



Обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта

Максим Алексеевич Литвинов,

кандидат технических наук,
младший научный сотрудник,
e-mail: litvvinov.max@yandex.ru;

Рашид Курбанович Курбанов,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: celeba@outlook.com;

Наталья Ивановна Захарова,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: smedia@vim.ru;

Станислав Иванович Кривко,

инженер,
e-mail: stk_30@mail.ru.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что позиционирование беспилотного воздушного судна в условиях закрытого грунта возможно без применения спутниковой навигации. Внесение изменений в стандартное программное обеспечение полетного контроллера с внедрением программных блоков по обработке и дешифрации данных видеопотокового сенсора и лазерного дальномера позволяют добиться высокой точности определения координат по высоте и в плане. *(Цель исследования)* Определение параметров точности позиционирования беспилотного воздушного судна при использовании в качестве приборов для вычисления координат видеопотокового сенсора и лазерного дальномера. *(Материалы и методы)* Изучили данные, поступающие от сенсора *optical flow & LIDAR sensor 3901-L0X* в полетный контроллер беспилотного воздушного судна, полученные с помощью порта отладчика. Использовали детектор *Canny* и фильтр Гаусса для определения точных контуров контрастных объектов на горизонтальной плоскости и вычисления координат множества точек при обработке данных видеопотока, а также коэффициента их масштабирования по данным лазерного дальномера. При обработке данных исследований использованы методы математической статистики для определения погрешностей вычисления координат позиционирования. *(Результаты и обсуждения)* Установили, что полученные данные с видеопотокового сенсора и значения высоты, полученные от лазерного дальномера, обладают высокой точностью и позволяют проводить аэрофотосъемку состояния сельскохозяйственных биообъектов в условиях закрытого грунта. *(Выводы)* Определили, что программное обеспечение для обработки данных видеопотока и лазерного дальномера позволяет осуществлять аэрофотосъемку в условиях закрытого грунта с вычислением координат беспилотного воздушного судна в пространстве с точностью более 95 процентов.

Ключевые слова: сельское хозяйство, беспилотное воздушное судно, закрытый грунт, теплица, система позиционирования, видеопотоковый сенсор, лазерный дальномер, оценка функционирования, программное обеспечение.

■ **Для цитирования:** Литвинов М.А., Курбанов Р.К., Захарова Н.И., Кривко С.И. Обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 10-16. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-10-16. EDN: YNSECO.

Scientific article

Validation of the Positioning Accuracy Parameters of the UAV Control System in Controlled-Environment Agriculture

Maxim A. Litvinov,

Ph.D.(Eng.), junior researcher,
e-mail: litvvinov.max@yandex.ru;

Rashid K. Kurbanov,

Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: celeba@outlook.com;

Natalia I. Zakharova,

Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: smedia@vim.ru;

Stanislav I. Krivko,

engineer,
e-mail: stk_30@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper demonstrates that positioning an unmanned aerial vehicle (UAV) in controlled agricultural environments is possible without reliance on satellite navigation. Modifications to the standard flight controller software, specifically, the

integration of modules for processing and decoding data from a video stream sensor and a laser rangefinder, ensures high accuracy in determining coordinates both in height and in plan. (*Research purpose*) The study aims to determine the positioning accuracy parameters of a UAV when using a video stream sensor and a laser rangefinder as primary instruments for coordinate calculation. (*Materials and methods*) Data from the Optical Flow & LIDAR Sensor 3901-L0X, transmitted to the UAV flight controller via the debugger port, were analyzed. The Canny detector and Gaussian filter were applied to extract precise contours of high-contrast objects on a horizontal plane and to compute the coordinates of multiple points in the processed video stream. The scaling factor of these coordinates was determined based on laser rangefinder measurements. Methods of mathematical statistics were used to process the research data and calculate errors in determining positioning coordinates. (*Results and discussion*) The findings indicate that combining data from the video stream sensor with height measurements from the laser rangefinder yields high accuracy and enables aerial imaging of agricultural biological objects in greenhouse environments. (*Conclusions*) The study determined that the software for processing video stream and laser rangefinder data enables aerial imaging in greenhouse environments, achieving UAV spatial coordinate calculation accuracy exceeding 95 percent.

Keywords: agriculture, unmanned aerial vehicle, enclosed environment, greenhouse conditions, positioning system, video stream sensor, laser rangefinder, performance evaluation, software.

■ For citation: Litvinov M.A., Kurbanov R.K., Zakharova N.I., Krivko S.I. Validation of the positioning accuracy parameters of the UAV control system in controlled-environment agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 10-16 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-10-16. EDN: YNSECO.

С развитием технологий в сфере сельского хозяйства нарастает потребность в автоматизации процессов, где высок риск ошибки из-за человеческого фактора при монотонных работах и мониторинге состояния посевов [1]. Внедрение научно-технических решений в агропроцессы существенно повышает их производительность и объем выпускаемой продукции [2, 3]. В связи с этим применение роботизированных средств и беспилотных воздушных судов (БВС) в системе «умное поле» или «умная теплица» является перспективным направлением [4, 5]. Тепличные комплексы, в свою очередь, являются основным компонентом экологически чистого производства сельскохозяйственной продукции, где необходима минимизация воздействия химических средств на людей и окружающую среду [6]. Применение мини-дронов с размером рамы до 250 мм в условиях закрытого грунта и на селекционных линиях позволит автоматизировать мониторинг, анализ и уход за растениями [7, 8]. Важным фактором для выполнения полетов в пространственно ограниченных условиях остается обеспечение точного позиционирования [9, 10].

При проведении мониторинга сельскохозяйственных биообъектов ориентирование БВС в пространстве производится с помощью GPS/ГЛОНАСС навигации [11, 12]. В условиях закрытого грунта из-за наличия металлических каркасов теплиц, представляющих собой клетку Фарадея, и переотражения сигнала от спутниковой навигации снижается точность позиционирования БВС ввиду накопления ошибок при расчете положения, что может привести к дрейфованию с дальнейшим столкновением с насаждениями, элементами строений и коммуникаций, а также к аварийной посадке и

прекращению выполнения полетного задания. Использование видеопотокового сенсора и лазерного дальномера позволяет осуществлять автоматическое удержание позиции БВС в условиях закрытого грунта.

В исследовании описывается обоснование параметров точности позиционирования системы управления БВС в условиях закрытого грунта без использования GPS/ГЛОНАСС навигации.

Цель исследования – определение параметров точности позиционирования беспилотного воздушного судна при использовании в качестве приборов для вычисления координат видеопотокового сенсора и лазерного дальномера.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Программное обеспечение большинства систем управления полетом БВС основано на открытом исходном коде (*INAV, Betaflight, Ardupilot, PX4*) [13]. Поскольку в документации к программному обеспечению указано только то аппаратное обеспечение, которое прошло тестирование и имеет совместимость с исходным кодом прошивки, возникают проблемы при подключении необходимых сторонних компонентов и требуется разработка собственных программных модулей, которые позволят внедрить аппаратное обеспечение, расширяющее функциональные возможности БВС [14, 15].

Для реализации задач исследования по использованию БВС в условиях закрытого грунта была разработана прошивка для полетного контроллера *Happymodel Crazybee F4 V3* [16] и программный код для обработки значений, полученных с дальномера и сырых видеоданных. Настройка аппаратного обеспечения БВС производилась в стандартном программном обеспечении *INAV Configurator*. Тестирование программного обеспечения прово-

дили на разработанном в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ беспилотном воздушном судне на основе полетного контроллера *Crazybee F4 PRO V3.1* (рис. 1).

Установленный на БВС полетный контроллер *Happy model Crazybee F4 V3* выступал в роли макетной платы для отладки процессов (отладчик), протекающих при вычислениях во время полета. Благодаря этому отпала необходимость в установке дополнительной обвязки на макетной плате для гироскопа, *OSD (On-Screen Display)* чипа, регулятора оборотов, *BEC (Battery Elimination Circuit)* для питания дополнительных устройств, а также отладчика для конфигурирования. Использование видеопотокового сенсора и лазерного дальномера *Matek optical flow & lidar sensor 3901-L0X* позволило осуществить автоматическое удержание позиции БВС без спутниковой навигации.

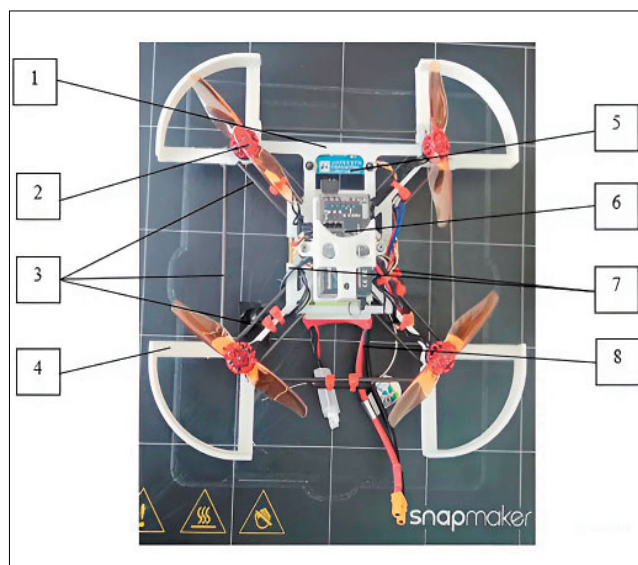


Рис. 1. Общий вид собранного квадрокоптера с размером рамы 150 мм: 1 – хребет рамы; 2 – винтомоторная группа; 3 – армирующие карбоновые прутки; 4 – защита винтомоторной группы; 5 – сенсор *optical flow & LiDAR sensor 3901-L0X*; 6 – стек приемника и полетного контроллера *AIO*; 7 – разъемы отладчика; 8 – АКБ с отсеком

Fig. 1. General view of the assembled quadcopter with a 150 mm frame size: 1 – frame backbone; 2 – motor-propeller assembly; 3 – reinforcing carbon rods; 4 – motor-propeller guard; 5 – optical flow and LiDAR sensor (3901-L0X); 6 – receiver and AIO flight controller stack; 7 – debugger connectors; 8 – battery with housing

Для оценки функционирования видеопотокового сенсора *PMW3901* была использована контрастная панель с нанесенной разметкой с шагом 50 мм, размещенная на расстоянии 50-100 см до сенсора на полу. Параллельно производилась оценка перемещения БВС в пространстве по совпадению графиков получаемого сигнала с отладчика (рис. 2).

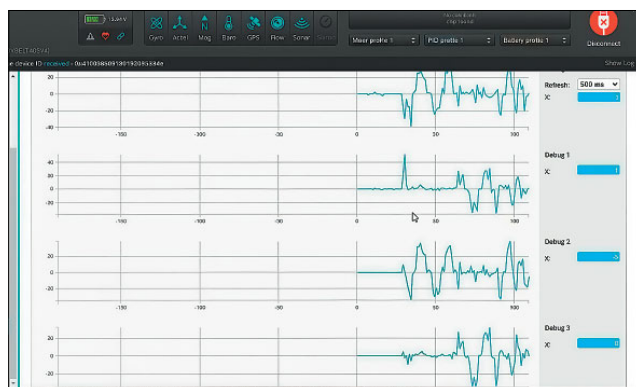


Рис. 2. Оценка функционирования видеопотокового сенсора
Fig. 2. Performance evaluation of the video stream sensor

В связи с тем, что на парных графиках соответственно *debug 0* и *debug 2*, *debug 1* и *debug 3* [17, 18] присутствует разное количество максимумов и минимумов, производили доработку кода обработки сырых видеоданных сенсора *PMW3901* и отладку детектора *Canny*.

Для подавления шума, вызывающего расхождение в графиках *debug 0* и *debug 2*, *debug 1* и *debug 3* был применен детектор *Canny*, который реагирует на границы, но при этом игнорирует ложные линии, точно определяя контур (без его фрагментирования), и реагирует на каждый из контуров один раз, что позволяет избежать восприятия широких полос изменения яркости как совокупности границ [19].

Для снижения нагрузки на микроконтроллер и повышения быстродействия видеопоток конвертировался из цветного в оттенки серого, чтобы уменьшить вычислительные затраты, а для подавления шума, использовали размытие кадров фильтром Гаусса [20]. После внедрения в программный код детектора *Canny* и фильтра Гаусса при перемещении измерительной системы относительно контрастной пластины через программу захвата видеопотока видно, что захваченный контур имеет четкие границы, на основе которых производится формирования плоскости с координатами множества точек (рис. 3).



Рис. 3. Захват обработанного видеопотока с помощью детектора *Canny* с сенсором *PMW3901*

Fig. 3. Processed video stream captured using the Canny detector with the PMW3901 sensor

Для интерпретирования данных об ускорении и получения измеренного полетным контроллером расстояния использовалась система уравнений коллинеарных векторов конечной скорости и пройденного пути по формуле:

$$\begin{cases} S = v_0 + \frac{a}{t} \cdot t^2 \\ v = v_0 + a \cdot t \end{cases} \quad (1)$$

где S – путь, пройденный телом, м; v – конечная скорость, м/с; v_0 – начальная скорость тела, м/с; a – ускорение тела, м/с²; t – время, за которое тело прошло этот путь, с.

При этом следует учесть, что необходимо рассматривать расстояние, пройденное на ускорении и торможении, поскольку БВС – инерциальная система и при перемещении по контрастной панели из начальной в конечную точку висения возникает сила инерции, которую необходимо погасить резким ростом ускорения торможения, в связи с чем возможны погрешности, влияющие на величину измеренного пройденного расстояния.

Средняя погрешность [21] измеренного значения пройденного пути относительно реального:

$$\Delta = \left(\sum_{i=1}^n \frac{|S_i^{\text{Общ}} - S_i^{\text{Реал}}|}{S_i^{\text{Реал}}} \right) / n, \quad (2)$$

где $S_i^{\text{Общ}}$ – сумма измеренного пройденного расстояния на разгоне и торможении, м; $S_i^{\text{Реал}}$ – реальное расстояние пройденное БВС, м; n – количество измерений.

Для валидации данных, полученных с лазерного дальномера VL53L0X, проведено исследование по измерению расстояния от плоскости пола до сенсора дальномера. Для измерений использовали линейку длиной 1 м, установленную перпендикулярно плоскости пола. Через каждые 10 см закрепляли БВС с установленным лазерным дальномером VL53L0X и отладочной платой Crazybee F4 V3.1. Результаты десяти измерений дальномера получали через отладчик на компьютере по графику высоты (рис. 4).

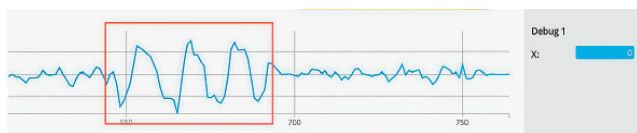


Рис. 4. Исследование по валидации данных дальномера
Fig. 4. Assessment of rangefinder data validity

Полученные данные проверяли по попаданию измерений в доверительный интервал по абсолютной погрешности. Коэффициент Стьюдента для 10 измерений и доверительной вероятности 0,95 составляет $t_p = 2,26$ [22].

Доверительный интервал определяли по формуле:

$$\Delta_p = t_p \cdot \sigma. \quad (3)$$

Относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{\Delta_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Через порт отладчика полетного контроллера Crazybee F4 PRO V3.1 получены графики ускорения по осям перемещения, полученных от видеопотокового сенсора PMW3901 (рис. 5). С помощью данных графиков и их интерпретации было определено пройденное расстояние, измеренное полетным контроллером.

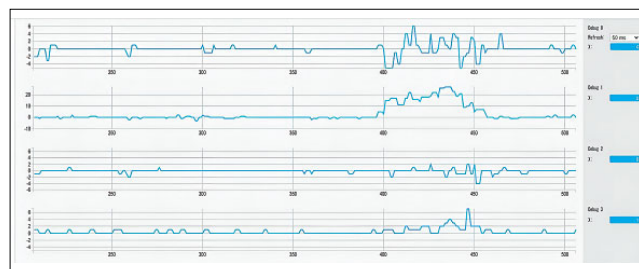


Рис. 5. Графики ускорений по осям перемещения:
 X – ускорение м/с²; Y – время, мс

Fig. 5. Acceleration plots along the movement axes:
 X – acceleration, m/s²; Y – time, ms

Данные из графика ускорения, времени и расчетов по формулам (1) и (2) приведены в сводной таблице 1.

Исходя из того, что средняя погрешность измерений составляет 1,71% и не превышает 5%-ный уровень статистической значимости, можно сделать вывод, что разработанная прошивка и программный код для видеопотокового сенсора PMW3901 способна обеспечить позиционирование БВС в условиях закрытого грунта без применения GPS/ГЛОНАСС навигации.

Результаты измерений дальномера получали также через отладчик полетного контроллера. Измерения графика высоты (рис. 4) представлены в таблице 2. Оценку доверительного интервала производили по измеренному отклонению высоты по формуле (3):

$$\Delta_p = 2,26 \cdot 0,0335 \text{ м} = 0,757 \text{ см}.$$

Наибольшее отклонение в выборке по абсолютной погрешности составляет 1,3 см, соответственно попадает в диапазон значений $1,23 \pm 0,0757$ см, а относительная погрешность, согласно формуле (4), составляет 4%. Можно сделать вывод, что разработанный программный код лазерного дальномера VL53L0X может обеспечить удержание высоты. Таким образом, БВС с системой позиционирования позволяет проводить аэрофотосъемку состояния сельскохозяйственных биообъектов в условиях закрытого грунта.

Таблица 1

Table 1

СВОДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВИДЕОПОТОКОВОГО СЕНСОРА PMW3901
SUMMARY OF MEASUREMENTS FOR THE PMW3901 VIDEO STREAM SENSOR

№ п/п	$S_{\text{реал}}, \text{м}$	$v_0, \text{м/с}$	$a_{\text{разг}}, \text{м/с}^2$	$t_{\text{разг}}, \text{с}$	$S_{\text{разг}}, \text{м}$	$v_0^{\text{торм}}, \text{м/с}$	$a_{\text{торм}}, \text{м/с}^2$	$t_{\text{торм}}, \text{с}$	$S_{\text{торм}}, \text{м}$	$S_{\text{общ}}, \text{м}$	$\Delta, \%$
1	0,1	0	252	0,02	0,050	5,04	-250	0,020	0,051	0,101	1,20
2	0,1	0	100	0,03	0,051	3,20	-100	0,033	0,051	0,102	2,39
3	0,1	0	50	0,04	0,048	2,20	-48	0,043	0,050	0,099	1,38
4	0,1	0	60	0,04	0,050	2,46	-60	0,041	0,050	0,101	0,86
5	0,1	0	150	0,03	0,051	3,90	-150	0,025	0,051	0,101	1,32
6	0,1	0	58	0,04	0,051	2,43	-58	0,041	0,051	0,102	1,80
7	0,1	0	50	0,04	0,048	2,20	-50	0,043	0,048	0,096	3,66
8	0,1	0	66	0,04	0,050	2,57	-66	0,043	0,050	0,100	0,14
9	0,1	0	64	0,04	0,051	2,56	-64	0,041	0,051	0,102	2,35
10	0,1	0	64	0,04	0,051	2,55	-64	0,042	0,051	0,101	1,21
11	0,1	0	50	0,04	0,049	2,21	-50	0,043	0,049	0,098	2,34
12	0,1	0	67	0,04	0,049	2,57	-67	0,043	0,049	0,098	1,82
13	0,1	0	54	0,04	0,051	2,35	-54	0,042	0,051	0,103	2,54
14	0,1	0	50	0,04	0,050	2,23	-50	0,043	0,050	0,099	0,61
15	0,1	0	66	0,04	0,050	2,57	-66	0,041	0,050	0,100	0,25
16	0,1	0	51	0,04	0,049	2,23	-51	0,042	0,049	0,097	2,65
17	0,1	0	65	0,04	0,051	2,58	-65	0,041	0,051	0,102	2,36
18	0,1	0	59	0,04	0,051	2,45	-59	0,041	0,051	0,102	2,08
19	0,1	0	58	0,04	0,051	2,42	-58	0,043	0,051	0,101	1,29
20	0,1	0	52	0,04	0,049	2,25	-52	0,044	0,049	0,097	2,97
21	0,1	0	64	0,04	0,050	2,54	-64	0,042	0,050	0,101	0,70
Средняя погрешность											1,71

Таблица 2

Table 2

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ ОТ ПЛОСКОСТИ ПОЛА ДО ДАТЧИКА ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА
MEASUREMENT RESULTS FOR THE HEIGHT FROM THE FLOOR PLANE TO THE LASER RANGEFINDER SENSOR

Показатель	Высота, см									
Высота по линейке, см	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Высота по графику отладчика, см	8,9	18,7	28,8	38,7	48,7	58,8	68,7	78,7	88,7	98,8
Отклонение высоты, см	1,1	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2
$\Delta_{\text{ср}}, \text{см}$	1,23									
$\sigma, \text{см}$	0,0335									

Выводы. Исследована система позиционирования беспилотного воздушного судна (БВС) без использования спутниковой навигации в условиях закрытого грунта. Разработанные БВС и программное обеспечение для обработки данных видеопотока и лазерного дальномера позволяет осуществлять выполнение полетного задания в теплицах и помещениях, где из-за наличия металлического

каркаса и переотражения спутникового сигнала возможны ошибки при вычислении полетным контроллером положения в пространстве.

Разработанная система позиционирования позволит выполнять автоматизированный полет с вычислением координат БВС в пространстве по горизонтальной плоскости с точностью 98,29% в плане и 96% по высоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Nagaraja G., Shoba H., Sreedevi M.S., Krishnamma P.N. The impact of robotics and drones on agricultural efficiency and productivity. *International Journal of Research in Agronomy*. 2024. 7(9S). 1001-1009. DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7.i9Sn.1650.
- Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Любачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве (окончание) // *Техника и оборудование для села*. 2022. N4(298). С. 2-6. DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
- Rejeb A., Abdollahi A., Rejeb K., Treiblmaier H. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol.

198. 107017. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
4. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ешин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // *Агроинженерия*. 2021. N1(101). С. 26-35. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
5. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45. EDN: RLCDHO.
6. Шарый С.В., Водолазская Н.В., Шарая О.А. Инновационные решения для тепличных комплексов // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2022. N3(35). С. 109-116. EDN: AWVCSYA.
7. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов // *Автоматика и телемеханика*. 2014. N2. С. 16-30. EDN: RXKJAF.
8. Свецкий А.В. Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // *Сельское хозяйство*. 2022. N3. С. 1-12. DOI: 10.7256/2453-8809.2022.3.39469.
9. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
10. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К. История развития систем управления беспилотных воздушных судов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N3. С. 4-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
11. Nguyen N.P., Hong S.K. Position control of a hummingbird quadcopter augmented by gain scheduling. *Int J Engineering Research & Technology*. 2018. Vol. 11(10). 1485-1498.
12. Андреев И.П., Замятин А.Ю., Иванов А.В. Особенности выполнения НИР «Комплексные исследования методов и технологий применения отечественной электронной компонентной базы в беспилотных авиационных системах и средствах их наземного управления» // *Славянский форум*. 2023. N3(41). С. 428-455. EDN: CUWDUA.
13. Федупин А.М., Дрягин Д.М. Перспективы применения крупноразмерных БПЛА при решении задач комплексного обследования территорий // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021. N1(218). С. 271-281. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281.
14. Jing Y., Wang X., Heredia-Juesas J. et al. PX4 Simulation results of a quadcopter with a disturbance-observer-based and pso-optimized sliding mode surface controller. *Drones*. 2022. 6(9). 261. DOI: 10.3390/drones6090261.
15. Ivashko V., Krulikovskyi O., Haliuk S., Samila A. Review of operating systems used in unmanned aerial vehicles. *Informatics, Control, Measurement in Economy and Environment Protection*. 2025. Vol. 15(1). 95-100. DOI: 10.35784/iapgos.6786.
16. Литвинов М.А., Куприн А.А. Применение беспилотных воздушных систем в сельском хозяйстве // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2023. N6. С. 28-35. DOI: 10.33920/sel-10-2306-03.
17. Ковалев И.В., Лосев В.В., Сарамуд М.В. и др. К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов // *Современные инновации, системы и технологии*. 2021. Т. 1. N3. С. 54-71. DOI: 10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64.
18. Данилова С.Д. Разработка модели визуальной одометрии на основе сенсоров и анализа видеопотока // *Computational Nanotechnology*. 2024. Т. 11. N1. С. 36-47. DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-1-36-47.
19. Али Б., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Алгоритмы навигации беспилотных летательных аппаратов с использованием систем технического зрения // *Гироскопия и навигация*. 2022. Т. 30. N4(119). С. 87-105. DOI: 10.17285/0869-7035.00105.
20. Конаныхин А.Ю., Конаныхина Т.Н., Панищев В.С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстродействующей обработке символьной информации // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение*. 2021. Т. 11. N4. С. 106-119. DOI: 10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119.
21. Чикмарев А.Д. Сравнение критериев идентификации математических моделей при решении измерительных задач // *Измерительная техника*. 2022. N8. С. 41-45. DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-8-41-45.
22. Иванищев Ю.Г., Давыдов В.М., Старцев Н.А. Возможности использования доверительного интервала при принятии параметров нормализованной модели // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2021. N1(60). С. 35-48. EDN: WLPUGL.

REFERENCES

1. Nagaraja G., Shoba H., Sreedevi M.S., Krishnamma P.N. The impact of robotics and drones on agricultural efficiency and productivity. *International Journal of Research in Agronomy*. 2024. 7(9S). 1001-1009 (In English). DOI: 10.33545/2618060X.2024.v7i9Sn.1650.
2. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogonov Yu.Kh. The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022. N4(298). 2-6 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2022-4-2-6.
3. Rejeb A., Abdollahi A., Rejeb K., Treiblmaier H. Drones in agriculture: A review and bibliometric analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 198, 107017 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2022.107017.
4. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V. Development prospects for methods and technical means of farm crop protection. *Agricultural Engineering*. 2021. N1 (101). 26-35 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-26-35.
5. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Digitization

- aspects of the system of technologies and machines. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian). EDN: RLCDHO.
6. Shariy S.V., Vodolazskaya N.V., Sharaya O.A. Innovative solutions for greenhouse complexes. *Innovations in Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2022. N3(35). 109-116 (In Russian). EDN: AWVCYA.
 7. Aleksandrov A.G., Palenov M.V. Adaptive pid controllers: state-of-the-art and future developments. *Automation and Remote Control*. 2014. N2. 16-30 (In Russian). EDN: RXKJAF.
 8. Svetsky A.V. The use of artificial intelligence in agriculture. *Agriculture*. 2022. N3. C. 1-12 (In Russian). DOI: 10.7256/2453-8809.2022.3.39469.
 9. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
 10. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K. History of unmanned aircraft flight controller development. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N3. 4-15 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15.
 11. Nguyen N.P., Hong S.K. Position control of a hummingbird quadcopter augmented by gain scheduling. *Int J Engineering Research & Technology*. 2018. Vol.11(10). 1485-1498 (In English).
 12. Andreev I.P., Zamyatin A.J., Ivanov A.V. Features of the implementation of research work «Comprehensive studies of methods and technologies for the use of domestic electronic component base in unmanned aerial systems and means of their ground control». *Slavic Forum*. 2023. N3(41). 428-455 (In Russian). EDN: CUWDUA.
 13. Fedulin A.M., Driagin D.M. Prospects of male-class uavs using for the huge territories aerial survey. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2021. N1(218). 271-281 (In Russian). DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-271-281.
 14. Jing Y., Wang X., Heredia-Juesas J. et al. PX4 Simulation results of a quadcopter with a disturbance-observer-based and PSO-optimized sliding mode surface controller. *Drones*. 2022. 6(9). 261 (In English). DOI: 10.3390/drones6090261.
 15. Ivashko V., Krulikovskiy O., Haliuk S., Samila A. Review of operating systems used in unmanned aerial vehicles. *Informatics, Control, Measurement in Economy and Environment Protection*. 2025. Vol. 15(1). 95-100 (In Russian). DOI: 10.35784/iapgos.6786.
 16. Litvinov M.A., Kuprin A.A. Application of unmanned air systems in agriculture. *Agricultural machinery: service and repair*. 2023. N6. 28-35 (In Russian). DOI: 10.33920/sel-10-2306-03.
 17. Kovalev I.V., Losev V.V., Saramud M.V. et al. To the question for formation of a block-modular structure of the control system for unmanned aerial vehicles. *Modern Innovations, Systems and Technologies*. 2021. Vol. 1. N3. 54-71 (In Russian). DOI: 10.47813/2782-2818-2021-1-3-48-64.
 18. Danilova S.D. Development of a visual odometry model based on sensors and video stream analysis. *Computational Nanotechnology*. 2024. Vol. 11. N1. 36-47 (In Russian). DOI: 10.33693/2313-223X-2024-11-1-36-47.
 19. Ali B., Sadekov R.N., Tsodokova V.V. A review of navigation algorithms for unmanned aerial vehicles based on computer vision systems. *Gyroscopy and Navigation*. 2022. Vol. 13. N4. 87-105 (In Russian). DOI: 10.17285/0869-7035.00105.
 20. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. A method for improving the selected area of the image with high-speed processing of symbolic information. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, computer engineering, information science. medical instruments engineering*. 2021. Vol. 11. N4. C. 106-119 (In Russian). DOI: 10.21869/2223-1536-2021-11-4-106-119.
 21. Chikmarev A.D. Comparison of criteria for identification of mathematical models in solving measurement problems. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022. N8. 41-45 (In Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-8-41-45.
 22. Ivanishchev Yu.G., Davydov V.M., Startsev N.A. Opportunities to use a confidence interval when adopting the parameters of a normalized model. *Bulletin of PNU*. 2021. N1(60). 35-48 (In Russian). EDN: WLPUGL.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Литвинов М.А. – работа над аппаратной частью;
Курбанов Р.К. – научное руководство, формирование задач исследования, настройка системы управления полетом;
Захарова Н.И. – проведение испытаний, подготовка статьи;
Кривко С.И. – работа над программной частью разработки.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Litvinov M.A. – development of hardware components;
Kurbanov R.K. – scientific supervision, formulation of research objectives, configuration of the flight control system;
Zakharova N.I. – conducting experiments, drafting the research manuscript;
Krivko S.I. – software development.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

30.06.2025
18.08.2025