

# ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

---

УДК 621.391:621.396

ББК 39.57-5

DOI 10.51955/2312-1327\_2024\_4\_127

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА DJI MAVIC 2 ZOOM\*

*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.** Стремительное развитие беспилотных авиационных систем (БАС) и сфер их применения требует обеспечения безопасного и эффективного использования воздушного пространства (ВП) различными категориями его пользователей. Одной из важных задач при использовании ВП являются планирование траектории и осуществление полета беспилотных воздушных судов (БВС) с учетом точностных характеристик бортовых комплексов навигации. В данной работе представлена методика экспериментальной оценки точностных характеристик бортового навигационного комплекса квадрокоптера DJI MAVIC 2 ZOOM. Методика основана на формировании заданной траектории полета БВС, с помощью которой можно оценить погрешность отклонения по одной из горизонтальных координат, и высоты. Натурные эксперименты проведены путем реальных полетов на разных высотах и скоростях БВС. Кроме этого проведены полунатурные эксперименты с имитатором сигналов GNSS CH-3803M, позволившие определить условия работоспособности навигационного комплекса при уменьшении числа спутников рабочего созвездия.

**Ключевые слова:** беспилотное воздушное судно, бортовой навигационный комплекс, GNSS, точность выдерживания траектории.

# THE METHOD OF EXPERIMENTAL EVALUATION OF ACCURACY OF THE DJI MAVIC 2 ZOOM NAVIGATION SYSTEM

*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\_astrahanceva\_awesome@mail.ru*

**Abstract.** Rapid development of unmanned aircraft systems (UAS) and their application areas requires safe and efficient airspace (AS) for various categories of its users. One of the important tasks when using AS is planning a trajectory and flying the unmanned aerial vehicles (UAV) with account of the accuracy characteristics of on-board navigation systems. The paper presents a methodology for experimentally evaluating the accuracy characteristics of the on-board navigation system of the DJI MAVIC 2 ZOOM quadcopter. The methodology is based on the formation of a UAV desired track, with the help of which it is possible to estimate the deviation error in one of the horizontal coordinates and altitude. The experiments were conducted for real UAV flights at different altitudes and speeds. Semi-natural experiments were conducted with the GNSS SN-3803M signal simulator allowing us to determine the state of operability of the transport complex with a reduction in the number of the working constellation satellites.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV), on-board navigation system, GNSS, trajectory accuracy.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T23-029).

## Введение

Интеграция беспилотных авиационных систем в общее с пилотируемой авиацией ВП должна опираться на технологии, предлагаемые в рамках блочной модернизации авиационной системы (ASBU – Aviation System Block Upgrades) и концепции навигации, основанной на характеристиках (PBN –

Performance Based Navigation)<sup>27</sup> [ICAO GANP..., 2024]. Согласно 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. Указанное положение в полной мере относится к беспилотной авиации при её интеграции в общее ВП, когда БВС с вероятностью 95% не должно выходить за границы «коридора», установленного для конкретного маршрута полета в конкретном ВП<sup>28</sup>.

Для обеспечения безопасности полетов в динамично изменяющемся ВП вокруг каждого пилотируемого и беспилотного ВС вводится виртуальная защитная область (ВЗО) в виде трехосного эллипсоида (рис. 1) в связанной со строительными осями ВС системе координат, пересечение границы которой другим объектом квалифицируется как конфликтная ситуация.

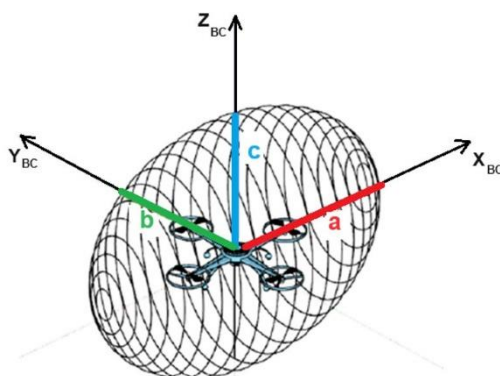


Рисунок 1 – Виртуальная защитная область в виде трехосного эллипсоида

Размеры ВЗО характеризуются длиной большой полуоси  $a$  эллипсоида, совпадающей с продольной осью (вектором воздушной скорости) ВС, длиной средней полуоси  $b$  (при  $b > c$ ), лежащей в горизонтальной плоскости ВС, и длиной малой полуоси  $c$ , нормальной горизонтальной плоскости ВС. Ориентация ВЗО в пространстве определяется углами крена, тангажа и курса ВС.

Размеры ВЗО зависят от точности определения местоположения ВС, его скорости, маневренных характеристик, сложности выполняемой операции и других факторов. Кроме этого, при решении задач планирования траекторий и предупреждения конфликтных ситуаций параметры ВЗО будут зависеть от характеристик средств наблюдения (точность, темп обновления информации) и обмена данными (время транзакции, целостность, готовность), дополняя её буферными (защитными) зонами, размеры которых определяются характеристиками средств наблюдения и средств связи.

С учетом этого сечение ВЗО можно представить в виде эллипса (рис. 2).

<sup>27</sup> Скрыпник О. Н. Радионавигационные системы аэропортов и воздушных трасс: учебник. М.: ИНФРА-М», 2020. 325 с. DOI 10.12737/textbook\_5d4138adabcd9c7.79696890. EDN NLQKHF.

<sup>28</sup> Скрыпник О. Н. Радионавигационные системы аэропортов и воздушных трасс: учебник. М.: ИНФРА-М», 2020. 325 с. DOI 10.12737/textbook\_5d4138adabcd9c7.79696890. EDN NLQKHF.

При планировании траектории полета ВС в структурированном ВП предполагается, что выполняется горизонтальный полет с заданным курсом без крена, тангажа и с нулевым углом сноса. При этом следует пересчитать параметры ВЗО в горизонтальную систему координат  $OXYZ$ , плоскость  $OXY$  которой параллельна земной поверхности, а ось  $OZ$  направлена по местной вертикали.

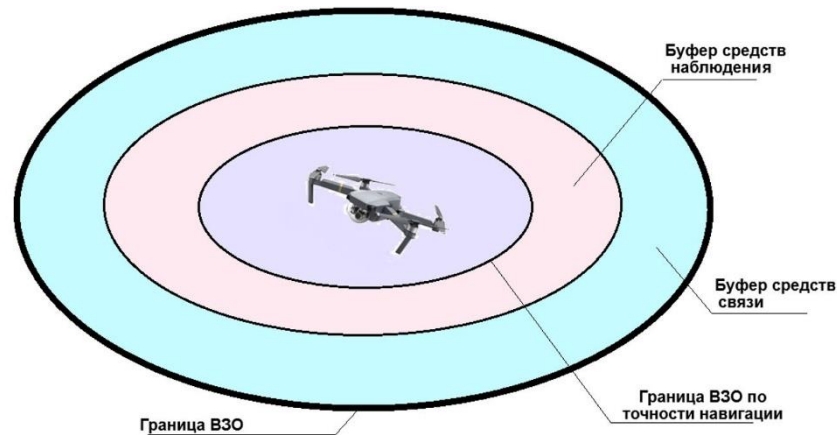


Рисунок 2 – Структура виртуальной защитной области

При решении задачи предупреждения и разрешения конфликтных ситуаций на всех уровнях рассматривается минимальное безопасное расстояние  $R_{\min}$  между ВС (рис. 3).

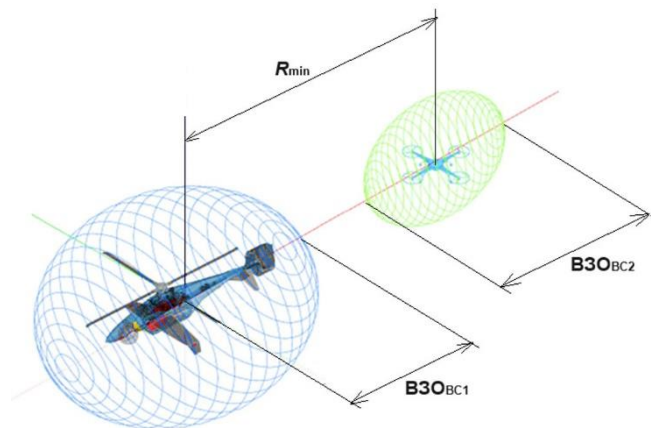


Рисунок 3 – Минимальное безопасное расстояние между ВС

Расстояние  $R_{\min}$  может быть найдено путем проектирования на линию дальности (соединяющую центры масс ВС) осей их ВЗО и добавления к этому некоторого дополнительного безопасного расстояния  $R_6$ , зависящего от характеристик используемого ВП и условий выполнения полетов.

Для определения  $R_{\min}$  по аналогии с пилотируемой авиацией можно использовать требуемые навигационные характеристики для общего ВП (U-пространства) [Huttunen, 2019; SESAR Roadmap..., 2018; U-space concept..., 2020]

- RUNP (Required U-space Navigation Performance). RUNP определяются по тем же принципам, что RNP и RNAV спецификации ICAO и различны для разных операций и зон ВП. Так, например, для ВП с высокой плотностью воздушного движения может использоваться RUNP-5m, что определяет следующие характеристики навигации: точность выдерживания траектории ( $2\sigma$ ) 5 м, целостность выше, чем  $1-1\cdot 10^{-7}$  с задержкой выдачи предупреждения не более 1 сек, доступность соединения по линии C2 в нормальных условиях – не ниже 99%, непрерывность – не менее  $1-1\cdot 10^{-4}$  1 / час линии C2, область – задаваемая зона высокой плотности воздушного движения.

Для ВП над небольшим населенным пунктом может применяться спецификация RUNP-50 m, что определяет следующие характеристики навигации: точность выдерживания траектории ( $2\sigma$ ) 50 м, целостность выше, чем  $1-1\cdot 10^{-7}$  с задержкой выдачи предупреждения не более 5 сек, доступность соединения по линии C2 в нормальных условиях – не ниже 99%, непрерывность – не менее  $1-1\cdot 10^{-4}$  1 / час по линии C2, область – город и пригородная зона.

Навигационный комплекс БВС играет определяющую роль в обеспечении точного позиционирования, стабилизации БВС в полете, способности решения поставленных задач [Алгоритмы управления траекториями..., 2021; Ерохин и др., 2023]. В состав навигационного комплекса БВС массой до 30 кг входят одно- или мультисистемные приемные модули спутниковой навигации GNSS, IMU инерциальные датчики для определения ориентации и скорости БВС, датчики визуального позиционирования.

Как правило, производители БВС в эксплуатационной документации приводят характеристики точности навигации их изделий, однако обычно не указывают, какими средствами и в каких условиях эта точность обеспечивается. Поэтому представляет интерес проведение натурных экспериментов по исследованию точности выдерживания заданной траектории при выполнении БВС реального полета.

### **Методика проведения эксперимента по оценке точности выдерживания траектории полета БВС**

Для проведения эксперимента задавался полет БВС по маршруту, показанному на рис. 4, представляющему собой квадрат со стороной 200 м. Стороны квадрата 1 и 3 ориентированы в направлении север-юг, стороны 2 и 4 – запад-восток, что позволяет оценивать погрешность бокового отклонения (выдерживания) БВС от заданной траектории по одной из горизонтальных координат (широте или долготе). На участках 1 и 3 полет осуществляется с курсами  $0^\circ$  и  $180^\circ$ , на участках 2 и 4 – с курсами  $90^\circ$  и  $270^\circ$  соответственно.

Формирование заданной траектории осуществляется заданием геодезических координат точек А (точка входа на маршрут), В, С и D на карте. При этом полет с курсами  $0^\circ$  и  $180^\circ$  характеризуется постоянным значением долготы, а с курсами  $90^\circ$  и  $270^\circ$  – широты, что позволяет определять

отклонение реальной траектории полета БВС от заданной в первом случае по широте, во втором – по долготе (рис. 5).

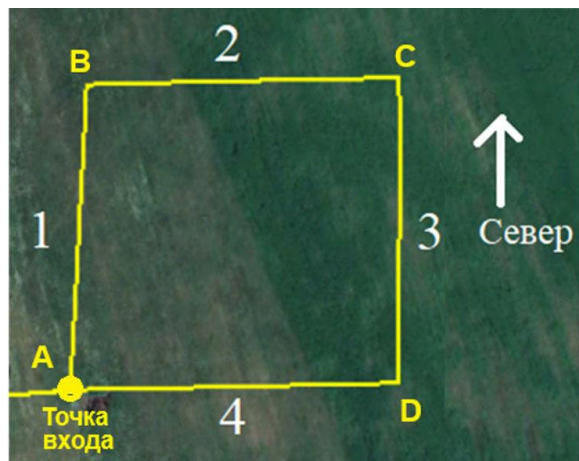


Рисунок 4 – Заданный маршрут полета

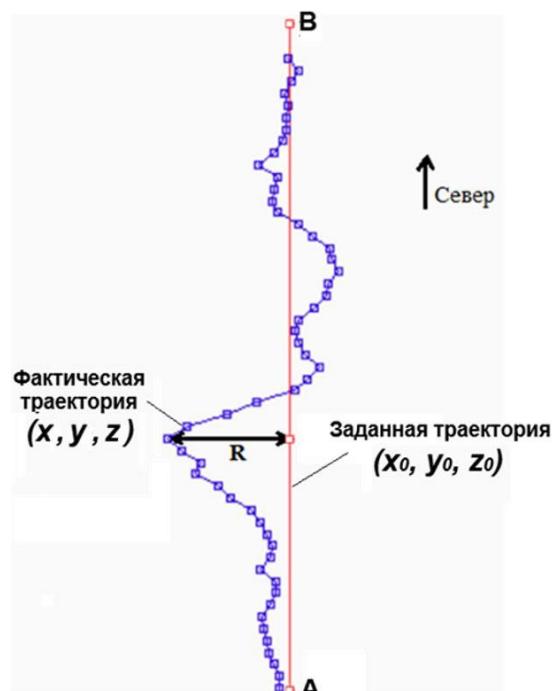


Рисунок 5 – Заданная и фактическая траектории

Оценка (среднеквадратическая погрешность, СКП) точности выдерживания траектории осуществлялась путем статистической обработки ряда зафиксированных значений отклонений фактической траектории от заданной для каждого участка маршрута. Выходные координаты формирует приемник GNSS, для которого закон распределения погрешностей определения координат соответствует нормальному, а методика расчета СКП представлена в работе [Скрыпник и др., 2019].

Для проведения исследований использовался квадрокоптер DJI MAVIC 2 ZOOM, обладающий возможностью выполнять автономный полет по запрограммированной (в нашем случае – заданной) траектории. В состав бортового навигационного оборудования данного БВС входят модули IMU, GNSS (системы ГЛОНАСС и GPS), а также система оптической стабилизации и обхода препятствий.

Согласно заявленным производителем данным точность позиционирования составляет: в вертикальной плоскости  $\pm 0,1$  м (позиционирование оптической системой) и  $\pm 0,5$  м (позиционирование приемником GNSS); в горизонтальной плоскости  $\pm 0,3$  м (позиционирование оптической системой) и  $\pm 1,5$  м (позиционирование приемником GNSS). Однако производитель не разъясняет, для какого режима полета обеспечиваются заявленные характеристики [DJI MAVIC 2, 2024]. В [Арефьев и др., 2024] проведены исследования точности пространственной стабилизации квадрокоптера DJI Air2S, показавшие соответствие полученных



экспериментальным путем характеристик заявленным. Это дает основание предположить, что и для квадрокоптера DJI MAVIC 2 ZOOM точность пространственной стабилизации будет соответствовать заявленной.

Для построения заданной траектории использовалось приложение DJI Ground Station Pro (DJI GS PRO), которое устанавливается на планшетные компьютеры фирмы Apple. В документации производителя не указывается точность вычисления заданной траектории, однако для программирования полета на расстояния порядка 200 м данную погрешность можно считать несущественной по сравнению с погрешностью позиционирования. Далее планшет подключался к пульту управления БВС, как показано на рис. 6, а. В приложении есть возможность создания и редактирования координат опорных точек заданной траектории, что позволило сформировать заданную траекторию в виде квадрата 200х200 метров.

На рис. 6, б представлено отображение заданной траектории полета БВС в DJI GS PRO.

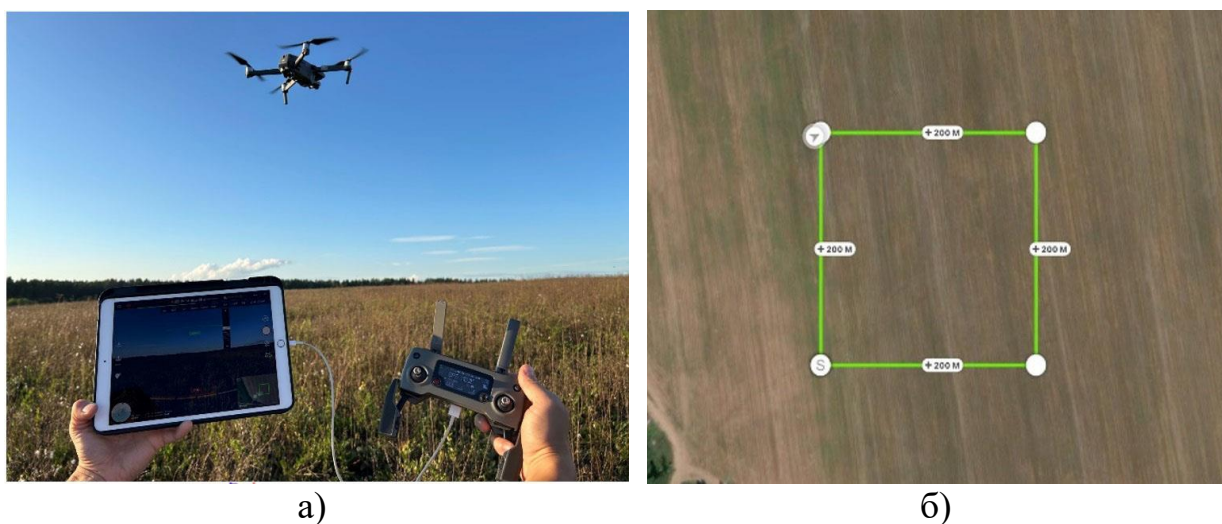


Рисунок 6 – Управление БВС (а) и интерфейс программы (б)

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе при штатном функционировании навигационного комплекса выполнялись полеты квадрокоптера на высотах 30 м, 60 м и 90 м со скоростями 5 м / с, 10 м / с и 15 м / с.

На втором этапе для тех же высот и скоростей отключалась система оптической стабилизации.

Полетная и другая информация с систем БВС записывается в log-файл, который содержит координаты полета, а также данные о количестве видимых навигационных спутников (НС), которые использовались для решения навигационной задачи приемником GNSS. В ходе полетов наблюдалось 17-18 НС мультисозвездия ГЛОНАСС / GPS, но информация о геометрическом факторе GNSS в log-файле отсутствует. Более подробно о составе log-файлов DJI квадрокоптеров изложено в работе [Salamh et al., 2021].

Все эксперименты проводились в один день, в простых метеорологических условиях (скорость ветра 1,3 м/с, угол ветра – около 180 град.).

### Дискуссия и результаты исследований

#### *Исследование точности выдерживания заданной траектории при включенной системе оптической стабилизации и GNSS*

На рис. 7, 8 представлены графики СКП определения координат и высоты полета квадрокоптера на разных высотах при различной скорости.

Так на рис. 7 представлены результаты экспериментов для участков полета 1 (а – СКП<sub>Д</sub> долготы, б – СКП<sub>Н</sub> высоты) и 3 (в – СКП<sub>Д</sub> долготы, г – СКП<sub>Н</sub> высоты) (см. рис. 4). Из полученных результатов следует, что при увеличении скорости полета БВС наблюдается увеличение СКП оценки координат по долготе до 15-20 см, по высоте – до 0,5 м.

Увеличение высоты полета БВС с 30 м до 90 м практически не влияет на точность выдерживания траектории БВС по долготе и высоте.

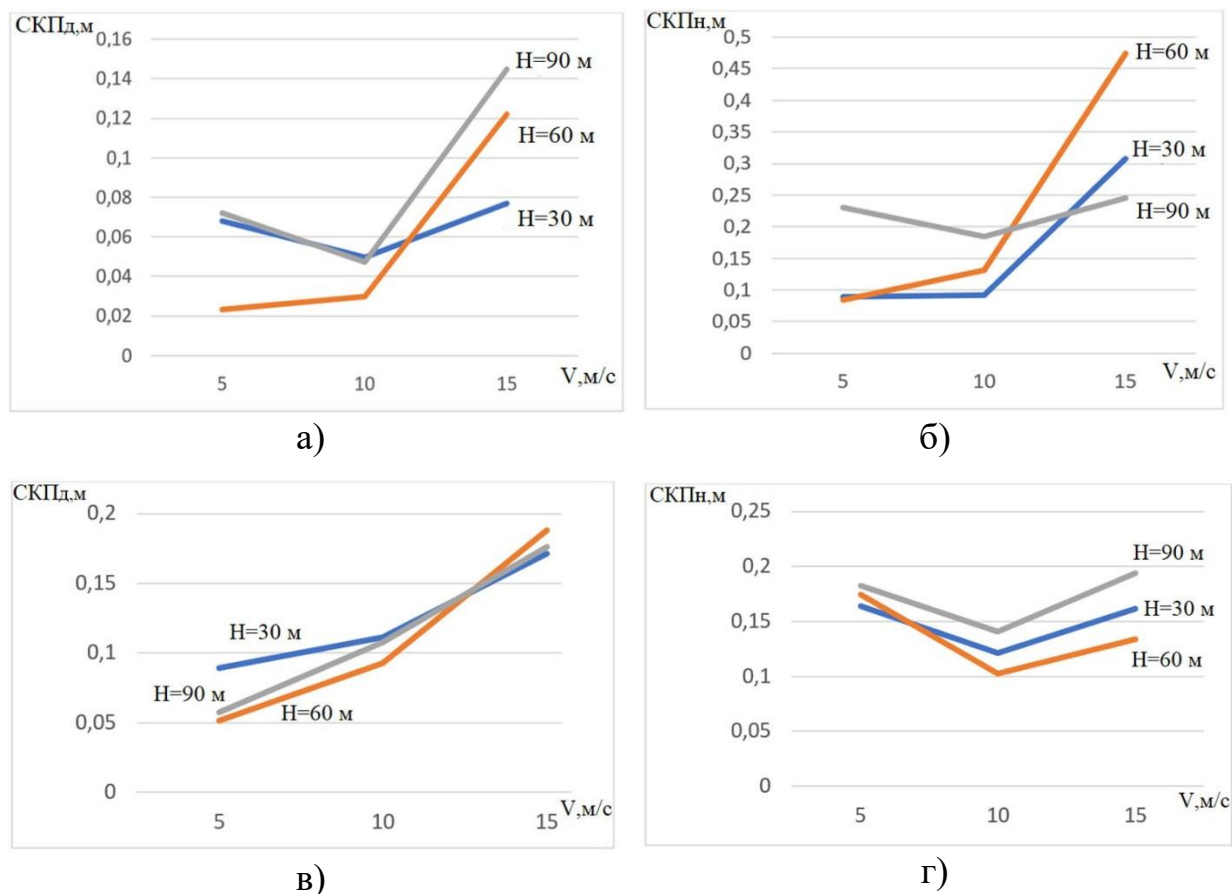


Рисунок 7 – Зависимость СКП измерения координат от скорости полета БВС:

а) СКП<sub>Д</sub> долготы, участок 1; б) СКП<sub>Н</sub> высоты, участок 1; в) СКП<sub>Д</sub> долготы, участок 3; г) СКП<sub>Н</sub> высоты, участок 3

Результаты экспериментов для участков полета 2 и 4 представлены на рис. 8. Из полученных результатов следует, что при увеличении скорости



полета БВС наблюдается увеличение СКП оценки координат по широте до 15-20 см, по высоте – до 25-40 см.

Увеличение высоты полета БВС с 30 м до 90 м практически не влияет на точность выдерживания траектории БВС по широте и высоте.

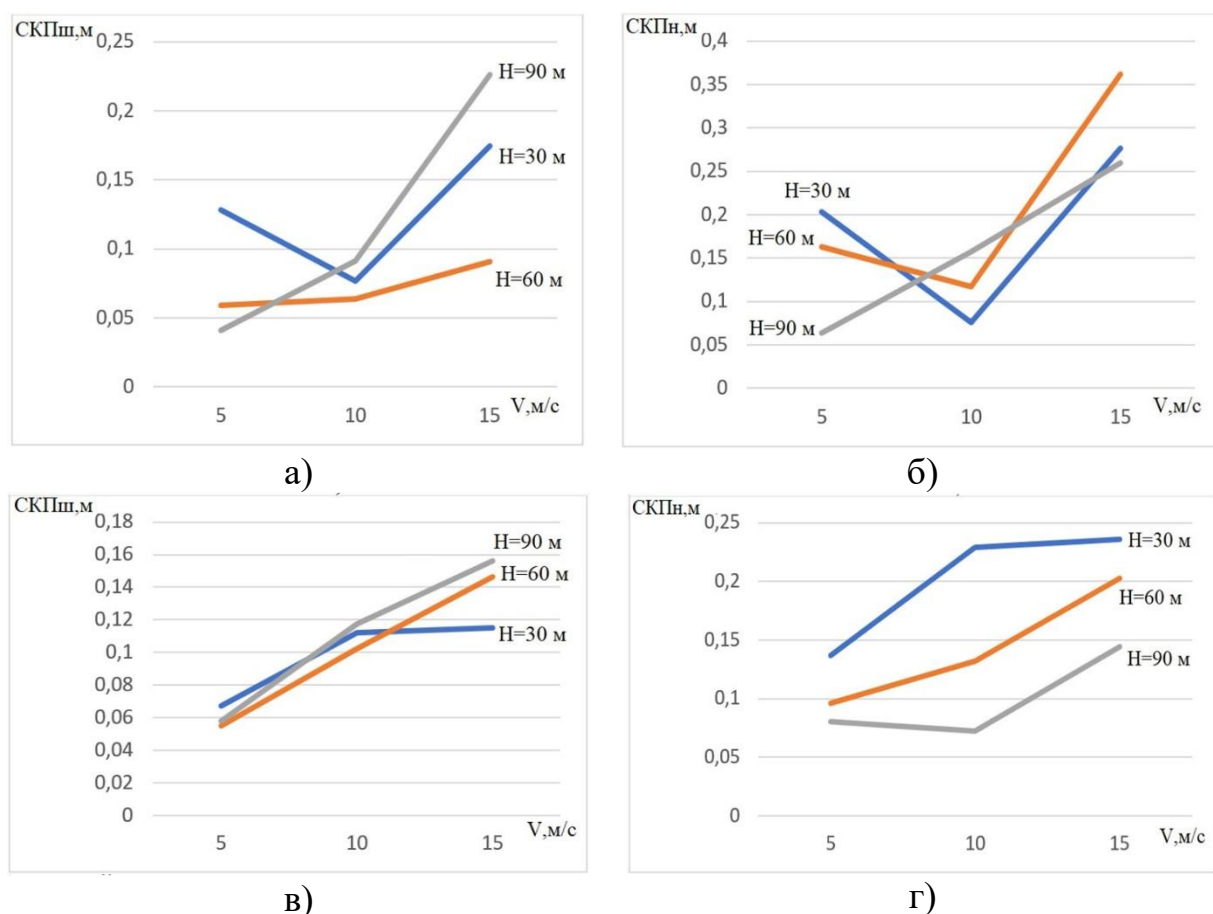


Рисунок 8 – Зависимость СКП измерения координат от скорости полета БВС:  
а) СКП<sub>Ш</sub> широты, участок 2; б) СКП<sub>Н</sub> высоты, участок 2; в) СКП<sub>Ш</sub> широты, участок 4; г) СКП<sub>Н</sub> высоты, участок 4

Сравнивая СКП измерения горизонтальных координат и СКП измерения высоты, видно, что в большинстве случаев ошибка измерения высоты оказывается больше, чем горизонтальных координат, тогда как производитель заявляет о лучшей, по сравнению с горизонтальными координатами, точности измерения именно высоты.

### ***Исследование точности выдерживания заданной траектории БВС при выключенной системе оптической стабилизации и GNSS***

Для исключения из работы системы оптической стабилизации и обхода препятствий были выключены соответствующие опции в приложении DJI GS PRO. Полеты проводились на высотах 30, 60 и 90 метров со скоростью 15 м/с.

Эксперименты показали, что отключение системы оптической стабилизации не привело к значительному ухудшению СКП горизонтальных координат и высоты при полетах на высотах от 30 м и выше. Это позволяет сделать вывод, что включенные ранее опции оптической стабилизации на этих

высотах не использовались и навигация БВС осуществлялась только с использованием данных приемника GNSS (это подтверждает заявленные производителем ограничения использования оптической системы высотой 20 м). Значения СКП измерения широты и долготы составили от 4,5 до 17 см, СКП измерения высоты от 11 до 31 см.

Несмотря на высокую точность определения координат БВС при работе приемника GNSS, возможны ситуации, ухудшающие условия навигационного сеанса (ухудшение геометрического фактора, влияние помех, сбои слежения за спутниками и др.) [Веремеенко и др., 2010; A study on the..., 2015; GPS jamming..., 2009].

Поэтому представляет практический интерес исследование работоспособности приемника GNSS и всей навигационной системы квадрокоптера при ухудшении условий навигационного сеанса.

С этой целью проведены полунатурные эксперименты с использованием имитатора спутниковых сигналов СН-3803М (рис. 9), с помощью которого было воспроизведено видимое спутниковое созвездие системы ГЛОНАСС/GPS. В ходе экспериментов БВС устанавливалось рядом с антенной СН-3803М со снятыми пропеллерами для захвата формируемых радиосигналов видимого созвездия. При запуске электромоторов осуществлялась запись данных в log-файл, что позволило осуществить их последующую обработку.

Спутники видимого созвездия исключались из решения навигационной задачи путем отключения соответствующих каналов в СН-3803М.

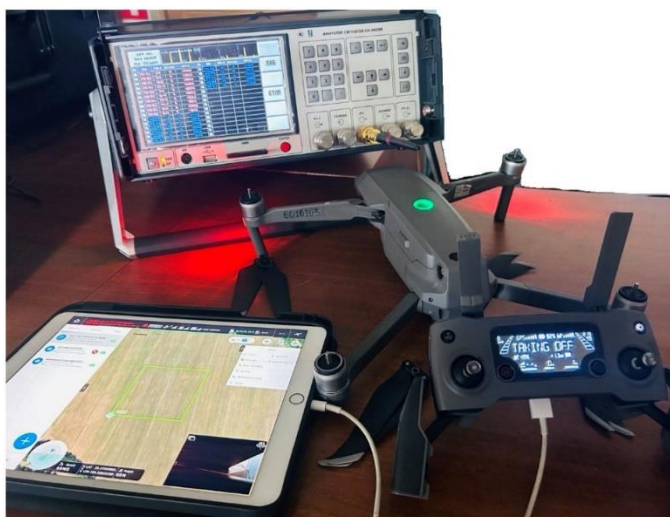


Рисунок 9 – Экспериментальная установка для полунатурных экспериментов

В результате проведенных экспериментов установлено, что минимальное количество НС рабочего созвездия, при котором возможно решение задачи комплексом по определению координат квадрокоптера, равно восьми. После перехода в режим слежения за сигналами НС решение навигационной задачи обеспечивалось при уменьшении числа НС рабочего созвездия до семи.

При уменьшении числа спутников рабочего созвездия до шести данные с приемника GNSS в навигационном комплексе квадрокоптера не используются и решение навигационной задачи становится невозможным.

Известно, что минимальное рабочее созвездие для односистемного спутникового приемника составляет четыре НС [ГЛОНАСС..., 2010; Соловьев, 2000; Hofmann-Wellenhof et al., 2007; Kaplan et al., 2005]. Исходя из этого следует вывод, что производитель вводит ограничение на работу спутникового приемника, который выдает координаты в комплекс при работе не менее, чем по восьми НС, тем самым защищая пользователя от потери БВС при эксплуатации.

### **Заключение**

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

1. Навигационный комплекс DJI MAVIC 2 ZOOM обеспечивает высокую (первые десятки сантиметров) точность определения координат и выдерживания заданной траектории полета при работе мультисистемного приемника GNSS по числу спутников рабочего созвездия более восьми.

2. Отключение системы оптической стабилизации и обхода препятствий не приводит к существенному ухудшению точности выдерживания заданной траектории на высотах полета более 30 м. При этом точность измерения высоты хуже, чем горизонтальных координат, что не соответствует информации, заявленной производителем.

3. Увеличение скорости полета квадрокоптера приводит к ухудшению точности определения координат, но в пределах заявленной производителем.

4. Предложенная методика основана на данных, получаемых из log-файла, который может быть записан с погрешностями, что не позволяет оценить в полной мере реальные отклонения от заданной траектории, и требует доработки методики оценки точности выдерживания траектории.

### **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.

Арефьев Р. О. Экспериментальная оценка точности пространственной стабилизации квадрокоптера DJI Air 2S / Р. О. Арефьев, О. Н. Скрыпник, Н. Г. Арефьева (Астраханцева) // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2024. № 1. С. 128-145. DOI 10.51955/2312-1327\_2024\_1\_128. EDN UQDIOE.

Веремеенко К. К. Анализ состояния разработок интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем / К. К. Веремеенко, Б. В. Кошелев, Ю. А. Соловьев // Новости навигации. 2010. № 4. С. 32-41. EDN RBGRIF.

ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 801 с.

- 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.
- Скрыпник О. Н. Оценка характеристик погрешностей позиционирования комбинированных ГЛОНАСС/GPS приемников / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев, Н. Г. Арефьева // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 10-2. С. 296-301. EDN VSQSMТ.
- Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М: Эко-Трендз, 2000. 270 с.
- A study on the accuracy of GPS positioning during jamming / B. Lubbers, S. Mildner, P. Oonincx, A. Scheele // 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN). IEEE. 2015. pp. 1-6.
- DJI MAVIC 2 // [Электронный ресурс]. – 2024. URL: <https://www.dji.com/ru/mavic-2/info> (дата обращения: 10.10.2024).
- GPS jamming and the impact on maritime navigation / A. Grant, P. Williams, N. Ward, S. Baske // *The Journal of Navigation*. 2009. Т. 62, № 2. pp. 173-187.
- Hofmann-Wellenhof B. GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle // Springer Science & Business Media, 2007. 16 p.
- Huttunen M. The u-space concept // *Air and Space Law*. 2019. Т. 44. № 1. pp. 69-89
- ICAO GANP PORTAL // [Электронный ресурс]. – 2024. URL: <https://www4.icao.int/ganportal/ASBU/Thread> (дата обращения: 10.10.2024).
- Kaplan E. Understanding GPS: principles and applications / E. Kaplan, C. Hegarty. Bedford: Artech house, 2005. 723 p.
- Salamh F. E. UAV forensic analysis and software tools assessment: DJI Phantom 4 and Matrice 210 as case studies / F. E. Salamh, M. M. Mirza, U. Karabiyik // *Electronics*. 2021. Т. 10, № 6. p. 733.
- SESAR Roadmap for the Safe Integration of Drones into all Classes of Airspace; SESAR Joint Undertaking: Brussels, Belgium, 2018. pp. 1-33.
- U-space concept of operations: A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations / C. Barrado, M. Boyero, L. Brucculeri, G. Ferrara, A. Hately, P. Hullah, D. Martin-Marrero, E. Pastor, A. P. Rushton, A. Volkert // *Aerospace*. 2020. № 3. p. 24.

## References

- Arefyev R. O., Skrypnik O. N., Arefyeva N. G. (2024). Experimental assessment of spatial stabilization accuracy of the DJI AIR 2S quadcopter. *Crede Experto: transport, society, education, language*. 1: 128-145. DOI 10.51955/2312-1327\_2024\_1\_128. EDN UQDIOE. (in Russian)
- Barrado C., Boyero M., Brucculeri L., Ferrara G., Hately A., Hullah P., Martin-Marrero D., Pastor E., Rushton A. P., Volkert A. (2020). U-space concept of operations: A key enabler for opening airspace to emerging low-altitude operations. *Aerospace*. 3: 24.
- DJI MAVIC 2 (2024). Available at: URL: <https://www.dji.com/ru/mavic-2/info> (accessed 10 October 2024).
- Ermakov A. K., Portnova T. Yu., Lezhankin B. V., Erokhin V. V. (2021). Algorithms for controlling the trajectories of unmanned aircraft systems when flying as part of a group. *Volnovaya elektronika i infokommunikacionnye sistemy: Materialy XXIV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. V 3-h chastyah, Sankt-Peterburg, 31 maya – 04 2021 goda. Tom Chast' 2. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya*. 62-69. EDN YIEIWM. (in Russian)
- Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Bolelov E. A. (2023). Estimation of UAV trajectory parameters with different configurations of navigation information sources. *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*. 77(6): 35-49. DOI 10.18127/j20700784-202306-04. EDN MVHGGW. (in Russian)

- Grant A., Williams P., Ward N., Baske S. (2009). GPS jamming and the impact on maritime navigation. *The Journal of Navigation*. 62(2): 173-187.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. (2007). GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. *Springer Science & Business Media*. 2007. 16 p.
- Huttunen M. (2019). The u-space concept. *Air and Space Law*. 44(1): 69-89.
- ICAO GANP PORTAL. (2024). Available at: <https://www4.icao.int/ganpportal/ASBU/Thread> (accessed 10 October 2024).
- Kaplan E., Hegarty C. (2005). Understanding GPS: principles and applications. Bedford: Artech house, 2005. 723 p.
- Lubbers B., Mildner S., Oonincx P., Scheele A. (2015). A study on the accuracy of GPS positioning during jamming. *2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN)*. – IEEE. 2015. 1-6.
- Perov A. I., Kharisov V. N. (2010). GLONASS. Principles of construction and operation. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 801 p. (in Russian)
- Salamh F. E., Mirza M. M., Karabiyik U. (2021). UAV forensic analysis and software tools assessment: DJI Phantom 4 and Matrice 210 as case studies. *Electronics*. 10(6): 733.
- SESAR Roadmap for the Safe Integration of Drones into all Classes of Airspace. SESAR Joint Undertaking: Brussels, Belgium. 1-33.
- 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)
- Soloviev Yu. A. (2000). Satellite navigation systems. *Eko-Trendz*. 2000. 270 p. (in Russian)
- Veremeenko K. K., Koshelev B. V., Solovyev Yu. A. (2010). The analysis of development of the integrated inertial & satellite navigation systems. *Novosti navigacii*. 4: 35-49. (in Russian)