

УДК 519.7

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-8-20>



## Моделирование процесса автономной посадки БПЛА-квадрокоптера на движущуюся платформу с использованием инфракрасной оптической системы

Д.А. Аникин<sup>1</sup> ✉, А.И. Савельев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,  
14 линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: [anikin.d@iias.spb.su](mailto:anikin.d@iias.spb.su)

### Резюме

**Цель исследования.** Оценка эффективности работы системы автоматической посадки БПЛА на подвижную платформу с использованием инфракрасного маяка на основе критериев точности посадки и успешность маневра при различных высотах.

**Методы.** Моделирование процесса движения сложного объекта (БПЛА) в среде Gazebo с использованием экосистемы ROS. Позиционирование БПЛА основано на математической модели инфракрасного маяка, состоящего из четырех пар излучателей. Алгоритм посадки включает адаптивные ПИД-регуляторы для координат X и Y и логполиномиальный регулятор для обеспечения снижения аппарата по оси Z.

**Результаты.** Тестирование посадки БПЛА проводилось 50 раз с высот 5 м, 10 м и 15 м. На высоте 5 м время посадки составило 9,04 сек (разброс 0,504 сек), ошибка – 0,18 м (разброс 0,035 м), успешность – 100%. На 10 м время увеличилось до 19,17 сек (разброс 1,78 сек), ошибка – 0,19 м (разброс 0,036 м), успешность осталась 100%. На 15 м время возросло до 40,45 сек (разброс 5,502 сек), ошибка – 0,21 м (разброс 0,046 м), распределение данных стало шире, появились выбросы, успешность снизилась до 92%, что связано с потерями сигналов, их затуханием и необходимостью коррекции траектории. Увеличение высоты тестирования процесса посадки нецелесообразно из-за снижения вероятности успешной посадки.

**Заключение.** Исследование показало, что система инфракрасного маяка эффективно работает для посадки БПЛА на подвижную платформу на высотах до 10 м, обеспечивая необходимую стабильность и точность. При высотах свыше 10 м возникают проблемы с потерей сигналов, увеличением времени посадки и ошибками, что требует улучшений для обеспечения надежности посадки.

**Ключевые слова:** автономная посадка; БПЛА; имитационное моделирование; математические модели; навигация; инфракрасный маяк.

© Аникин Д.А., Савельев А.И., 2024

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Аникин Д.А., Савельев А.И. Моделирование процесса автономной посадки БПЛА-квадрокоптера на движущуюся платформу с использованием инфракрасной оптической системы // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №4. С. 8-20. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2024-28-4-8-20](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-8-20).

Поступила в редакцию 19.10.2024

Подписана в печать 26.11.2024

Опубликована 10.12.2024

## Modeling the process of autonomous landing of a uav quadcopter on a moving platform using an infrared optical system

Dmitry A. Anikin<sup>1</sup>, Anton I. Saveliev<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),  
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: [anikin.d@iias.spb.su](mailto:anikin.d@iias.spb.su)

### Abstract

**Purpose of research.** Evaluation of the effectiveness of the UAV automatic landing system on a mobile platform using an infrared beacon based on criteria for landing accuracy and maneuver success at various altitudes.

**Methods.** Modeling the process of movement of a complex object (UAV) in the Gazebo environment using the ROS ecosystem. The positioning of the UAV is based on a mathematical model of an infrared beacon consisting of four pairs of emitters. The landing algorithm includes adaptive PID controllers for the X and Y coordinates and a logo polynomial controller to ensure the descent of the UAV along the Z axis.

**Results.** The UAV landing was tested 50 times from heights of 5 m, 10 m and 15 m. At a height of 5 m, the landing time was 9.04 seconds (0.504 sec deviation), the error was 0.18 m (0.035 m deviation), the success rate was 100%. At 10 m, the time increased to 19.17 seconds (1.78 sec deviation), the error was 0.19 m (0.036 m deviation), the success rate remained 100%. At 15 m, the time increased to 40.45 seconds (5.502 seconds deviation), the error was 0.21 m (0.046 m deviation), the data distribution became wider, outliers appeared, the success rate decreased to 92%, which is due to signal losses, their attenuation and the need to correct the trajectory. Increasing the height of the landing process testing is impractical due to a decrease in the probability of a successful landing.

**Conclusion.** The study showed that the infrared beacon system works effectively for landing UAVs on a mobile platform at altitudes up to 10 m, providing the necessary stability and accuracy. At altitudes above 10 m, problems arise with loss of signals, increased landing time and errors, which require improvements to ensure the reliability of landing.

**Keywords:** autonomous landing; UAV; simulation modeling; mathematical models; navigation; infrared beacon.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Anikin D. A., Saveliev A. I. Modeling the process of autonomous landing of a uav quadcopter on a moving platform using an infrared optical system. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(4): 8-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-4-8-20>.

Received 19.10.2024

Accepted 26.11.2024

Published 10.12.2024

## Введение

Разработка и внедрение беспилотных летательных аппаратов являются одной из ключевых тенденций в современных технологиях. Сфера их применения постоянно расширяется, охватывая задачи доставки грузов [1-2], мониторинга объектов [3-4] и выполнения аварийно-спасательных операций [5-6]. Для эффективного выполнения этих задач важна возможность автоматической посадки, особенно в условиях, где требуется высокая точность и стабильность процесса. В частности, посадка БПЛА на подвижную платформу является сложной инженерной задачей, требующей применения надёжных и эффективных систем позиционирования.

Существует множество подходов к позиционированию для автоматической посадки БПЛА. Наиболее популярными являются GPS-навигация [7], системы компьютерного зрения [8], ультразвуковые датчики [9] и лазерные лидары [10]. GPS-навигация обеспечивает глобальное позиционирование, но её точности часто недостаточно для точной посадки на ограниченные площади, особенно в условиях помех или плохой видимости спутников. Системы компьютерного зрения эффективны при достаточной освещённости, но их работа ухудшается в условиях недостаточного света, дождя или других погодных воздействий [11]. Лазерные лидары и ультразвуковые датчики обеспечивают вы-

сокую точность на малых расстояниях, но имеют ограниченный радиус действия и чувствительны к особенностям отражающих поверхностей [12].

Одной из перспективных систем позиционирования является оптическая система инструментального захода на посадку<sup>1</sup> с использованием инфракрасного маяка. Принцип работы системы заключается в установке инфракрасного маяка на платформе и использовании специальных приёмников на борту БПЛА для определения углов поворота БПЛА по отношению к нормали маяка и расстояния до него. Данная система уже показала свою эффективность при посадке на статичные цели, где удалось достичь высокой точности и стабильности. Однако задача посадки на подвижные платформы представляет собой более сложный вызов. Основным фактором, усложняющим процесс, является затухание сигнала и рост погрешности с увеличением высоты и постоянным перемещением платформы, что снижает устойчивость и точность позиционирования.

Целью данной работы является оценка практической целесообразности применения системы инструментального захода на посадку на подвижные платформы с использованием инфракрасного маяка ме-

---

<sup>1</sup> Будза А. А. Разработка устройства приема и обработки сигналов оптической системы инструментального захода на посадку беспилотного летательного аппарата: выпускная квалификационная работа магистра: 11.04.02- Инфокоммуникационные технологии и системы связи; 11.04.02\_03-Системы и устройства радиотехники и связи. 2018.

тодом имитационного моделирования, в рамках которого исследуются ключевые параметры, на которые может влиять система позиционирования: время посадки, ошибка посадки и успешность маневра. Исследование позволяет выявить оптимальные и критические условия работы

системы и определить потенциал практического применения данной системы.

## Материалы и методы

### Архитектура системы моделирования

Архитектура разработанной системы представлена на рис 1.

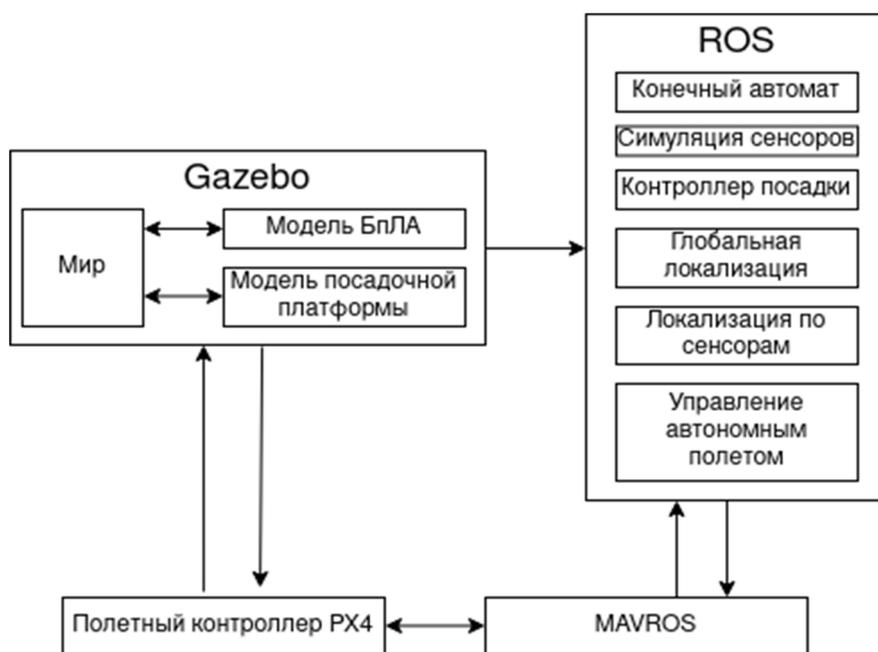


Рис. 1. Схематичное представление архитектуры

Fig. 1. Schematic representation of the architecture

В системе используется Software-in-the-Loop полетного контроллера PX4. Полетный контроллер и разработанные программные модули взаимодействуют с симулятором робототехнических систем Gazebo [13]. Gazebo передает данные от виртуальных сенсоров в контроллер PX4, а контроллер, в свою очередь, отправляет управляющие сигналы на двигатели и исполнительные механизмы БПЛА.

Программные модули реализованы в экосистеме Robotic Operating System [14] (ROS) на языке Python. Они состоят

из конечного автомата для управления последовательностью действий БПЛА, математической модели инфракрасного маяка, алгоритма локализации, контроллера посадки и алгоритма автоматической посадки.

Для передачи телеметрии и управления автопилотом используется MAVROS [15] – программный интерфейс, обеспечивающий двустороннюю конвертацию сообщений между протоколом MAVLink и ROS, что позволяет программным модулям отправлять команды и получать данные от автопилота.

В качестве наземной подвижной платформы используется модель дифференциального колесного робота Clearpath Husky UGV [16] с установленной площадкой размером 1x1 метр и размещенным на ней маяком для посадки БПЛА. Скорость движения платформы составляет 3 м/с. Платформа перемещалась по эллипсоидной траектории длиной 350 метров.

В качестве модели мультироторного БПЛА использовалась модель 3DR Iris [17].

Математическая модель позиционирования по инфракрасному маяку

За основу была взята следующая модель<sup>1</sup>.

Инфракрасный маяк состоит из двух вертикальных и двух горизонтальных разнесенных пар излучателей. Рассмотрим модель для вертикальных пар излучателей (рис. 2), для горизонтальных пар расчеты проводятся аналогично.

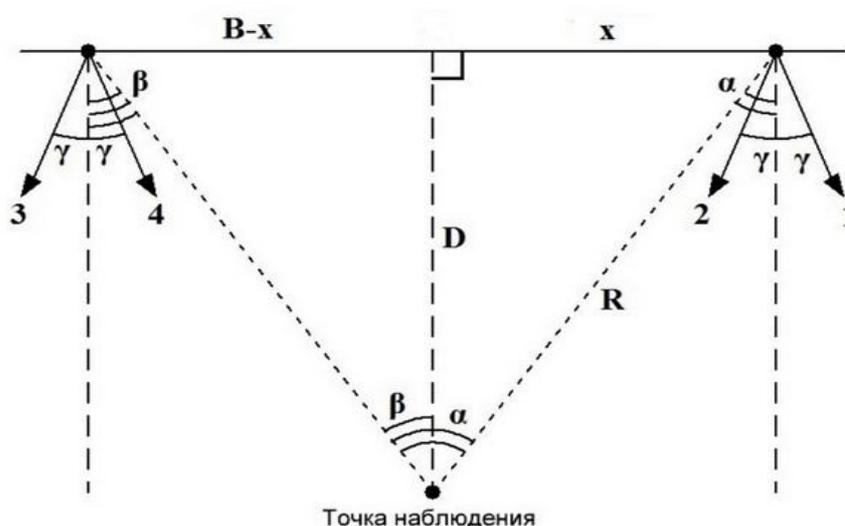


Рис. 2. Геометрия системы позиционирования

Fig. 2. Geometry of the positioning system

Согласно закону Ламберта, аппроксимирующим диаграмму направленности инфракрасного диода, и закону квадратичной зависимости ослабления интенсивности излучения от расстояния для пар 1-2 и 3-4 имеем:

$$I_1 = \frac{I_0}{R^2} \cos^n(\varphi) \cos^m(\alpha + \gamma),$$

$$I_2 = \frac{I_0}{R^2} \cos^n(\varphi) \cos^m(\alpha - \gamma),$$

$$I_3 = \frac{I_0}{R^2} \cos^n(\omega) \cos^m(\beta + \gamma),$$

$$I_4 = \frac{I_0}{R^2} \cos^n(\omega) \cos^m(\beta - \gamma),$$

$$R = \sqrt{(x_{\text{изл}} - x_{\text{пр}})^2 + (y_{\text{изл}} - y_{\text{пр}})^2 + (z_{\text{изл}} - z_{\text{пр}})^2},$$

$$n = \frac{-\ln 2}{\ln \left( \cos^2 \theta_{\text{пр}}^2 \right)},$$

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln \left( \cos \left( \frac{1}{\theta_{\text{изл}}^2} \right) \right)},$$

<sup>1</sup> Будза А. А. Разработка устройства приема и обработки сигналов оптической системы инструментального захода на посадку беспилотного летательного аппарата: выпускная квалификационная работа магистра: 11.04. 02- Инфокоммуникационные технологии и системы связи; 11.04. 02\_03-Системы и устройства радиотехники и связи. 2018.

где  $\alpha, \beta$  – углы поворота БПЛА по отношению к нормали маяка;  $I_0$  – максимально возможная интенсивность излучения;  $\theta_{\text{пр}}^{\frac{1}{2}}$ ,  $\theta_{\text{изл}}^{\frac{1}{2}}$  – углы половинной яркости приемника и излучателей;  $\varphi$ ,  $\omega$  – углы падения лучей пар на плоскость приемника;  $x_{\text{изл}}$ ,  $y_{\text{изл}}$ ,  $z_{\text{изл}}$  – координаты излучателей;  $x_{\text{пр}}$ ,  $y_{\text{пр}}$ ,  $z_{\text{пр}}$  – координаты приемника.  $\gamma$  – угол поворота диодов в маяке.

Угол  $\alpha$  поворота по отношению к нормали маяка рассчитывается как  $\arcsin\left(\frac{D}{R}\right)$ , где  $D = \sqrt{(y_{\text{изл}} - y_{\text{пр}})^2}$ .

Множитель  $\cos^m(\alpha \pm \gamma)$  характеризует зависимость интенсивности излучателя от угла наблюдения, а множитель  $\cos^n(\varphi)$  характеризует диаграмму направленности приемника.

Для симуляции погрешности, связанной с флуктуациями амплитуд из-за влияния дробового шума, добавлены

флуктуации 0.01-0.012% от исходных значений интенсивностей.

Отношения интенсивностей используются для вычисления тангенсов углов поворота БПЛА по отношению к нормали маяка. С помощью них можно вычислить абсолютное и относительное смещение БПЛА от маяка.

Относительное смещение от центра маяка в горизонтальной плоскости рассчитывается по формуле

$$x = B \frac{\text{tg}\alpha}{(\text{tg}\beta + \text{tg}\alpha)},$$

$$\text{tg}\alpha = \frac{1 - \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^{\frac{1}{m}}}{1 + \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^{\frac{1}{m}}},$$

$$\text{tg}\beta = \frac{1 - \left(\frac{I_3}{I_4}\right)^{\frac{1}{m}}}{1 + \left(\frac{I_3}{I_4}\right)^{\frac{1}{m}}},$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности излучения первой пары излучателей;  $I_3$  и  $I_4$  – интенсивности излучения второй пары излучателей;  $B$  – расстояние между парами излучателей.

**Таблица 1.** Конфигурация имитационной модели инфракрасного маяка

**Table 1.** Configuration of an infrared beacon simulation model

Максимальная интенсивность излучения $I_0$ (Вт/м <sup>2</sup> ) / Maximum radiation intensity $I_0$ (Wt/m <sup>2</sup> )	0,5
Расстояние между вертикальными парами диодов $V_{\text{vert}}$ (м)	1,92
Расстояние между горизонтальными парами диодов $V_{\text{horiz}}$ (м)	0,87
Угол половинной яркости оптики приемника $\theta_{\text{пр}}^{\frac{1}{2}}$ (град)	45
Угол половинной яркости диодов передатчика $\theta_{\text{изл}}^{\frac{1}{2}}$ (град)	60
Угол поворота диодов в маяке $\gamma$ (град)	18

Абсолютное смещение рассчитывается как:

$$\frac{B}{2} \cdot x = \frac{B \cdot \operatorname{tg} \beta}{2 \cdot (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha)}$$

Расстояние до маяка по оси  $u$  рассчитывается по формуле

$$D = \frac{B}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}$$

Данные формулы справедливы для расчетов в вертикальной плоскости, при использовании интенсивностей вертикальных пар излучателей.

В данной конфигурации рассматривается маяк с четырьмя парами оптических ИК излучателей, расположенных на вертикальных и горизонтальных границах маяка. Моделируется приемник сигналов на основе PIN фотодиода ВРW34 [18].

Остальные параметры рассчитываются динамически на основе местоположения и ориентации БПЛА относительно маяка, получаемых напрямую из Gazebo.

Алгоритм посадки и контроль наведения БПЛА на платформу

Для наведения БПЛА на посадочную платформу используется ранее разработанный нами в [19] контроллер, состоящий из двух адаптивных ПИД-регуляторов для координат  $X$  и  $Y$  и логполиномиального регулятора для координаты  $Z$ . Адаптивные ПИД-регуляторы автоматически меняют коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей по эмпирически установленной экспоненциальной зависимости от высоты, обеспечивая управление линейными скоростями по осям

$X$  и  $Y$ . Логполиномиальный регулятор генерирует скорость снижения по оси  $Z$ , уменьшая её по мере приближения к платформе. Выходные линейные скорости передаются в автопилот PX4 [20].

Алгоритм посадки включает следующие этапы:

1. Отслеживание платформы: БПЛА поддерживает постоянную высоту и следует за платформой, используя сигналы от ПИД-регуляторов.

2. Снижение: При достижении расстояния 45 см до центра платформы активируется логполиномиальный регулятор для плавного снижения.

3. Посадка: Снижение продолжается до высоты менее 10 см, после чего двигатели отключаются для окончательной посадки.

4. Обработка ситуации потери платформы: Если платформа выходит из зоны видимости, БПЛА поднимается и пытается повторно её обнаружить или возвращается на исходную позицию в случае неудачи.

Пример захода на посадку приведен на рис. 3.



Рис. 3. Процесс захода на посадку

Fig. 3. Process of landing approach

## Результаты и их обсуждение

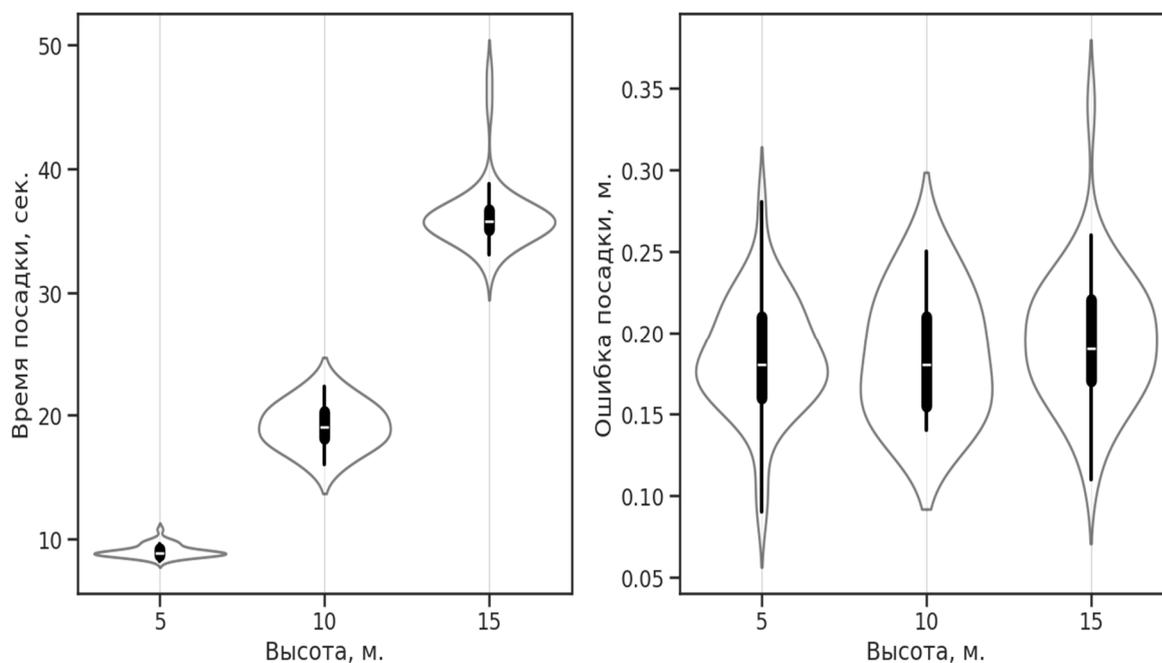
Посадка тестировалась с высот 5 м, 10 м, 15 м, при этом было выполнено 50 попыток. В ходе каждой попытки фиксировалось время, затраченное на посадку, и ошибка, представляющая собой расстояние между центром платформы и центром масс БПЛА. Успешность определяется отношением количества посадок без потерь платформы к общему количеству.

При посадке по ИК-маяку максимальная оптимальная высота составила 15 метров. Проблемой данного решения является возможность перелета БПЛА за пределы маяка и, что приводило к временным потерям сигнала, а также непосредственное затухание сигнала. Результаты испытаний представлены на рис. 4 и в табл. 2.

**Таблица 2.** Показатели эффективности посадки на установленных высотах

**Table 2.** Landing efficiency indicators at set altitudes

Высота, м / Height, m	Успешность / Success rate	Время посадки, с / Landing time, s	Ошибка посадки, м / Landing error, m
5	100%	$9,04 \pm 0,504$	$0,18 \pm 0,035$
10	100%	$19,17 \pm 1,78$	$0,19 \pm 0,036$
15	92%	$40,45 \pm 5,502$	$0,21 \pm 0,046$



**Рис. 4.** Скрипичные графики зависимостей времени посадки и ошибки посадки от высоты

**Fig. 4.** Violin plots of the dependence of landing time and landing error on altitude

На высоте 5 метров система позиционирования демонстрирует максимальную точность и стабильность. Среднее время посадки составляет 9.04 секунды с минимальным разбросом в 0.504 секунды. Ошибка посадки также низкая – 0.18 метров с отклонением 0.035 метров. На графиках видно плотное распределение данных без выбросов, что свидетельствует о надёжности системы. Высота 5 метров позволяет системе работать максимально эффективно благодаря стабильному сигналу, минимальным пространственным и временным отклонениям. Система обеспечивает успешность посадки на уровне 100%, исключая любые потери платформы.

На высоте 10 метров система продолжает демонстрировать высокую точность, но время посадки увеличивается до 19.17 секунд с разбросом 1.78 секунды. Это связано с удвоением высоты, требующим выполнения дополнительных манёвров для посадки и более продолжительного контроля траектории. Ошибка посадки возрастает незначительно до 0.19 метров с отклонением 0.036 метров, а распределение остаётся плотным и стабильным, практически не отличаясь от высоты 5 метров. Графики показывают редкие выбросы по времени, но точность системы остаётся высокой, а успешность посадки достигает 100%. Это демонстрирует, что система позиционирования справляется с возросшей высотой, обеспечивая стабильное определение положения платформы.

На высоте 15 метров система начинает сталкиваться с ограничениями. Среднее время посадки увеличивается до 40.45 секунд с разбросом 5.502 секунды, что значительно превышает пропорциональное увеличение высоты. Графики показывают более широкое распределение времени и наличие выбросов, что свидетельствует о сложностях в управлении и задержках. Ошибка посадки увеличивается до 0.21 метров с отклонением 0.046 метров, и на графике появляются редкие выбросы, отражающие снижение точности в отдельных случаях. Это объясняется уменьшением устойчивости сигнала системы позиционирования на большой высоте, ростом погрешности и, как следствие, необходимостью более сложной коррекции траектории. Успешность системы на высоте 15 метров снижается до 92%, что указывает на случаи потери платформы из-за роста сложности управления в следствие ухудшения качества позиционирования.

### **Выводы**

Данная работа была посвящена моделированию посадки на подвижную платформу с использованием системы позиционирования на основе инфракрасного маяка. Цель исследования заключалась в оценке эффективности системы при различных высотах и определении её практической применимости. Анализ был сосредоточен на изучении двух ключевых параметров – времени посадки и ошибки посадки, что позволило выявить влияние системы позиционирования на различных высотах.

Система позиционирования на основе инфракрасного маяка является эффективным средством для посадки на подвижную платформу при малых высотах. На высоте 5 и 10 метров посадка осуществляется быстро и стабильно. Однако с дальнейшим увеличением высоты система сталкивается с затуханием сигнала и ограниченной видимостью, что приводит к увеличению времени посадки и снижению точности. На высотах

выше 10 метров система демонстрирует увеличение времени и рост ошибок, сопровождающееся выбросами, что требует мер по стабилизации процесса.

В целом, работа показала, что система инфракрасного маяка эффективна при малых высотах, но при больших высотах требуется дополнительная коррекция и усиление сигналов для обеспечения точности и надёжности процесса посадки.

### Список литературы

1. Li X., et al. Drone-aided delivery methods, challenge, and the future: A methodological review // *Drones*. 2023. Vol. 7, № 3. P. 191.
2. Gupta N., Chauhan R., Chadha S. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for parcel delivery // *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2020. Vol. 13, № 10. P. 2824-2830.
3. Lebedeva V., Lebedev I. Development of an algorithm for coverage path planning for survey of the territory using UAVs // *Frontiers in Robotics and Electromechanics*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 315-329.
4. Ecke S. et al. UAV-based forest health monitoring: A systematic review // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 13. P. 3205.
5. Kowshika M., et al. Unmanned Aerial Systems in Search and Rescue: A Comprehensive Review and Future Directions // *Proceedings of 2024 5th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI)*. IEEE, 2024. P. 15-18.
6. Dong J., Ota K., Dong M. UAV-based real-time survivor detection system in post-disaster search and rescue operations // *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. 2021. Vol. 2, № 4. P. 209-219.
7. Khyasudeen M. F., et al. The development of a GPS-based autonomous quadcopter towards precision landing on moving platform // *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*. 2022. T. 16. №. 2-4. P. 108-126.
8. Lebedev I., Erashov A., Shabanova A. Accurate autonomous uav landing using vision-based detection of aruco-marker // *Proceedings of International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 179-188.
9. He Y., et al. Acoustic localization system for precise drone landing // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2023. Vol. 23, №. 5. P. 4126-4144.

10. Yan L., et al. A safe landing site selection method of UAVs based on LiDAR point clouds // 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020. P. 6497-6502.
11. Vargas J., et al. An overview of autonomous vehicles sensors and their vulnerability to weather conditions // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 16. P. 5397.
12. Karbowski Ł., Kubanek M., Bobulski J. Comparison the ultrasonic distance sensor with the LiDAR in different conditions // *Intelligent Human Systems Integration 2021: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2021): Integrating People and Intelligent Systems*, February 22-24, 2021, Palermo, Italy. Springer International Publishing, 2021. P. 111-115.
13. About Gazebo // Gazebo Official Website. URL: <https://gazebo.org/about>.
14. ROS/Introduction // ROS Wiki. URL: <https://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.
15. Mavros // ROS Wiki. URL: <https://wiki.ros.org/mavros>.
16. Husky // Husky UGV - Outdoor Field Research Robot by Clearpath. URL: <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>.
17. Gazebo Vehicles// PX4 User Guide Website. URL: [https://docs.px4.io/v1.12/en/simulation/gazebo\\_vehicles.html#quadrotor](https://docs.px4.io/v1.12/en/simulation/gazebo_vehicles.html#quadrotor).
18. BPW34 B. Silicon PIN Photodiode // Vishay Semiconductors. URL: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>.
19. Anikin D., et al. Autonomous landing algorithm for UAV on a mobile robotic platform with a fractal marker // *Proceedings of International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. P. 357-368.
20. Controller Diagrams // PX4 User Guide Website. URL: [https://docs.px4.io/main/en/flight\\_stack/controller\\_diagrams.html](https://docs.px4.io/main/en/flight_stack/controller_diagrams.html).

## References

1. Li X., et al. Drone-aided delivery methods, challenge, and the future: A methodological review. *Drones*. 2023; 7(3): 191.
2. Gupta N., Chauhan R., Chadha S. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for parcel delivery. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2020; 13(10): 2824-2830.
3. Lebedeva V., Lebedev I. Development of an algorithm for coverage path planning for survey of the territory using UAVs. *Frontiers in Robotics and Electromechanics*. Singapore : Springer Nature Singapore; 2023. P. 315-329.
4. Ecke S., et al. UAV-based forest health monitoring: A systematic review. *Remote Sensing*. 2022; 14(13): 3205.
5. Kowshika M., et al. Unmanned Aerial Systems in Search and Rescue: A Comprehensive Review and Future Directions. *Proceedings of 2024 5th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI)*. IEEE, 2024. P. 15-18.

6. Dong J., Ota K., Dong M. UAV-based real-time survivor detection system in post-disaster search and rescue operations. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. 2021; 2(4): 209-219.
7. Khyasudeen M. F., et al. The development of a GPS-based autonomous quadcopter towards precision landing on moving platform. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*. 2022; 16(2-4): 108-126.
8. Lebedev I., Erashov A., Shabanova A. Accurate autonomous uav landing using vision-based detection of aruco-marker. *Proceedings of International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Cham : Springer International Publishing; 2020. P. 179-188.
9. He Y., et al. Acoustic localization system for precise drone landing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2023; 23(5): 4126-4144.
10. Yan L., et al. A safe landing site selection method of UAVs based on LiDAR point clouds. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020. P. 6497-6502.
11. Vargas J., et al. An overview of autonomous vehicles sensors and their vulnerability to weather conditions. *Sensors*. 2021; 21(16): 5397.
12. Karbowski Ł., Kubanek M., Bobulski J. Comparison the ultrasonic distance sensor with the LiDAR in different conditions. *Intelligent Human Systems Integration 2021: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2021): Integrating People and Intelligent Systems*, February 22-24, 2021, Palermo, Italy, Springer International Publishing; 2021. P. 111-115.
13. About Gazebo. Gazebo Official Website. Available at: <https://gazebo.org/about>.
14. ROS/Introduction. ROS Wiki. Available at: <https://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.
15. Mavros. ROS Wiki. Available at: <https://wiki.ros.org/mavros>.
16. Husky. Husky UGV - Outdoor Field Research Robot by Clearpath. Available at: <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>.
17. Gazebo Vehicles. PX4 User Guide Website. Available at: [https:// docs.px4.io/v1.12/en/simulation /gazebo\\_vehicles.html#quadrotor](https://docs.px4.io/v1.12/en/simulation/gazebo_vehicles.html#quadrotor).
18. BPW34 B. Silicon PIN Photodiode. Vishay Semiconductors. Available at: <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>.
19. Anikin D., et al. Autonomous landing algorithm for UAV on a mobile robotic platform with a fractal marker. *Proceedings of International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Cham : Springer Nature Switzerland; 2023. P. 357-368.
20. Controller Diagrams. PX4 User Guide Website. Available at: [https://docs.px4.io/main/ en/flight\\_stack/controller\\_diagrams.html](https://docs.px4.io/main/en/flight_stack/controller_diagrams.html).

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Аникин Дмитрий Андреевич**, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [anikin.d@iias.spb.su](mailto:anikin.d@iias.spb.su), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6998-5687>

**Савельев Антон Игоревич**, старший научный сотрудник, лаборатория автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [saveliev@iias.spb.su](mailto:saveliev@iias.spb.su), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>

**Dmitry A. Anikin**, Junior Researcher, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: [anikin.d@iias.spb.su](mailto:anikin.d@iias.spb.su), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6998-5687>

**Anton I. Saveliev**, Senior Researcher, Laboratory of Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Russian Federation, e-mail: [saveliev@iias.spb.su](mailto:saveliev@iias.spb.su), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>