

# ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

---

УДК 621.391:621.396

ББК 39.57-5

DOI 10.51955/2312-1327\_2024\_1\_128

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КВАДРОКОПТЕРА DJI AIR 2S\*

*Роман Олегович Арефьев,  
orcid.org/0000-0001-8040-6470,  
кандидат технических наук, доцент  
Московский государственный технический университет  
гражданской авиации (Иркутский филиал),  
ул. Коммунаров, 3  
Иркутск, 664047, Россия  
aqua160905@mail.ru*

*Олег Николаевич Скрыпник,  
orcid.org/0000-0002-2006-0428,  
доктор технических наук, профессор  
Белорусская государственная академия авиации,  
ул. Уборевича, 77  
Минск, 220096, Республика Беларусь  
skripnikon@yandex.ru*

*Наталья Геннадьевна Арефьева (Астраханцева),  
orcid.org/0000-0002-9916-1239,  
кандидат технических наук, доцент  
Московский государственный технический университет  
гражданской авиации (Иркутский филиал),  
ул. Коммунаров, 3  
Иркутск, 664047, Россия  
n\_astrahanceva\_awesome@mail.ru*

**Аннотация.** В работе предложена методика оценки фактической точности пространственной стабилизации квадрокоптера DJI Air 2S с помощью его видеокамеры и обработки получаемых видеорядов разработанным программным комплексом в режиме висения над опорным объектом. Программный комплекс выполнен на основе библиотеки OpenCV на языке Python. Для фиксации отклонений систем стабилизации квадрокоптера от заданной позиции предложено использовать опорное поле с известными геометрическими параметрами, информация о которых вносится в алгоритм обработки. Основной задачей программного комплекса является выделение границ опорного поля и измерение геометрических сторон в пикселях, что позволяет определить центр поля и измерить его отклонение относительно центра изображения, а также определить высоту полета квадрокоптера. В работе проведено тестирование предложенного алгоритма измерения высоты. Данная методика применена для оценки точности стабилизации квадрокоптера при различных сочетаниях, используемых для этой цели навигационных датчиков. Проведен статистический анализ полученных результатов и сделаны выводы о соответствии

заявленным производителем характеристикам точности позиционирования с помощью оптических систем обхода препятствий и спутниковых навигационных систем.

**Ключевые слова:** беспилотное воздушное судно (БВС), системы стабилизации, техническое зрение, GNSS.

## EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF SPATIAL STABILIZATION ACCURACY OF THE DJI AIR 2S QUADCOPTER

*Roman O. Arefyev,  
orcid.org/0000-0001-8040-6470,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Moscow State Technical University  
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),  
3, Kommunarov str.  
Irkutsk, 664047, Russia  
aqua160905@mail.ru*

*Oleg N. Skrypnik,  
orcid.org/0000-0002-2006-0428,  
Doctor of Technical Sciences, Full professor  
Belarusian State Academy of Aviation,  
77, Uborevich str.  
Minsk, 220096, Republic of Belarus  
skripnikon@yandex.ru*

*Natalya G. Arefyeva (Astrakhanceva),  
orcid.org/0000-0002-9916-1239,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Moscow State Technical University  
of Civil Aviation (Irkutsk Branch),  
3, Kommunarov str.  
Irkutsk, 664047, Russia  
n\_astrakhanceva\_awesome@mail.ru*

**Abstract.** The paper proposes a method for assessing the actual accuracy of spatial stabilization of a DJI Air 2S quadcopter using its video camera and processing the resulting video sequences with a developed software package in the mode of hovering over a reference object. The software package was implemented using the OpenCV library in Python. To register deviations of stabilization systems from a given position, it is proposed to use a reference field with known geometric parameters, information about which is entered into the processing algorithm. The main task of the software package is to identify the boundaries of the reference field and measure the geometric sides in pixels which allows you to determine the center of the field and measure its deviation relative to the center of the image as well as determine the height of the unmanned aerial vehicle flight. In the work the height measurement algorithm was tested. This technique is used to evaluate the accuracy of quadcopter stabilization with various combinations of navigation sensors used for this purpose. A statistical analysis of the obtained results was carried out and conclusions were drawn about compliance with the characteristics of positioning accuracy declared by the manufacturer using optical obstacle avoidance systems and satellite navigation systems.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV), stabilization systems, technical vision, GNSS.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т23-029).

## Введение

Реализация стратегии развития беспилотной авиации в Российской Федерации предполагает интеграцию беспилотных воздушных судов (БВС) в общее с пилотируемой авиацией воздушное пространство (ВП) [Стратегия развития..., 2023]. Допуск БВС в это ВП «должен осуществляться в соответствии с документами, регламентирующими его организацию и использование пилотируемой авиацией, и опираться на существующие и перспективные технологии в рамках блочной модернизации авиационной системы (ASBU – Aviation System Block Upgrades) и навигации, основанной на характеристиках (PBN – Performance Based Navigation)» [Скрыпник, 2023].

В рамках концепции PBN для эффективного использования ВП с требуемым уровнем безопасности полётов необходимо обеспечивать соответствующую навигационным спецификациям точность выдерживания заданной траектории полета в используемой зоне ВП [ICAO..., 2008]. Указанное положение в полной мере относится к беспилотной авиации для её интеграции в общее ВП, когда БВС с вероятностью 95% не должно выходить за границы «коридора», установленного для конкретного маршрута полета в конкретном ВП (рис. 1).

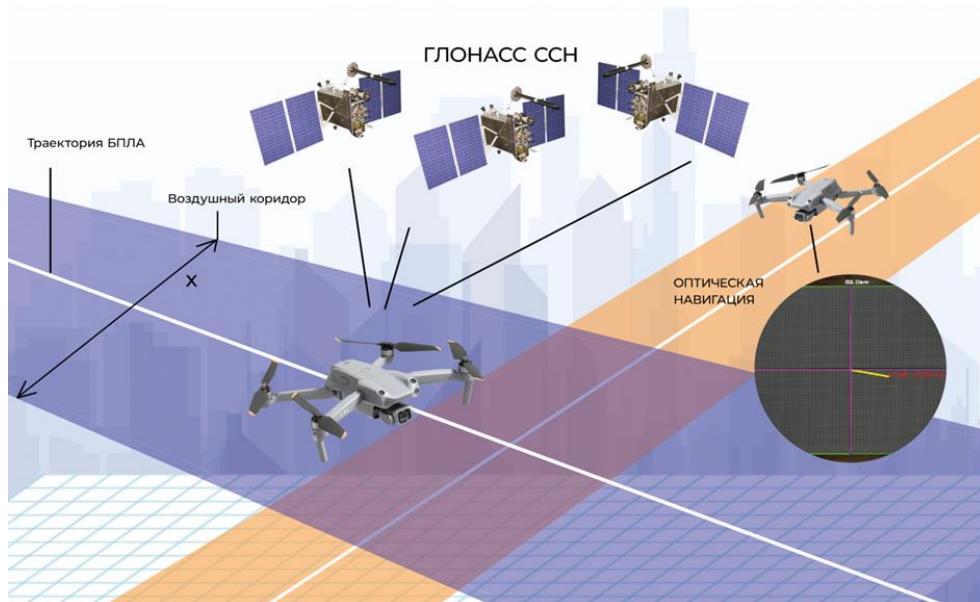


Рисунок 1 – «Коридоры» ВП для полётов БВС

Для определения координат БВС в полёте по заданной траектории используются различные навигационные датчики. К ним прежде всего относятся инерциальные навигационные системы (ИНС) и приемники глобальных спутниковых систем навигации (GNSS), используемые либо как отдельные навигационные датчики, либо в комплексе с ИНС [Ерохин и др., 2023]. Возможно комплексирование указанных систем с другими средствами автономной навигации БВС (оптические, лазерные, инфракрасные и др.).

Каждое из средств навигации обладает как достоинствами, так и недостатками, что ограничивает возможности их применения для высокоточного позиционирования в различных видах полётов и условиях

применения БВС. Так, например, приёмник GNSS обеспечивает высокую (первые единицы метров) точность определения координат неподвижных объектов по однократным измерениям. Как правило, именно для таких условий производители приемников GNSS указывают точность их позиционирования. Однако при воздействии помех, сбоях в слежении за сигналами навигационных спутников, наличии их затенений рельефом местности или объектами, высокой динамике определяющегося объекта точность позиционирования может существенно ухудшиться [Межетов и др., 2023; Скрыпник, 2019; Glomsvoll, 2014]. ИНС, как основное автономное средство навигации, характеризуется ухудшением точности счисления координат и определения пилотажных параметров с течением времени.

Ухудшение точности позиционирования БВС относительно заявляемой производителями может привести к соответствующему ухудшению точности выдерживания заданной траектории. Это может нести прямую угрозу безопасности полетов ввиду повышения риска возникновения потенциально конфликтных ситуаций с другими пользователями ВП [Алгоритмы управления..., 2021]. Уменьшение же рисков путем увеличения защитных зон вокруг БВС приведёт к снижению эффективности использования ВП из-за уменьшения его пропускной способности. Поэтому возникает задача оценки фактической точности определения пространственных координат как навигационным комплексом БВС в целом, так и отдельными системами.

Известны работы, в которых проводятся экспериментальные исследования точности стабилизации RTK-GNSS приемника квадрокоптера семейства DJI [Assessment of Accuracy..., 2023; Ekaso et al., 2020] в реальных условиях эксплуатации. RTK-GNSS приемники являются высокоточными и дорогими решениями для решения задач геодезии. Особенностью данных работ является использование тахометрической съемки и использование базовых станций для формирования поправок, что позволяет с высокой точностью определить отклонения квадрокоптера от заданных координат.

Для проведения экспериментов в данной работе использовался квадрокоптер DJI Air2S.

## **Материалы и методы**

Оценка фактической точности позиционирования БВС в реальных условиях полета (динамика движения объекта, воздействие внешних случайных возмущений на траекторию) является весьма сложной технической задачей. Поэтому ограничимся исследованием точности позиционирования квадрокоптера DJI Air 2S в режиме висения при использовании информации от его различных бортовых устройств навигации и в отсутствии внешних возмущений. Для этого была разработана методика экспериментального исследования точности навигационного комплекса DJI Air2S.

Для исследования точности позиционирования в горизонтальной плоскости под квадрокоптером устанавливается тестовое поле с координатной сеткой (рис. 2). В ручном режиме управления квадрокоптер устанавливается по вертикали над центральной точкой (т. О) координатной сетки на

определенной высоте, затем переводится в режим автоматического управления.

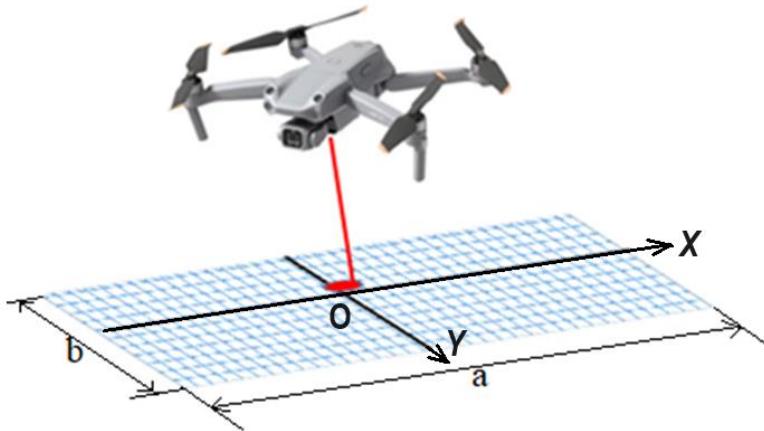


Рисунок 2 – Квадрокоптер над тестовым полем

Отклонения от вертикали по осям ОХ и ОY (в плане) фиксируются с помощью видеокамеры квадрокоптера и записываются в видеофайл. Вертикаль (виртуальный вертикальный луч) задаётся с использованием видеокамеры квадрокоптера, которая установлена на подвесе с гиростабилизацией.

На этапе постобработки из видеофайла извлекается информация об ошибках позиционирования квадрокоптера относительно начальной точки его привязки в горизонтальной плоскости. Программный комплекс обработки видеофайлов реализован с помощью библиотеки OpenCV среды программирования Python. Библиотека OpenCV [Bradski, 2000] с открытым исходным кодом предназначена для решения задач компьютерного зрения и машинного обучения, обладает широким спектром функций и достаточно проста в отладке.

Основные этапы обработки изображения программным комплексом, реализующим алгоритм технического зрения, состоят в следующем.

Записанный видеофайл разбивается на кадры (рис. 3). Каждый кадр представляет собой изображение в цветовой модели RGB (Red, Green, Blue) форматом 1080 на 1920 точек. Далее изображение преобразуется в цветовую модель HSV (Hue, Saturation, Value – тон, насыщенность, яркость) в блоке преобразователя цветов. Модель HSV обладает бо́льшим количеством градаций цвета, чем модель RGB, что существенно влияет на точность выделения контура объекта.

После преобразования изображение поступает в цветовой фильтр, основными параметрами которого являются минимальные и максимальные границы пропускаемого цвета. В данной работе значения границ цвета устанавливались эмпирически для конкретных полётных условий.

Основная задача фильтра заключается в затемнении участков изображения, которые не попадают под значения границ фильтра, поэтому на выходе формируется бинарное изображение, где белому цвету соответствует выделенная область в виде поля. Бинарное изображение поступает в блок

поиска контуров, алгоритм работы которого рассмотрен в работе [Suzuki et al., 1985.].

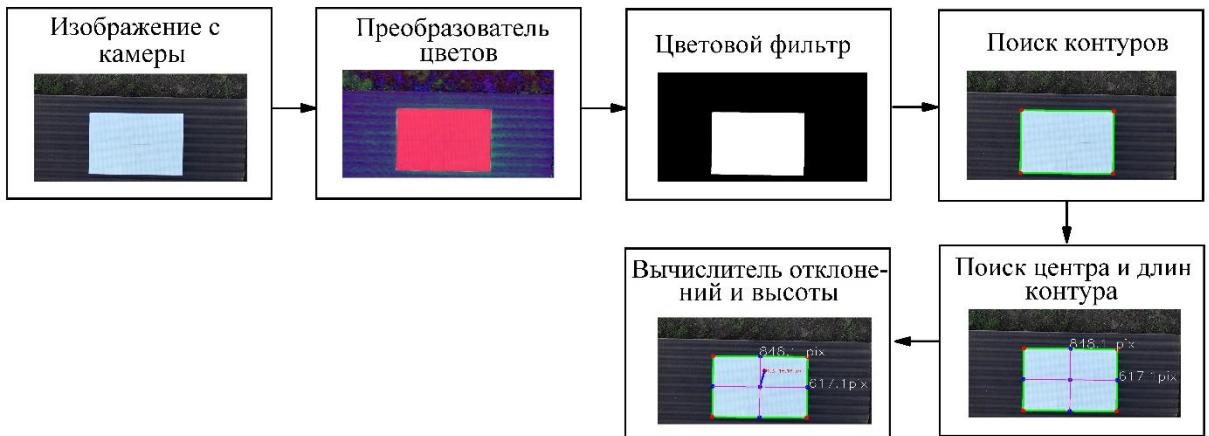


Рисунок 3 – Этапы обработки изображения программным комплексом

Параметрами блока поиска контуров являются режим поиска контура и метод аппроксимации контура. В данной работе определялись координаты вершин повернутого прямоугольника, после чего выделенные точки соединялись линиями. Полученный контур накладывается на исходное изображение. Зная координаты четырех вершин, измеряется длина и ширина контура в пикселях, а также вычисляется его середина. По изменяемым параметрам ширины и длины контура определяется высота полета квадрокоптера, а по отклонению центра контура от центра кадра определяются значения ошибок в горизонтальной плоскости.

Метод измерения высоты [Трусфус, 2019; Шубникова и др., 2013; Rosebrock..., 2015] полета основывается на известных геометрических размерах тестового поля, например, длины  $a$  (рис. 4, а), значение которой вносится в алгоритм обработки в виде константы. Изображение, получаемое видеокамерой (рис. 4, б), подвергается обработке программным комплексом, с помощью которого определяется длина в пикселях  $da$ . Изображение, полученное с помощью камеры квадрокоптера, является подобным реальному объекту, что позволяет определить высоту из соотношения сторон:

$$\frac{H}{f} = \frac{a}{da}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота полета квадрокоптера;  $a$  – длина поля;  $f$  – фокусное расстояние камеры;  $da$  – длина поля в пикселях.

В выражение (1) входят неизвестные высота  $H$  и фокусное расстояние  $f$ . Для определения фокусного расстояния квадрокоптер устанавливается на минимальную фиксированную высоту, при которой фотографируется изображение тестового поля. Зная высоту и геометрическую длину поля, из выражения (1) можно определить фокусное расстояние  $f$  путем определения длины поля в пикселях  $da$  алгоритмом.

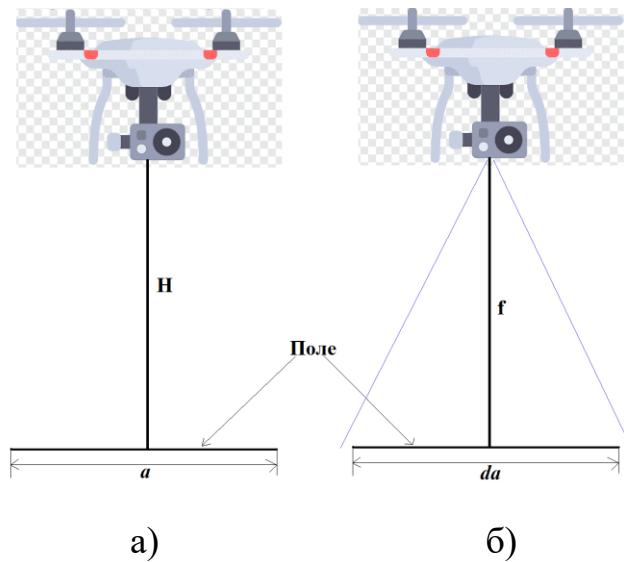


Рисунок 4 – Представление метода измерения высоты:

- а) реальные параметры длины поля и высоты;
- б) параметры длины поля и высоты, измеряемые с помощью видеокамеры

Процедура нахождения фокусного расстояния называется калибровкой видеокамеры. Ввиду того, что фотосъемка может проводиться на разных высотах над тестовым полем, необходимо исключить попадание в кадр ложных объектов. Для этого необходимо воспользоваться цифровым зумом  $r$ . Тогда формула определения высоты примет следующий вид:

$$H = \frac{(a \cdot f) \cdot r}{da}, \quad (2)$$

где  $r$  – значение цифрового зума.

В случае, если цифровой зум не используется,  $r=1$ . Параметр  $r$  записывается в протоколе формата SRT при включении видеосъемки.

Пример работы блока технического зрения представлен на рисунке 5.

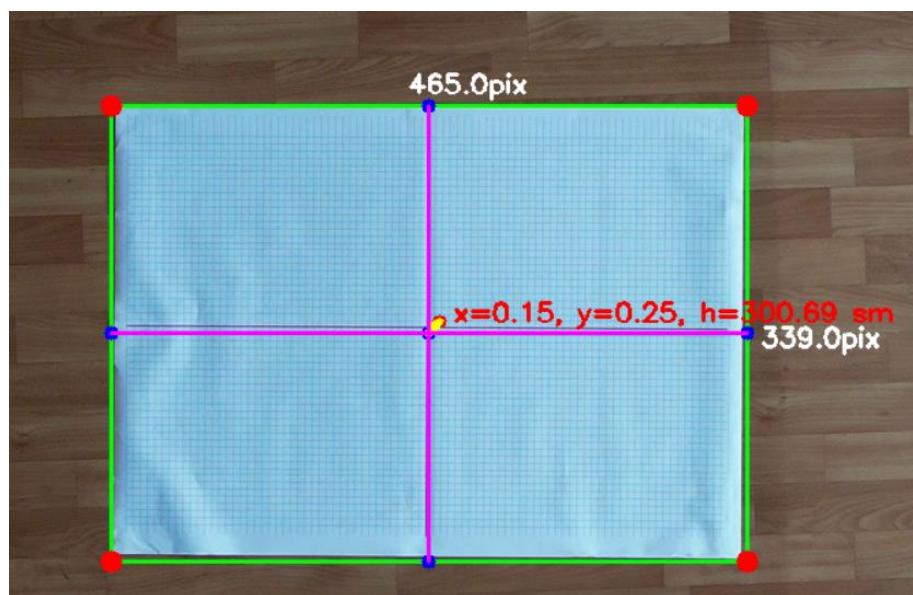


Рисунок 5 – Пример работы алгоритма технического зрения

Тестирование корректности алгоритма определения высоты проводилось на основе видеоданных, получаемых с помощью квадрокоптера DJI Air 2S. В качестве опорного объекта, до которого измеряется высота, использовалось тестовое поле размером 9 на 9 см.

На первом этапе выполнялась процедура калибровки видеокамеры для нахождения фокусного расстояния. Для этого квадрокоптер устанавливался на фиксированных высотах 339; 299; 249; 199; 149; 99; и 49 см над тестовым полем, видеофайлы для каждой высоты записывались в течение 5 минут с частотой следования кадров 24 Гц. На больших высотах для исключения попадания мешающих объектов в изображение использовался цифровой зум.

Записанные видеофайлы обрабатывались программным комплексом. Для каждого кадра видеоряда рассчитывалось значение фокусного расстояния, из которого находилось среднее значение для видеоряда. Полученные средние значения фокусных расстояний отдельных видеорядов лежат в диапазоне 1210,61-1235 см (см. табл. 1). Путем их усреднения найдена оценка фокусного расстояния видеокамеры, равная 1220,1 см.

Изменение фокусного расстояния для разных высот связано с особенностями работы цифрового фильтра, что требует выставления параметров границ для каждого обрабатываемого изображения.

Таблица 1 – Результаты измерения фокусного расстояния

Высота, м	49	99	149	199	249	299	339
Фокусное расстояние $f$ , см	1210,61	1235	1228,2	1226,34	1214,82	1212,3	1213,18
Среднее фокусное расстояние, см	1220,1						

На втором этапе обработки была проведена оценка точности (СКП – среднеквадратической погрешности) измерения высоты по каждому видеоряду при фокусном расстоянии 1220,1 см. Результаты обработки полученных данных представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты измерения высоты при фокусном расстоянии 1220,1 см

Высота, см	49	99	149	199	249	299	339
СКП, см	0,58	0,096	0,18	0,33	0,307	0,777	0,553

Как следует из табл. 2, значения СКП измерения высоты лежат в диапазоне от 0,96 мм до 7,7 мм.

Дополнительно была проведена обработка видеорядов при разных фокусных расстояниях согласно значениям из табл. 1. Результаты обработки данных показали, что точность оценки высоты (табл. 3) при значениях фокусных расстояний, определённых для каждой высоты полета (см. табл. 1), оказалась несколько лучшей (от 0,4 мм до 7,7 мм), чем при фокусном расстоянии 1220,1 см.

Таблица 3 – Результаты измерения высоты при разных фокусных расстояниях

Фокусное расстояние, см	49	99	149	199	249	299	339
СКП, см	0,04	0,05	0,18	0,33	0,305	0,772	0,55

Исходя из полученных результатов следует, что для достижения наилучшей точности измерения высоты необходимо использовать адаптивный по границам пропускаемого цвета цифровой фильтр, что позволит более точно определить фокусное расстояние.

### **Дискуссия и результаты исследований**

#### ***Исследование фактической точности позиционирования квадрокоптера в режиме висения***

Основными системами навигации и стабилизации в пространстве DJI Air 2S являются: приемник GNSS, оптическая система стабилизации и обхода препятствий (четыре стереопары, расположенные по строительным осям квадрокоптера), система навигации IMU на основе гироскопов, акселерометров и магнитометра, выполненных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), измеритель высоты на основе инфракрасного (ИК) сенсора.

Согласно технической документации DJI Air 2S точность позиционирования составляет: в вертикальной плоскости  $\pm 0,1$  м (позиционирование оптической системой) и  $\pm 0,5$  м (позиционирование приемником GNSS); в горизонтальной плоскости  $\pm 0,1$  м (позиционирование оптической системой) и  $\pm 1,5$  м (позиционирование приемником GNSS). Из технической документации следует, что наилучшая точность позиционирования обеспечивается при работе по оптическому каналу (стереопары совместно с ИК-сенсором высоты). Данные по конкретному типу IMU и обеспечиваемых ей точностях не приводятся.

#### ***Позиционирование с использованием только оптической системы***

Цель исследования состояла в оценке точности позиционирования (стабилизации) квадрокоптера по данным оптической системы. Эксперименты проводились в помещении, что позволило исключить работу приемника GNSS из-за отсутствия сигналов от навигационных спутников (НС). Высота стабилизации квадрокоптера над тестовым полем (3 м) задавалась с помощью пульта дистанционного управления оператором. Были проведены два эксперимента продолжительностью каждый около 25 мин.

На рис. 6 представлены графики, характеризующие погрешности позиционирования квадрокоптера относительно центра тестового поля в горизонтальной плоскости (рис. 6, а) и по высоте (рис. 6, б). Вертикальной линией на рис. 6, б разделены графики, соответствующие 1-му и 2-му экспериментам.

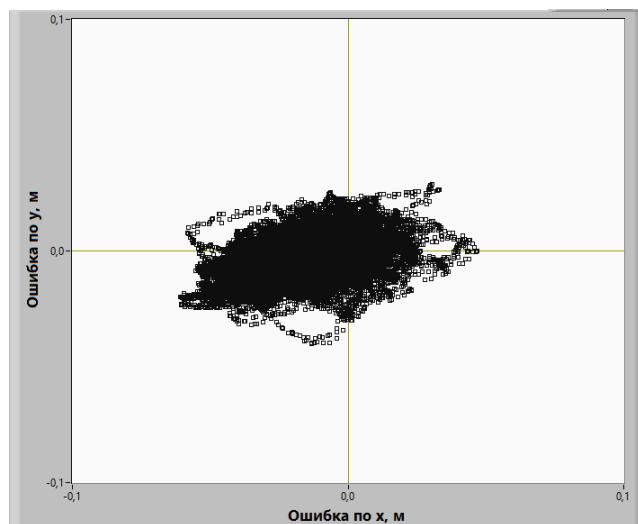
При статистической обработке результатов экспериментов СКП позиционирования по горизонтальным координатам составила  $\sigma_x=0,02$  м,

$\sigma_y=0,01$  м для обоих экспериментов, по высоте  $\sigma_h=0,01$  м для первого и  $\sigma_h=0,02$  м для второго эксперимента.

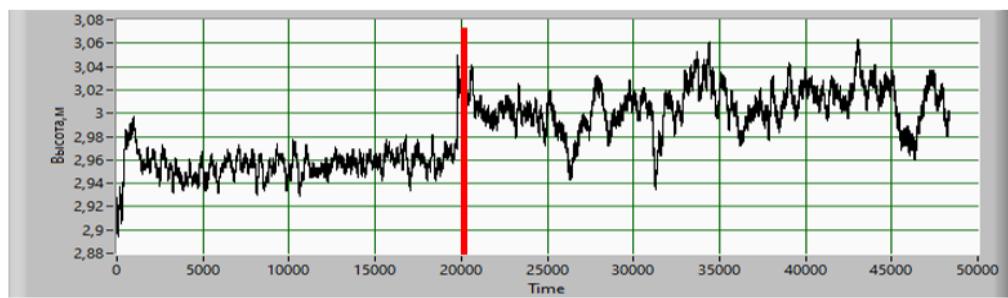
Из полученных результатов следует, что оптическая система обеспечивает высокую (единицы сантиметров) точность позиционирования (стабилизации) квадрокоптера DJI Air 2S, соответствующую заявленной в его документации. Однако система оптической стабилизации, в зависимости от видимости, хорошо работает лишь до высот 30-60 м и критична к состоянию земной поверхности.

### *Позиционирование с использованием оптической системы и приемника GNSS*

Цель исследования состояла в оценке точности позиционирования по данным всех навигационных датчиков квадрокоптера. Для устойчивого приёма сигналов GNSS и минимизации возмущающих воздействий на квадрокоптер эксперименты проводились на открытой местности в безветренную погоду. Квадрокоптер стабилизировался на высоте 3 м над тестовым полем.



а)



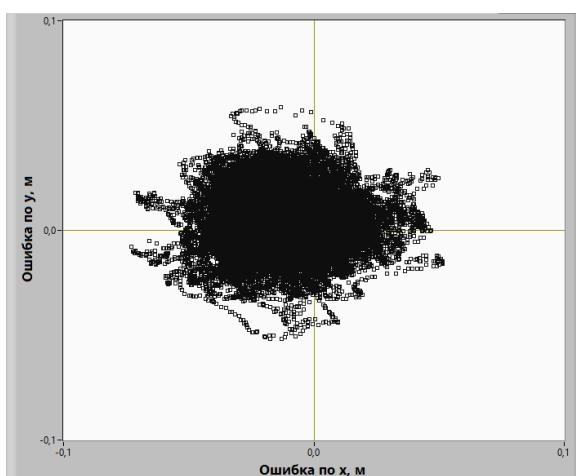
б)

Рисунок 6 – Погрешности позиционирования квадрокоптера с помощью оптической системы: а) погрешности в плане; б) погрешности по высоте

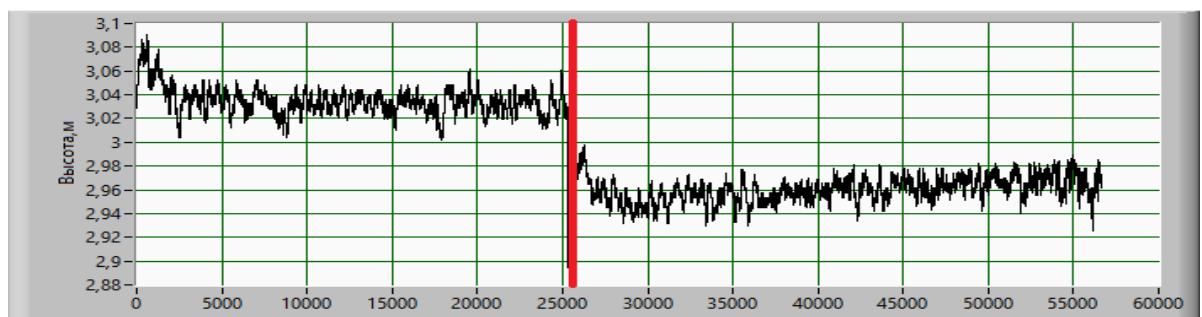
На рис. 7 представлены графики, характеризующие погрешности позиционирования квадрокоптера относительно центра тестового поля в горизонтальной плоскости (рис. 7, а) и по высоте (рис. 7, б). Вертикальной линией на рис. 7, б разделены первый и второй полёты.

Согласно результатам статистической обработки измерений СКП позиционирования по горизонтальным координатам составили  $\sigma_x=0,02$  м,  $\sigma_y=0,01$  м для обоих экспериментов, а по высоте  $\sigma_h=0,01$  м для первого и  $\sigma_h=0,02$  м для второго эксперимента. Полученные данные по точности позиционирования полностью совпадают с данными экспериментов, когда позиционирование осуществлялось только по оптической системе. Это позволяет сделать вывод о том, что при условиях штатной работы оптической системы именно она определяет точность позиционирования (стабилизации) квадрокоптера.

С целью определения точности позиционирования, обеспечиваемой в процессе экспериментов собственно приёмником GNSS, были обработаны данные с лог-файла (log file) полетного контроллера квадрокоптера. Полученные при этом результаты по погрешностям позиционирования в горизонтальной плоскости и по высоте представлены на рис. 8, а и рис. 8, б соответственно.



а)



б)

Рисунок 7 – Погрешности позиционирования квадрокоптера с помощью оптической системы и спутникового навигационного приемника:  
а) погрешности в плане; б) погрешность по высоте

Диапазон значений погрешностей позиционирования приемником GNSS в плане составил: по широте от -1,4 м до 1,26 м, по долготе от -1,25 м до 1,44 м, по высоте от -2,3 м до 3,6 м.

Согласно результатам статистической обработки измерений среднеквадратическая погрешность позиционирования составила (см. табл. 4): 1-й эксперимент: по широте  $\sigma_\varphi=0,34$  м, долготе  $\sigma_\lambda=0,42$  м, высоте  $\sigma_h=0,58$  м; 2-й эксперимент: по широте  $\sigma_\varphi=0,44$  м, долготе  $\sigma_\lambda=0,42$  м, высоте  $\sigma_h=1$  м.

При этом приёмник GNSS решал навигационную задачу по 26-27 спутникам систем GPS, GALILEO и ГЛОНАСС, при горизонтальном геометрическом факторе  $HDOP=0,48-0,50$  и вертикальном  $VDOP=0,92-0,95$ .

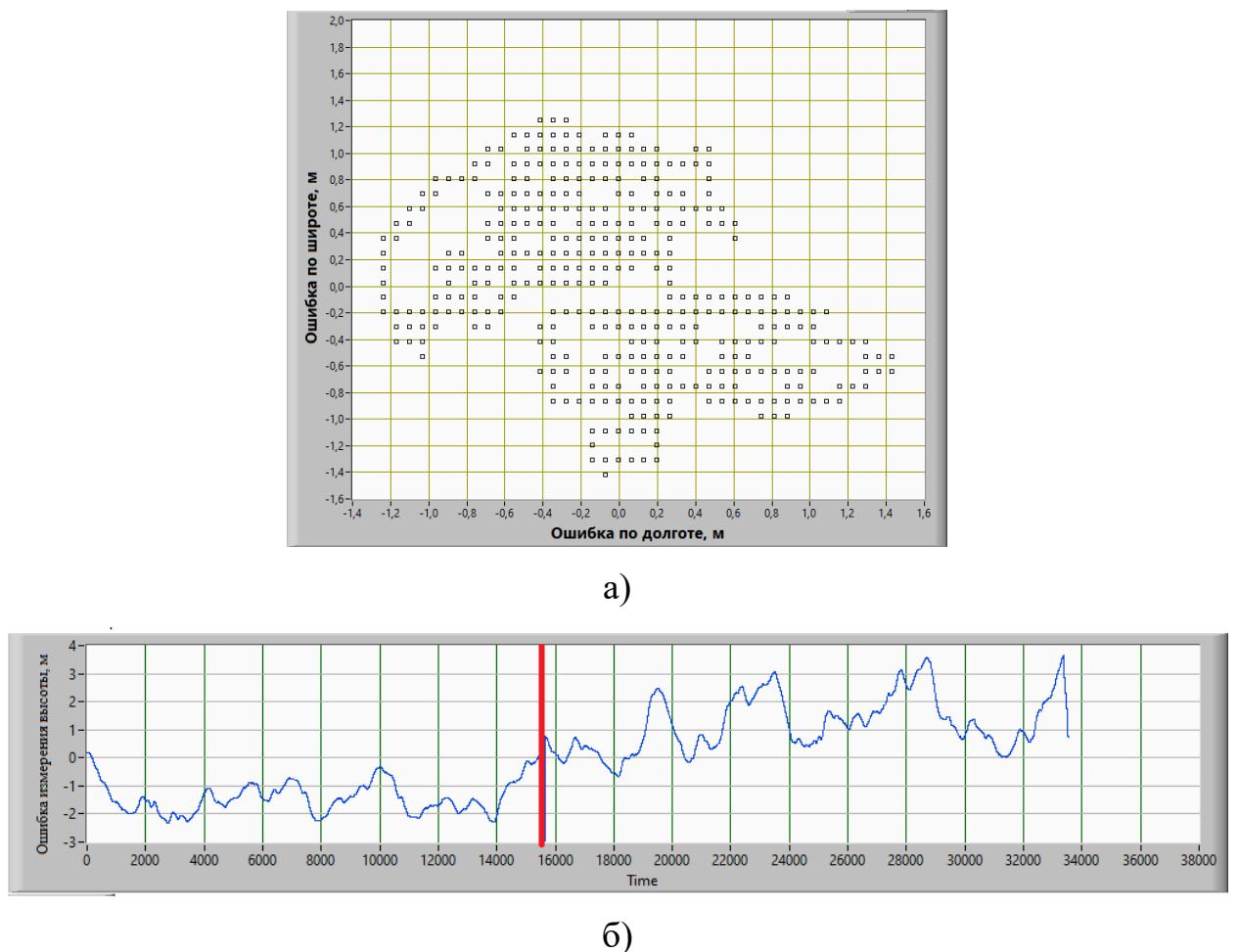


Рисунок 8 – Погрешности позиционирования приемником GNSS:  
а) погрешности в плане; б) погрешность по высоте

Таблица 4 – Результаты статистической обработки данных из лог-файла

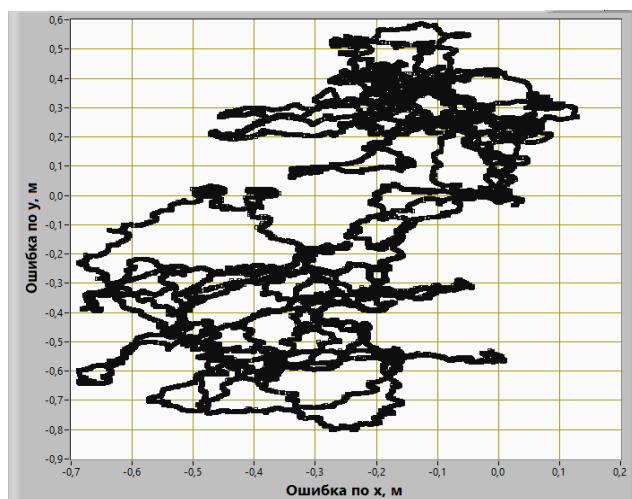
	$\sigma_\varphi$ , м	$\sigma_\lambda$ , м	$\sigma_h$ , м	$HDOP$	$VDOP$	Количество НС
1-й эксперимент	0,34	0,42	0,58	0,48	0,92	27
2-й эксперимент	0,44	0,42	1	0,50	0,95	26

Результаты экспериментов показывают, что точность позиционирования приемником GNSS была хуже, чем точность оптической системы, но это не повлияло на результирующую точность позиционирования квадрокоптера.

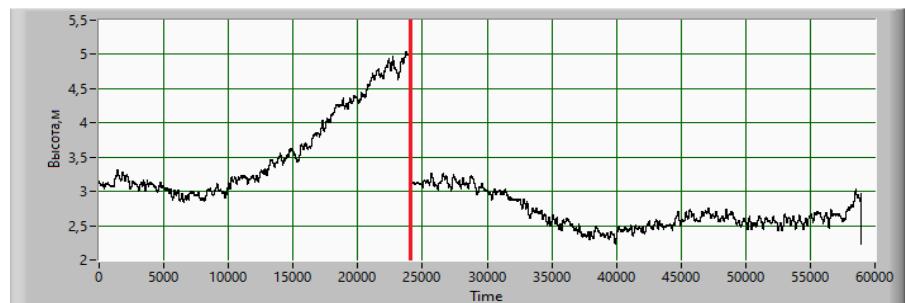
### *Позиционирование с использованием только приемника GNSS*

Цель эксперимента состояла в определении погрешностей позиционирования (стабилизации) квадрокоптера по данным приемника GNSS и сравнении их с данными, формируемыми на выходе приемника. При проведении эксперимента оптическая система была исключена из решения задачи позиционирования путем экранирования всех стереопар и ИК-сенсоров фольгой. При этом на пульте дистанционного управления индицировался маркер отключения системы оптической стабилизации. Эксперимент проводился на открытом воздухе в безветренную погоду. С помощью пульта дистанционного управления задавалась точка стабилизации квадрокоптера на высоте 3 м относительно тестового поля.

Результаты эксперимента по оценке точности позиционирования квадрокоптера после обработки данных программным комплексом представлены на рис. 9 (два полёта продолжительностью 25 и 30 мин, на рис. 9, б разделены вертикальной линией).



а)



б)

Рисунок 9 – Погрешности позиционирования приемником GNSS:  
а) погрешности в плане; б) погрешность по высоте

Диапазон значений погрешностей позиционирования квадрокоптера по данным приемника GNSS в плане составил: по координате  $x$  от -0,7 м до 0,13 м, по координате  $y$  от -0,8 м до 0,6 м, по высоте от -2,3 м до 3,6 м.

Результаты статистической обработки измерений первого эксперимента: СКП выдерживания горизонтальных координат составили  $\sigma_x=0,18$  м,  $\sigma_y=0,31$  м при математическом ожидании  $m_x=-0,14$  м,  $m_y=0,26$  м. Погрешность выдерживания высоты с 10000-го кадра начала расти и достигла 2 м к концу эксперимента. При этом анализ информации из лог-файла для данного эксперимента (рис. 10) не показал нарастающего характера погрешности измерения высоты приемником GNSS. Возможная причина ухудшения точности выдерживания высоты квадрокоптером в первом эксперименте – частичное влияние ИК-канала измерения высоты из-за неполного экранирования ИК-сенсоров.

Результаты статистической обработки измерений второго эксперимента: СКП выдерживания горизонтальных координат  $\sigma_x=0,41$  м,  $\sigma_y=0,45$  м при математическом ожидании  $m_x=-0,38$  м и  $m_y=-0,4$  м. СКП выдерживания высоты составила  $\sigma_h=0,25$  м с математическим ожиданием  $m_h=2,69$  м.

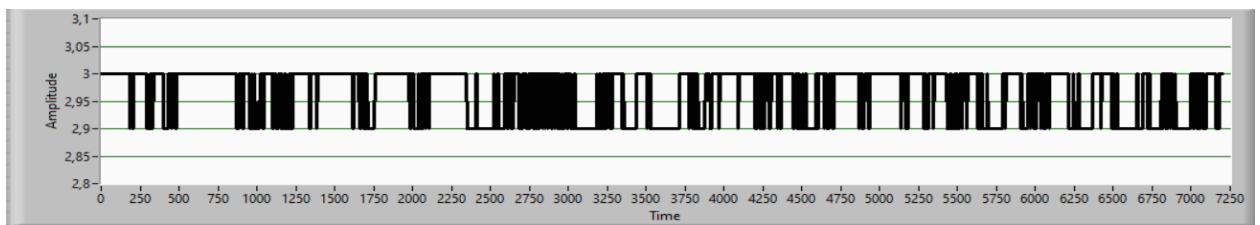
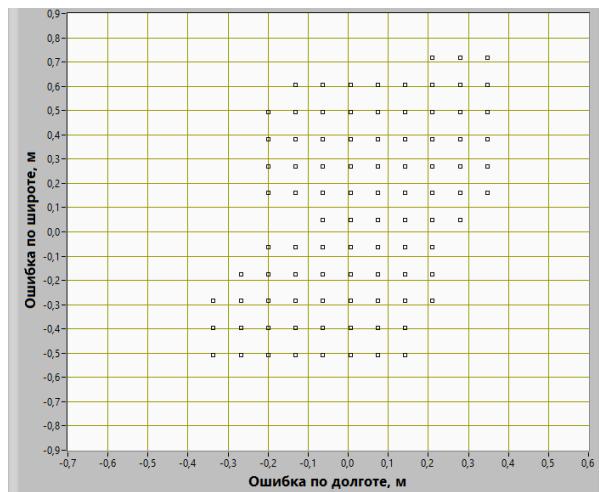
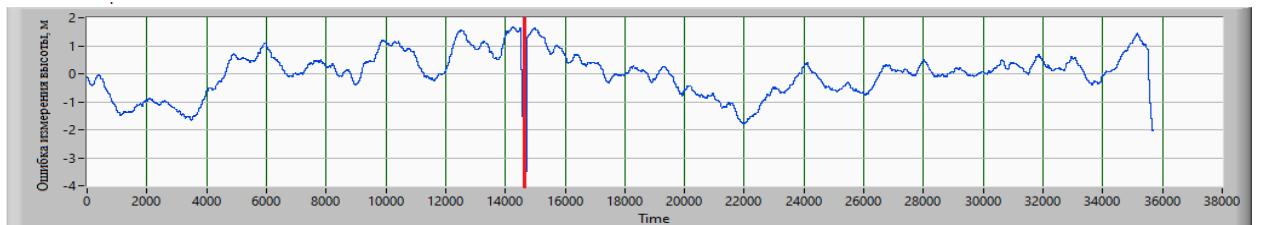


Рисунок 10 – Данные изменения высоты приемником GNSS с лог-файла

Приемник GNSS решал задачу позиционирования по 25 навигационным спутникам систем GPS, GALILEO и ГЛОНАСС одновременно. Результаты обработки измерений с выхода приемника GNSS представлены на рис. 11, а – погрешности позиционирования в плане (погрешности определения широты и долготы), рис. 11, б – погрешность определения высоты.



а)



б)

Рисунок 11 – Погрешности позиционирования приемником GNSS:  
а) погрешности в плане; б) погрешность измерения высоты

Результаты статистической обработки данных с выхода приемника GNSS приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты статистической обработки данных

	$\sigma_\phi$ , м	$\sigma_\lambda$ , м	$\sigma_h$ , м	<i>HDOP</i>	<i>VDOP</i>	Количество НС
1-й эксперимент	0,125	0,13	0,91	0,54	1,14	24
2-й эксперимент	0,136	0,116	0,64	0,49	0,98	26

Данные, приведённые в табл. 5 и табл. 4, достаточно хорошо согласуются между собой. Отличие в оценках статистических характеристик погрешностей связано с различием условий проведения экспериментов по датам, времени суток и условиям прохождения сигналов от НС в ионосфере.

Как показали результаты экспериментов, фактическая погрешность стабилизации квадрокоптера по данным приемника GNSS оказалась хуже, чем точность позиционирования самим GNSS приёмником. Это может быть связано с особенностями алгоритмического обеспечения полётного контроллера квадрокоптера и реализованным принципом комплексной обработки информации от бортовых навигационных датчиков.

Из полученных результатов следует, что точность позиционирования квадрокоптера по данным приёмника GNSS хуже, чем по оптической системе,

но во всех проведённых экспериментах соответствует характеристикам, указанным в технической документации квадрокоптера DJI Air 2S.

### **Заключение**

В данной работе предложена методика определения погрешностей позиционирования квадрокоптера DJI Air 2S, основанная на обработке данных, получаемых по видеоканалу. Разработан программный комплекс, реализующий данную методику, проведено его тестирование. Показано, что точность фиксации пространственного положения предложенным методом и алгоритмом составляет доли сантиметра при висении над тестовой поверхностью.

Результаты проведённых экспериментов подтвердили соответствие фактической точности позиционирования (стабилизации) квадрокоптера DJI Air 2S в режиме висения заявленным в его технической документации.

Показано, что при штатном функционировании оптической системы точность позиционирования (стабилизации) квадрокоптера будет наилучшей и составляет первые единицы сантиметров как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. При этом на точность позиционирования квадрокоптера не влияет худшая точность выходных данных приёмника GNSS.

При позиционировании по данным приёмника GNSS точность стабилизации квадрокоптера оказалась несколько хуже, чем точность выходных данных приёмника GNSS. Возможной причиной такого эффекта являются особенности комплексной обработки информации приёмника GNSS и модуля IMU в полётном контроллере.

### **Библиографический список**

Алгоритмы управления траекториями беспилотных авиационных комплексов при полете в составе группы / А. К. Ермаков, Т. Ю. Портнова, Б. В. Лежанкин, В. В. Ерохин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXIV Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 31 мая – 04 2021 года. Том Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 62-69. EDN YIEIWM.

Ерохин В. В. Оценка параметров траекторного движения БПЛА при различной конфигурации источников навигационной информации / В. В. Ерохин, Б. В. Лежанкин, Э. А. Болелов // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77, № 6. С. 35-49. DOI 10.18127/j20700784-202306-04. EDN MVHGGW.

Межетов М. А. Перспективная схема автоматизированной системы радиомониторинга в задачах организации воздушного движения / М. А. Межетов, А. А. Шалаев, А. В. Федоров // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2023. № 4(41). С. 74-85. EDN CLTAPD.

Скрыпник О. Н. Проблемы безопасности полетов при интеграции беспилотных авиационных систем в общее воздушное пространство / О. Н. Скрыпник, Р. А. Вишневский, М. К. Завалей // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации, Москва, 18–19 мая 2023 года. Москва: ИД Академии имени Н. Е. Жуковского, 2023. С. 226-228. EDN QLOQLM.

*Скрыпник О. Н. Оценка характеристик погрешностей позиционирования комбинированных ГЛОНАСС/GPS приемников / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Арефьева // Современные научные технологии. 2019. № 10-2. С. 296-301. EDN VSQSMT.*

*Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года, утверждена распоряжением Правительства РФ от 21.06.2023 № 1630-р // [Электронный ресурс]. 2023. –*

*<https://static.government.ru/media/fles/3m4AHa9s3PrYTDs316ibUtyEVUpnRT2x.pdf> (дата обращения: 13.02.2024).*

*Трусфус М. В. Измерение расстояний по изображениям с камеры // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Материалы Международной молодёжной научной конференции. В 6-ти томах, Казань, 07–08 ноября 2019 года. Том IV. Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. С. 454-460. EDN NOUCFR.*

*Шубникова И. С. Анализ способов и алгоритмов определения параметров объекта и расстояния до него по изображению / И. С. Шубникова, К. А. Палагута // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т. 1. С. 352-355. EDN RXEXGB*

*Assessment of Accuracy in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Pose Estimation with the REAL-Time Kinematic (RTK) Method on the Example of DJI Matrice 300 RTK / S. Czyż, K. Szuniewicz, K. Kowalczyk, A. Dumalski, M. Ogrodniczak, Ł. Zieleniewicz // Sensors. 2023. № 23. p. 2092. <https://doi.org/10.3390/s23042092>.*

*Bradski G. The OpenCV Library // Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer. 2000. Vol. 25, № 11. P. 120-123. EDN EOYXGL.*

*Ekaso D. Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing / D. Ekaso, F. Nex, N. Kerle // Geo-Spat. Inf. Sci. 2020. № 23. p. 165–181.*

*Glomsvoll O. Jamming of GPS & GLONASS signals // Department of Civil Engineering, Nottingham Geospatial Institute, 2014. 80 p.*

*ICAO. Doc.9613/AN 937. Performance based navigation (PBN). Manual. third edition. 2008. 294 p.*

*Rosebrock A. Find distance from camera to object/marker using Python and OpenCV // [Электронный ресурс]. 2015. – URL: <https://pyimagesearch.com/2015/01/19/find-distance-camera-objectmarker-using-python-opencv/> (дата обращения: 10.02.2024).*

*Suzuki S. Topological structural analysis of digitized binary images by border following / S. Suzuki, Keiichi A be // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. 1985. № 30(1). p. 32-46.*

## References

- Bradski G. (2000). The OpenCV Library // Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer. 25(11). 120-123. EDN EOYXGL.*
- Czyż S., Szuniewicz K., Kowalczyk K., Dumalski A., Ogrodniczak M., Zieleniewicz Ł. (2023). Assessment of Accuracy in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Pose Estimation with the REAL-Time Kinematic (RTK) Method on the Example of DJI Matrice 300 RTK. Sensors. 23, 2092.*
- Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Bolelov E. A. (2023). Estimation of the parameters of the trajectory movement of an unmanned aerial vehicle with different configurations of navigation information sources. Telecommunications and Radio Engineering. 77(6): 35-49. EDN MVHGGW. (In Russian)*
- Ermakov A. K. Portnova T. Yu., Lezhankin B. V., Erokhin V. V. (2021). Trajectory control algorithms for unmanned aircraft complexes flying in formation. Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy : Materialy XXIV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. V 3-h chastyah. Sankt-Peterburg: State University of Aerospace Instrumentation. 391: 62-69. EDN YIEIWM. (In Russian)*

- Ekaso D., Nex F., Kerle N.* (2020). Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. *Geo-Spat. Inf. Sci.* 23: 165-181.
- Glomsvoll O.* Jamming of GPS & GLONASS signals // Department of Civil Engineering, Nottingham Geospatial Institute, 2014. 80 p.
- Rosebrock A.* (2015). Find distance from camera to object/marker using Python and OpenCV. Available at: <https://pyimagesearch.com/2015/01/19/find-distance-camera-objectmarker-using-python-opencv/> (accessed 10 February 2024)
- ICAO (2008). Doc. 9613/AN 937. Performance based navigation (PBN) Manual. Third edition. 2008. 294 p.
- Suzuki S., Keiichi A be* (1985). Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing.* 30(1): 32-46.
- Mezhetov M. A., Shalayev A. A., Fedorov A. V.* (2023). Perspective scheme of automated radio monitoring system in tasks of air traffic management. *Vestnik sankt-peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviacii.* 4(41): 74-85. EDN CLTAPD. (In Russian)
- Skrypnik O. N., Arefyev R. O., Arefyeva N. G.* (2019). Estimation of positioning error characteristics of combined GLONASS / GPS receivers. *Modern high technologies.* 10-2. 296-301. (In Russian)
- Skrypnik O. N., Vishnevskij R. A., Zavalej M. K.* (2023). Flight safety problems when integrating unmanned aviation systems into the common air space. *Grazhdanskaya aviaciya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: Sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu otechestvennoj grazhdanskoy aviacii.* Moscow: ID Akademii imeni N. E. Zhukovskogo. 226-228. EDN QLOQLM (In Russian)
- Strategiya razvitiya bespilotnoj aviacii Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2035 goda, utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 21.06.2023 № 1630-p. Available at: <http://static.government.ru/media/fles/3m4AHa9s3PrYTDs316ibUtyEVUpnRT2x.pdf> (accessed 10 February 2024). (In Russian).
- Shubnikova I. S., Palaguta K. A.* (2013). Analysis of methods and algorithms for determining object parameters and distance to it by image. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo".* 352-355. EDN RXEXGB. (In Russian).
- Trusfus M.* (2019). Distance measurement using a single camera image. *XXIV tupolevskie chteniya (shkola molodyh uchenyh).* 6(4): 454-460. EDN NOUCFR. (In Russian).