors of the track position control made by a stereoscopic optical-electronic system. On the basis of computer modeling, we investigate the degree of influence of the components of the system error on the total value of the additional error. The conclusions are formulated through analysis of the diagrams obtained via a computer model and the results of an experimental study of the system's technological samples. **Main results.** The work reports on the relationship between the linear displacements of the track in the profile and plan with the coordinates of the reference marks as well as the parameters of the system elements with the informative parameters of the signal. A mathematical description of the components of additional errors of the stereoscopic system with changes in the medium temperature, vibration amplitude, vertical gradient of the air path temperature, and movement speed is proposed. It is shown that the components of the error caused by vibrations, inertia of the system, and thermal deformation of the base unit produce the greatest effect on the total additional error in decreasing order. Theoretical, experimental and field testing have shown that the assessment of the random component of the displacement control error when measuring the track position does not exceed 0.8 mm in the longitudinal profile, and 1.8 mm in the plan. **Practical relevance.** The authors developed a method for studying additional errors in determining the displacement of the track in the profile and in the plan by means of a stereoscopic control system. The prepared recommendations can reduce the most strongly influencing components of the additional error. A stand and software for static and dynamic testing of physical models have been created. The proposed solutions are aimed at achieving full automation of control of the actual position of the railway track when servicing continuous straightening technologies with high-performance track machines using stereoscopic optical-electronic systems. The results can be applied by developers of high-precision optical-electronic systems for ensuring the safety of railway traffic.

Keywords

stereoscopic optical-electronic system, optoelectronic elements, temperature changes, vibrations, temperature gradient, air path, mark coordinates measurements, photo-receiving matrix field, measurement error

Acknowledgements

This work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Grant 08-08, by FCT/MCTES through national funds and co-funded EU funds under the Project UIDB/50008/2020; and by Brazilian National Council for Scientific and Technological Development — CNPq, via Grant No. 309335/2017-5.

For citation: Pham N.T., Timofeev A.N., Korotaev V.V., Ryzhova V.A., Rodrigues J.J.P.C. An analysis of additional errors of the optical-electronic system for monitoring the railway track position. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 15–23 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-15-23

Введение

Измерение геометрии железнодорожного пути — задача принципиальной важности для своевременного выявления опасных для движения поездов деформаций пути на этапах его строительства и регулярного ремонта [1–3]. Геометрические параметры железнодорожного пути поддерживаются благодаря его выправке и рихтовке в процессе периодического обслуживания специализированными путевыми машинами и комплек-

сами [4–7]. Специальные реперные сети для контроля положения железнодорожного пути в профиле и плане [8] являются физической основой информационных систем контроля пространственного положения пути. Марки специальной геодезической сети реализованы в виде анкеров на опорах контактной сети.

Требуемая высокая точность и производительность контроля фактического положения железнодорожного пути может обеспечиваться интеграцией инерциальной навигационной системы с геодезической сетью желез-

ной дороги, дополненной специальной аппаратурой [9], реализующей распределенный метод контроля пути по маркам реперной сети [10, 11]. При этом проблемой остается создание измерительных систем, которые могли бы гарантировать полную автоматизацию контроля фактического положения железнодорожного пути при реализации технологий непрерывной выправки пути машинами на скорости до 10 км/ч.

Указанные системы должны удовлетворять требованиям по точности и диапазону многокоординатных измерений, а именно, определять положение пути:

- 1) в продольном профиле (смещения в диапазоне до 300 мм) и в плане (на дистанции от 2 до 7 м) с погрешностями, не превышающими единицы миллиметров;
- 2) по уровню (в диапазоне ± 10 угловых градусов) с погрешностью в несколько угловых секунд [1, 9, 12].

Принцип действия оптико-электронной системы контроля положения железнодорожного пути (СОЭСКПП) основан на применении активных реперных меток (РМ) [13] и на синхронной обработке изображений РМ на фотоприемных матричных полях.

СОЭСКПП, реализуя требования по диапазону и точности контроля в ограниченных диапазонах условий эксплуатации и скоростей непрерывной выправки пути, не всегда обеспечивает выполнение требований по точности в реальных климатических и производственных условиях эксплуатации.

Целью настоящей работы является оценка степени влияния дополнительных составляющих погрешности СОЭСКПП, обусловленных воздействием температуры среды, вибраций, вертикального градиента температуры воздушного тракта и постоянной времени электронного тракта обработки информации при изменениях скорости движения.

Работа распределенной СОЭСКПП в схеме контроля положения пути по реперной сети

СОЭСКПП включает в себя базовый блок 1 (рис. 1, а), расположенный на измерительной тележке

D, которая перемещается по железнодорожному пути вместе с путевой машиной со скоростью V_x , и установленные на опорах $B_n, B_{n+1} \dots$ контактной сети железной дороги РМ 2, которые содержат полупроводниковый источник оптического излучения 3, отражатель индикатора опор 4, блок питания источника и сопряжены с марками *C* специальной реперной сети.

Базовый блок 1 СОЭСКПП определяет текущее положение пути *A'* (система координат $O'_\Pi X'_\Pi Y'_\Pi Z'_\Pi$) относительно проектного положения пути *A* (система координат $O_\Pi X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$) преобразованием текущих координат РМ в приборной системе координат $O_B X_B Y_B Z_B$ в искомые координаты смещения пути y_Π^Π и z_Π^Π относительно его проектного положения. В процессе работы базового блока определяется и положение пути по уровню φ_x .

Искомые смещения пути в профиле y_Π^Π , в плане z_Π^Π и по уровню φ_x связаны с линейными координатами смещений центра O_B базового блока 1 СОЭСКПП y_B^Π, z_B^Π и координатами РМ y_M^Π, z_M^Π в проектной системе координат $O_\Pi X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$ следующими соотношениями:

$$y_\Pi^\Pi = y_M^\Pi - (y_M^B + y_B^\Pi) \cos \varphi_x + (z_M^B + z_B^\Pi) \sin \varphi_x, \quad (1)$$

$$z_\Pi^\Pi = z_M^\Pi - (y_M^B + y_B^\Pi) \sin \varphi_x - (z_M^B + z_B^\Pi) \cos \varphi_x. \quad (2)$$

Из выражений (1), (2) видно, что погрешности контроля смещений железнодорожного пути δy_Π^Π и δz_Π^Π будут зависеть от погрешности задания линейных параметров размещения базового блока СОЭСКПП y_B^Π, z_B^Π , которые могут быть сведены до ничтожно влияющих величин, а также от погрешностей измерения угла φ_x и определения координат РМ y_M^B и z_M^B в приборной системе координат $O_B X_B Y_B Z_B$ средствами СОЭСКПП.

В оптимальной конфигурации базовый блок 1 СОЭСКПП включает в себя два видеомодуля 5, содержащих объектив и матричный приемник оптического излучения (МПОИ), индикатор опор 6, блок управления и обработки 7 и электронный уровень 8.

Два видеомодуля 5 образуют стереосистему, позволяющую обеспечить получение совокупности цифро-

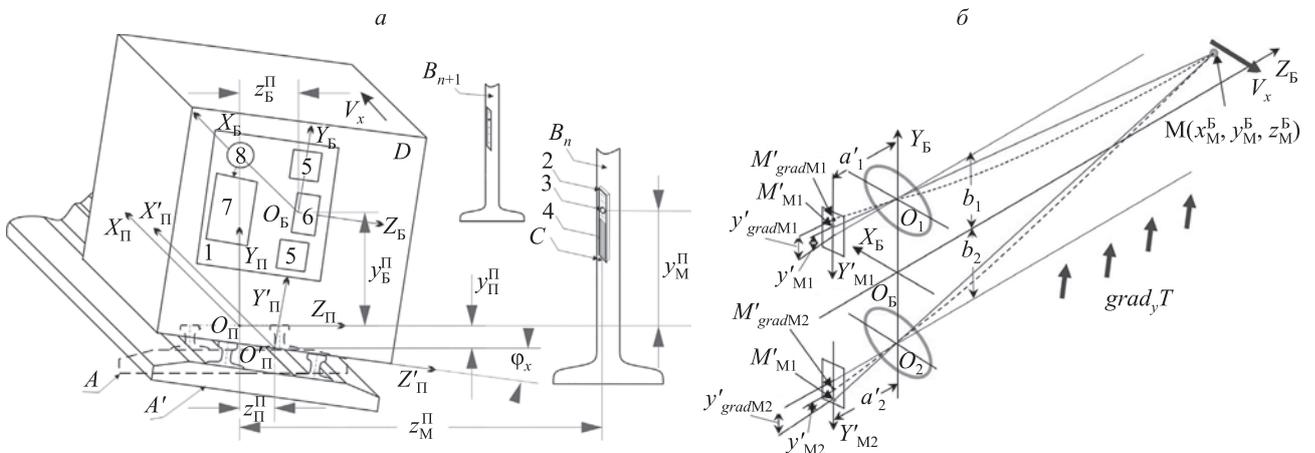


Рис. 1. Схема размещения элементов оптико-электронной системы контроля положения железнодорожного пути (а), ход лучей в оптической схеме базового блока для двух систем координат матричных полей анализа (б)

Fig. 1. The layout element component of the stereoscopic optical-electronic system for monitoring the railway track position using active reference marks located on the supports of the contact network (а), Schemes of the optical setup and ray paths (б)

вых изображений источника 3, координаты центра М которого рассматриваются как координаты РМ и как координаты марки специальной реперной сети.

Для случая, когда центр O_B (рис. 1, б) находится между входными зрачками объективов стереосистемы на равном расстоянии от их главных точек, а оптические оси параллельны, координаты y_M^B и z_M^B точки М в приборной системе координат $O_B X_B Y_B Z_B$ СОЭСКПП определяются следующими выражениями [14, 15]:

$$y_M^B = (a'_1 b_1 y'_{M2} + a'_2 b_2 y'_{M1}) / (a'_1 y'_{M2} - a'_2 y'_{M1}), \quad (3)$$

$$z_M^B = -(a'_1 a'_2 (b_1 + b_2) / (a'_1 y'_{M2} - a'_2 y'_{M1})), \quad (4)$$

где a'_1 и a'_2 — задние отрезки объективов видеомодулей; b_1 и b_2 — расстояния от центра O_B приборной системы координат до оптических осей первого и второго видеомодулей соответственно; y'_{M1} и y'_{M2} — координаты центров изображений РМ на матричном поле анализа в первом и втором видеомодуле соответственно.

Из выражений (1)–(4) следует, что основными информативными параметрами в СОЭСКПП для определения координат точки М при ее смещении из проектного положения пути А в текущее А', являются координаты центров изображений РМ y'_{M1} и y'_{M2} .

Оценка погрешности определения координат РМ при температурных изменениях линейных размеров корпуса базового блока

При эксплуатации СОЭСКПП максимальный перепад температуры ΔT окружающей среды относительно значения, соответствующего нормальным условиям, составляет 30 К.

Изменение температуры в диапазоне от -10°C до $+50^\circ\text{C}$ носит случайный характер во времени и вызывает изменение линейных размеров корпуса базового блока. Для однородного материала корпуса возникает смещение плоскости изображений относительно плоскости МПОИ вдоль оптической оси, а также увеличение размера базы стереосистемы. Поскольку воздействие температуры на видеомодули происходит одновременно, то изменение линейных размеров при перепаде температуры ΔT вызовет суммарные погрешности $\sum \delta y_{\Delta T}^B$ и $\sum \delta z_{\Delta T}^B$, определяемые выражениями

$$\begin{aligned} \sum \delta y_{\Delta T}^B &= \alpha_{Al} (y_M^B + b)^2 \Delta T / b \\ \text{и } \sum \delta z_{\Delta T}^B &= \alpha_{Az} z_M^B (y_M^B + 2b) \Delta T / b, \end{aligned} \quad (5)$$

где α_{Al} — коэффициент линейного расширения материала корпуса; $b = b_1 + b_2$ — базовое расстояние между оптическими каналами базового блока (рис. 1, б).

Исследование погрешности на компьютерной модели с применением формул (5) показало, что для значений параметров $b = 300$ мм, $\alpha_{Al} = 22,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [16], $\Delta T = 30$ К, $z_M^B = 7000$ мм, $y_M^B = 140$ мм суммарные дополнительные погрешности измерения координат РМ в профиле $\sum \delta y_{\Delta T}^B$, составляют величину 0,2 мм и превышают 10 мм в плане $\sum \delta z_{\Delta T}^B$, что недопустимо.

Рассмотренные погрешности не могут быть скомпенсированы с помощью калибровки, поскольку носят во времени случайный характер. Для их снижения тре-

буется либо ослабить влияние температурного фактора за счет специальных конструктивных решений по подбору материалов базового блока [16], либо выполнить коррекцию результатов измерений с учетом информации от датчиков температуры корпуса.

Оценки на компьютерной модели показали, что при температурной коррекции с погрешностью определения температуры корпуса, равной 1 К, остаточные погрешности могут уменьшиться до значений $\sum \delta y_{\Delta T}^B = 0,02$ мм и $\sum \delta z_{\Delta T}^B = 0,2$ мм.

Оценка погрешности определения координат РМ, обусловленной вибрациями базового блока

Анализ измерений параметров вибраций в наименее благоприятных условиях эксплуатации СОЭСКПП при движении путевой машины ВПО-3000 №3 со скоростью 1,5–2 км/ч на щебеночном балласте (рельсы Р-65 с железобетонными шпалами) показал, что основная частота вибраций исполнительных подбивочных органов машины составляет 33 Гц [17]. Для однородных условий работы системы (постоянная скорость движения, однородный балласт и т. д.) процесс флуктуации амплитуды вибрационных колебаний базового блока можно считать стационарным. Оценка среднего квадратического отклонения (СКО) флуктуаций амплитуды вибраций в направлении выправки пути в профиле (рис. 1, а) составляет $\sigma_B = 0,2$ мм, при этом амплитуда изменяется в диапазоне 0,14–0,23 мм с доверительной вероятностью 0,95 [17].

В этом случае СКО определения координат РМ δy_B в каждом из видеомодулей СОЭСКПП будет определяться выражением [18]

$$\delta y_B = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\Phi(j\omega)|^2 S_B(\omega) d\omega}, \quad (6)$$

где $\Phi(j\omega)$ — частотная передаточная функция электронного тракта обработки информации СОЭСКПП по исследуемой координате; $S_B(\omega)$ — спектральная плотность мощности распределения амплитуд вибрационных колебаний; ω — круговая частота гармонического колебания.

С некоторым допущением, применимым к оптико-электронным системам управления и слежения, электронный тракт обработки информации в СОЭСКПП можно характеризовать частотной передаточной функцией $\Phi(j\omega)$ для инерционного звена первого порядка [19]. В связи с этим, с учетом формулы (6), при одинаковых параметрах каналов СОЭСКПП, погрешности определения координат РМ $\sum \delta y_B^B$ по оси $O_B Y_B$ и $\sum \delta z_B^B$ по оси $O_B Z_B$ от воздействия вибрации могут быть определены из следующих формул:

$$\begin{aligned} \sum \delta y_B^B &= \sigma_B \sqrt{\frac{1}{\pi(1 + 2\alpha_B \tau)}}, \\ \sum \delta z_B^B &= \frac{\sigma_B z_M^B}{b} \sqrt{\frac{1}{\pi(1 + 2\alpha_B \tau)}} \end{aligned} \quad (7)$$

где $\alpha_B < 0,32 \text{ мм}^{-1}$ — коэффициент, определяющий затухание корреляционной функции случайного процес-

са; $\sigma_B = \sigma_B^y = \sigma_B^z$ — оценки СКО флуктуации амплитуды вибрации (в общем случае имеют разные значения при измерениях координат РМ в плане σ_B^z и в профиле σ_B^y); τ — постоянная времени СОЭСКПП (практически определяется частотой кадров видеомодуля $f_{\max} = 70$ кадр/с).

В результате компьютерного моделирования для указанных параметров (7) получено, что суммарная погрешность определения координат смещений РМ в профиле $\sum \delta y_B^B$ не превышает 0,1 мм, что вполне допустимо. В свою очередь, суммарная погрешность определения координат РМ в плане $\sum z_B^B$ для $z_M^B = 7000$ мм в пять раз больше, чем погрешность в профиле $\sum \delta y_B^B$, что и требует ее учета.

Оценка погрешности определения координат РМ, обусловленная инерционностью электронного тракта обработки информации

Вынужденные колебания, возникающие при движении выправочной машины с измерительной тележкой по неровностям железнодорожного пути, являются входными информативными параметрами, которые должны регистрироваться СОЭСКПП. В этом случае преобразование сигналов в электронном тракте системы сопровождается инерционными физическими процессами, которые приводят к погрешностям определения координат РМ.

Рассматривая СОЭСКПП как инерционное звено первого порядка, получим, что СКО погрешности δy_D^B воспроизведения реализации случайного входного сигнала (смещение пути) в канале СОЭСКПП определяется выражением [18]

$$\delta y_D^B = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |1 - \Phi(j\omega)|^2 S_{\text{ЖД}}(\omega) d\omega},$$

где $S_{\text{ЖД}}(\omega)$ — спектральная плотность мощности распределения колебаний амплитуд неровностей пути [20].

С учетом того, что составляющие погрешности в каналах имеют сильную корреляцию в связи с наличием единого источника колебаний (неровностей пути), суммарные составляющие погрешности, обусловленные перемещением СОЭСКПП по железнодорожному пути вдоль оси $O_B Y_B$ $\sum \delta y_D^B$ и вдоль оси $O_B Z_B$ $\sum \delta z_D^B$ при одинаковых параметрах каналов ОЭСКПП будут определяться выражениями

$$\begin{aligned} \sum \delta y_D^B &= \sigma_D^y \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ЖД}} \tau + (\alpha_{\text{ЖД}}^2 + \beta_{\text{ЖД}}^2) \tau^2}{\pi[(1 + \alpha_{\text{ЖД}} \tau)^2 + \beta_{\text{ЖД}}^2 \tau^2]}} \\ \text{и } \sum \delta z_D^B &= \frac{z_M^B \sigma_D^z}{b} \sqrt{\frac{\alpha_{\text{ЖД}} \tau + (\alpha_{\text{ЖД}}^2 + \beta_{\text{ЖД}}^2) \tau^2}{\pi[(1 + \alpha_{\text{ЖД}} \tau)^2 + \beta_{\text{ЖД}}^2 \tau^2]}} \end{aligned} \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{ЖД}}, \beta_{\text{ЖД}}$ — коэффициенты, обусловленные неровностями пути; σ_D^y, σ_D^z — оценки СКО флуктуации амплитуды неровностей.

Оценки погрешностей при движении по пути со скоростью 10 км/ч, полученные при значениях параметров пути $\alpha_{\text{ЖД}} = 0,072 \text{ м}^{-1}$, $\beta_{\text{ЖД}} = 0,265 \text{ м}^{-1}$ и $\sigma_D^y = 6,12 \text{ мм}$ [20], показали, что для дистанции $z_M^B = 7000 \text{ мм}$ в диапазоне изменений постоянной

времени системы τ от 0,143 с до 0,014 с суммарная погрешность определения координат РМ, вызванная инерционностью электронного тракта системы, в профиле $\sum \delta y_D^B$ изменяется от 0,58 до 0,18 мм, в то время как погрешность $\sum \delta z_D^B$ будет больше, чем $\sum \delta y_D^B$, в пять раз. Регулируя постоянную времени в зависимости от скорости движения, обусловленной технологией выправки, можно существенно снижать анализируемую погрешность.

Оценка погрешности определения координат РМ, обусловленная вертикальным градиентом температуры воздушного тракта

Оптическое излучение от РМ до базового блока распространяется в слое атмосферы, непосредственно прилегающем к поверхности земли, практически на высоте до 1 м. Наличие вертикального градиента температуры воздушного тракта $grad_y T$ вызывает отклонение оптического луча от прямолинейного распространения [21, 22], зависящее от времени суток и года [23]. Это явление приводит к смещениям изображений РМ на МПОИ в видеомодулях. При этом вертикальные координаты смещенных изображений источника 3 M'_{gradM1} и M'_{gradM2} (рис. 1, б) будут, соответственно, y'_{gradM1} и y'_{gradM2} :

$$\begin{aligned} y'_{gradM1} &= a'_1 \frac{nTy'_{M1} + a'_1(n-1)grad_y Tz_M^B}{nTa'_1 - (n-1)grad_y Ty'_{M1}z_M^B} \\ \text{и } y'_{gradM2} &= a'_2 \frac{nTy'_{M2} + a'_2(n-1)grad_y Tz_M^B}{nTa'_2 - (n-1)grad_y Ty'_{M2}z_M^B} \end{aligned} \quad (9)$$

где y'_{M1}, y'_{M2} — вертикальные координаты изображений РМ, измеренные в условиях отсутствия $grad_y T$; T — средняя температура воздуха; n — показатель преломления воздуха при нормальных условиях ($n \approx 1,00029$).

С помощью выражений (3), (4), (9) произведены оценки погрешностей определения координат РМ $\sum \delta y_{grad}^B$ и $\sum \delta z_{grad}^B$ от воздействия максимально возможной величины вертикального градиента температуры $grad_y T = 1,4 \text{ К/м}$ [23]. Оценки показали, что влияние вертикального градиента температуры на погрешность измерения координат РМ в профиле возрастает с увеличением расстояния от РМ до проектного положения пути и достигает значения $\sum \delta y_{grad}^B = 0,25 \text{ мм}$ на максимальной дистанции $z_M^B = 7000 \text{ мм}$. Влияние вертикального градиента температуры на суммарную погрешность в плане $\sum \delta z_{grad}^B$ незначительно и составляет несколько тысячных долей миллиметра.

Оценка суммарной дополнительной погрешности системы

Все рассмотренные составляющие погрешности считаются случайными и распределенными по нормальному закону, поэтому расчет зависимостей суммарных дополнительных погрешностей $\sum \delta y_{\Sigma}^B$ и $\sum \delta z_{\Sigma}^B$ от их частных составляющих погрешностей (5)–(9) можно осуществлять в соответствии с выражениями:

$$\sum \delta y_{\Sigma}^B = \sqrt{(\sum \delta y_{\Delta T}^B)^2 + (\sum \delta y_B^B)^2 + (\sum \delta y_D^B)^2 + (\sum \delta y_{grad}^B)^2}, \quad (10)$$

$$\sum \delta z_{\Sigma}^B = \sqrt{(\sum \delta z_{\Delta T}^B)^2 + (\sum \delta z_B^B)^2 + (\sum \delta z_D^B)^2 + (\sum \delta z_{grad}^B)^2}. \quad (11)$$

В среде MATCAD создана модель, позволяющая численно оценить вклад составляющих погрешности с использованием относительной величины каждой составляющей $\delta y_i^B = \sum \delta y_i^B / \sum \delta y_{\Sigma}^B$ и $\delta z_i^B = \sum \delta z_i^B / \sum \delta z_{\Sigma}^B$.

На рис. 2 представлены результаты расчета относительных величин составляющих погрешности δy_i^B (рис. 2, а) и δz_i^B (рис. 2, б) в зависимости от расстояния z_M^B до РМ при величине базы стереосистемы $b = 300$ мм; фокусных расстояниях объективов $f_{об}^B = 35$ мм (Юпитер-12); МПОИ с размерами пикселя $2,25 \times 2,25$ мкм; частоте кадров 70 Гц; времени экспозиции $t_{exp} = 0,8 t_{fr}$, где t_{fr} — время кадра; отношении сигнал/шум $\mu = 300$; диаметре излучателя РМ $d = 3$ мм.

Из графиков (рис. 2) можно сделать выводы, что наиболее сильное влияние на суммарную величину дополнительных погрешностей $\sum \delta y_{\Sigma}^B$ и $\sum \delta z_{\Sigma}^B$ по степени убывания оказывают следующие частичные составляющие погрешности: от воздействия вибраций — δy_B^B и δz_B^B ; от инерционности системы — δy_D^B и δz_D^B ; от температурной деформации корпуса — $\delta y_{\Delta T}^B$ и $\delta z_{\Delta T}^B$. Погрешность, обусловленная наличием вертикального градиента температуры воздушного тракта δy_{grad}^B (рис. 2, а), оказывает существенное влияние только на величину $\sum \delta y_{\Sigma}^B$ и может быть частично скомпенсирована применением дисперсионного метода обработки результатов измерений координат РМ в нескольких спектральных диапазонах [24, 25].

Экспериментальные исследования погрешности определения координат РМ, обусловленной изменениями скорости перемещения базового блока

Оценка величины суммарной погрешности при изменениях скорости взаимного перемещения ее элементов экспериментально исследовалась на стенде (рис. 3), собранном на базе фотометрической скамьи 1.

Модель базового блока СОЭСКПП включает в себя стереосистему из двух видеокамер 2 (VEC545, производитель ООО «ЭВС»). Видеокамеры содержат фотоприемники на основе КМОП-матриц (OV5620 Color CMOS QSXGA, Omni Vision) с размером пикселя $2,25 \times 2,25$ мкм и объективы Гелиос-10 с фокусным расстоянием $f' = 12$ мм.

Реперные метки 3 реализованы в виде полупроводниковых излучающих диодов 4 (SFH 485 P), которые закреплены на кронштейне оси двигателя 5 с блоком питания 6, и перемещаются в вертикальной плоскости между каналами стереосистемы перпендикулярно оптическим осям видеокамер со скоростью до 4 км/ч.

РМ с двигателем располагаются на модели тележки 7, которая позволяет перемещать РМ вдоль фотометрической скамьи и изменять дистанцию между базовым блоком и РМ в диапазоне 2,5–5,5 м.

В среде LabVIEW разработана программа управления стендом, которая позволяет задавать параметры видеокамер, количество проведенных измерений, оценивать координаты РМ по формулам (3) и (4), СКО координат изображений в каналах стереосистемы и измеренных координат РМ.

На стенде (рис. 3) проведены сравнительные испытания СОЭСКПП для оценки максимальных суммарных погрешностей в статике (кривая 1) (рис. 4) и динамике (кривая 2) для частоты видеосъемки $f_{max} = 70$ кадр/с. Графики экспериментов показывают неплохое согласование с результатами расчетов по формулам (10) и (11).

Натурные испытания образцов СОЭСКПП проводились на Октябрьской железной дороге в процессе ремонта пути при комплексном контроле качества пути после ремонта на путевой машине типа ВПР-02М №35. Результаты испытаний для скорости движения 2 км/ч, в условиях эксплуатации при температуре 293 К и частоте вибрации 33 Гц показали, что оценка СКО случайной составляющей погрешностей контроля смеще-

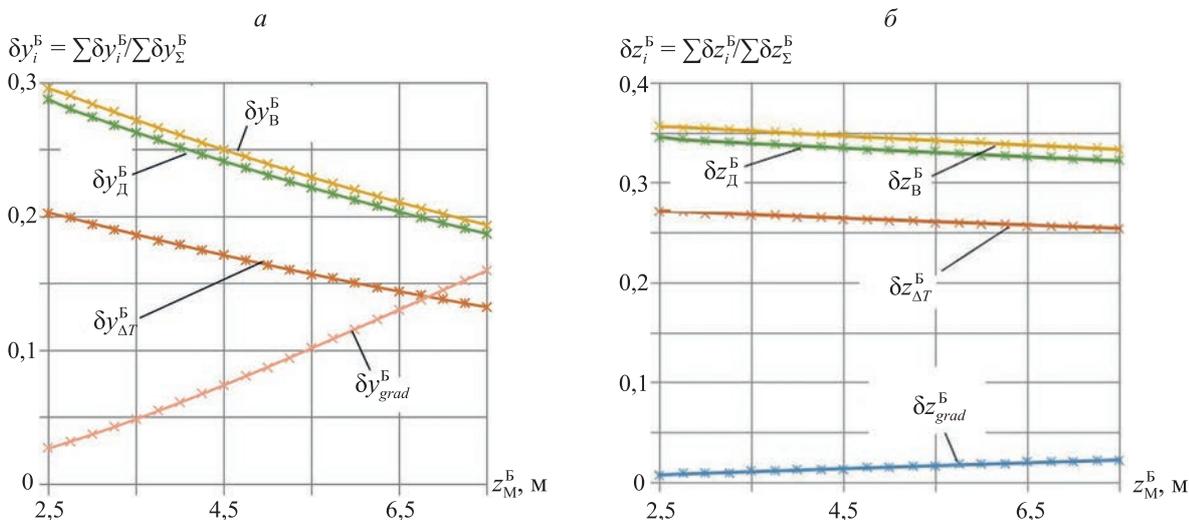


Рис. 2. Графики оценки влияния составляющих погрешностей δy_i^B и δz_i^B на суммарные погрешности: $\sum \delta y_{\Sigma}^B$ (а) и $\sum \delta z_{\Sigma}^B$ (б) в относительных единицах

Fig. 2. Assessing the influence of the component errors on the total errors $\sum \delta y_{\Sigma}^B$ (а) and $\sum \delta z_{\Sigma}^B$ (б) in relative units



Рис. 3. Общий вид стенда для исследования оптико-электронной системы контроля положения железнодорожного пути в статике и при движении реперной метки

Fig. 3. The stand for the study of the stereoscopic optical-electronic system for monitoring the railway track position in statics and during the movement of the reference mark

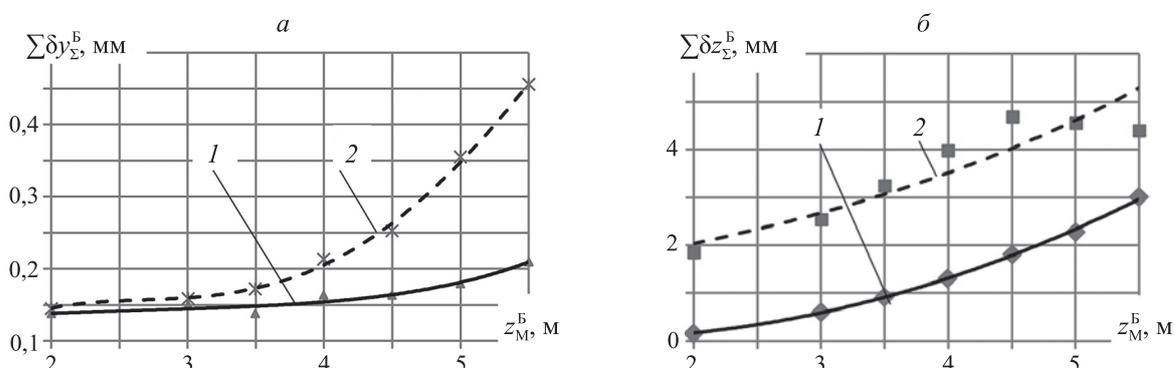


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) оценки суммарных погрешностей $\sum\delta y_{\Sigma}^B$ (а) и $\sum\delta z_{\Sigma}^B$ (б) определения координат реперной метки в статике (кривая 1) и в динамике (кривая 2) при скорости движения 4 км/ч и времени экспозиции 0,068 с

Fig. 4. Experimental (points) and calculated (lines) estimates of the total errors (a) and (b) determining the coordinates of the reference mark in statics (curve 1) and in dynamics (curve 2) at a movement speed 4 km/h and an exposure time 0.068 s

ний при измерениях положения пути не превышала в продольном профиле 0,8 мм, а в плане 1,8 мм.

Заклучение

Анализ дополнительных погрешностей стереоскопической оптико-электронной системы контроля пространственного положения железнодорожного пути в профиле и в плане доказал необходимость включения термодатчика в структуру системы для уменьшения влияния температуры.

Предложенная методика и оценка дополнительной погрешности стереосистемы с двумя симметричны-

ми матричными полями показала, что наиболее существенное влияние на погрешность контроля параметров железнодорожного пути оказывают погрешности, обусловленные вибрациями базового блока и постоянной времени видеокамер.

Экспериментальные исследования макета стереоскопической оптико-электронной системы контроля пространственного положения железнодорожного пути показали, что увеличение расстояния от базового блока до реперной метки от 2,5 м до 5,5 м приводит к увеличению погрешности определения параметров пути в профиле практически в 3 раза.

Литература

1. Sánchez A., Bravo J., González A. Estimating the accuracy of track-surveying trolley measurements for railway maintenance planning // *Journal of Surveying Engineering*. 2017. V. 143. N 1. P. 05016008. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000197
2. Щербakov В.В., Земерова А.А., Комягин С.А., Попов И.А. Контроль геометрических параметров в процессе строительства и ремонта железных дорог // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. № 1. С. 64–70.

References

1. Sánchez A., Bravo J., González A. Estimating the accuracy of track-surveying trolley measurements for railway maintenance planning. *Journal of Surveying Engineering*, 2017, vol. 143, no. 1, pp. 05016008. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000197
2. Shcherbakov V.V., Zemerova A.A., Komyagin S.A., Popov I.A. Control of geometric parameters in the process of construction and repair of railways. *Interexpo GEO-Siberia*, 2018, no. 1, pp. 64–70. (in Russian)

3. Li Q., Chen Z., Hu Q., Zhang L. Laser-aided INS and odometer navigation system for subway track irregularity measurement // *Journal of Surveying Engineering*. 2017. V. 143. N 4. P. 04017014. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000236
4. Yao L., Sun H., Zhou Y., Li N., Sun P. Detection of high speed railway track static regularity with laser trackers // *Survey Review*. 2015. V. 47. N 343. P. 279–285. doi: 10.1179/1752270614Y.0000000135
5. Сычев В.П., Виноградов В.В., Быков Ю.А., Коваленко Н.И. Автоматизированная технология текущего содержания железнодорожного пути // *Вестник МГСУ*. 2016. № 3. С. 68–78.
6. Chen Q., Niu X., Zuo L., Zhang T., Xiao F., Liu Y., Liu J. A railway track geometry measuring trolley system based on aided INS // *Sensors*. 2018. V. 18. N 2. P. 538. doi: 10.3390/s18020538
7. Akpinar B., Güral E. Multisensor railway track geometry surveying system // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012. V. 61. N 1. P. 190–197. doi: 10.1109/TIM.2011.2159417
8. Специальная реперная система контроля состояния железнодорожного пути в профиле и плане: Технические требования. М.: МПС РФ, 1998. 29 с.
9. Самратов У.Д., Сакович Л.А., Кривдин Д.Г. О точности определения геометрических параметров железнодорожного пути с помощью автоматизированных путеизмерительных комплексов // *Геопрофи*. 2007. № 6. С. 28–32.
10. Chen Q., Niu X., Zhang Q., Cheng Y. Railway track irregularity measuring by GNSS/INS integration // *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*. 2015. V. 62. N 1. P. 83–93. doi: 10.1002/navi.78
11. Glaus R. *Kinematic Track Surveying by Means of a Multi-Sensor Platform*. Zürich, Switzerland: Eidgenössische Technische Hochschule ETH, 2006. 196 p. doi: 10.3929/ethz-a-005168061
12. Коган А.А., Ершова К.Б., Петуховский В.В. Актуальные проблемы выправки и приемки пути после ремонта // *Путь и путевое хозяйство*. 2007. № 5. С. 7–9.
13. Коротаев В.В., Пантюшин А.В., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные системы контроля положения реперных меток // *Путь и путевое хозяйство*. 2012. № 11. С. 34–37.
14. Сарвин А.А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1983. 144 с.
15. Pham N.T., Timofeev A.N., Nekrylov I.S. Study of the errors of stereoscopic optical-electronic system for railroad track position // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11056. P. 110562F. doi: 10.1117/12.2526081
16. Зиновьев В.Е. *Термофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник*. М.: Metallurgija, 1989. 382 с.
17. *Механизированная выправка и подбивка железнодорожного пути: учеб. пособие / под ред. М.В. Поповича*. Л.: ЛИИЖТ, 1984. 102 с.
18. Порфирьев Л.Ф. *Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах*. СПб.: Лань, 2013. 400 с.
19. Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д.В., Курьянов И.Ю., Шатский Е.Д. Исследование алгоритма высокоточного сопровождения зенитных управляемых ракет матричным фотоприемником по блику формирующей оптики системы самонаведения // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии*. 2016. Т. 9. № 3. С. 401–415. doi: 10.17516/1999-494X-2016-9-3-401-415
20. Галиев И.И., Нехаев В.А., Николаев В.А., Ушак В.Н. *Основы механики подвижного состава. Часть I: учебное пособие*. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. 202 с.
21. Hodara H. Laser wave propagation through the atmosphere // *Proceedings of the IEEE*. 1966. V. 54. N 3. P. 368–375. doi: 10.1109/PROC.1966.4698
22. Федоров А.С., Неумывакин Ю.К., Перский М.И., Захаренко М.А. Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. М.: Недра, 1984. 126 с.
23. Грейм И.А. *Оптические дальномеры и высотомеры геометрического типа*. М.: Недра, 1983. 320 с.
24. Nekrylov I.S., Timofeev A.N., Konyakhin I.A., Korotaev V.V., Hoa T.M. Peculiarities of reducing the impact of air tract on the accuracy of positioning elements of robotics at analysis of a diffraction pattern of air tract dispersion on a photo matrix field // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. V. 261. P. 189–197. doi: 10.1007/978-3-030-32710-1_14
25. Сычева Е.А., Коротаев В.В., Мараев А.А., Тимофеев А.Н. Компенсация погрешности определения пространственного по-
3. Li Q., Chen Z., Hu Q., Zhang L. Laser-aided INS and odometer navigation system for subway track irregularity measurement. *Journal of Surveying Engineering*, 2017, vol. 143, no. 4, pp. 04017014. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000236
4. Yao L., Sun H., Zhou Y., Li N., Sun P. Detection of high speed railway track static regularity with laser trackers. *Survey Review*, 2015, vol. 47, no. 343, pp. 279–285. doi: 10.1179/1752270614Y.0000000135
5. Sychev V.P., Vinogradov V.V., Bykov Yu.A., Kovalenko N.I. Automated technology for current maintenance of railway track. *Vestnik MGSU*, 2016, no. 3, pp. 68–78. (in Russian)
6. Chen Q., Niu X., Zuo L., Zhang T., Xiao F., Liu Y., Liu J. A railway track geometry measuring trolley system based on aided INS. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 538. doi: 10.3390/s18020538
7. Akpinar B., Güral E. Multisensor railway track geometry surveying system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, vol. 61, no. 1, pp. 190–197. doi: 10.1109/TIM.2011.2159417
8. *Special reference system for monitoring the state of the railway track in profile and plan: Technical requirements*. Moscow, MPS RF, 1998, 29 p. (in Russian)
9. Samratov U.D., Sakovich L.A., Krivdin D.G. On the accuracy of determining the geometric parameters of a railway track using automated track measuring complexes. *Geoprofi*, 2007, no. 6, pp. 28–32. (in Russian)
10. Chen Q., Niu X., Zhang Q., Cheng Y. Railway track irregularity measuring by GNSS/INS integration. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 2015, vol. 62, no. 1, pp. 83–93. doi: 10.1002/navi.78
11. Glaus R. *Kinematic Track Surveying by Means of a Multi-Sensor Platform*. Zürich, Switzerland: Eidgenössische Technische Hochschule ETH, 2006, 196 p. doi: 10.3929/ethz-a-005168061
12. Kogan A.A., Ershova K.B., Petukhovskii V.V. Actual problems of alignment and track acceptance after repair. *Railway Track and Facilities*, 2007, no. 5, pp. 7–9. (in Russian)
13. Korotaev V.V., Pantyushin A.V., Timofeev A.N. Optoelectronic systems for control of the reference markers position. *Railway Track and Facilities*, 2012, no. 11, pp. 34–37. (in Russian)
14. Sarvin A.A. *Systems for Non-Contact Measurements of Geometric Parameters*. Leningrad, Leningrad State University Publ, 1983, 144 p. (in Russian)
15. Pham N.T., Timofeev A.N., Nekrylov I.S. Study of the errors of stereoscopic optical-electronic system for railroad track position. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11056, pp. 110562F. doi: 10.1117/12.2526081
16. Zinovev V.E. *Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures*. Moscow, Metallurgija Publ., 1989, 382 p. (in Russian)
17. *Mechanized Alignment and Tamping of Railway Tracks*. Ed. by M.V. Popovich. Leningrad, LIRE Publ., 1984, 102 p. (in Russian)
18. Porfirev L.F. *Fundamentals of the Theory of Signal Conversion in Optoelectronic Systems*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013, 400 p. (in Russian)
19. Koziratsky Yu.L., Prokhorov D.V., Kuryanov I.Y., Shatsky E.D. Precision tracking algorithm study of surface-to-air missile on the photodetector matrix forming optics glare homing. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 401–415. (in Russian). doi: 10.17516/1999-494X-2016-9-3-401-415
20. Galiev I.I., Nekhaev V.A., Nikolaev V.A., Ushak V.N. *Fundamentals of Rolling Stock Mechanics. Part 1*. Omsk, OSTU Publ., 2013, 202 p. (in Russian)
21. Hodara H. Laser wave propagation through the atmosphere. *Proceedings of the IEEE*, 1966, vol. 54, no. 3, pp. 368–375. doi: 10.1109/PROC.1966.4698
22. Fedorov A.S., Neumyvakin Iu.K., Perskii M.I., Zakharenko M.A. *Automation of Geodetic Measurements in Land Reclamation Construction*. Moscow, Nedra Publ., 1984, 126 p. (in Russian)
23. Greim I.A. *Optical Rangefinders and Geometric Altimeters*. Moscow, Nedra Publ., 1983, 320 p. (in Russian)
24. Nekrylov I.S., Timofeev A.N., Konyakhin I.A., Korotaev V.V., Hoa T.M. Peculiarities of reducing the impact of air tract on the accuracy of positioning elements of robotics at analysis of a diffraction pattern of air tract dispersion on a photo matrix field. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 261, pp. 189–197. doi: 10.1007/978-3-030-32710-1_14
25. Sycheva E.A., Korotaev V.V., Maraev A.A., Timofeev A.N. Compensation of error caused by inhomogeneous air path in the control system of reference marks spatial position. *Journal of*

ложения реперных марок, вносимой воздушным трактом // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 4. С. 348–355. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-348-355

Instrument Engineering, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 348–355. (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-348-355

Авторы

Нгок Туан Фам — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57212445661](https://orcid.org/0000-0003-4045-1933), Ngoc Tuan1301@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4045-1933>

Тимофеев Александр Николаевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57189271286](https://orcid.org/0000-0002-7344-9832), timofeev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>

Коротаев Валерий Викторович — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603855670](https://orcid.org/0000-0001-7102-5967), vvkorotaev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

Рыжова Виктория Александровна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195127229](https://orcid.org/0000-0003-2142-1894), victoria_ryz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-1894>

Родригеш Жоэл Жозе Пуга Коэльо — доктор философии, профессор, профессор, Университет ИТМО; профессор, Федеральный университет Пиауи, Терезина, 64049-550, Бразилия; ведущий научный сотрудник, Институт телекоммуникаций, Ковилья, 6201-001, Португалия, [sc 25930566300](https://orcid.org/0000-0001-8657-3800), joeljr@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>

Authors

Ngoc Tuan Pham — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57212445661](https://orcid.org/0000-0003-4045-1933), NgocTuan1301@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4045-1933>

Aleksandr N. Timofeev — PhD, Senior Researcher, Laboratory Head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57189271286](https://orcid.org/0000-0002-7344-9832), timofeev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>

Valery V. Korotaev — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603855670](https://orcid.org/0000-0001-7102-5967), vvkorotaev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

Victoria A. Ryzhova — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195127229](https://orcid.org/0000-0003-2142-1894), victoria_ryz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-1894>

Joel J.P.C. Rodrigues — PhD, Full Professor, ITMO University; Professor, Federal University of Piauí, Teresina, 64049-550, Brazil; Leading Researcher, Instituto de Telecomunicações, Covilhã, 6201-001, Portugal, [sc 25930566300](https://orcid.org/0000-0001-8657-3800), joeljr@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>

Статья поступила в редакцию 12.11.2020
Одобрена после рецензирования 23.12.2020
Принята к печати 05.02.2021

Received 12.11.2020
Approved after reviewing 23.12.2020
Accepted 05.02.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»