

---

# Электродинамика и антенные системы

---

УДК 533.6.013.622

## Разработка измерительного комплекса на основе беспилотных летательных аппаратов для построения диаграмм направленности

Гусенков А.В., Смирнов М.С.

В статье описана разработка измерительного комплекса, основанного на использовании беспилотных летательных аппаратов, с целью построения диаграмм направленности. В работе представлен подробный анализ процесса создания такого комплекса, включая выбор оптимальных аппаратов, разработку программного обеспечения, проведение испытаний и анализ полученных данных. Такой подход к измерениям направленности позволяет получать более точные и детальные результаты при минимальных затратах человеческих ресурсов и времени. Результаты исследования могут быть использованы в различных областях, таких как геология, экология, сельское хозяйство и другие.

*Ключевые слова:* разработка, измерительный комплекс, беспилотный летательный аппарат.

### Введение

В последние годы набирают популярность альтернативные методы измерения диаграмм направленности антенн с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). БПЛА обладают высокой маневренностью, способны выполнять длительные полеты и могут подниматься на значительные высоты, что позволяет проводить измерения в широком диапазоне пространственных углов.

Разработка измерительного комплекса на основе БПЛА для построения диаграмм направленности антенн является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить эффективность и точность измерений, а также снизить их стоимость и трудоемкость.

Данная работа посвящена исследованию и разработке измерительного комплекса на основе БПЛА для построения диаграмм направленности антенн. В ходе работы решаются задачи по выбору и обоснованию конструктивных параметров БПЛА, разработке системы управления и сбора данных, а также программного обеспечения для обработки и визуализации результатов измерений.

### Разработка измерительного комплекса для построения диаграмм направленности антенн

Для построения диаграмм направленности антенн на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) может использоваться следующий измерительный комплекс с конкретными устройствами:

1. Антенны: петлевые антенны типа Моксона, специально настроенные для радиомониторинга и измерений. Внешний вид антенн Моксона и диполя представлены на рис. 1.

2. Приемно-передающее оборудование: включает радиопередатчик и радиоприемник модели LILYGO® TTGO LoRa32. Данные об уровне принимаемого сигнала будут регистрироваться в лог-файлах полетного контроллера Matek H743 Mini путем внесения изменений в программное обеспечение микроконтроллера STM32H743VIT6.

Данный код выполняет следующие действия:

1. Ищет доступный порт UART и устанавливает его параметры (скорость передачи данных - 115200, отсутствие управления потоком).

2. Создает таблицу log\_data для хранения данных и определяет функцию decode, которая декодирует входные данные и записывает

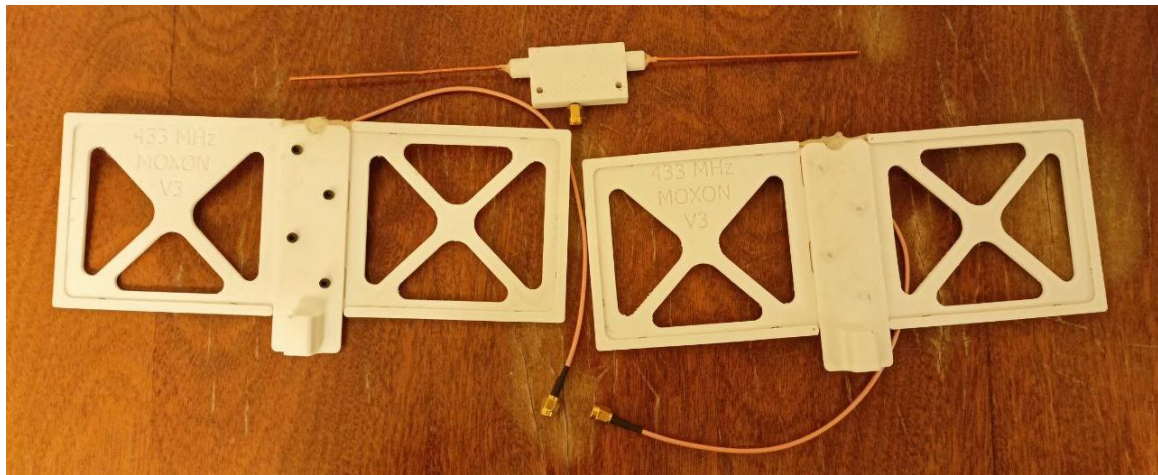


Рис. 1. – Приёмная и передающая антенна Моксона

значение сигнала RSSI (Received Signal Strength Indicator) в log\_data.

3. Использует функцию update, которая читает данные из порта UART, декодирует их с помощью decode, и если получена полная строка данных, сохраняет значение RSSI в журнале данных (dataflash).

```
-- Reads data in from UART and logs
to dataflash

-- find the serial first (0) script-
ing serial port instance
local port = serial:find_serial(0)

if not port or baud == 0 then
    gcs:send_text(0, "No Scripting
Serial Port")
    return
end

-- begin the serial port
port:begin(115200)
port:set_flow_control(0)

-- table for strings used in decoding
local log_data = {}
local valid = true
local term

-- maximum length of terms each term
we expect
local max_length = 20
```

```
-- decode a basic string
local function decode(byte)
    local char = string.char(byte)
    if char == '\r' or char == '\n'
then
        -- decode the term, note this
        assumes it is a number
        log_data["RSSI"] =
tonumber(term)
        term = nil

        if not log_data["RSSI"] then
            -- could not convert to a
            number, discard this message
            return false
        end

        -- reset for the next message
        local is_valid = valid
        valid = true

        return is_valid
    end

    if term then
        if string.len(term) <
max_length then
            term = term .. char
        else
            term = nil
        end
    end
end
```

```

        term = char
    end
    return false
end

-- the main update function that is
used to read in data from serial port
function update()

    if not port then
        gcs:send_text(0, "no Script-
ing Serial Port")
        return update, 100
    end

    local n_bytes = port:available()
    while n_bytes > 0 do
        local byte = port:read()
        if decode(byte) then
            -- we have got a full
line
            -- save to data flash

            -- care must be taken
when selecting a name, must be less
than four characters and not clash
with an existing log type
            -- format characters
specify the type of variable to be
logged, see AP_Logger/README.md
            -- not all format types
are supported by scripting only: i,
L, e, f, n, M, B, I, E, N, and Z
            -- Note that Lua automat-
ically adds a timestamp in micro sec-
onds
            log-
ger:write('SCR','RSSI','f',
log_data["RSSI"])
            -- gcs:send_text(0, "RSSI
Scan: " ..
tostring(log_data["RSSI"]))

            -- reset for the next
message
            log_data = {}
        end
        n_bytes = n_bytes - 1
    end
end

```

```

        return update, 100
    end

    return update, 100
end

```

Это изменение позволит добавить пункт «RSSI» (Received Signal Strength Indicator) в лог-файл полетного контроллера. Примеры лог-файла представлены на рис. 2 и 3.

Внешний вид LoRa32 представлен на рис. 4.

3. Беспилотный летательный аппарат, представлен в разделе «Разработка беспилотного летательного аппарата для реализации измерительного комплекса».

#### Разработка беспилотного летательного аппарата для реализации измерительного комплекса

В данном разделе мы рассмотрим разработку БПЛА, специально предназначенного для реализации измерительного комплекса. Такой БПЛА должен обладать определенными характеристиками:

1. Скорость полета:  $\leq 6$  м/с (21,6 км/ч);
2. Продолжительность полета с аккумулятором состава Li-Po (с полезной нагрузкой 1,5 кг), мин: 20;
3. Частота радиоуправления, МГц: 868;
7. Количество частотных каналов радиосвязи:  $\leq 10$ ;
8. Предельный радиус полета в режиме телеметрического управления, км:  $\leq 2$ ;
9. Максимальная дальность полета в режиме автономного управления с Li-Po аккумулятором, км:  $\leq 10$ ;
11. Надежный радиус дальности управления полета БПЛА от оператора управления, км:  $\leq 2$ ;
12. Максимальная высота полета, м: 150;
13. Максимальная грузоподъемность (кратковременная), кг:  $\leq 2$ ;
14. Система спутникового позиционирования: GPS;

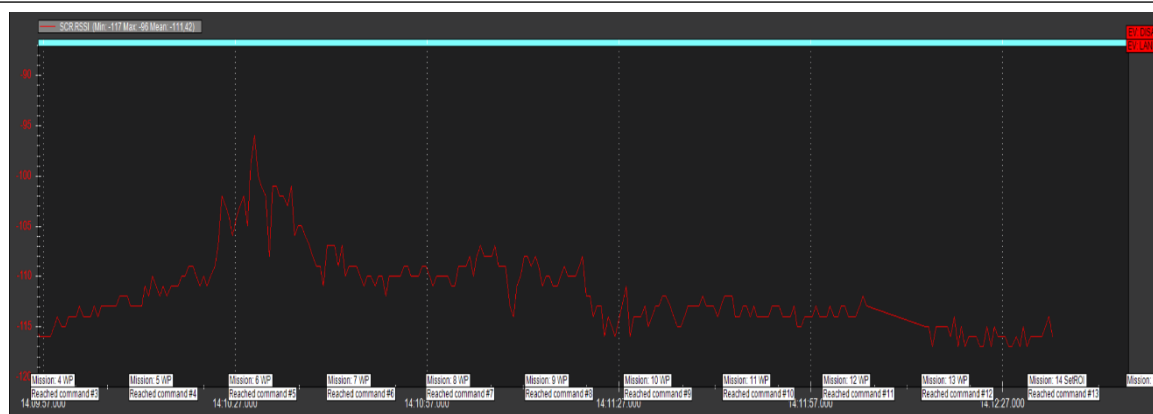


Рис. 2. – Пункт «RSSI»

|       |                    |     |   |            |            |
|-------|--------------------|-----|---|------------|------------|
| 21869 | 2024-05-19 14:3... | GPS | 1 | 55.5972778 | 41.9492325 |
|-------|--------------------|-----|---|------------|------------|

Рис. 3. – Координаты БПЛА

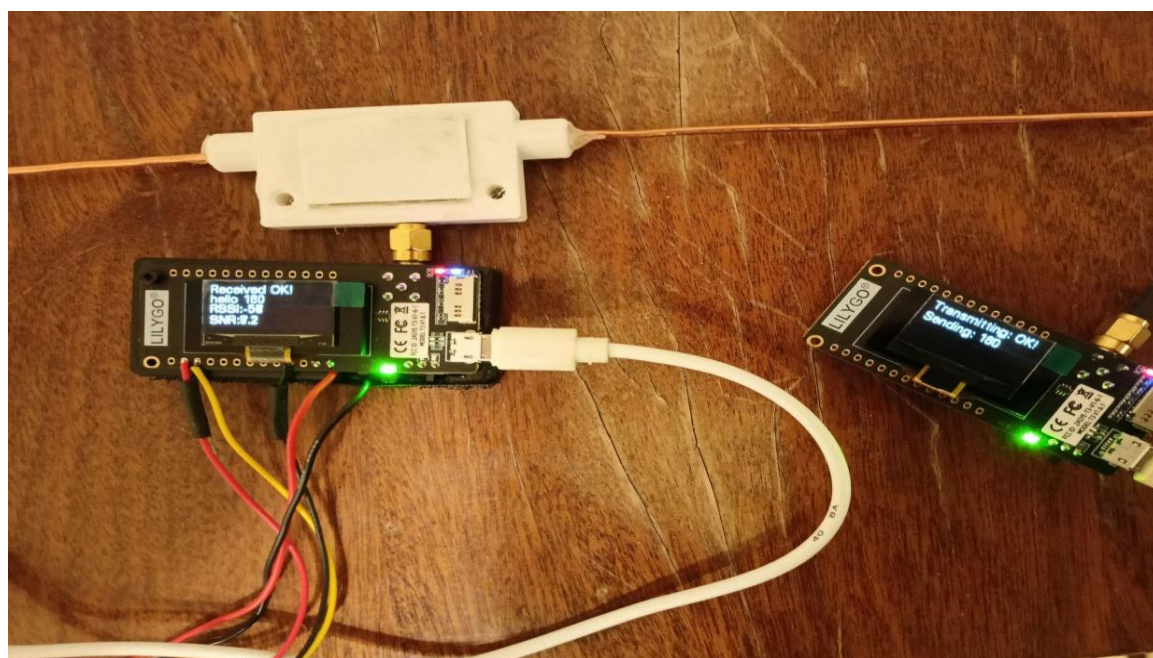


Рис. 4. – Приемо-передающее оборудование LILYGO@TTGO LoRa32

С целью достижения желаемых характеристик и функциональных возможностей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) были выбраны два типа БПЛА, каждый из которых обладает уникальными преимуществами: самолетного типа и мультироторный БПЛА. Самолеты обеспечивают эффективное и дальнее перемещение, а мультироторные БПЛА характеризуются высокой маневренностью и возможностью вертикального взлета и посадки.

Внешний вид и структурная схема БПЛА представлены на рис. 5,6.

Описание схемы: Четыре двигателя подключены к регулятору оборотов ESC RUSH BLADE, который используется для управления скоростью работы двигателей. Полетный контроллер Matek H743-Mini, с использованием ШИМ-преобразователя, контролирует работу двигателей. Схема подключения двигателей представлена на рис. 7. Телеметрия ESC подключена к UART 8.





Рис. 5. – Внешний вид мультироторного БПЛА

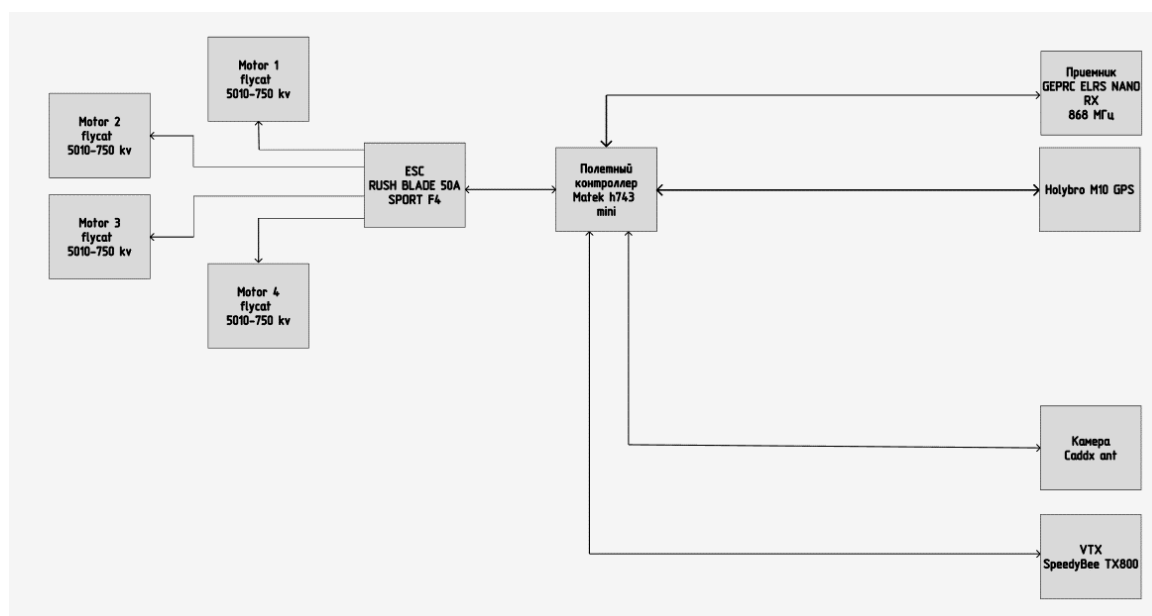


Рис. 6. – Структурная схема мультироторного БПЛА

| # | Position | Reverse                  | Function | Min  | Trim | Max  |
|---|----------|--------------------------|----------|------|------|------|
| 1 | 1000     | <input type="checkbox"/> | Motor3   | 1000 | 1000 | 2000 |
| 2 | 1000     | <input type="checkbox"/> | Motor2   | 1000 | 1000 | 2000 |
| 3 | 1000     | <input type="checkbox"/> | Motor1   | 1000 | 1000 | 2000 |
| 4 | 1000     | <input type="checkbox"/> | Motor4   | 1000 | 1000 | 2000 |

Рис. 7. – Motor output

GPS модуль Holybro M10 подключается к UART 3, компас, входящий в структуру GPS модуля Holybro M10, подключается к I<sup>2</sup>C1. Приемник ELRS 868 МГц подключается к

UART 7, видеопередатчик Speedybee TX800 подключается к выходам видео (VTX). Для управления параметрами видео передатчика

|                        |        |               |
|------------------------|--------|---------------|
| SERIAL PORT 4<br>UART3 | 38400  | GPS           |
| SERIAL PORT 5<br>UART8 | 115200 | ESC Telemetry |
| SERIAL PORT 6<br>UART4 | 4800   | IRC Tramp     |
| SERIAL PORT 7<br>UART6 | 57600  | RCIN          |

Рис. 8. – Serial ports



Рис. 9. – Внешний вид БПЛА самолётного типа

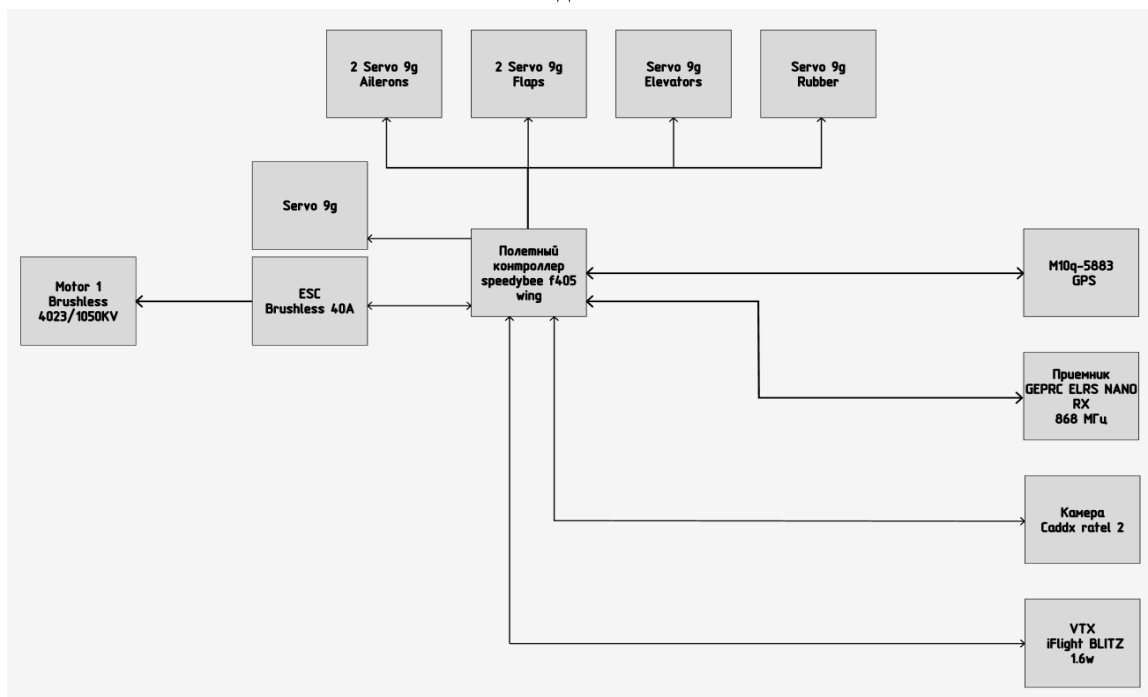


Рис. 10. – Структурная схема БПЛА самолётного типа

используется UART 4 в полудуплексном режиме. Камера Caddx Ant подключается к

контакту C1. Схема подключения периферии показана на рис. 8.

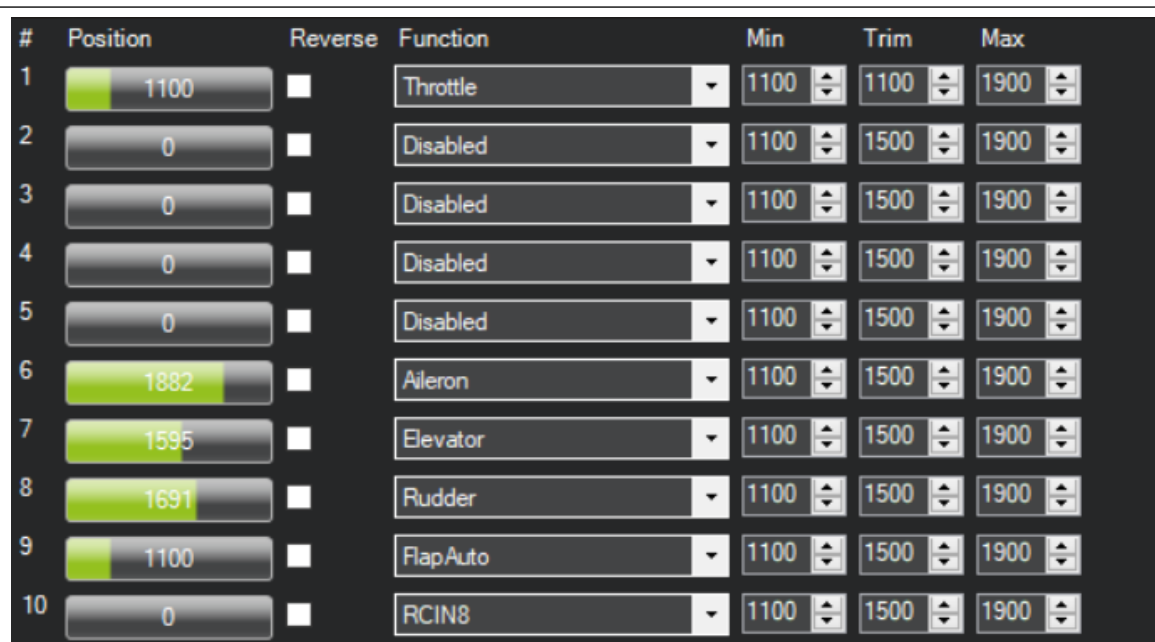


Рис. 11. – Motor output

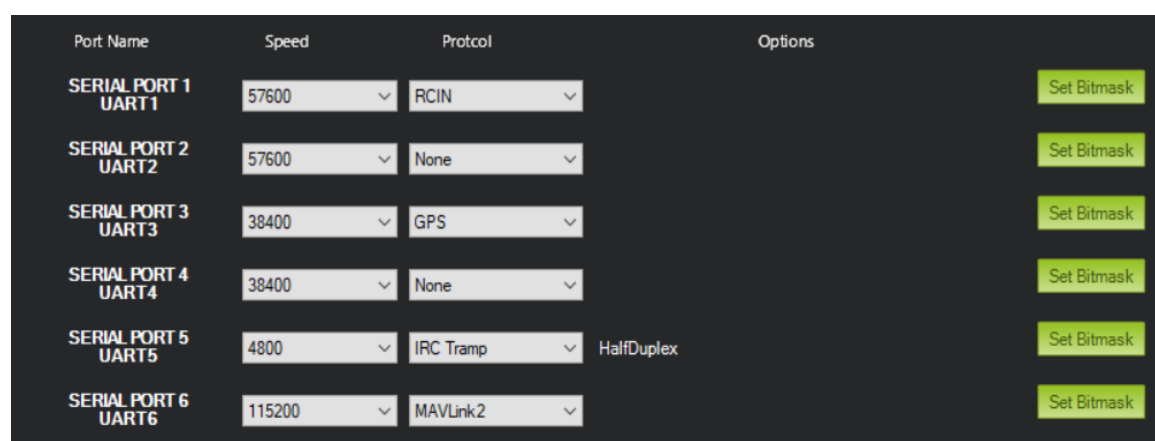


Рис. 12. – Serial ports

Внешний вид и структурная схема БПЛА самолётного типа представлены на рис. 9,10.

Описание схемы: Двигатель подключен к регулятору оборотов ESC 30A для изменения скорости вращения двигателя. Полетный контроллер Matek H-743-Mini через ШИМ-преобразователь питания управляет работой двигателя. Два сервопривода, управляющие элеронами, подключены к 6-ому PWM-выходу. Также два сервопривода, управляющие закрылками, подключены к 9-му PWM-выходу. К 7-му PWM-выходу подключен сервопривод, управляющий рулем высоты, а к 8-му PWM-выходу подключен руль направления. На 10-м PWM-выходе установлен сервопривод, управляющий поворотом камеры.

Подключение двигателей и сервоприводов представлено на рис. 11. Подключение периферии представлено на рис. 12.

GPS модуль Matek M10Q устанавливается на UART 3. Компас, входящий в состав Matek M10Q, подключается к шине I2C1. Приемник ELRS на частоте 868 МГц устанавливается на UART 1. Видео передатчик iFlight Blitz подключается к выходам видео (VTX). Для управления параметрами видео передатчика используется UART 5 в режиме полудуплекса. Камера Caddx Ratel 2 подключается к контакту C1. Wi-Fi модуль устанавливается на UART 6.



|                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Федеральное агентство воздушного транспорта<br/>(РОСАВИАЦИЯ)<br/>Федеральное государственное<br/>унитарное предприятие<br/>«ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ<br/>ПО ОРГАНИЗАЦИИ<br/>ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ<br/>В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»<br/>(ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»)</p> |  | <p>Federal Air Transport Agency<br/>(ROSAVIATSIYA)<br/>Federal State Unitary Enterprise<br/>"STATE AIR TRAFFIC MANAGEMENT<br/>CORPORATION IN THE RUSSIAN<br/>FEDERATION"<br/>(FSUE "State ATM Corporation")</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

---

**№ 7771654800 (SHR)**

Деятельность по использованию воздушного пространства разрешена ГУСЕНКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ (+79040365672) в границах местного режима MR02967, установленного Московским региональным центром ЕС ОрВД в соответствии с Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 27 июня 2011 г. №171 «Об утверждении инструкции по разработке, установлению, введению и снятию временного и местного режимов, а также кратковременных ограничений».

Расписание деятельности по ИВП:  
18.05.2024 с 11:00 до 17:00 (UTC)  
19.05.2024 с 11:00 до 17:00 (UTC)

Использование воздушного пространства БВС с учетным (регистрационным) номером 05F4861 0585090 0586A21 0R59282 073T813 H068710 0H68704 074G892 0A74694 07E9809 06G2229 0S77081 05Z5992 07X4141 00K3950 062G228 V058859 K081488 003K947 0148Y45 0694Y09 **РАЗРЕШЕНО** в 09:28 (UTC) 14.05.2024 года на период с 11:00 до 17:00 (UTC) 19.05.2024 года, Московским региональным центром ЕС ОрВД на основании п.52 Постановления Правительства Российской Федерации от 11 марта 2010 г. № 138 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации»

Телефон начальника смены Московского регионального центра ЕС ОрВД:  
+7 (495) 130-15-91

Система подачи планов полетов по сети Интернет (СППИ) является официальным ресурсом ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» и собственностью Федерального агентства воздушного транспорта (Росавиация) и предназначена для подачи планов полетов по сети Интернет и получения разрешения на использование воздушного пространства в электронной форме



---

|                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>125167, Россия, Москва, Ленинградский пр-т, д. 37, корп. 7<br/>Тел.: +7 (495) 601-08-99 Факс: +7 (495) 601-07-46<br/>ИНН 7734135124, КПП 771401001</p> | <p>37, bld.7, Leningradsky prospekt, Moscow, Russia, 125167<br/>Tel.: +7 (495) 601-08-04 Fax: +7 (495) 601-07-46<br/>E-mail: office@gkovd.ru, www.gkovd.ru</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Рис. 13.** – Разрешение на использование воздушного пространства



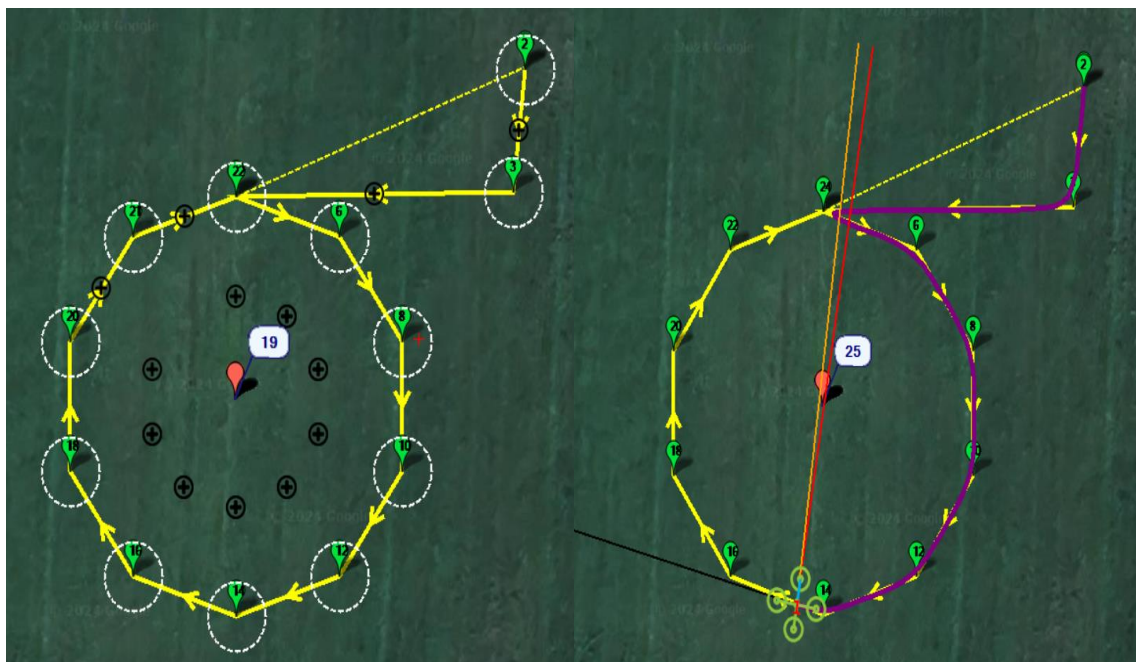


Рис. 14. – Полётное задание №1

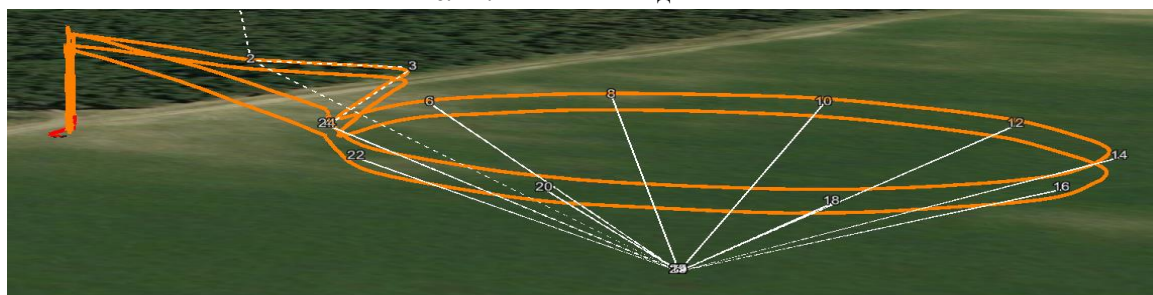


Рис. 15. – Экспериментальный полёт по полётному заданию

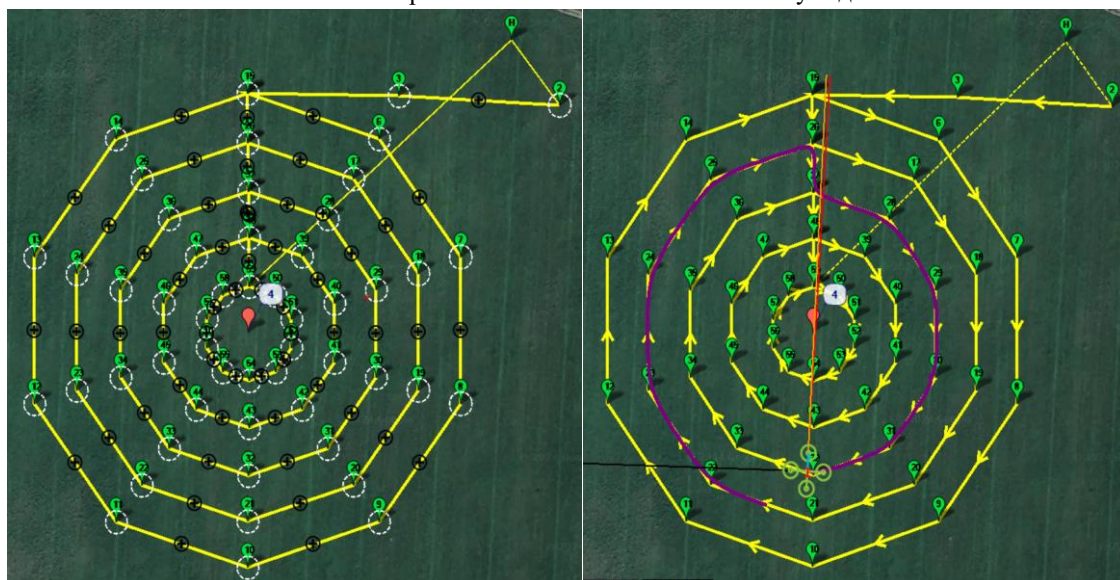


Рис. 16. – Полётное задание №2

#### Согласование полётов и выполнение полётных заданий

В данном разделе рассматривается важный аспект авиационной деятельности -

согласование полётов частного лица с "Единой системой организации воздушного движения Российской Федерации" (ЕСОВД РФ) и выполнение полётных заданий. Этот

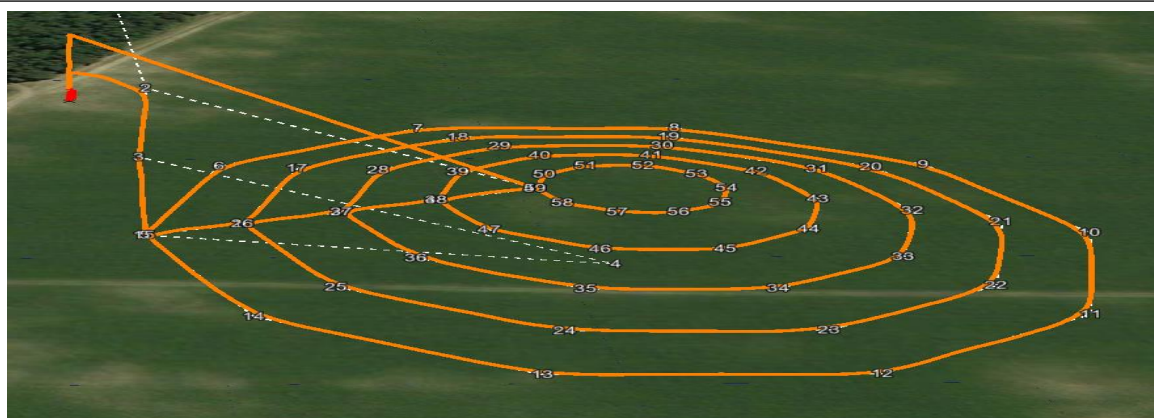


Рис. 17. – Экспериментальный полёт по полётному заданию

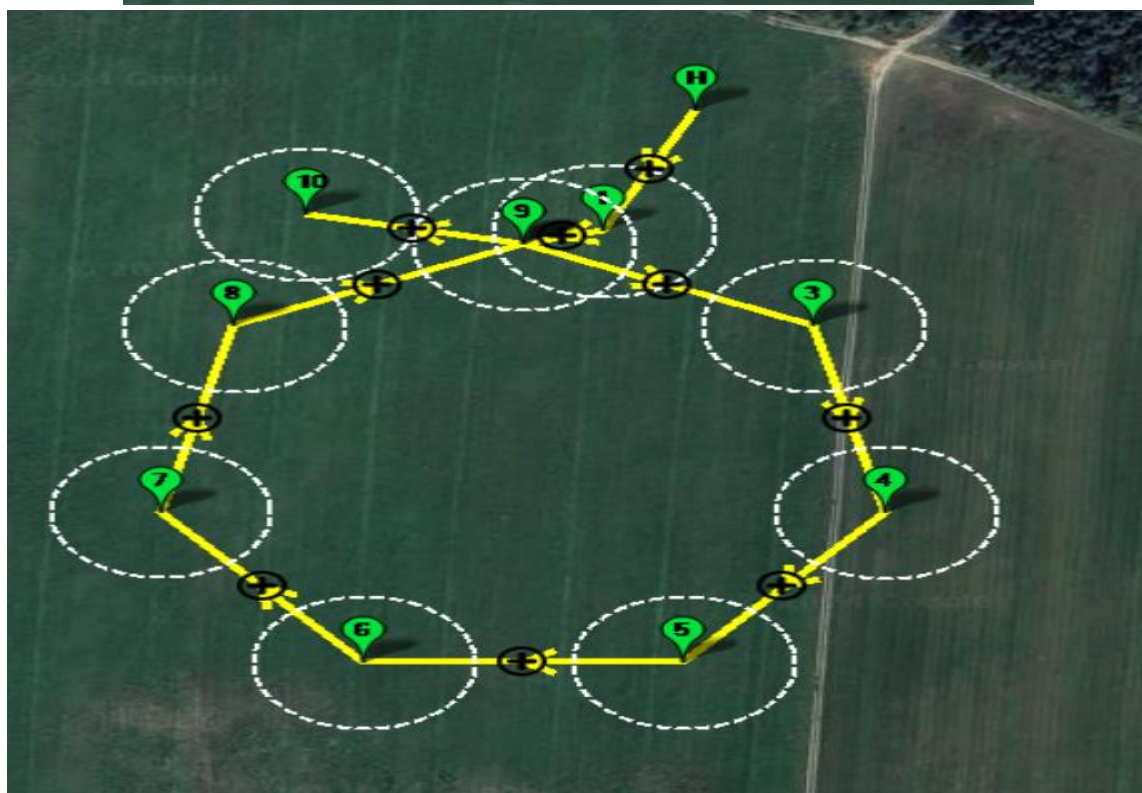


Рис. 18. – Полётное задание №3 и №4

процесс является неотъемлемой частью обеспечения безопасности и эффективности авиационных операций, требует строгого соблюдения норм и правил авиационной

деятельности, а также согласования с соответствующими авиационными службами.

В разрешение на использование воздушного пространства указываются:





Рис. 19. – Экспериментальный полёт по полётному заданию

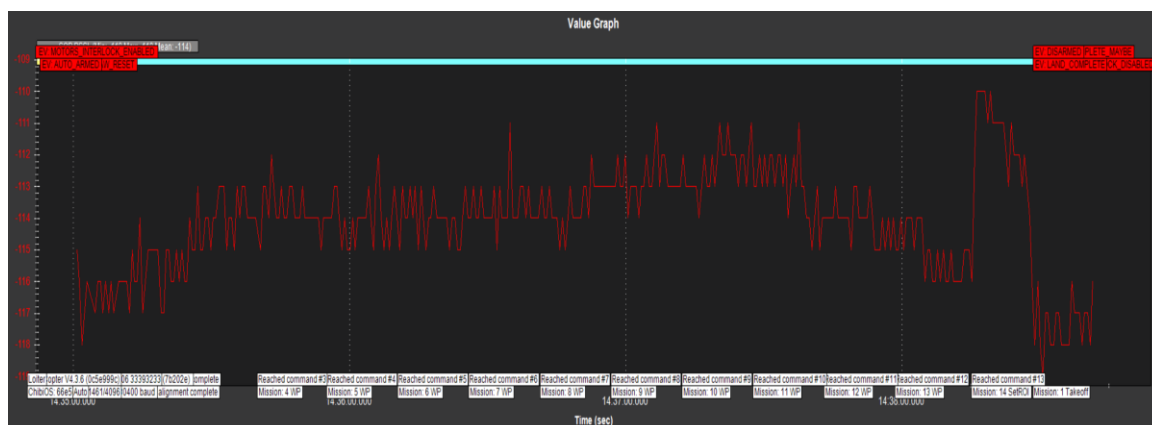


Рис. 20. – Значения RSSI

1. Расписание деятельности по использованию воздушного пространства;
2. Учетные регистрационные номера БПЛА;
3. ФИО главного пилота

Сообщение о представленном плане полета воздушного судна передается не более чем за 5 суток и не менее чем за 1 час до расчетного времени отправления.



Рис. 21. – Антенные установки (антенна Моксона и диполь)

Диаграмма направленности антенны Моксона

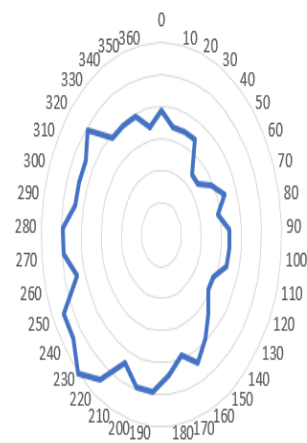


Диаграмма направленности диполя

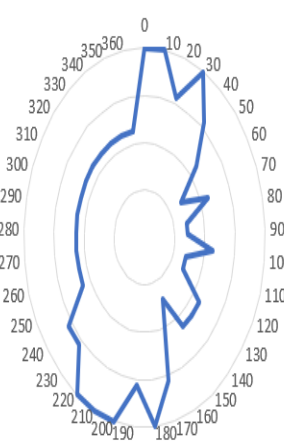


Рис. 22. – Диаграммы направленности измеряемых антенн

На рис. 13 представлено разрешение на использование воздушного пространства на 19.05.2024. В данный день проводились 4 испытательных полёта для проверки работоспособности БПЛА.

Для проверки устойчивости БПЛА при выполнении миссии были выбраны четыре полетных задания:

1. Полёт по кругу радиусом 30 метров, данный радиус был выбран для того, чтобы вести визуальный контроль на протяжении всей миссии. Полётное задание представлено на рис. 14.

В начале миссии БПЛА устанавливает домашнюю точку, с которой и начинает полётное задание, далее с помощью команды

«TAKEOFF» производится взлёт на высоту 15 метров, после чего происходит полёт по путевым точкам «WAYPOINT». Начиная с 4 путевой точки, в промежутке между путевыми точками была добавлена команда «DO\_SET\_ROI», которая добавляет точку наблюдения служащая для того, чтобы перед БПЛА был направлен на точку наблюдения. В конце полетного задания включается функция «RETURN\_TO\_LAUNCH» возвращающая БПЛА на домашнюю точку.

После чего было проведено экспериментальный полёт по полётному заданию представленный на рис. 15, в результате которого квадрокоптер успешно прошёл заданную миссию и вернулся на домашнюю точку.



2. Полётное задание «Полусфера» состоит из 5 кругов радиусом 100, 80, 60, 40, 20 метров переход из круга большего радиуса в круг меньше радиуса происходит в начале координат круга. При смене круга высота увеличивалась на 5 метров. Полётное задание представлено на рис. 16.

В данной миссии команда «DO\_SET\_ROI» устанавливается между 3 путевой точкой и 4 путевой точкой, далее команда «DO\_SET\_ROI» устанавливается в конце миссии с нулевыми координатами и высотой для создания диапазона, в котором будет работать данная команда.

После чего было проведено экспериментальный полёт по полётному заданию задание представленный на рис. 17, в результате которого квадрокоптер успешно прошёл заданную миссию и вернулся на домашнюю точку.

3. После испытания БПЛА мультироторного типа был запущен БПЛА самолётного типа. Самолёт вначале запускался вручную для доставки его к начальной точке миссии. После достижения этой точки, он выполнил полётное задание, включающее один круг

радиусом 50 метров, после чего совершил автоматическую посадку на поле.

4. После проведения предварительных полётов, было установлено оборудование, представленное в разделе «Разработка измерительного комплекса для построения диаграмм направленности антенн.» и произведён полёт со скоростью 7 километров в час, по маршруту, представленному на рис. 18. На борт БПЛА установлен диполь, настроенный на частоту 433 МГц, в наземной станции установлена антенна Моксона настроенная на 433 МГц.

В ходе испытания, демонстрируемого на рис. 19, квадрокоптер эффективно выполнил установленную задачу, после чего в системе управления полётом был создан лог-файл, содержащий данные о значении «RSSI» измерительного оборудования. Представленные значения показаны на рис. 20.

Далее были проведены измерения антенны Моксона и диполя. В результате измерений были получены диаграммы направленности данных антенн.

**Поступила 25 мая 2024 г.**

The work is devoted to the development of a measuring complex based on the use of unmanned aerial vehicles in order to construct directional diagrams. The paper presents a detailed analysis of the process of creating such a complex, including the selection of optimal devices, software development, testing and analysis of the data obtained. This approach to directional measurements allows you to obtain more accurate and detailed results with minimal expenditure of human resources and time. The results of the study can be used in various fields such as geology, ecology, agriculture and others.

**Keywords:** development, measuring complex, unmanned aerial vehicle.

*Гусенков Андрей Викторович* – студент Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*E-mail:* andrei.gs@list.ru.

*Смирнов Михаил Станиславович* – старший преподаватель кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

*Адрес:* 602264, Муром, ул. Орловская, д. 23.