

Определение коэффициента масштабирования в системе интеграции инфракрасной системы и ORB-SLAM

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. Интерес к исследованиям автономных малогабаритных транспортных устройств в последние годы стремительно растет, при этом задачи навигации являются ключевыми и первоочередными для их решения. В условиях внешней среды использование глобальной спутниковой навигационной системы остается оптимальным решением благодаря широкому покрытию, автоматичности и простоте применения. Однако движение в неизвестных и GPS-недоступных средах, таких как помещения, остаются открытой научной задачей. Система Valve Lighthouse была предложена для навигации транспортных устройств в ограниченных пространствах благодаря высокой степени автоматизации, низкой стоимости, простоте развертывания, а также крайне компактным сенсорам, устанавливаемым на устройство, что делает ее особенно подходящей для малогабаритных транспортных устройств. Однако, как и другие системы навигации в помещении, Lighthouse не позволяет строить карту неизвестной среды (обнаруживать препятствия), что может приводить к столкновениям и повреждению устройства. Поэтому интеграция с системой построения карты является необходимой. В настоящее время оптимальным выбором для малогабаритных устройств является ORB-SLAM на основе монокулярной камеры. Единственным существенным недостатком монокулярных систем является невозможность определения коэффициента масштаба карты. С этой целью в данной статье предлагается алгоритм определения коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM при ее интеграции с инфракрасной системой.

Цель работы. Определение коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM в интегрированной системе с инфракрасной системой.

Материалы и методы. Предложенный метод основан на адаптивном расширенном фильтре Калмана с окном "Sage" в сочетании с методом оценки максимального правдоподобия.

Результаты. Предложенный алгоритм позволяет в реальном времени определять коэффициент масштаба карты системы ORB-SLAM по каждой оси.

Заключение. Предлагается алгоритм определения коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM по каждой оси в реальном времени в составе интегрированной системы с инфракрасной системой Valve Lighthouse.

Ключевые слова: коэффициент масштаба, ORB-SLAM, инфракрасная система

Для цитирования: Боронахин А. М., Нгуен Куок Хань. Определение коэффициента масштабирования в системе интеграции инфракрасной системы и ORB-SLAM // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 64–78.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-64-78

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.01.2026; принята к публикации после рецензирования 13.03.2026; опубликована онлайн 30.04.2026

Determination of the Scale Factor in an Integrated Infrared and ORB-SLAM System

Alexander M. Boronakhin¹, Nguyen Quoc Khanh^{2✉}

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

✉ nguyenquockhanh183@gmail.com

Abstract

Introduction. Recent years have seen an increased interest in research on small autonomous vehicles, in which navigation are the fundamental problems that must be addressed. In outdoor environments, the use of global satellite navigation systems remains the optimum solution due to their wide coverage, high level of automation, and ease of use. However, operation in unknown and GPS-denied environments, such as indoor spaces, is still a relevant research problem. The Valve Lighthouse (LH) system has been proposed for guiding mobile platforms in confined spaces due to its autonomous operation, low cost, ease of deployment, and miniature onboard sensors, which are particularly suitable for small-scale vehicles. Nevertheless, similar to other indoor localization sensors, the LH system does not allow the reconstruction of an unknown environment (i.e., obstacle detection), which may lead to collisions and potential damage to the vehicle. Therefore, integration with a mapping system is necessary. Currently, an optimal choice for small-scale platforms is ORB-SLAM based on a monocular camera. The main drawback of monocular camera-based systems lies in their inability to determine the scale factor of the map. In this regard, this paper proposes an algorithm to estimate the map scale factor of the ORB-SLAM system through its integration with an infrared system.

Aim. Determination of the map scale factor of the ORB-SLAM system in an integrated infrared system.

Materials and methods. The proposed algorithm is based on an extended adaptive Kalman filter with a Sage window combined with a maximum likelihood estimation method.

Results. The proposed algorithm enables the determination of the map scale factor of the ORB-SLAM system along each axis in real time.

Conclusion. An algorithm is proposed to determine the map scale factor of the ORB-SLAM system along each axis in real time within a system integrated with the Valve Lighthouse infrared system.

Keywords: scale factor, ORB-SLAM, infrared system

For citation: Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh. Determination of the Scale Factor in an Integrated Infrared and ORB-SLAM System. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 64–78.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-64-78

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

Submitted 22.01.2026; accepted 13.03.2026; published online 30.04.2026

Введение. В последнее время растет интерес к исследованиям автономных транспортных устройств, особенно малых устройств. Основными преимуществами этих транспортных устройств являются возможность гибкого маневрирования в движении [1], а также совместная работа для решения сложных задач в труднодоступных средах, куда человеку непросто добраться [2–6]. Основные задачи малых транспортных средств (МТС) обычно включают наблюдение, разведку, исследование и изучение. Поэтому навигация является первоочередной задачей для обеспечения высокой эф-

фективности выполнения этих миссий.

Для внешней среды использование глобальных навигационных спутниковых систем является оптимальным решением благодаря широкому покрытию, автоматизации и простоте использования. Однако движение в неизвестных средах и в помещениях без GPS остается открытой проблемой. В настоящее время для решения задачи навигации в помещениях разработано множество альтернативных подходов [7]. Среди них можно выделить такие технологии, как оптический поток, инерциальные навигационные системы (ИНС) и ультразвуко-

вые системы. Тем не менее каждая из перечисленных технологий имеет определенные ограничения, такие как недостаточная точность, высокие требования к вычислительным ресурсам и накопление погрешностей с течением времени. Кроме того, особенности закрытых помещений с ограниченным пространством и высокой плотностью препятствий предъявляют требования к минимизации размеров транспортного устройства. Потребность в простой, точной (в пределах сантиметров) и компактной системе для навигации в помещении является актуальной задачей, требующей дальнейших исследований и разработки.

В последнее время навигация с использованием инфракрасной системы Valve Lighthouse привлекает большое внимание. Изначально система была разработана для приложений виртуальной реальности. Однако благодаря множеству преимуществ, таких как низкая стоимость, простота развертывания, удобство транспортировки и использования, компактные датчики, подходящие для малых устройств, система была внедрена для задач навигации в помещении для транспортных средств (ТС) [8–10]. В [11] Т. Арно и соавторы реализовали систему позиционирования в помещении для беспилотных летательных аппаратов, используя одну или две станции Lighthouse. Точность системы Valve Lighthouse была проверена в экспериментах [12–14]. В предыдущих исследованиях были разработаны алгоритмы для минимизации погрешностей системы, вызванных погрешностями установки базовых станций, до уровня 1...2 см, что соответствует требованиям навигации в помещениях.

Подобно ранее рассмотренным навигационным системам в помещении, одним из присущих недостатков этой системы в задаче навигации в помещении является неспособность определять неизвестную среду, что может привести к столкновениям и повреждению устройства. Это требует интеграции с методом определения и картографирования неизвестной среды в реальном времени. На данный момент оптимальным выбором является метод одновременного позиционирования и построения карты (SLAM). Для этого метода были исследованы различные датчики, такие как лазерные

сканеры (Lidar) [15], монокулярные камеры [16], стереокамеры [17]. Среди них монокулярные камеры являются наиболее подходящими для МТС по следующим причинам:

- низкое энергопотребление, компактные размеры и низкая стоимость;
- система SLAM с одной камерой не ограничена внутренним полем зрения, что позволяет работать даже в очень узких пространствах [18].

Однако недостатком этой системы является невозможность определения масштабного коэффициента карты из-за отсутствия информации о глубине в изображении, поэтому требуется интеграция с внешними системами для определения истинного масштаба карты (в данном случае – инфракрасная система Valve Lighthouse). Методы определения масштабного коэффициента были представлены во многих публикациях, таких как [18], где предложен замкнутый оценщик масштабного коэффициента на основе статистической модели. В [19] масштабный коэффициент вводится в расширенный фильтр Калмана как дополнительная переменная состояния. Однако в этих публикациях масштабный коэффициент обычно рассматривается как постоянный, а случайная погрешность коэффициента – как неизменная на протяжении всего времени. На практике же существует два этапа: нестабильного масштабного коэффициента на малых координатах и стабильного коэффициента после того, как устройство прошло достаточное расстояние.

Поэтому в данном исследовании авторы предлагают систему определения масштабного коэффициента в реальном времени по каждой оси, с использованием расширенного адаптивного фильтра Калмана с окном "Sage" и методом максимально правдоподобной оценки.

Система позиционирования Lighthouse. Система, разработанная компанией Valve Corporation, изначально была создана для виртуальной реальности, однако в последние годы она стала использоваться как высокоточное решение для пространственного позиционирования в робототехнике и управлении ТС в помещении. При применении для навигации ТС система работает на основе базовых станций (рис. 1), которые излучают лазерные сигналы, непрерывно сканирующие пространство, в то

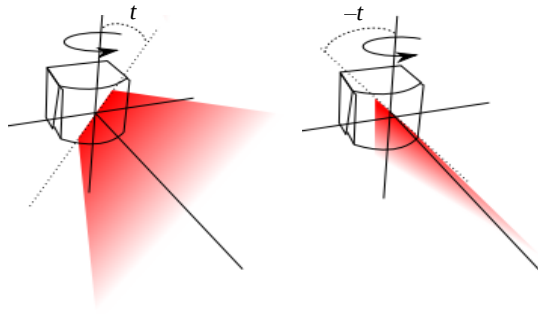


Рис. 1. Базовая станция

Fig. 1. Basestation

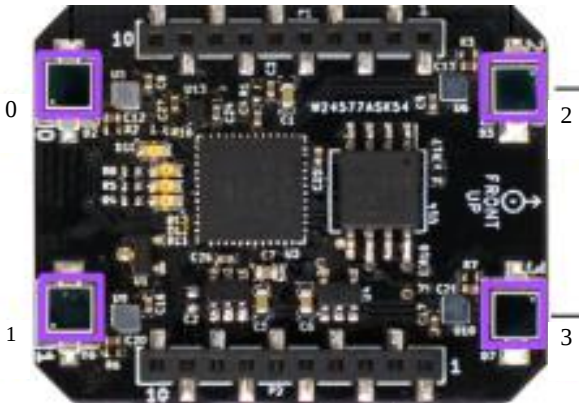


Рис. 2. Сенсорная плата

Fig. 2. Sensor deck

время как датчики (0–3), установленные на дроне (рис. 2), принимают эти сигналы для вычисления своего положения и ориентации в реальном времени [11].

Такой подход позволяет ТС определять координаты с точностью, достигающей миллиметрового уровня при идеальных условиях. Благодаря этому система позиционирования Lighthouse становится эффективной альтернативой GPS в помещении, где спутниковый сигнал недоступен или нестабилен, а также может конкурировать с дорогостоящими системами захвата движения, такими как Vicon или OptiTrack.

Алгоритм определения положения ТС в системе Lighthouse основан на нахождении угла вращения вращающегося барабана $\alpha_{i,j}$ (рис. 3), который теоретически описывается двумя составляющими α_s и α_t по следующей формуле:

$$\alpha_{i,j} = \alpha_s + \alpha_t = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{Y_2^{D_i}}{X_2^{D_i}} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{Z_2^{D_i} \operatorname{tg}(\beta_j)}{\sqrt{(X_2^{D_i})^2 + (Y_2^{D_i})^2}} \right),$$

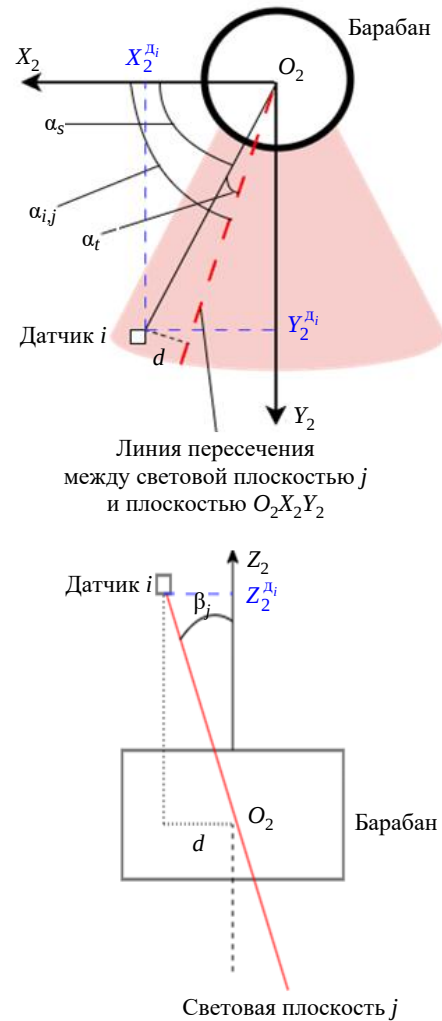


Рис. 3. Принцип работы системы
Fig. 3. Operating principle of the system

где $[X_2^{D_i}, Y_2^{D_i}, Z_2^{D_i}]^T = P_2^{D_i}$ – координаты датчика i в системе координат, связанной с базовой станцией; α_s – угол между O_2X_2 и проекцией O_2 – датчик на плоскость $O_2X_2Y_2$; $\alpha_t = \alpha_{i,j} - \alpha_s$; i – индекс датчиков (1–4); j – индекс световых плоскостей (1–2); β_j – угол наклона световой плоскости относительно оси O_2Z_2 .

Из соотношения между координатами датчика $P_2^{D_i}$ и координатами ТС $P_2^{об}$ в системе координат, связанной с базовой станцией, определяется соотношение между углом вращения барабана $\alpha_{i,j}$ и координатами ТС $P_2^{об}$. Положение ТС определяется методом Ньютона по следующему выражению для невязки:

$$u_{i,j} = \bar{\alpha}_{i,j} - \alpha_{i,j},$$

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

Положение объекта определяется методом Ньютона по шагам:

$$P_{2,k+1}^{ob} = P_{2,k}^{ob} - (JJ^T)^{-1} J^T U,$$

где $J = \frac{\partial U}{\partial P_2^{ob}}$; $U_{8 \times 1} = [u_{i,j}]$.

Далее рассмотрим ORB-SLAM и принцип ее работы.

ORB-SLAM – это мощный метод SLAM, который использует постоянные скорость и вращения для выделения особых точек на изображениях. ORB-SLAM позволяет в режиме реального времени искать характеристики ORB на поверхности изображения и использовать их в качестве ключевых точек для расчета положения и ориентации камеры [20].

Система состоит из 3 основных потоков: мониторинга, локального картирования и замыкания контура (рис. 4). Последовательность изображений будет последовательно поступать на обработку. Поток мониторинга определяет

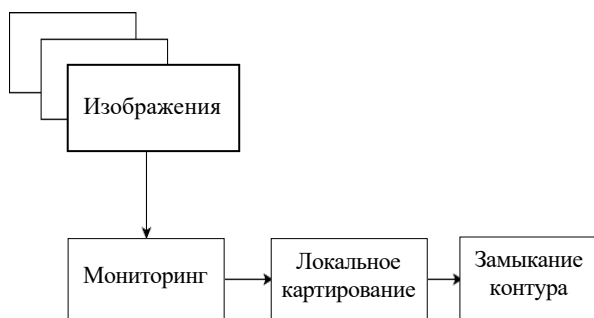


Рис. 4. Принцип работы ORB-SLAM

Fig. 4. Operating principle of ORB-SLAM

локальное положение камеры на основе идентификации ключевых кадров. Характеристики корреляции подкадров по отношению к основным кадрам оптимизируются посредством автоматической коррекции луча при движении. Поток локального картирования использует граф совместимости для создания локальной карты. Функции ORB триангулируются и сопоставляются с ближайшим ключевым кадром на графике совместимости. Если точка карты встречается более чем в 25 % кадров и встречается как минимум в 3 ключевых кадрах, она будет добавлена на локальную карту. Поток замыкания цикла позволяет повторно оптимизировать местоположения и точки на карте, используя RANSAC и методы коррекции луча [21].

На рис. 5 представлен наглядный принцип работы системы.

Интеграция системы Lighthouse и системы ORB-SLAM. Система, интегрирующая инфракрасную систему Lighthouse и систему ORB-SLAM, представлена на схеме на рис. 6. При этом обе системы преобразуются в одну локальную систему координат 1, поскольку система ORB-SLAM принимает координаты, связанные с устройством в начальный момент, в качестве исходной системы координат. Достаточно на первом шаге настроить устройство так, чтобы оно находилось в начале координат локальной системы. Таким образом, система координат ORB-SLAM совпадает с локальной системой координат.

Теперь необходимо преобразовать систему координат 2, связанную с базовой станцией, в локальную систему 1. Базовая станция будет установлена на фиксированном возвышении. Система Lighthouse определяет положение МТС в системе координат, прикрепленной к базовой станции. Для навигации и ориентации МТС в определенном пространстве требуется

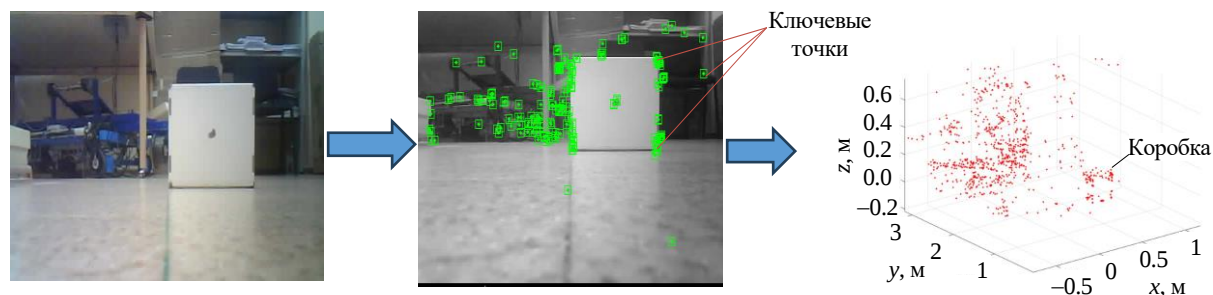


Рис. 5. Наглядный принцип работы системы

Fig. 5. Visual representation of the system operation

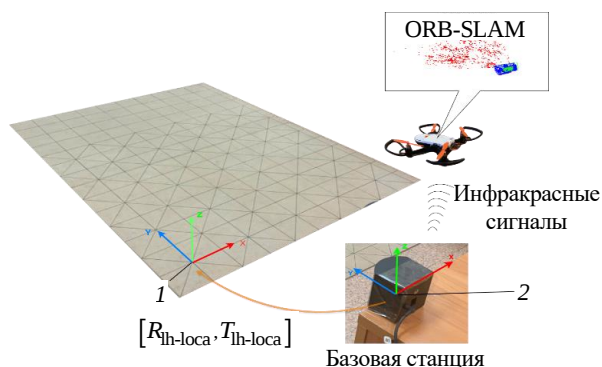


Рис. 6. Интеграция системы Lighthouse и системы ORB-SLAM

Fig. 6. Integration of the Lighthouse and ORB-SLAM systems

калибровка системы, прикрепленной к базовой станции, по сравнению с локальной системой координат. Этот процесс осуществляется по следующей математической модели:

$$\begin{bmatrix} x^{lh} \\ y^{lh} \\ z^{lh} \end{bmatrix} = [R_{lh-local} \quad T_{lh-local}] * \begin{bmatrix} x_0^{lh} \\ y_0^{lh} \\ z_0^{lh} \end{bmatrix},$$

где x^{lh} , y^{lh} , z^{lh} – координаты, определенные инфракрасной системой, преобразуются в локальную систему координат; x_0^{lh} , y_0^{lh} , z_0^{lh} – координаты в инфракрасной системе Lighthouse; $[R_{lh-local} \quad T_{lh-local}]$ – матрица преобразования.

Одним из оптимальных методов калибровки между двумя системами координат является метод PnP. Метод использует набор точек в локальной системе координат и соответствующие им позиции в системе координат, прикрепленной к базовой станции, для определения относительного положения базовой станции в локальной системе координат в виде вращения и перемещения. Нелинейная задача в методе оптимизируется с помощью алгоритма Левенберга–Маркварда.

Определение коэффициента масштаба карты ORB-SLAM. Масштаб карты представляет собой соотношение между картой, построенной системой ORB-SLAM, и реальной картой. При интеграции с инфракрасной системой масштаб может быть определен по следующему уравнению:

$$k^x = \frac{x^{slam}}{x^{lh}}; k^y = \frac{y^{slam}}{y^{lh}}; k^z = \frac{z^{slam}}{z^{lh}}, \quad (1)$$

где k^x , k^y , k^z – коэффициенты масштаба по каждой оси; x^{slam} , y^{slam} , z^{slam} – координаты устройства, определенные ORB-SLAM в локальной системе координат; x^{lh} , y^{lh} , z^{lh} – координаты устройства, определенные инфракрасной системой в локальной системе координат.

Из-за схожести осей в статье рассматривается только определение коэффициента масштаба одной оси, в данном случае оси OY . Для оценки коэффициента масштаба по (1) при движении устройства проводится наблюдение, как показано на рис. 7, при котором устройство перемещается параллельно оси OY , а коэффициент масштаба вычисляется в реальном времени по (1) (рис. 8). Для оценки точности коэффициента масштаба координаты объекта (бумажной коробки) определяются с помощью системы ORB-SLAM и умножаются на коэффициент масштаба, после чего сравниваются с истинными координатами (рис. 8).

Можно оценить, что в процессе движения устройства параллельно оси OY (с увеличением координаты по оси OY) коэффициент масштаба изменяется в определенном направлении (уменьшается), и когда устройство достигает определенной координаты, коэффициент масштаба стабилизируется, а его среднее значение стремится к фиксированному. Одновременно при наблюдении графика координат объекта

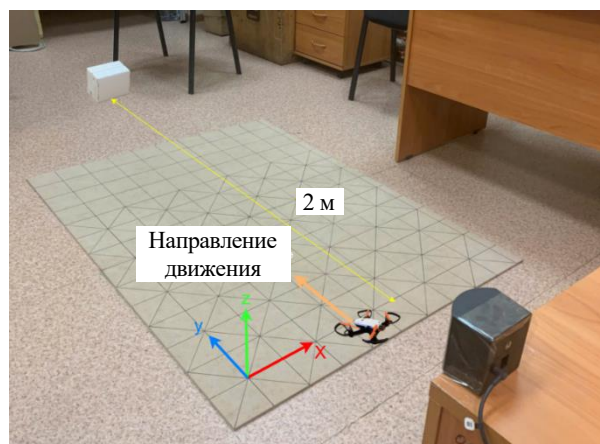


Рис. 7. Установка экспериментов

Fig. 7. Experimental setup

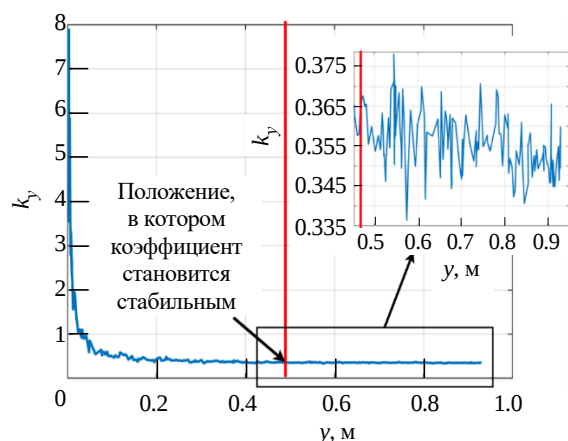


Рис. 8. Зависимость коэффициента масштаба от положений устройства по оси OY

Fig. 8. Dependence of the scale factor on the device positions along the OY axis

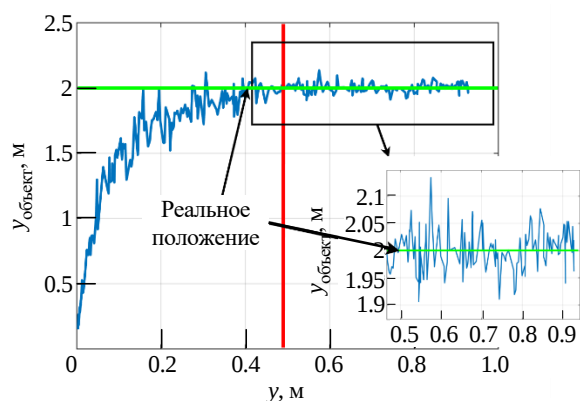


Рис. 9. Оценка положения объекта при движении устройства вдоль оси OY

Fig. 9. Estimation of the object position when the device moves along the OY axis

(бумажной коробки), определенных системой ORB-SLAM с учетом коэффициента масштаба, видно, что по мере увеличения координаты устройства координаты объекта также постепенно приближаются к реальному положению, а при достижении стабильности значения координат находятся вокруг истинного значения. Однако погрешность может достигать более 10 см, что делает их неприемлемыми для навигации в помещении. Кроме того, дисперсия коэффициента масштаба, оцененная в некоторых точках (рис. 10), показывает, что дисперсия также уменьшается со временем и стремится к определенному значению. Это изменение обусловлено тем, что дисперсия координат устройства, определяемых системой ORB-SLAM, также уменьшается со временем.

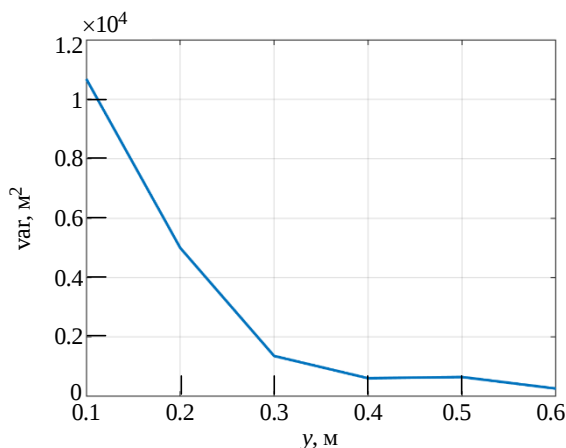


Рис. 10. Дисперсия коэффициента масштаба в разных положениях устройства по оси OY

Fig. 10. Variance of the scale factor at different device positions along the OY axis

Именно поэтому в данной статье предлагается алгоритм, объединяющий два метода: расширенный адаптивный фильтр Калмана с окном "Sage" и метод оценки максимального правдоподобия. Фильтр Калмана используется на этапе, когда коэффициент масштаба изменяется, а метод оценки максимального правдоподобия применяется, когда коэффициент масштаба уже стабилизировался. Схема предложенного алгоритма представлена на рис. 11. Алгоритм разделен на два этапа.

Первый этап. На первом этапе, когда коэффициент масштаба изменяется, а также меняется дисперсия, используется расширенный адаптивный фильтр Калмана с окном "Sage" (SWEKF). Схема фильтра показана на рис. 12. Модель состояния и модель наблюдения представлены следующими выражениями:

1) модель состояния:

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} y & v^y & k^y \end{bmatrix}; \\ X_k &= FX_{k-1} + Gu_{k-1} + \omega_{k-1}; \\ F &= \begin{bmatrix} 1 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} 0 & dt & 0 \end{bmatrix}^T; \\ u &= a^y; \\ Q &= \text{const}; \end{aligned}$$

2) модель наблюдения:

$$\begin{aligned} z^{\text{slam}} &= k^y y + g^{\text{slam}}; \\ z^{\text{lh}} &= y + g^{\text{lh}}; \end{aligned}$$

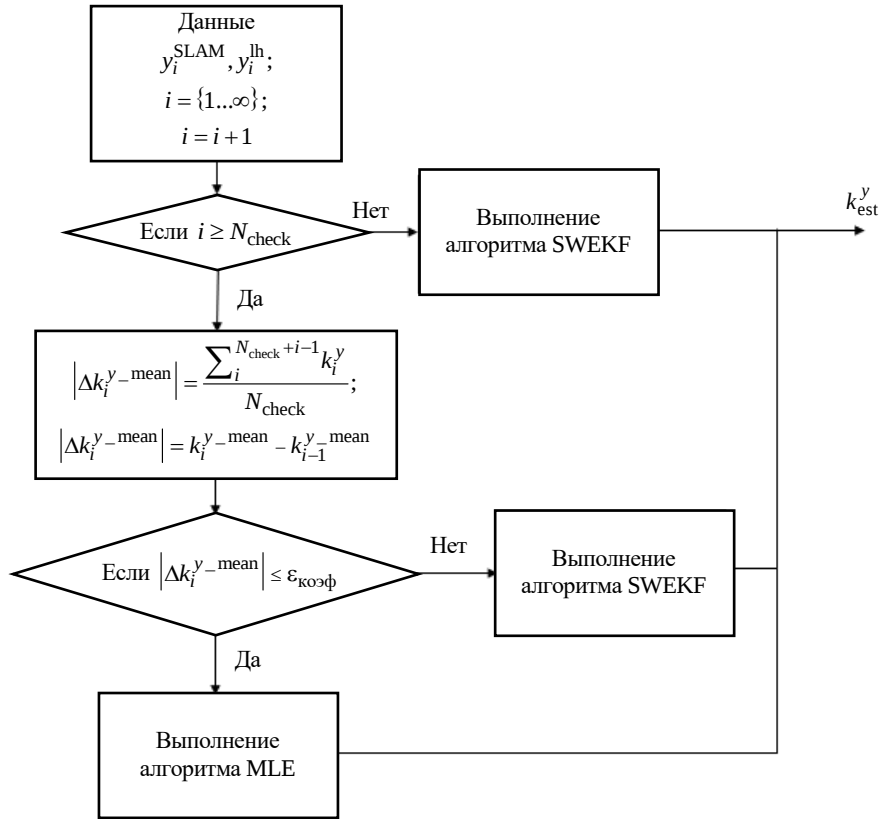


Рис. 11. Схема предложенного алгоритма

Fig. 11. Diagram of the proposed algorithm

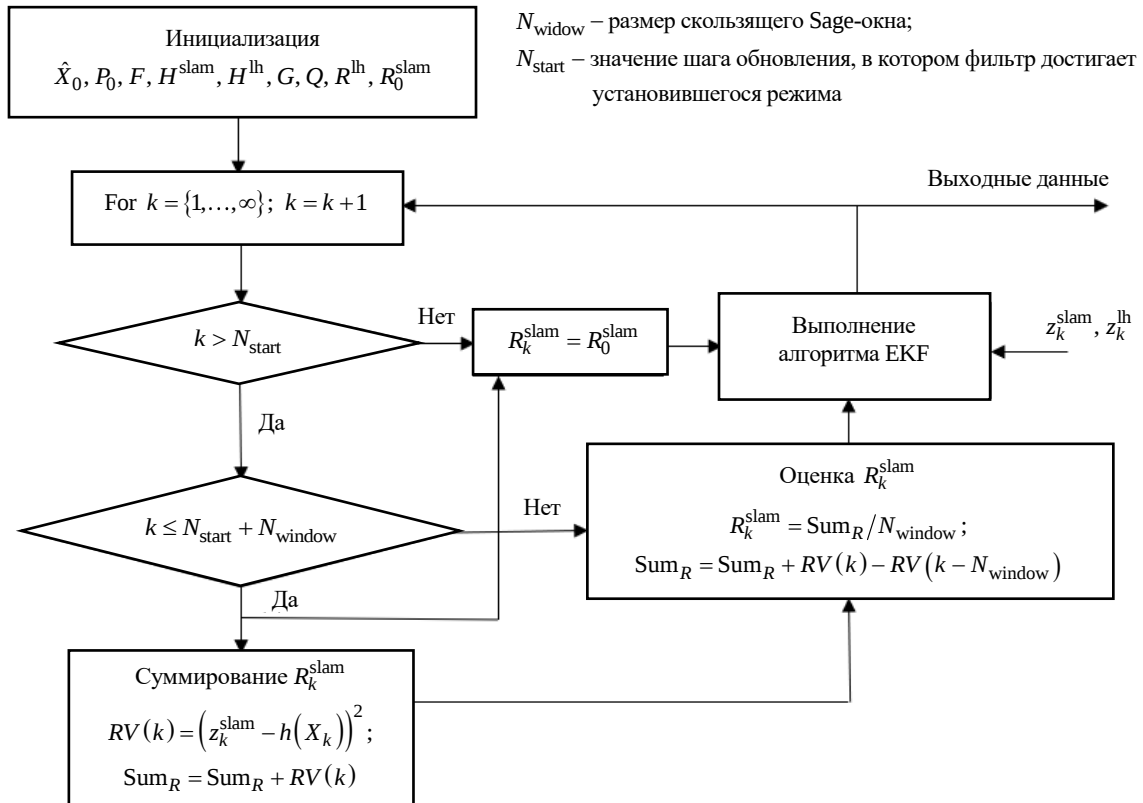


Рис. 12. Схема адаптивного расширенного фильтра Калмана с окном "Sage"

Fig. 12. Diagram of the adaptive Extended Kalman Filter with Sage Window

$$\begin{aligned} H^{\text{slam}} &= \begin{bmatrix} k^y & 0 & y \end{bmatrix}; \\ H^{\text{lh}} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ R^{\text{lh}} &= \text{const}; \\ R^{\text{slam}} &\neq \text{const}, \end{aligned}$$

где y , v^y – координаты и скорость устройства по ОУ; a^y – ускорение устройства по ОУ, измеряемое акселерометром; ω , $\mathcal{G}^{\text{slam}}$, $\mathcal{G}^{\text{lh}}$ – белый гауссовский шум.

Особенность этого адаптивного фильтра заключается в использовании скользящего окна с количеством шагов N_{window} , в котором статистические характеристики шума остаются неизменными или изменяются очень мало. Скользящее окно во времени позволяет обновлять дисперсию сигнала системы ORB-SLAM во времени:

$$R_k^{\text{slam}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_{\text{window}}} \left[z_{k-j}^{\text{slam}} - h(\hat{X}_{k-j}) \right]^2.$$

Второй этап. Когда коэффициент масштаба и дисперсия стабилизировались, применяется метод оценки максимального правдоподобия (maximum-likelihood estimation – MLE) – это широко используемый метод для оценки неизвестных параметров статистической модели. Основная идея этого метода заключается в выборе неизвестных параметров так, чтобы вероятность наблюдаемых данных была максимальной. Обычно выполняют минимизацию отрицательного логарифма функции правдоподобия:

$$\begin{aligned} L(y_k, \dots, y_n, k^y) &\propto \\ &\propto \frac{1}{2} \sum_k^n \left(\frac{\|z_k^{\text{slam}} - k^y y_k\|^2}{\sigma_{\text{slam}}^2} + \frac{\|z_k^{\text{lh}} - y_k\|^2}{\sigma_{\text{lh}}^2} \right), \end{aligned}$$

где $\sigma_{\text{slam}}^2 = R^{\text{slam}}$; $\sigma_{\text{lh}}^2 = R^{\text{lh}}$.

В этом случае коэффициент масштаба определяется по следующей формуле:

$$k^y = \frac{s_1 - s_2 + \text{sign}(s_3) \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + 4s_3^2}}{2\sigma_{\text{slam}}^{-1} \sigma_{\text{lh}} s_3},$$

$$\begin{aligned} \text{где } s_1 &= \sigma_{\text{lh}}^2 \sum_k^n \left(z_k^{\text{slam}} \right)^2; \quad s_2 = \sigma_{\text{slam}}^2 \sum_k^n \left(z_k^{\text{lh}} \right)^2; \\ s_3 &= \sigma_{\text{slam}} \sigma_{\text{lh}} \sum_k^n z_k^{\text{lh}} z_k^{\text{slam}}. \end{aligned}$$

Два этапа связываются между собой одним условием:

$$|\Delta k_i^{y-\text{mean}}| \leq \varepsilon_{\text{коэф}},$$

где $\Delta k_i^{y-\text{mean}}$ – изменение среднего значения коэффициента масштаба; $\varepsilon_{\text{коэф}}$ – константа.

Здесь также используется скользящее окно для определения среднего коэффициента масштаба с целью снижения влияния случайных погрешностей.

Оценка эффективности предложенного алгоритма. Для оценки эффективности предложенного алгоритма описанный эксперимент был проведен 3 раза. При каждом проведении коэффициент определялся тремя методами (SWEKF, MLE, SWEKF+MLE). Эффективность оценивалась через определение координат объекта (бумажной коробки). Результаты представлены на рис. 13–15.

Для дополнительной оценки эффективности алгоритма были определены координаты бумажной коробки, установленной в положении 1.1 м. Результаты, показывающие наибольшее значение ошибки определения координат коробок, представлены в таблице.

По результатам трех проведенных экспериментов можно легко видеть эффективность предложенного алгоритма. В то время как метод MLE обладает низкой скоростью сходимости, а фильтр Калмана определяет коэффициент масштаба с недостаточным снижением уровня шума, предложенный алгоритм объединяет преимущества обоих методов. Это позволяет на стадии стабилизации определять коэффициент масштаба с очень низким уровнем шума (1-й эксперимент – $k^y = 0.361$; 2-й эксперимент – $k^y = 0.264$; 3-й эксперимент – $k^y = 0.307$). Точка перехода между двумя этапами находится в диапазоне 0.550...0.650 м (1-й эксперимент – $U_{\text{переход}} = 0.552$ м; 2-й эксперимент – $U_{\text{переход}} = 0.621$ м; 3-й эксперимент – $U_{\text{переход}} = 0.623$ м),

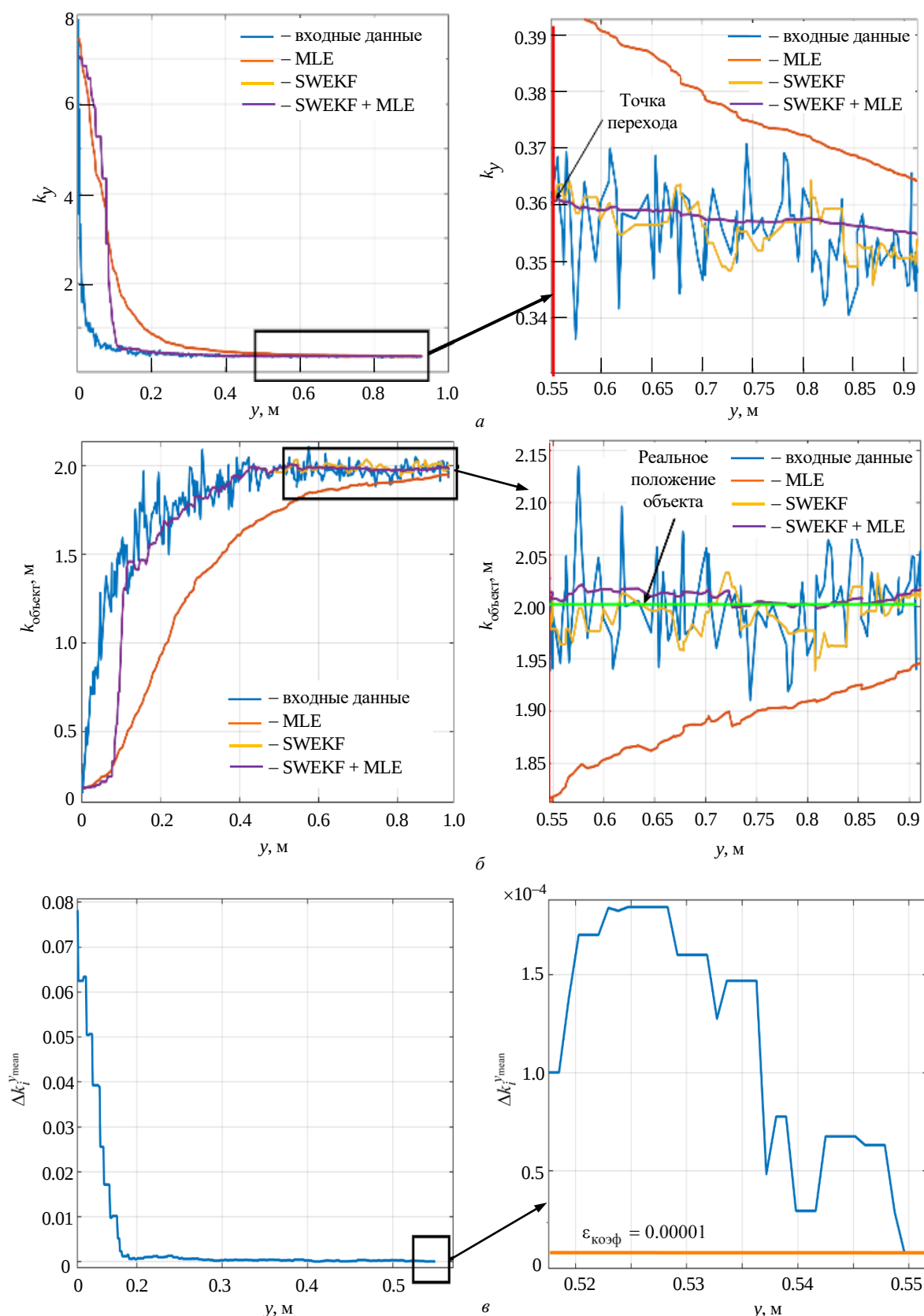


Рис. 13. Результаты первого проведения экспериментов: *a* – коэффициент масштаба ОУ; *б* – координаты объекта в положении 2 м по ОУ; *в* – изменение среднего коэффициента масштаба

Fig. 13. Results of the first experimental run: *a* – scale factor ОУ; *б* – object coordinates at position 2 m along ОУ; *в* – change in the average scale factor

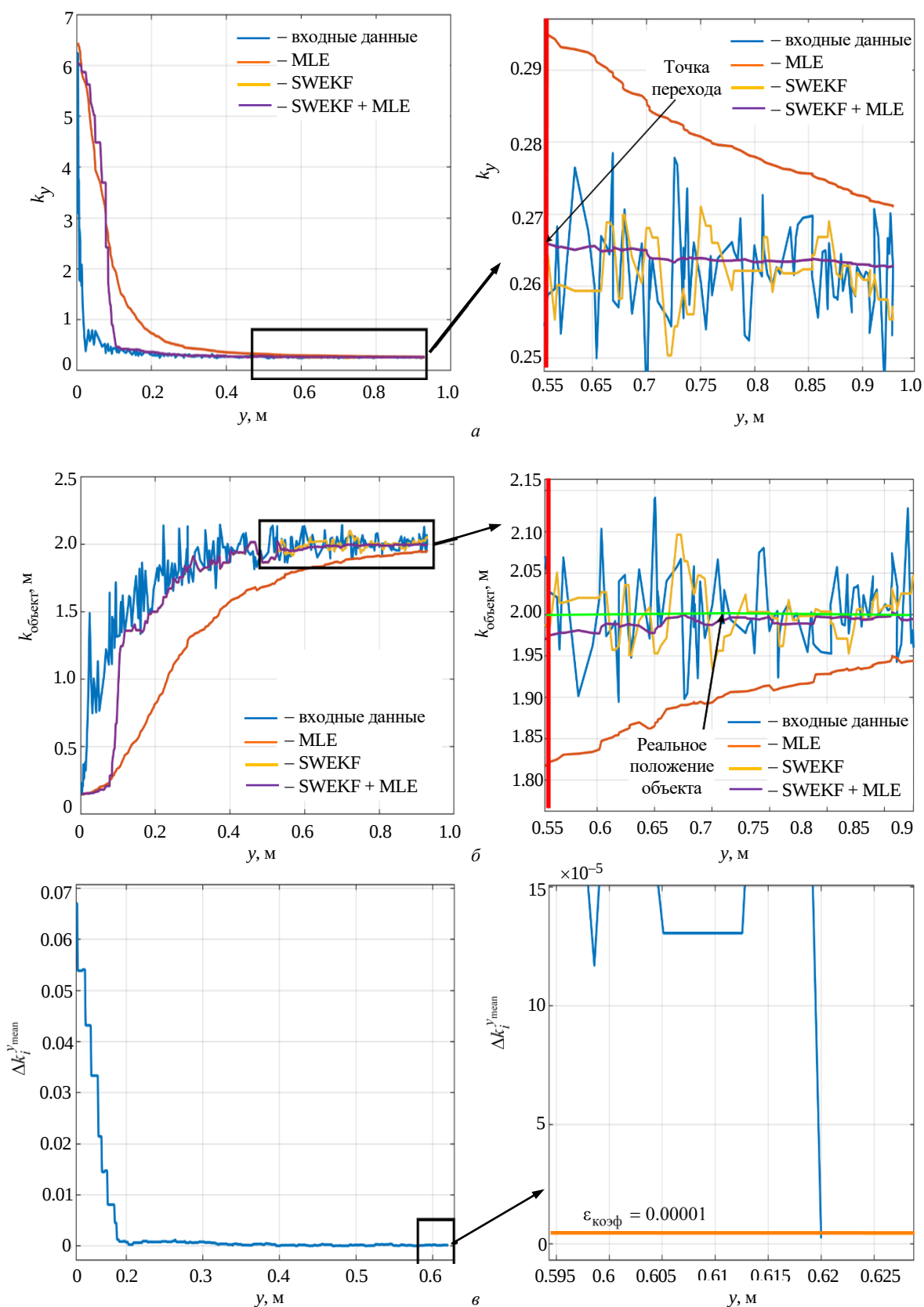


Рис. 14. Результаты второго проведения экспериментов: а – коэффициент масштаба ОУ; б – координаты объекта в положении 2 м по ОУ; в – изменение среднего коэффициента масштаба

Fig. 14. Results of the second experimental run: а – scale factor ОУ; б – object coordinates at position 2 m along ОУ; в – change in the average scale factor

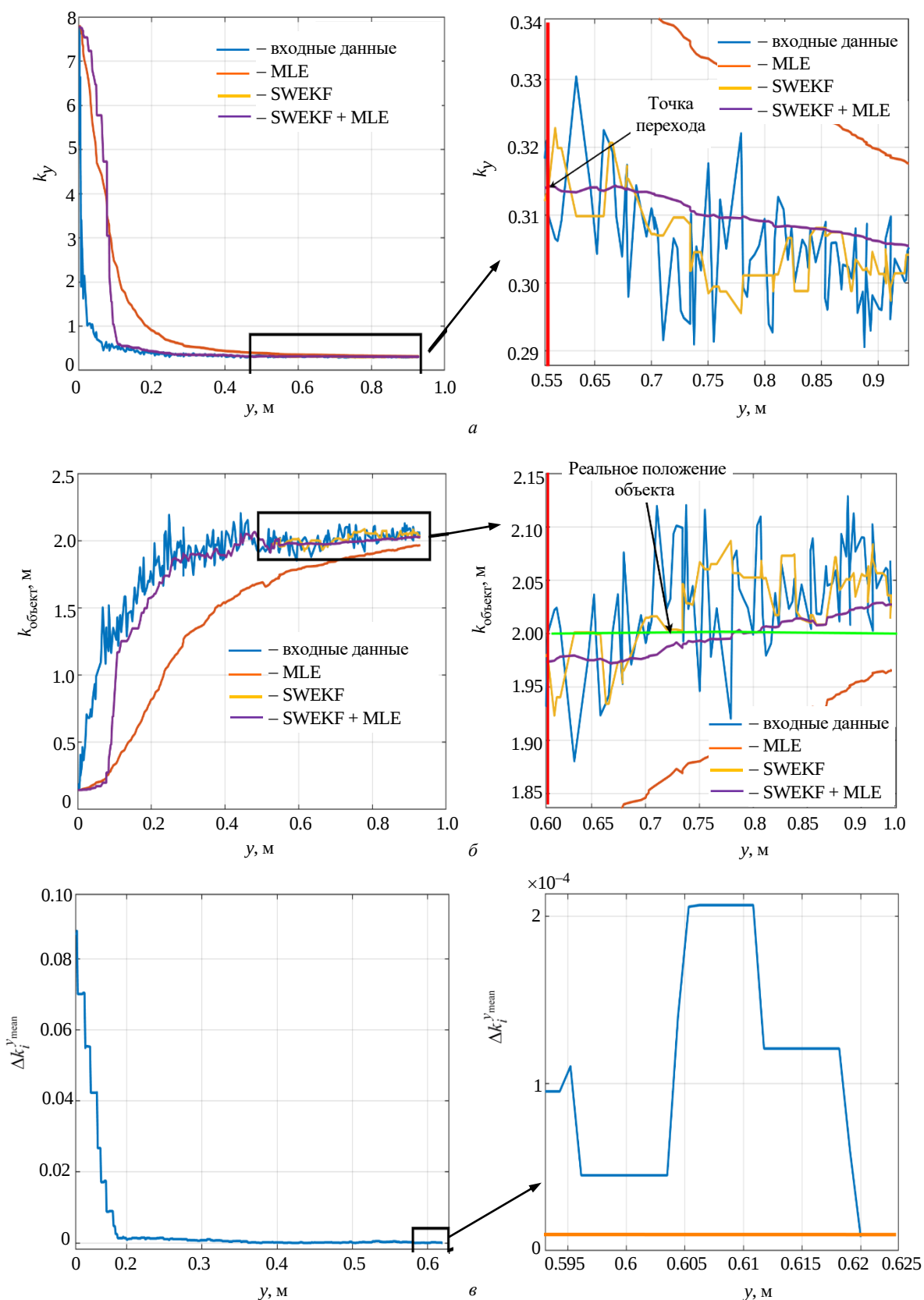


Рис. 15. Результаты третьего проведения экспериментов: а – коэффициент масштаба ОУ; б – координаты объекта в положении 2 м по ОУ; в – изменение среднего коэффициента масштаба

Fig. 15. Results of the third experimental run: а – scale factor ОУ; б – object coordinates at position 2 m along ОУ; в – change in the average scale factor

Максимальные погрешности определения положения
объекта по оси OY

Maximum errors in determining the object position
along the OY axis

Методы	Положение объекта, м	1-й раз, см	2-й раз, см	3-й раз, см
Входные	1.1	8.4	9.6	7.1
	2	13.4	14.1	12.8
MLE	1.1	14.3	13.5	12.6
	2	18.3	17.5	14.7
SWEKF	1.1	5.5	4.6	6.5
	2	6.9	9.7	8.6
SWEKF+MLE	1.1	1.5	1.9	1.6
	2 м	2.1	2.3	2.2

что соответствует оценкам, представленным на рис. 8 и 9.

Эффективность алгоритма также проявляется при определении координат объектов (бу-мажных коробок). Предложенный алгоритм позволяет определять координаты объектов в пределах 2 м с точностью около 2 см (1-й эксперимент – 2.1 см; 2-й эксперимент – 2.3 см; 3-й эксперимент – 2.2 см), а в пределах 1 м по-

грешность составляет около 1.7 см (1-й эксперимент – 1.5 см; 2-й эксперимент – 1.9 см; 3-й эксперимент – 1.6 см). Таким образом, полученные результаты соответствуют требованиям навигации в помещениях.

Заключение. В данной статье предложен алгоритм, объединяющий расширенный адаптивный фильтр Калмана с окном "Sage" и метод оценки максимального правдоподобия для определения коэффициента масштаба карты системы ORB-SLAM в составе системы, интегрированной с инфракрасной системой Valve Lighthouse. Алгоритм демонстрирует высокую эффективность при определении коэффициента масштаба с очень низким уровнем шума, что позволяет определять положение объектов в пределах 2 м с погрешностью около 2.2 см и объектов в пределах 1 м с погрешностью около 1.7 см. Указанные значения погрешностей обеспечивают эффективную работу системы при решении задач навигации и позиционирования в помещениях.

Список литературы

1. Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, 09–13 May 2011. IEEE, 2011. P. 2520–2525. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980409
2. Lindsey Q., Mellinger D., Kumar V. Construction of cubic structures with quadrotor teams // Robotics: Science and Systems VII. Cambridge: MIT Press, 2012. P. 177–184. doi: 10.7551/mitpress/9481.003.0028
3. Cooperative quadcopter ball throwing and catching / R. Ritz, M. Mueller, M. Hehn, R. D'Andrea // Proc. IEEE Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012. P. 4972–4978. doi: 10.1109/IROS.2012.6385963
4. Towards a swarm of agile micro quadrotors / P. Agarwal, S. Kumar, J. Ryde, J. Corso et al. // Robotics: Science and Systems VIII. Cambridge: MIT Press, 2013. P. 217–224. doi: 10.7551/mitpress/9816.001.0001
5. 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
6. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A survey of optical flow techniques for UAV navigation applications // Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013. P. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752

7. 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
8. DronOS: Aflexible open-source prototyping framework for interactive drone routines / M. Hoppe, M. Burger, A. Schmidt, T. Kosch // Proc. of Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia. 2019. Art. № 15. P. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642
9. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance bounds in positioning with the VIVE lighthouse system // Intern. Conf. on Information Fusion, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019. P. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242
10. A Review of Multi-Sensor Fusion SLAM Systems Based on 3D LIDAR / X. Xu, L. Zhang, J. Yang, C. Cao, W. Wang, Y. Ran, Z. Tan, M. Luo // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 12. Art. № 2835. doi: 10.3390/rs14122835
11. Lighthouse positioning system: Dataset, accuracy, and precision for UAV research / A. Taffanel, B. Rousselot, J. Danielsson, K. McGuire, K. Richardson, M. Eliasson, T. Antonsson, W. Honig // ArXiv. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (дата обращения: 23.04.2021).
12. 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. № 204166951770820. doi: 10.1177/2041669517708205

13. Ikbāl M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC vive virtual reality system // IEEE Access. 2020. Vol. 9. P. 3798–3815.

doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698

14. HTC Vive Tracker: Accuracy for Indoor Localization / J. Lwowski, A. Majumdar, P. Benavidez, J. Prevost, Mo Jamshidi // IEEE Systems, Man and Cybernetics Magazine. 2020. Vol. 6, № 4. P. 15–22.

doi: 10.1109/MSMC.2020.2969031

15. Grzonka S., Grisetti G., Burgard W. Towards a navigation system for autonomous indoor flying // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12–17 May 2009. IEEE, 2009. P. 2878–2883.

doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152446

16. Visual-inertial SLAM for a small helicopter in large outdoor environments / M. W. Achtelik, S. Lynen, S. Weiss, L. Kneip, M. Chli, R. Siegwart // IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012. P. 2651–2652.

doi: 10.1109/IROS.2012.6386270

17. Vision-based autonomous mapping and exploration using a quadrotor MAV / F. Fraundorfer, L. Heng,

D. Honegger, G. Lee, L. Meier, P. Tanskanen, M. Pollefeys // IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012. P. 4557–4564.

doi: 10.1109/IROS.2012.6385934

18. Engel J., Sturm J., Cremers D. Scale-aware navigation of a low-cost quadcopter with a monocular camera // Robotics and Autonomous Systems. 2014. Vol. 62, № 11. P. 1646–1656.

doi: 10.1016/j.robot.2014.03.012

19. Versatile distributed pose estimation and sensor self-calibration for an autonomous MAV / S. Weiss, M. Achtelik, M. Chli, R. Siegwart // IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 14–18 May 2012. IEEE, 2012. P. 31–38.

doi: 10.1109/ICRA.2012.6225002

20. Mur-Artal R., Tardós J. D. ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras // IEEE Transactions on Robotics. IEEE, 2017. Vol. 33, № 5. P. 1255–1262.

doi: 10.1109/TRO.2017.2705103

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

doi: 10.31590/ejosat.819620

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 11 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. Mellinger D., Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, 09–13 May 2011. IEEE, 2011, pp. 2520–2525.

doi: 10.1109/ICRA.2011.5980409

2. Lindsey Q., Mellinger D., Kumar V. Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams. Robotics: Science and Systems VII. Cambridge, MIT Press, 2012, pp. 177–184.

doi: 10.7551/mitpress/9481.003.0028

3. Ritz R., Mueller M., Hehn M., D'Andrea R. Co-operative Quadcopter Ball Throwing and Catching. Proc. IEEE Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012.

IEEE, 2012, pp. 4972–4978.

doi: 10.1109/IROS.2012.6385963

4. Agarwal P., Kumar S., Ryde J., Corso J. et al. Towards a Swarm of Agile Micro Quadrotors. Robotics: Science and Systems VIII. Cambridge, MIT Press, 2013, pp. 217–224.

doi: 10.7551/mitpress/9816.001.0001

5. 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

6. Chao H., Gu Y., Napolitano M. A Survey of Optical Flow Techniques for UAV Navigation Applica-

tions. Intern. Conf. on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta, USA, 28–31 May 2013. IEEE, 2013, pp. 710–716. doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564752

7. Boronakhin A. M., Nguyen Quoc Khanh, Nguyen Trong Yen. Comparative Review of Navigation Systems for Indoor Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 6–18. (In Russ.) doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-6-18

8. Hoppe M., Burger M., Schmidt A., Kosch T. DronOS: Aflexible Open-Source Prototyping Framework for Interactive Drone Routines. Proc. of Intern. Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia. 2019, art. no. 15, pp. 1–7. doi: 10.1145/3365610.3365642

9. Greiff M., Robertsson A., Berntorp K. Performance Bounds in Positioning with the VIVE Lighthouse System. Intern. Conf. on Information Fusion, Ottawa, Canada, 02–05 July 2019. IEEE, 2019, pp. 1–8. doi: 10.23919/FUSION43075.2019.9011242

10. Xu X., Zhang L., Yang J., Cao C., Wang W., Ran Y., Tan Z., Luo M. A Review of Multi-Sensor Fusion SLAM Systems Based on 3D LIDAR. Remote Sensing. 2022, vol. 14, no. 12, art. no. 2835. doi: 10.3390/rs14122835

11. Taffanel A., Rousselot B., Danielsson J., McGuire K., Richardsson K., Eliasson M., Antonsson T., Honig W. Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research. ArXiv. 2021. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2104.11523> (accessed: 23.04.2021).

12. 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. 204166951770820. doi: 10.1177/2041669517708205

13. Ikbali M. S., Ramadoss V., Zoppi M. Dynamic Pose Tracking Performance Evaluation of HTC Vive Virtual Reality System. IEEE Access. 2020, vol. 9, pp. 3798–3815. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047698

14. Lwowski J., Majumdar A., Benavidez P., Prevost J., Jamshidi M. HTC Vive Tracker: Accuracy

for Indoor Localization. IEEE Systems, Man and Cybernetics Magazine. 2020, vol. 6, no. 4, pp. 15–22. doi: 10.1109/MSMC.2020.2969031

15. Grzonka S., Grisetti G., Burgard W. Towards a Navigation System for Autonomous Indoor Flying. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12–17 May 2009. IEEE, 2009, pp. 2878–2883. doi: 10.1109/ROBOT.2009.5152446

16. Achtelik M. W., Lynen S., Weiss S., Kneip L., Chli M., Siegwart R. Visual-Inertial SLAM for a Small Helicopter in Large Outdoor Environments. IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012, pp. 2651–2652. doi: 10.1109/IROS.2012.6386270

17. Fraundorfer F., Heng L., Honegger D., Lee G., Meier L., Tanskanen P., Pollefeys M. Vision-Based Autonomous Mapping and Exploration Using a Quadrotor MAV. IEEE Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura-Algarve, Portugal, 07–12 Oct. 2012. IEEE, 2012, pp. 4557–4564. doi: 10.1109/IROS.2012.6385934

18. Engel J., Sturm J., Cremers D. Scale-Aware Navigation of a Low-Cost Quadcopter with a Monocular Camera. Robotics and Autonomous Systems. 2014, vol. 62, no. 11, pp. 1646–1656. doi: 10.1016/j.robot.2014.03.012

19. Weiss S., Achtelik M., Chli M., Siegwart R. Versatile Distributed Pose Estimation and Sensor Self-Calibration for an Autonomous MAV. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation, Saint Paul, USA, 14–18 May 2012. IEEE, 2012, pp. 31–38. doi: 10.1109/ICRA.2012.6225002

20. Mur-Artal R., Tardós J. D. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. IEEE Transactions on Robotics. IEEE, 2017, vol. 33, no. 5, pp. 1255–1262. doi: 10.1109/TRO.2017.2705103

21. Yusefi A., Durdu A., Sungur C. ORB-SLAM-Based 2D Reconstruction of Environment for Indoor Autonomous Navigation of UAVs. J. Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi. 2020, pp. 466–472. doi: 10.31590/ejosat.819620

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 11 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