

Калибровка инфракрасной системы позиционирования

А. М. Боронахин¹, Нгуен Куок Хань^{2✉}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона, Ханой, Вьетнам
✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

Аннотация

Введение. Для транспортных устройств (ТУ) задача определения положения всегда является одним из важнейших факторов, особенно для автономных устройств. В условиях внешней среды глобальная навигационная спутниковая система (Global Positioning System – GPS) остается оптимальным решением благодаря широкому покрытию, автоматичности и простоте использования. Однако в помещениях сигнал GPS значительно ослабляется, что создает серьезные трудности при определении местоположения устройства. Система Valve Lighthouse была предложена для навигации ТУ в ограниченных пространствах. Несмотря на то что случайный шум системы очень мал и может достигать уровня миллиметров, одним из ее недостатков является то, что вследствие неточностей при установке базовой станции принимаемый сигнал содержит искажения, что приводит к ошибкам в определении координат устройства. В настоящее время также отсутствуют материалы, посвященные методам определения этих искажений и калибровке системы. С этой целью в данной статье предлагается алгоритм определения коэффициентов в модели погрешностей сигнала системы, использующий только координаты ТУ.

Цель работы. Калибровка сигнала инфракрасной системы, опираясь только на координаты транспортного устройства в системе координат, связанной с базовой станцией.

Материалы и методы. Используется модель погрешностей инфракрасной системы, предоставленная компанией HTC Vive. Предлагаемый метод основан на методе Ньютона и использует набор данных истинных координат ТУ в системе координат, связанной с базовой станцией, а также координаты, определенные системой.

Результаты. Предложенный метод позволяет определить коэффициенты в модели погрешностей сигнала инфракрасной системы, использующей одну базовую станцию.

Заключение. Представлен метод калибровки сигнала инфракрасной системы с одной базовой станцией, основанный на методе Ньютона и наборе координат транспортного устройства в системе координат системы.

Ключевые слова: калибровка, метод Ньютона, инфракрасная система, калибровочные коэффициенты

Для цитирования: Боронахин А. М., Нгуен Куок Хань. Калибровка инфракрасной системы позиционирования // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 92–102.
doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-92-102

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; принята к публикации после рецензирования 20.01.2026; опубликована онлайн 27.02.2026

Calibration of an Infrared Positioning System

Alexander M. Boronakhin¹, Nguyen Quoc Khanh²✉

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

¹Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

Abstract

Introduction. For transportation systems and, in particular, autonomous devices, accurate position determination is an essential requirement. In outdoor environments, the Global Positioning System (GPS) remains the optimal solution due to its broad coverage, high level of automation, and ease of use. However, in indoor environments, the significantly weakened GPS signal creates serious difficulties for accurate localization. For navigation of transportation devices in confined spaces, the Valve Lighthouse system has been proposed. Although this system exhibits rather low random noise, capable of achieving millimeter-level precision, its accuracy is sensitive to installation-related distortions in the received signal. This leads to errors in position estimation. The current literature lacks methods for identifying these distortions and performing system calibration. To address this gap, this paper proposes an algorithm for estimating the coefficients of a signal error model based exclusively on the coordinates of the transportation device.

Aim. Calibration of the signal of an infrared system using exclusively the coordinates of the transportation device in the coordinate system associated with the base station.

Materials and methods. An HTC Vive error model of an infrared system was used. The proposed approach is based on Newton's method and uses a dataset of the true coordinates of the transportation device in the coordinate system associated with the base station, as well as the coordinates determined by the system.

Results. The proposed method makes it possible to determine the coefficients of the signal error model of an infrared system using a single base station.

Conclusion. A method for calibrating the signal of an infrared system using a single base station is presented. This method is based on Newton's method and a dataset of transportation device coordinates in the system coordinate frame.

Keywords: calibration, Newton's method, infrared system, calibration coefficients

For citation: Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh. Calibration of an Infrared Positioning System. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 1, pp. 92–102.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-92-102

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 11.12.2025; accepted 20.01.2026; published online 27.02.2026

Введение. В последние годы автономные транспортные средства являются перспективной и активно развивающейся областью. Отличительной особенностью таких устройств является способность выполнять задачи автономно в различных условиях и в разных областях, включая сложные и опасные зоны, куда человеку сложно добраться [1, 2]. Применения автономных транспортных средств включают мониторинг, разведку, исследование и т. д. Во всех случаях точность навигации всегда является важнейшей задачей.

Для внешней среды глобальная система позиционирования (Global Positioning System – GPS) остается оптимальным решением благода-

ря своему глобальному покрытию, автоматичности и простоте использования. Однако в помещении сигнал GPS значительно ослабляется, что приводит к серьезным трудностям при определении положения устройств. Особенностью внутренней среды является ограниченное пространство и высокая плотность препятствий, что накладывает строгие требования на габариты, массу и степень автономности транспортных средств. В настоящее время были разработаны многие альтернативные решения для навигации в помещении. Среди них можно отметить такие технологии, как оптический поток, инерциальные навигационные системы (ИНС) и ультра-

звук. Однако каждая из этих технологий имеет определенные ограничения, например:

- система оптического потока обладает невысокой точностью и требует больших вычислительных ресурсов [3];
- ИНС накапливает погрешности со временем;
- ультразвук, хотя и обладает высокой точностью, но имеет небольшой рабочий диапазон [3].

Системы, использующие световые сигналы, также являются эффективным решением, особенно системы на основе инфракрасного (ИК) излучения. Преимущество использования ИК-света заключается в отсутствии радиочастотных или электромагнитных помех, а также в слабой зависимости от внешних условий. Применение ИК-технологий для навигации впервые было представлено в [4], где С. Лее и соавт. предложили систему, в которой три ИК-излучателя размещались в известных фиксированных точках. Датчик угла падения измерял разницу углов между каждой парой излучателей, что позволяло определить положение объекта. Авторами [5] был разработан миниатюрный безлинзовый сенсор "НуретCube", в основе которого лежит строение глаз насекомых, предназначенный для отслеживания движения малогабаритных устройств.

В последнее время для задач навигации в помещении представляет интерес платформа Valve Lighthouse, которая изначально была разработана для приложений виртуальной реальности. Преимущества этой системы включают низкую стоимость, простоту транспортировки и использования, а также возможность автономной работы без центрального компьютера. Благодаря широкому потенциалу система была адаптирована для задач внутреннего позиционирования роботов [6–8]. В [9] Т. Arnaud и соавт. реализовали систему позиционирования в помещении для беспилотного летательного аппарата (БПЛА), используя одну или две станции Lighthouse.

Точность системы Lighthouse для контроллеров и трекеров была подтверждена в [10–12]. Случайный шум системы очень мал и может достигать миллиметрового уровня, однако существует один существенный тип погрешности – статическая погрешность, которая появляется из-за неточности при установке базовой станции в сигнала-

ле системы. Статическая погрешность, вызванная оптическими характеристиками, приводит к погрешности в определении положения объекта. На данный момент отсутствуют публикации, посвященные калибровке этих параметров. Поэтому в данной статье предлагается алгоритм калибровки статической погрешности в сигнале системы, основанный на методе Ньютона и данных о положении объекта в системе координат, связанной с базовой станцией.

Система позиционирования Lighthouse состоит из двух основных частей: базовой станции (рис. 1) и сенсорной платы (рис. 2). Внутри базовой станции SteamVR расположен вращающийся барабан, который обеспечивает сканирование двух плоскостей ИК-света вокруг вертикальной оси [13]. Инфракрасное излучение от базовой станции обнаруживается датчиками, размещенными на сенсорной плате.

Каждая световая плоскость наклонена под своим углом. В зависимости от конфигурации канала базовой станции барабан вращается с разной скоростью.

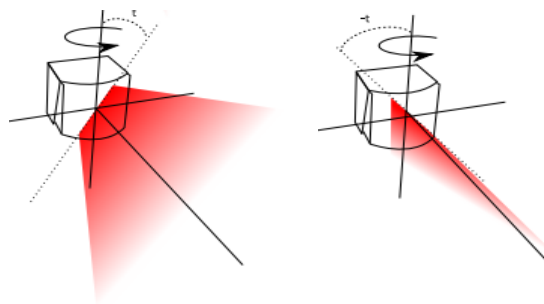
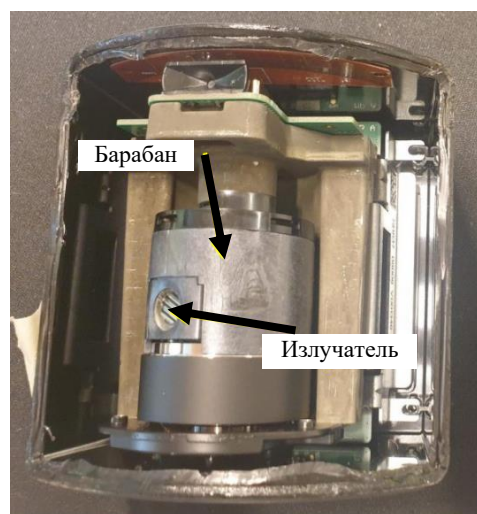


Рис. 1. Базовая станция

Fig. 1. Basestation

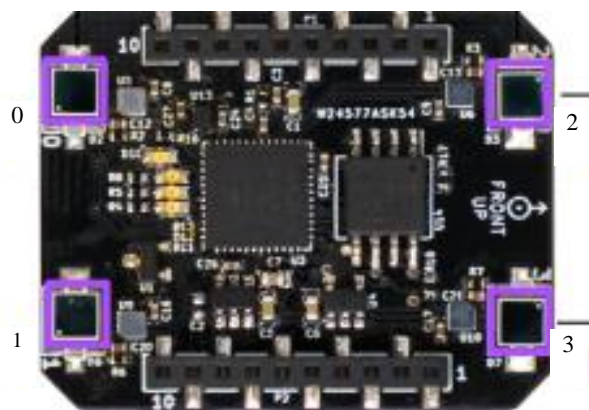


Рис. 2. Сенсорная плата

Fig. 2. Sensor deck

Сенсорная плата Lighthouse содержит 4 датчика [14]. На микроконтроллере STM32F4 данные об угловом сканировании световых плоскостей обрабатываются для оценки положения БПЛА.

Алгоритм определения положения. Система позволяет объекту определять свое положение в системе координат, связанной с базовой станцией. Система координат, привязанная к базовой станции, определяется таким образом, что ось Ox направлена вправо от базовой станции, а ось Oy – вперед (рис. 3).

Когда световая плоскость проходит через датчик, базовая станция передает информацию об угле поворота барабана $\alpha_{i,j}$. Положение $\alpha_{i,j} = 0$ является положением, при котором линия пересечения световой плоскости с плоскостью Oxy совпадает с осью Ox . Таким образом, угол будет выражаться следующей формулой:

$$\alpha_{i,j} = \alpha_s + \alpha_t = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{y_i}{x_i}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{z_i \operatorname{tg} \beta_j}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right), \quad (1)$$

где $[x_i, y_i, z_i] = p_i^b$ – координаты датчиков в системе, связанной с базовой станцией;

$\beta_j = \left[\frac{\pi}{6}, -\frac{\pi}{6}\right]$ – угол наклона плоскости относительно оси Oz ; $i = 1, \dots, 4$; $j = 1, \dots, 2$.

Координаты датчиков в системе базовой станции выражаются следующим образом:

$$p_i^b = R p_i^d + P, \quad (2)$$

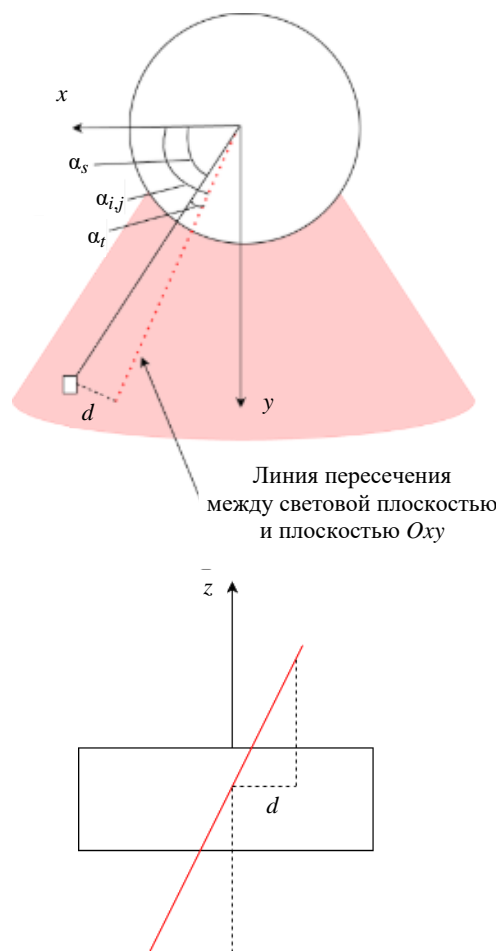


Рис. 3. Принцип работы системы
Fig. 3. Operating principle of the system

где R – матрица поворота из системы координат, связанной с дроном, в систему, связанную с базовой станцией; p_i^d – координаты датчиков в системе, связанной с дроном; P – координаты дрона в системе, связанной с базовой станцией.

Таким образом, для каждой световой плоскости каждый датчик получает информацию о двух углах: всего 4 датчика получают данные о 8 углах. После того как четыре датчика принимают сигнал, положение дрона определяется методом Ньютона по следующему выражению для невязки:

$$r_{i,j} = \alpha'_{i,j} - \alpha_{i,j}, \quad (3)$$

где $\alpha'_{i,j}$ – значение угла, полученного датчиком от базовой станции.

Применив метод Ньютона, вычислим матрицу Якоби:

$$J = \frac{\partial r}{\partial P} = \left[\frac{\partial r_{i,j}}{\partial X}, \frac{\partial r_{i,j}}{\partial Y}, \frac{\partial r_{i,j}}{\partial Z} \right]. \quad (4)$$

Изначально, на нулевом шаге итерации ($k = 0$), набор случайных чисел назначается вектору решения $P_0 = [X_0, Y_0, Z_0]^T$. Дальнейшие шаги итерации выполняются по следующему уравнению на любом шаге k :

$$P_{k+1} = P_k - (JJ')^{-1} J'r. \quad (5)$$

Итерации прекращаются, когда достигнуто максимальное заданное число шагов или когда ошибка решения находится в пределах заданной допустимой величины (в зависимости от того, что наступит раньше). Рассмотрим модель погрешности сигнала в ИК-системе.

Статические погрешности инфракрасной системы. Из-за неточности при установке базовой станции сигнал, передаваемый базовой станцией на датчик, будет содержать погрешности. В [15] приведены факторы, влияющие на точность сигнала. Среди них на точность сильнее всего влияют:

1. Смещение, представляющее собой поправку смещения к углам визирования от фронта синхросигнала до центра попадания луча.
2. Наклон – отклонение линзы веерного луча от ее идеального положения.
3. Кривизна – приблизительная поправка на то, что ось линзы не является полностью радиальной, из-за чего веерный луч изгибается в коническую форму, а не остается строго плоским.
4. Смещение выравнивания – неточность юстировки системы лазера/зеркала/линзы;

Статическая погрешность ИК-системы выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{ст\ i,j} &= \alpha_{р\ i,j} - \alpha_{ид\ i,j} = \\ &= \phi_j + k_{накл\ j} \alpha_{ид\ i,j} + k_{кр\ j} (\alpha_{ид\ i,j})^2 + \\ &+ k_{выр\ j} \sin(\alpha_{ид\ i,j} + \phi_{выр\ j}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_{р\ i,j}$ – реальный сигнал, полученный датчиком; $\alpha_{ид\ i,j}$ – идеальный сигнал, полученный датчиком; ϕ_j – смещение сигнала, связанное с j -плоскостью; $k_{накл\ j}$ – коэффициент

наклона, связанный с j -плоскостью; $k_{кр\ j}$ – коэффициент кривизны, связанный с j -плоскостью; $k_{выр\ j}$ – амплитуда коррекции смещения выравнивания, связанной с j -плоскостью; $\phi_{выр\ j}$ – фаза коррекции смещения выравнивания, связанной с j -плоскостью.

Погрешности в сигнале, получаемом датчиком, приводят к погрешностям в координатах, определяемых системой. Погрешности координат устройства, определяемые системой ИК-излучения, представлены на рис. 4, 5.

Из рис. 4, 5 видно, что ошибка системы без калибровки может достигать 10 см, что делает ее непригодной для позиционирования и навигации в помещении.

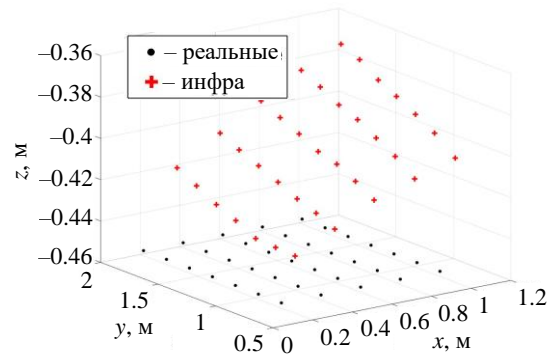


Рис. 4. Реальные координаты и координаты, определенные системой

Fig. 4. Real coordinates and system-determined coordinates

Метод калибровки статических погрешностей. Когда на шаге k найдено решение для P , ожидается, что будет выполняться следующее:

$$r(\tilde{P}) = [r_{i,j}(\tilde{P})] \approx [0]. \quad (7)$$

Из (3), (4), (6) получим:

$$r(\tilde{P}) = [\alpha'_{i,j} - \alpha_{i,j}(\tilde{P})] \approx [0], \quad (8)$$

где $\alpha'_{i,j} = \alpha_{i,j}(P_{ид}) + \phi_j + k_{накл\ j} \alpha_{i,j}(P_{ид}) + k_{кр\ j} \times (\alpha_{i,j}(P_{ид}))^2 + k_{выр\ j} \sin(\alpha_{i,j}(P_{ид}) + \phi_{выр\ j})$; \tilde{P} – координаты дрона, определенные датчиком; $P_{ид}$ – идеальные координаты дрона.

Поставив (8) в (5), получим:

$$\Delta P = (JJ')^{-1} J'r(\tilde{P}) \approx 0. \quad (9)$$

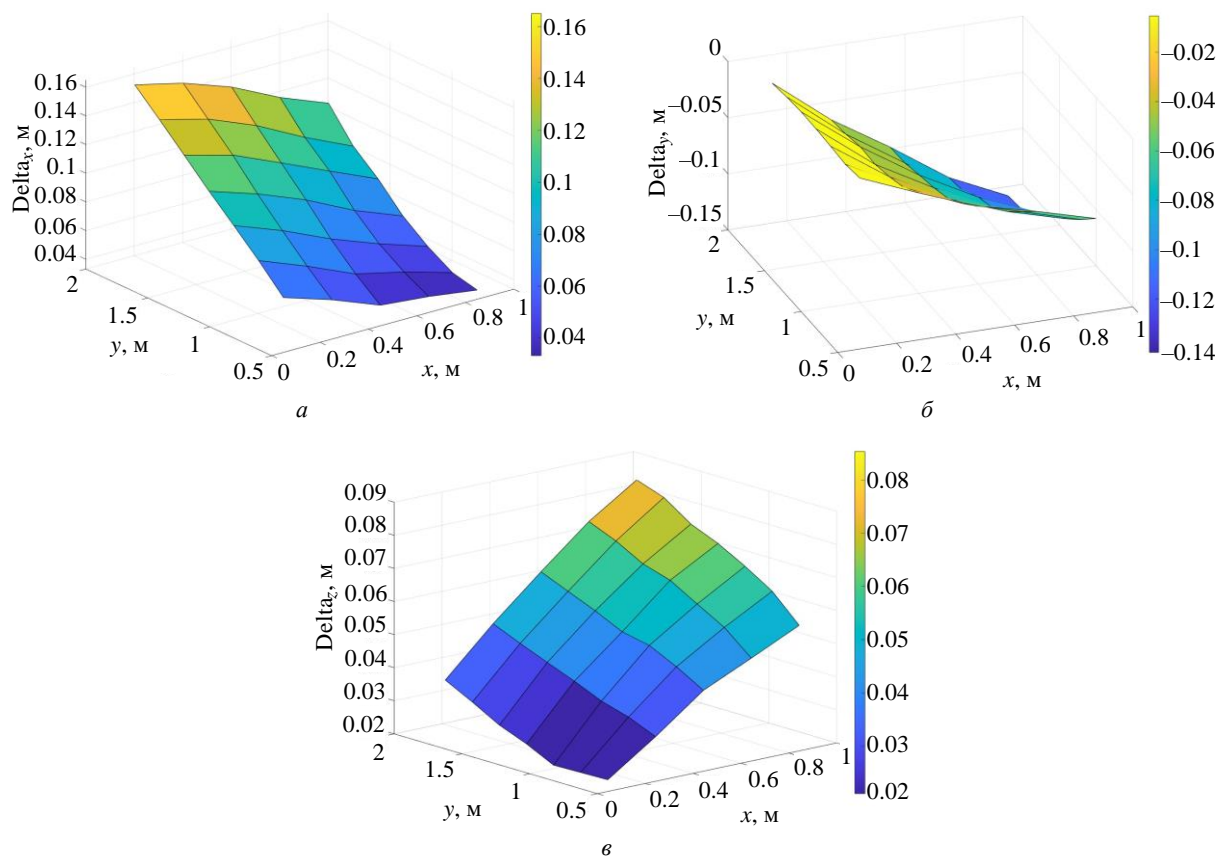


Рис. 5. Погрешности по осям $a - O_x$; $б - O_y$; $в - O_z$

Fig. 5. Errors along the axes $a - O_x$; $б - O_y$; $в - O_z$

Таким образом, для определения значений коэффициентов предлагается применить метод Ньютона со следующим выражением для невязки:

$$f(\text{coef}) = Cr(\text{coef}), \quad (10)$$

где $\text{coef} = [\phi_j, k_{\text{накл}j}, k_{\text{кр}j}, k_{\text{выр}j}, \phi_{\text{выр}j}]^T$;

$$C = (JJ')^{-1} J'; \quad r(\text{coef}) = \alpha_{i,j}(P_{\text{ид}}) + \phi_j + k_{\text{накл}j} \alpha_{i,j}(P_{\text{ид}}) + k_{\text{кр}j} (\alpha_{i,j}(P_{\text{ид}}))^2 + k_{\text{выр}j} \times \sin(\alpha_{i,j}(P_{\text{ид}}) + \phi_{\text{выр}j}) - \alpha_{i,j}(\tilde{P}).$$

Эксперимент. Эксперименты проводились с целью определения коэффициентов в модели ошибок, а также для оценки эффективности алгоритма калибровки. Экспериментальная установка представлена на рис. 6. Транспортное устройство перемещалось по "шахматной" площадке размером 1×1.8 м.

Для определения коэффициентов в модели ошибок с использованием предложенного метода был сформирован набор данных о положении

транспортного устройства в системе координат, связанной с базовой станцией, включающий:

- данные о реальных координатах положения устройства;
- данные, определенные ИК-системой.

Набор данных собирался для положений устройства в диапазонах $0.1 \leq x \leq 0.9$ и

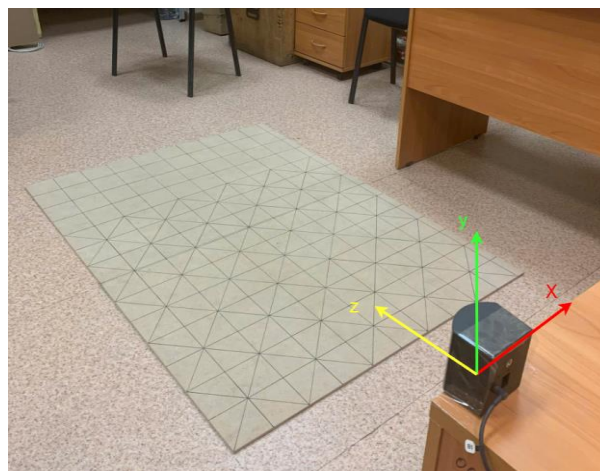


Рис. 6. Экспериментальная установка

Fig. 6. Experimental setup

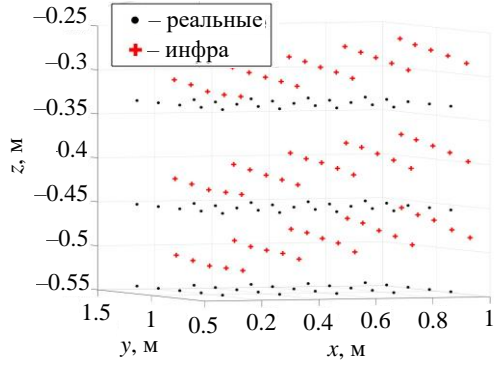


Рис. 7. Набор данных

Fig. 7. Dataset

$0.6 \leq y \leq 1.2$ на трех разных высотах. Набор данных представлен на рис. 7.

Был применен метод Ньютона с невязкой (10) для получения значения вектора coef. Результаты определения коэффициентов представлены в табл. 1.

С целью оценки эффективности процесса калибровки данные о реальных координатах устройства в системе координат прошли сличение с координатами после калибровки. Для обеспечения объективности тестовая область ограни-

Табл. 1. Значения коэффициентов

Tab. 1. Results of the coefficients

Коэффициент	Плоскость 1	Плоскость 2
ϕ_j	-0.4551	0.1127
$k_{\text{накл } j}$	0.1799	-0.0840
$k_{\text{крив } j}$	-0.1888	0.1206
$k_{\text{выр } j}$	-0.3452	0.3658
$\phi_{\text{выр } j}$	-0.3452	0.0988

чена диапазонами $0.1 \leq x \leq 0.9$ и $1.2 \leq y \leq 1.8$ на различных высотах. Кроме того, данные собирались при разных углах ориентации устройства ($yaw = 0^\circ$ и $yaw = 45^\circ$). Результаты, включающие реальные координаты устройства, координаты после калибровки и соответствующие погрешности, представлены на рис. 8–10. Максимальные значения абсолютной погрешности по осям приведены в табл. 2.

Кроме того, для оценки эффективности процесса калибровки в зависимости от расстояния объекта до базовой станции был проведен

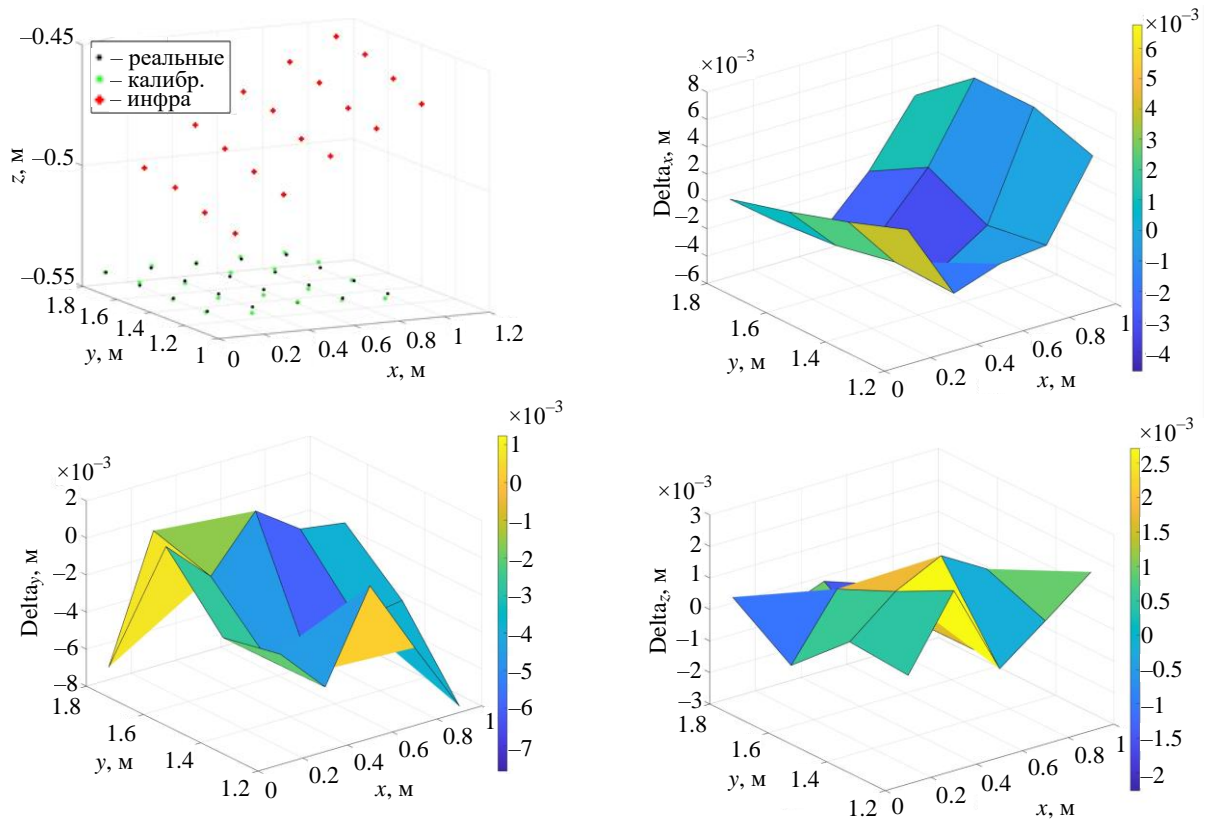


Рис. 8. Реальные данные и откалиброванные данные в точке $z = -0.545$ м, угол ориентации $yaw = 0^\circ$ и их погрешности по осям

Fig. 8. Real data and calibrated data at point $z = -0.545$ m, with orientation angle $yaw = 0^\circ$ and their errors along each axis

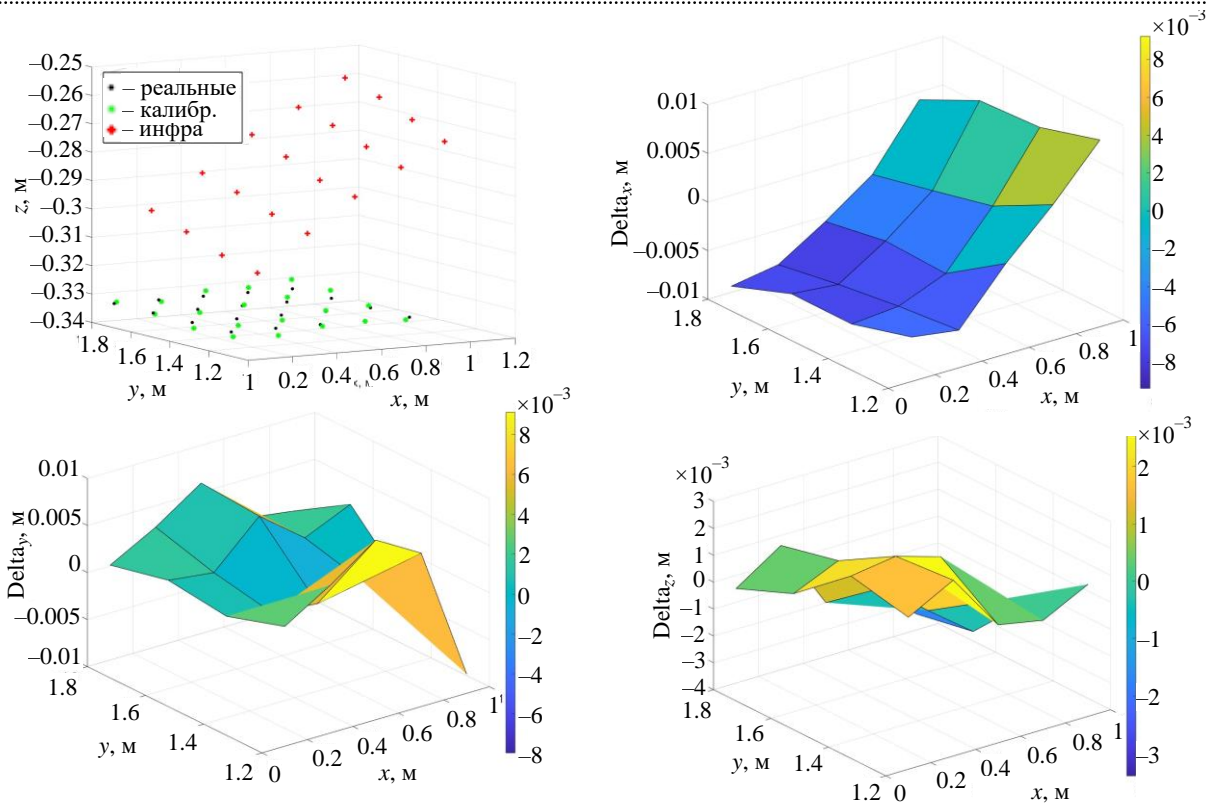


Рис. 9. Реальные данные и откалиброванные данные в точке $z = -0.334$ м, угол ориентации $yaw = 0^\circ$ и их погрешности по осям

Fig. 9. Real data and calibrated data at point $z = -0.334$ m, with orientation angle $yaw = 0^\circ$ and their errors along each axis

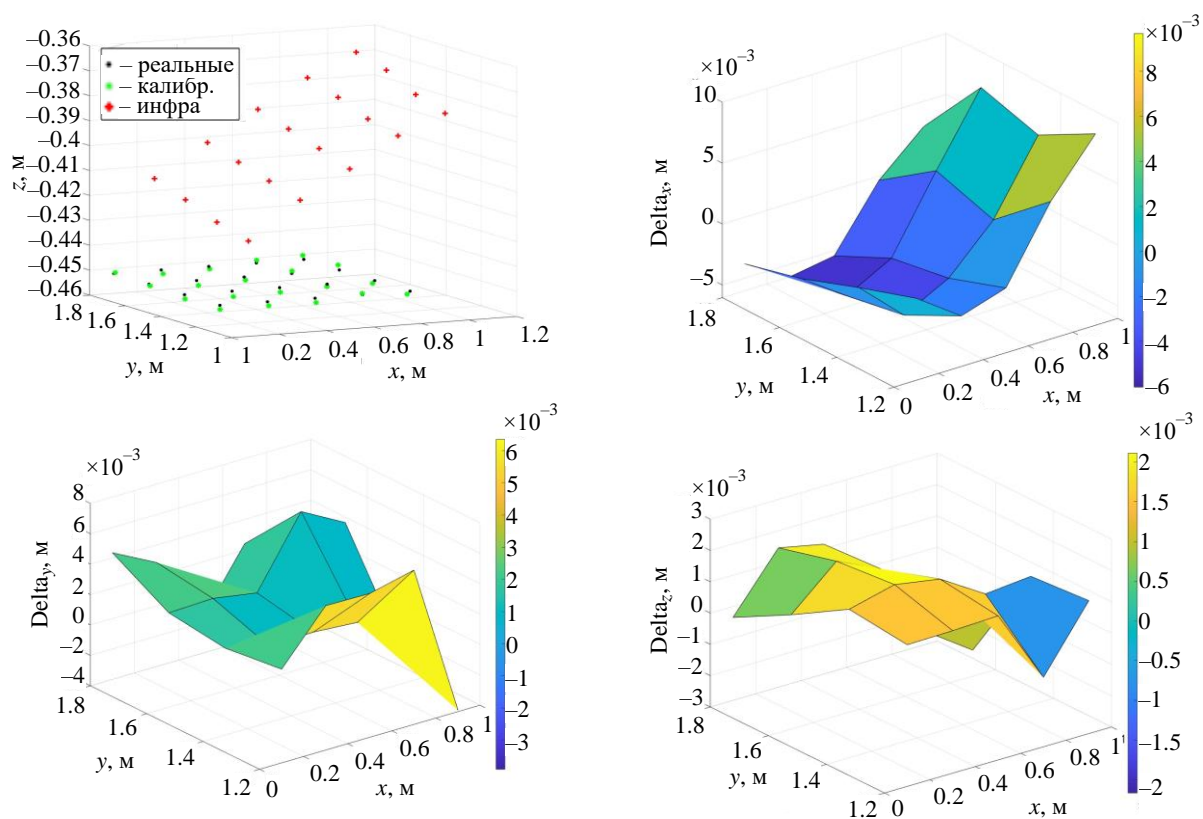


Рис. 10. Реальные данные и откалиброванные данные в точке $z = -0.452$ м, угол ориентации $yaw = 45^\circ$ и их погрешности по осям

Fig. 10. Real data and calibrated data at point $z = -0.452$ m, with orientation angle $yaw = 45^\circ$ and their errors along each axis

Табл. 2. Максимальные значения абсолютной погрешности по осям

Tab. 2. Maximum values of absolute error along the axes

Ось	$z = -0.545$ м, $yaw = 0^\circ$	$z = -0.334$ м, $yaw = 0^\circ$	$z = -0.452$ м, $yaw = 45^\circ$
x	0.007 м	0.009 м	0.009 м
y	0.008 м	0.009 м	0.006 м
z	0.003 м	0.003 м	0.002 м

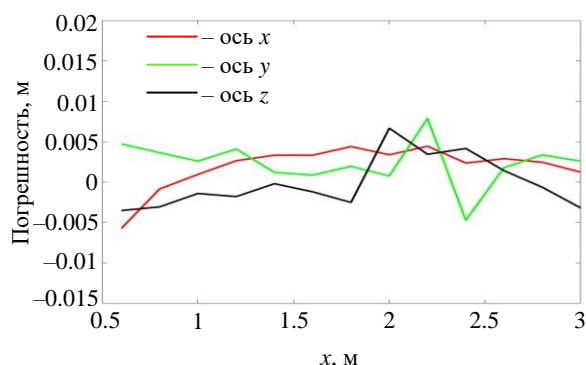


Рис. 11. Погрешности по осям при перемещении устройства по Oy

Fig. 11. Errors along the axes when the device moving along the Oy direction

эксперимент, в котором объект располагался на прямой вдоль оси Oy в диапазоне $0.6 \leq y \leq 3$ (пределы рабочей зоны системы). Погрешности

между реальными координатами и координатами после калибровки представлены на рис. 11.

Алгоритм калибровки позволил практически полностью устранить статическую ошибку. Погрешность координат после калибровки по сравнению с реальными координатами составляет около 1 см, что удовлетворяет требованиям для позиционирования и навигации в закрытых помещениях. Таким образом, алгоритм калибровки достиг желаемого результата.

Заключение. В статье предложен алгоритм определения коэффициентов в модели ошибки сигнала инфракрасной системы с использованием одной базовой станции Lighthouse Valve. Алгоритм калибровки использует метод Ньютона и данные устройства в системе координат, связанной с базовой станцией. Проведенные эксперименты показали эффективность алгоритма: статическая ошибка практически полностью устранена, а погрешность между откалиброванными и реальными координатами составляет около 1 см. Алгоритм повышает точность навигации и позиционирования транспортного устройства в ограниченном пространстве.

Список литературы

1. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends // J. of Intelligent & Robotic Systems. 2017. Vol. 87. P. 141–168. doi: 10.1007/s10846-017-0483-z
2. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications // Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013. P. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752
3. A novel distributed architecture for UAV indoor navigation / Yu. Li, M. Scanavino, E. Capello, F. Dabene, G. Guglieri, A. Vilardi // Transportation Research Procedia. 2018. Vol. 35. P. 13–22. doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.003
4. Indoor positioning system based on incident angles of infrared emitters / Ch. Lee, Yu. Chang, G. Park, J. Ryu, S.-G. Jeong, S. Park // 30th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea (South), 02–06 Nov. 2004. IEEE, 2004. P. 2218–2222. doi: 10.1109/IECON.2004.1432143
5. HyperCube: A small lensless position sensing device for the tracking of flickering infrared LEDs / T. Raharjaona, P. Mignon, R. Juston, L. Kerhuel, S. Viollet // Sensors. 2015. Vol. 15, № 7. P. 16484–16502. doi: 10.3390/s150716484
6. DronOS: A flexible open-source prototyping framework for interactive drone routines / M. Hoppe, M. Burger, A. Schmidt, T. Kosch // Proc of. 18th Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia. 2019. Art. № 15. P. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642
7. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance bounds in positioning with the vive light-house system // IEEE Intern. Conf. on Information Fusion, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019. P. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242
8. Sletten K. Automated testing of industrial robots using HTC vive for motion tracking. M. S. thesis. Norway, University of Stavanger, 2017. 28 p.
9. Yusefi A., Durdu A., Sungur C. ORB-SLAM-based 2D Reconstruction of Environment for Indoor Autonomous Navigation of UAVs // Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi. 2020. P. 466–472. doi: 10.31590/ejosat.819620.
10. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research // I-Perception. 2017. Vol. 8, № 3. Art. № 2041669517708205. doi: 10.1177/2041669517708205
11. Ikbal M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC vive virtual reality system // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698
12. HTC Vive Tracker: Accuracy for Indoor Localization / J. Lwowski, A. Majumdar, P. Benavidez, J. J. Prevost,

M. Jamshidi // IEEE Systems, Man and Cybernetics Magazine. 2020. Vol. 6, iss. 4. P. 15–22.

doi: 10.1109/MSMC.2020.2969031

13. Боронахин А. М., Нгуен К. Х., Нгуен Ч. И. Сравнительное исследование навигационных систем для автономных беспилотных летательных аппаратов в помещении // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 6–18.

doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

14. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research / A. Taffanel, B. Rousselot, J. Danielsson, K. McGuire, K. Richardsson, M. Eliasson, T. Antonsson, W. Hönig. URL: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (дата обращения: 08.12.2025)

15. HTC Vive: Analysis and Accuracy Improvement / M. Borges, A. Symington, B. Coltin, T. Smith, R. Ventura // IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Madrid, Spain, 01–05 Oct. 2018. IEEE, 2018. P. 2610–2615. doi: 10.1109/IROS.2018.8593707

Информация об авторах

Боронахин Александр Михайлович – доктор технических наук (2013), профессор (2020), профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Нгуен Куок Хань – магистр по направлению "Приборостроение" (2020), аспирант Вьетнамского государственного технического университета им. Ле Куй Дона (Ханой, Вьетнам). Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – инерциальные системы навигации и ориентации.

Адрес: Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 236, Хоанг Куок Вьет, Ко Нхуэ, Бак Ты Лиэм, Ханой, Вьетнам

E-mail: nguyenquockhanh183@gmail.com

References

1. Kanellakis C., Nikolakopoulos G. Survey on Computer Vision for UAVs: Current Developments and Trends. *J. of Intelligent & Robotic Systems*. 2017, vol. 87, pp. 141–168.

doi: 10.1007/s10846-017-0483-z

2. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A Survey of Optical Flow Techniques for UAV Navigation Applications. *Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013, pp. 710–716.

doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752

3. Li Yu., Scanavino M., Capello E., Dabbene F., Guglieri G., Vilardi A. A Novel Distributed Architecture for UAV Indoor Navigation. *Transportation Research Procedia*. 2018, vol. 35, pp. 13–22.

doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.003

4. Lee Ch., Chang Yu., Park G., Ryu J., Jeong S.-G., Park S. Indoor Positioning System Based on Incident Angles of Infrared Emitters. *30th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea (South), 02–06 Nov. 2004. IEEE, 2004, pp. 2218–2222.

doi: 10.1109/IECON.2004.1432143

5. Raharijaona T., Mignon P., Juston R., Kerhuel L., Viollet S. HyperCube: A Small Lensless Position Sensing Device for the Tracking of Flickering Infrared LEDs. *Sensors*. 2015, vol. 15, no. 7, pp. 16484–16502.

doi: 10.3390/s150716484

6. Hoppe M., Burger M., Schmidt A., Kosch T. DronOS: Aflexible Open-Source Prototyping Framework for Interactive Drone Routines. *Proc. of 18th Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia*. 2019, art. no. 15, pp. 1–7.

doi: 10.1145/3365610.3365642

7. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance Bounds in Positioning with the Vive Lighthouse System. *IEEE Intern. Conf. on Information Fusion*, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019, pp. 1–8.

doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242

8. Sletten K. Automated Testing of Industrial Robots Using HTC Vive for Motion Tracking. M. S. thesis. Norway, University of Stavanger, 2017, 28 p.

9. Yusefi A., Durdu A., Sungur C. ORB-SLAM-based 2D Reconstruction of Environment for Indoor Autonomous Navigation of UAVs. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*. 2020, pp. 466–472.

doi: 10.31590/ejosat.819620

10. Niehorster D. C., Li L., Lappe M. The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research. *I-Perception*. 2017, vol. 8, no. 3, art. no. 2041669517708205. doi: 10.1177/2041669517708205

11. Ikbal M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic Pose Tracking Performance Evaluation of HTC Vive Virtual Reality System. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698

12. Lwowski J., Majumdar A., Benavidez P., Prevost J. J., Jamshidi M. HTC Vive Tracker: Accuracy for Indoor Localization. *IEEE Systems, Man and Cybernetics Magazine*. 2020, vol. 6, iss. 4, pp. 15–22.

doi: 10.1109/MSMC.2020.2969031

13. Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh, Nguyen Trong Yen. Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 6–18.

doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

14. Taffanel A., Rousselot B., Danielsson J., McGuire K., Richardsson K., Eliasson M., Antonsson T., Hönig W. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (accessed: 08.12.2025)

15. Borges M., Symington A., Coltin B., Smith T., Ventura R. HTC Vive: Analysis and Accuracy Improvement. IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Madrid, Spain, 01–05 Oct. 2018. IEEE, 2018, pp. 2610–2615.

doi: 10.1109/IROS.2018.8593707

Information about the authors

Alexander M. Boronakhin, Dr Sci. (Eng.) (2013), Professor (2020), Professor of the Department of Laser Measuring and Navigation Systems, Dean of the Faculty of Information Measuring and Biotechnical Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of railway traffic.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Nguyen Quoc Khanh, Engineer in Instrumentation Engineering (2020), Postgraduate student at Le Quy Don State Technical University (Hanoi, Vietnam). The author of 10 scientific publications. Area of expertise: inertial navigation and orientation systems.

Address: Le Quy Don Technical University, 236, Hoang Quoc Viet, Co Nhue, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

E-mail: nguyenquockhanh183@gmail.com
