

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## ROJOVÉ LÉTÁNÍ DRONŮ

DRONE SWARM CONTROL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Josef Kolísek**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Jiří Janoušek**

**BRNO 2021**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Josef Kolísek

**ID:** 211230

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Rojové létání dronů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou rojového létání a autonomního řízení bezpilotních letounů. Navrhněte řešení pro koordinaci více bezpilotních letounů v prostoru. Realizujte software umožňující předání letových instrukcí řídicím jednotkám pro synchronizovaný let více dronům najednou, při kterém bude proveden předem stanovený letový plán. Proveďte experiment řízení dvou bezpilotních letounů najednou pomocí jednoduché aplikace v jazyce Python. Vyhodnoťte možnosti použití realizovaného řešení a úspěšnost provedeného experimentu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 10.8.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Janoušek

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce pojednává o problematice rojového létání dronů a jeho využití v praxi. Jedná se o propojení více řídicích jednotek bezpilotních letounů a jejich následné koordinaci ve vzduchu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V praktické části jsou popsány možnosti způsobů rojového létání a koordinace více dronů. V další části jsou popsány možnosti řízení více letových jednotek z jednoho centrálního bodu a tvorba letových instrukcí. Následně možné způsoby jejich komunikace a přenos telemetrických dat pro řízení pomocí protokolu MAVLink (Micro Air Vehicle Link). Praktická část práce se zabývá realizací softwaru pro synchronizovaný let dvou bezpilotních letounů a jejich propojení s řídicí stanicí pro přenos instrukcí pro let.

## **Klíčová slova**

Dron, rojové létání, protokol MAVLink, Wi-Fi, GPS

## **Abstract**

This thesis focuses on the drone swarm control and the using in practice. It is about the interconnection of several control units of drones and subsequent coordination in the air. The work is divided into theoretical part and practical part. The practical part describes the possibilities of drone swarm flying and coordination of multiple drones. Possible ways of communication and transmission of telemetry data for control using the MAVLink protocol. The next part describes the possibilities of controlling multiple units from one central point and creating flight instructions. The practical part deals with the realization of the software for synchronized flight of two unmanned aircraft and their connection with the ground control station for the transmission of flight instructions. The last part of the work deals with evaluation of the control, compliance of the established flight plan and the proposal of other possibilities for improvement with the solution of deficiencies.

## **Keywords**

Drone, swarm, MAVLink protocol, Wi-Fi, GPS

## **Bibliografická citace**

KOLÍSEK, Josef. *Rojové létání dromů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/136707>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jiří Janoušek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Josef Kolísek  
**VUT ID studenta:** 211230  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečné práce:** Rojové létání dronů

*Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne: 9. srpna 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Janouškovi za pedagogickou a odbornou přípravu, za cenné rady a za celkové vedení při zpracovávání mé práce.

V Brně dne: 9. srpna 2021

-----  
podpis autora

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK .....	9
ÚVOD.....	10
<b>1. ROJOVÉ LÉTÁNÍ.....</b>	<b>11</b>
1.1 ZPŮSOBY ROZMÍSTĚNÍ A KOMUNIKACE.....	11
<b>2. AUTONOMNÍ ŘÍZENÍ BEZPILOTNÍHO LETOUNU.....</b>	<b>15</b>
2.1 ARDUPILOT .....	15
2.2 MAVPROXY.....	15
2.3 MISSION PLANNER .....	15
2.4 DRONEKIT-SITL .....	16
2.5 KOMUNIKACE BEZPILOTNÍCH LETOUNŮ.....	17
2.5.1 MAVLink .....	17
2.6 TELEMETRICKÁ DATA.....	18
2.6.1 Wi-Fi telemetrická data.....	19
2.6.2 Radiová telemetrická data.....	20
2.6.3 Telemetrická data přenášená přes mobilní síť .....	21
2.6.4 Bluetooth telemetrická data .....	22
<b>3. REALIZACE ROJOVÉHO LÉTÁNÍ .....</b>	<b>24</b>
3.1 KNIHOVNY POUŽITÉ V PROGRAMU .....	24
3.1.1 Knihovna DroneKit .....	25
3.1.2 Knihovna Pymavlink .....	25
3.1.3 Knihovna GetKey .....	25
3.1.4 Modul time .....	25
3.2 PROPOJENÍ ŘÍDÍCÍCH JEDNOTEK A POZEMNÍ STANICE .....	25
3.3 INICIALIZACE ZAŘÍZENÍ .....	26
3.4 NAHRÁNÍ LETOVÉHO PLÁNU .....	28
3.5 NAPLÁNOVÁNÍ DRÁHY LETU .....	28
3.6 OVLÁDÁNÍ NAPLÁNOVANÉ MISE.....	29
3.7 ANTIKOLIZNÍ SYSTÉM.....	30
3.8 HLEDÁNÍ IDEÁLNÍ LETOVÉ ODCHYLKY .....	33
3.9 TESTOVÁNÍ SOFTWARE V REÁLNÉM ŘÍZENÍ.....	35
3.9.1 Specifikace použitých dronů.....	36
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>37</b>
LITERATURA .....	38
SEZNAM ZKRATEK.....	40



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Přímé řízení dronů .....	11
1.2	Řízení dronů skrze satelit .....	12
1.3	Řízení dronů skrze celulární síť.....	13
1.4	Řízení dronů vytvořením Ad-Hoc sítě.....	14
2.1	Způsob ovládání roje dronů v aplikaci Mission Planner [5] .....	16
2.2	Délka protokolu MAVLink [10].....	18
2.3	Použitý ESP-07 8266 Wi-Fi modul [13] .....	19
2.4	Vysílací modul Robsense Swarmlink [16] .....	20
2.5	Vysílací modul s vysílací frekvencí 868 MHz [17] .....	20
2.6	Wi-Fi modul XBEE PRO [20].....	21
2.7	Bluetooth modul pro připojení [25] .....	23
3.1	Souřadnicový systém WGS84 [27] .....	24
3.2	Schéma zapojení a komunikace dronů s pozemní řídicí stanicí.....	26
3.3	Ukázka připojení dronů k pozemní řídicí stanicí.....	27
3.4	Vytvoření simulace dronů .....	27
3.5	Definování připojení k UDP portu .....	28
3.6	Ukázka kódu čtení z textového souboru .....	28
3.7	Přepis souřadnic do formátu integer .....	29
3.8	Ukázka naplánované dráhy letu v souřadnicích .....	29
3.9	Ukázka kódu pro ovládání skrze klávesy pozemní řídicí stanice .....	30
3.10	Ukázka kódu pro porovnávání souřadnic zeměpisné šířky a délky .....	31
3.11	Výpis letové hladiny při vzletnutí dronů .....	31
3.12	Simulace antikolizního systému .....	32
3.13	Výpis údajů při zastavení dronů před střetem .....	32
3.14	Využití softwaru v reálném prostředí .....	36

## SEZNAM TABULEK

2.1	Obsah protokolu MAVLink.....	18
3.1	Vyhodnocení experimentu pro zjištění ideální odchylky letu dronů .....	34

# ÚVOD

Problematika rojového létání dronů se v dnešní době dostává do popředí více a více. S novými inovacemi v elektrotechnickém odvětví a se zvyšováním nároků na technologická zařízení je kladen důraz na automatizaci strojů. Nejsou opomíjeny ani letové jednotky a jejich využití v budoucnosti. Škála využití roje dronů je téměř neomezená, od využití v civilním průmyslu, kdy se drony použijí jakožto světelná show, ve které desítky dronů tancují oblohou nebo využití v průmyslu vojenském, ve kterém se roje dronů starají o zabezpečení oblasti nebo při pátracích akcích. Autonomní řízení dronu se stává zajímavějším jak pro širokou společnost, tak i pro soukromé organizace.

Cílem práce je vytvořit síť dronů a následně jí pomocí vytvořeného programu naplánovat dráhu letu po určitých GPS souřadnicích (Global Positioning System). Řídící jednotky dronů, využívající firmware ArduPilot, zabezpečující kvalitní let dronů a slouží ke zpracování signálů z pozemní řídicí stanice do dronů a zařizují propojení jednotlivých dronů a GPS modul slouží k určování souřadnic dronů ve vzduchu a předává polohu řídicí jednotce, která se snaží danou polohu držet. S pomocí Wi-Fi sítě, rádiové komunikace či využití mobilních dat lze vytvořit a propojit skupinu dronů pro oboustrannou komunikaci. Hierarchii postavení jednotlivých dronů lze rozdělit na dvě kategorie. Buď nastavit jednu letovou jednotku jako hlavní a zbytek jí bude podřízen a tzv. kopírovat její signály, anebo všechny drony naprogramovat na shodné postavení. V této práci bude realizována komunikace mezi drony s pomocí Wi-Fi modulů připojených k pozemní řídicí stanici, ke které bude využit osobní počítač, tedy všechny drony budou dostávat samostatné letové instrukce ve formě GPS souřadnic o poloze záchytného bodu, ke kterému přiletí a obdrží informace o poloze dalšího záchytného bodu.

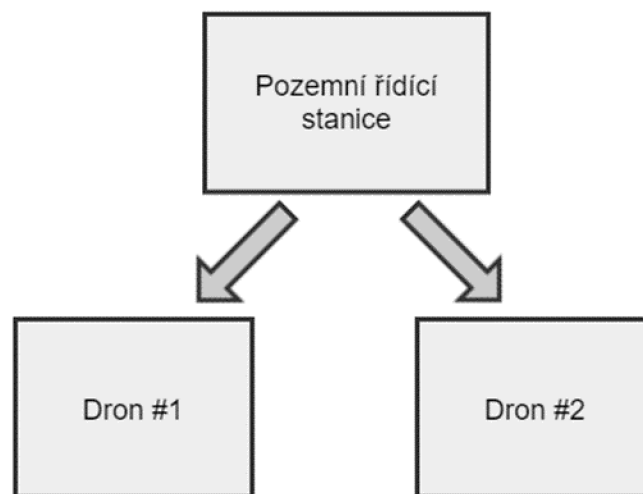
# 1. ROJOVÉ LÉTÁNÍ

Bezpilotní drony mají velký potenciál v civilním i vojenském průmyslu, kde je potřeba mapování, pátrání a zajištění objektů. Jsou užitečné především v oblastech, kde by bez nich byly ohroženy lidské životy. Roje dronů mohou kooperativně plnit mise ekonomičtěji a efektivněji ve srovnání se systémem jednotlivých dronů. Mezi hlavní výhody roje dronů patří úspora času, snížení pracovní síly a snížení provozních nákladů v důsledku technologického pokroku v elektronických systémech [1].

Malé bezpilotní drony mají ve srovnání s velkými letouny omezené možnosti. V typickém případě je malá letová jednotka vybavena řadou mikroelektronických systémů, senzorů, baterií s nízkou kapacitou, mají nižší rádiový dosah a též nižší hmotnostní kapacitu a objem užitečného zatížení. Tím pádem jsou schopnosti malé letové jednotky omezeny v prostoru i čase. S těmito omezeními je problém výkonu složitých misí, hledání a záchran. Pro rozšíření oblasti pokrytí by bylo řešením nasazení více letových jednotek, které by obsahovaly komunikační modul a společně by spolupracovaly. Technologie to není dokonalá, a i nadále je potřeba se zabírat otázkou propojení dronů, vybudování sítě a efektivní využití roje, který nabídne spolehlivé a stabilní připojení [1][2].

## 1.1 Způsoby rozmístění a komunikace

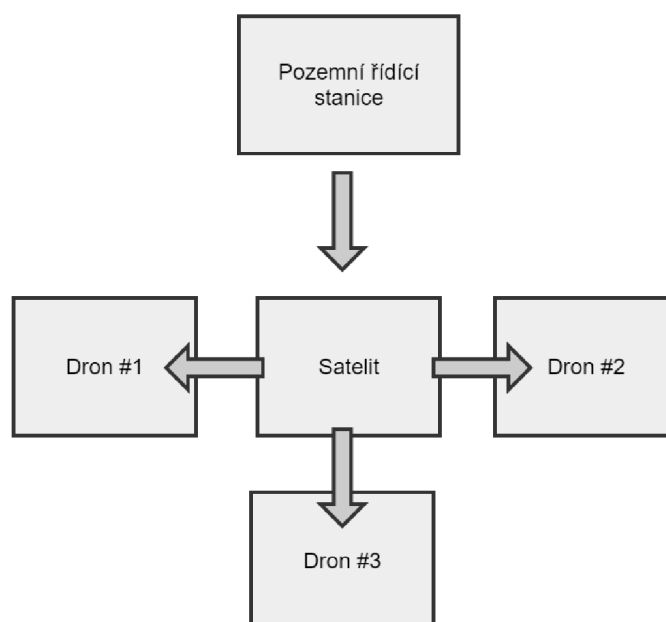
Jedná se o způsob, jakým si jsou drony nadřazené. Jeden ze způsobů je, že si budou všechny drony v hierarchii letových vlastností a vykonávání příkazů sobě rovny, žádný z nich nebude nikomu nadřazen a budou pracovat jako jeden celek, nebo bude jeden dron nadřazený a ostatní jej budou následovat a přijímat příkazy skrze něj. Drony jsou ovládány s pomocí pozemní řídicí stanice GCS (Ground Control Station) a přijímají požadavky na provedení manévru. S pozemní řídicí stanicí lze realizovat tyto čtyři typy komunikace a ovládání roje dronů. Každé z jednotlivých zapojení disponuje svými výhodami, ale i nevýhodami [2].



Obrázek 1.1 Přímé řízení dronů

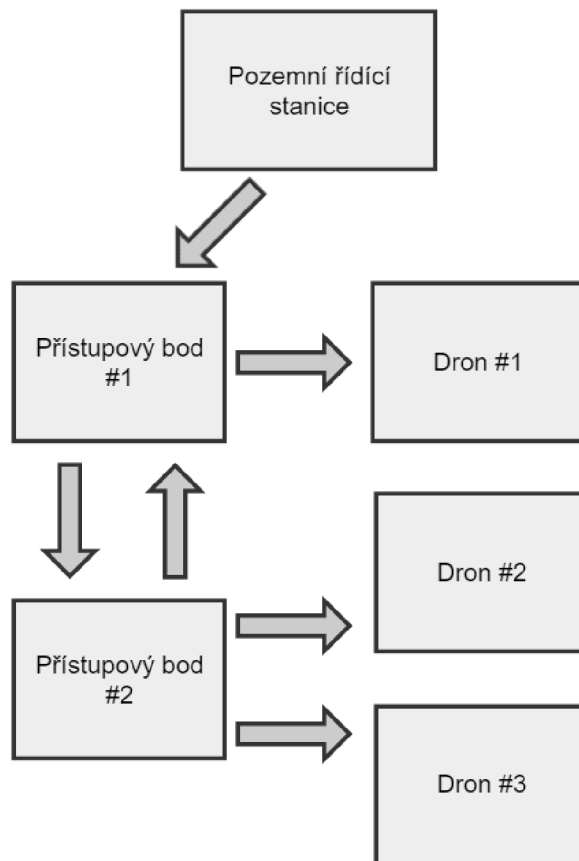
Jedním ze způsobů je zapojení pozemní stanice přijímající telemetrické informace od všech dronů a posílající nazpět každému zvlášť příkazy viz Obrázek 1.1. Drony jsou ovládány v reálném čase a reagují na povely od pozemní stanice hned, nebo mají předem naprogramované pohyby a plán letu a pozemní stanice se dále používá jen k pozorování dráhy letu. Tento systém ovládání považujeme za poloautonomní, jelikož drony stále vyžadují pozornost operátora. Tento styl ovládání je mnohem výhodnější než autonomní ovládání roje dronů, protože pozemní stanice má vyšší výkonnost než jakýkoliv počítač připevněný na jednotlivých dronech [2].

V případě selhání jednoho z příkazů či některého dronu je zde velké nebezpečí neschopnosti letu celého roje, protože drony nekomunikují mezi sebou a může dojít ke srážce. Navíc drony musí být stále v dosahu radiového signálu pozemní stanice, ale radiový signál může být citlivý na rušení [2].



Obrázek 1.2 Řízení dronů skrze satelit

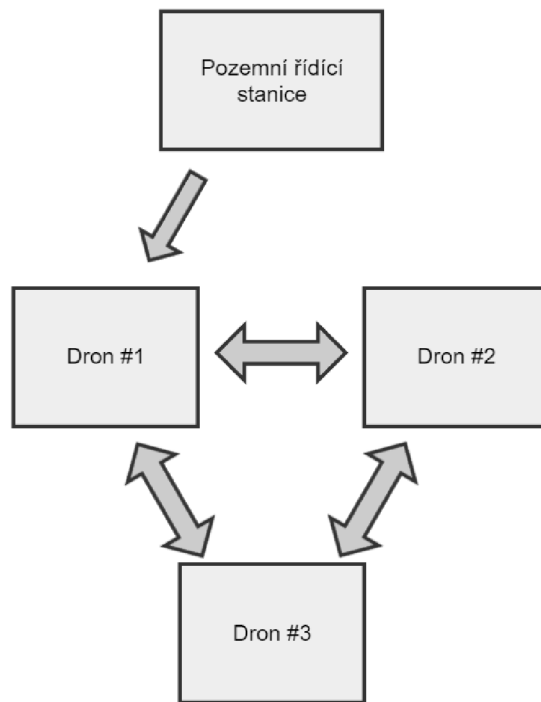
Další možností je síť řízena pozemní stanicí přes satelit viz Obrázek 1.2. Je vhodná k ovládání dronů, které se nachází ve velké vzdálenosti od sebe, tudíž zde není možné mít pevnou infrastrukturu. Družice poskytují komunikaci mezi pozemní stanicí a každým dronem jednotlivě. Problémem může být přímá viditelnost pozemní stanice, satelitu a dronu. V některých případech jsou na vině budovy či stromy, přes které neprojde signál ze satelitu do dronu. Výkon satelitů souvisí s vysílacím výkonem pozemních vysílačů, což může mít za následek špatnou ovladatelnost mini nebo mikro dronů, které jsou vybaveny bateriemi s nízkou kapacitou [2].



Obrázek 1.3 Řízení dronů skrze celulární síť

Nejvíce rozšířeným způsobem komunikace je komunikace s pomocí celulární sítě viz Obrázek 1.3. Roje dronů jsou rozděleny na určitá území, z nichž každé jednotlivé území je ovládáno pozemní stanicí. Veškerá komunikace prochází přes tyto stanice a ty zajišťují komunikaci se svými drony. Připojení je realizováno pomocí mobilní komunikace jako jsou GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service), LTE a bezdrátová datová komunikace. Taková infrastruktura je řešením pro omezení dosahu od jedné pozemní stanice. Jsou zde vysoké finanční nároky na instalaci dalších pozemních stanic a vytvoření další infrastruktury roje dronů [2].

Dalším způsobem řízení roje dronů je komunikace s pomocí Ad-Hoc sítě viz Obrázek 1.4. Jedná se o vytvoření sítě FANET (Flying Ad-Hoc Wireless Networks), tedy jde o letuschopné zařízení. V těchto sítích drony komunikují mezi sebou, avšak jen jeden z nich je připojen k pozemní stanici a přijímá signály od ní. Není zde nutná žádná infrastruktura, jelikož zde nejsou žádné směrovače či přístupové body. Tato síť zajišťuje komunikaci i mezi drony navzájem, tudíž je zde záruka bezpečí, že drony do sebe navzájem nenarazí během letu, to lze ovšem zajistit senzory, které by zabránily srážce. Každý z dronů může obsahovat jiný typ senzoru a každý druh senzoru může dodávat jiná data zpět do pozemní stanice [2].



Obrázek 1.4 Řízení dronů vytvořením Ad-Hoc sítě

## 2. AUTONOMNÍ ŘÍZENÍ BEZPILOTNÍHO LETOUNU

Pro tuto práci je důležité navrhnout možné způsoby autonomního řízení více bezpilotních letounů. Předáním letových instrukcí z textového souboru o poloze záchytného bodu umožní vytvoření roje dronů ovládaného z jednoho centrálního bodu.

### 2.1 ArduPilot

V této semestrální práci se zaměřím na ovládání více dronů, které mají firmware ArduPilot. Jedná se o open source, pokročilý, spolehlivý a plně vybavený softwarový systém autopilota. ArduPilot je schopen ovládat jakýkoliv RC model letadla, vrtulníku, pozemních vozidel i dronu. Letové jednotky Pixhawk i Holybro Kakute s firmwarem ArduPilot podporují různé senzory proti nárazu dronů. Je schopný modelování široké škály charakteristik bezpilotních letounů, co se týče navigace, řízení a plánování misí nebo také je firmware schopen plnit požadavky závodů FPV (First Person View) [3].

### 2.2 MAVProxy

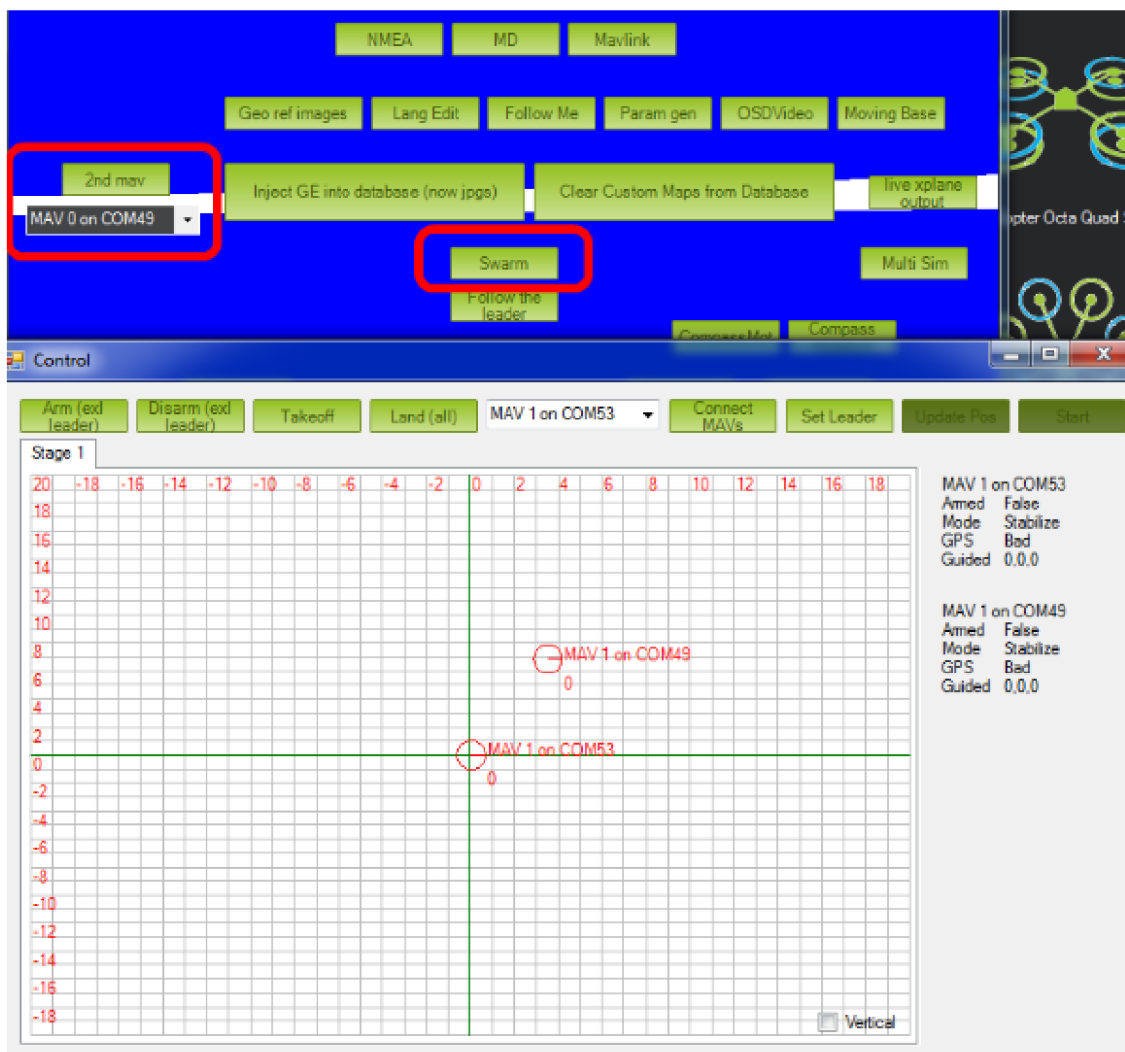
Knihovna MAVProxy slouží k vytvoření plně funkční pozemní řídicí stanice pro bezpilotní letouny podporující MAVLink protokol. Hlavním účelem je možnost vytváření síťové infrastruktury pro přenos protokolu MAVLink, vytváření paketů na síťové vrstvě a možnost přesměrování na libovolné porty. Software může být rozšířen o přídavné moduly nebo může být doplněn o další software jako je např.: Mission Planner. Obsahuje možnost směřování informací z pozemní řídicí stanice do dronu přes TCP (Transmission Control Protocol) nebo UDP (User Datagram Protocol) protokol. Používá se také ke směřování vytvořených testovacích dronů s pomocí SITL (Software In The Loop) [4].

### 2.3 Mission Planner

Plnohodnotná aplikace pozemní řídicí stanice pro řízení dronu s firmwarem Ardupilot. Jde o bezplatnou aplikaci s open-source kódem a komunitní podporou, navrženou Michaellem Obornem pro Ardupilot. Aplikace umožňuje nastavování parametrů jednotlivých dronů, jejich úplnou konfiguraci a možnosti provedení a plánování letu [5].

Mission Planner avšak podporuje jen omezené možnosti pro rojové létání. Pro účely předání různých letových instrukcí více dronů je tento software nevhodný. Otevřením více připojení MAVLink na sériovém portu, použitím USB (Universal Serial Bus) rozbočovače, a předáním informací o poloze GPS z hlavního dronu tzv. vůdce, na drony ostatní tzv. následovníky. Nastavením GPS souřadnic hlavnímu dronu se poté posílají příkazy trasových bodů ostatním dronům. Tímto způsobem by měly drony následovat hlavní dron v odsazených souřadnicích X, Y, Z viz Obrázek 2.1 [5].





Obrázek 2.1 Způsob ovládání roje dronů v aplikaci Mission Planner [5]

## 2.4 DroneKit-SITL

Dalším způsobem připojení pozemní řídicí stanice a dronu je s pomocí knihovny DroneKit. Umožňuje operátorovi vytvářet aplikace, které běží na palubním počítači a komunikují s letovou jednotkou ArduPilot. Integrované aplikace mohou vylepšit let, co se týče provádění výpočetních a časově náročných úkonů, jako např.: plánování cest či 3D modelování. Ke komunikaci se používá MAVLink protokol. Knihovna poskytuje přístup k telemetrii, ke stavu letounu, k parametrům o připojení dronu a umožňuje řízení mise i přímou kontrolu nad pohybem dronu [6][7].

Po importu skriptu a připojení dronu s pomocí příkazu *connect ()* musí operátor nastavit parametry dronu. První parametr určuje cílovou adresu, tedy adresu zpětné smyčky pro port UDP. Druhý parametr *wait\_ready* se používá k určení, zda se počká, jestli se k dronu operátor připojí ihned nebo se počká na naplnění parametrů letounu. Ve většině případů se čeká na naplnění parametrů [6][7].

Knihovna podporuje také Software In The Loop, zkráceně SITL. Umožňuje nasimulovat letovou jednotku založenou na bázi ArduPilot a komunikovat s ní pomocí MAVLink protokolu na síťové vrstvě. DroneKit-SITL je nejrychlejší a nejjednodušší způsob spuštění simulace bezpilotního letounu ve Windows, Linux nebo MAC OS. Nainstaluje se z pythonovského pip nástroje a poskytuje několik jednoduchých příkazů pro spuštění předem vytvořených binárních souborů, které jsou vhodné pro daný hostitelský operační systém. Tento software se používá k testování aplikací DroneKit a nových zdrojových kódů [6][7].

## 2.5 Komunikace bezpilotních letounů

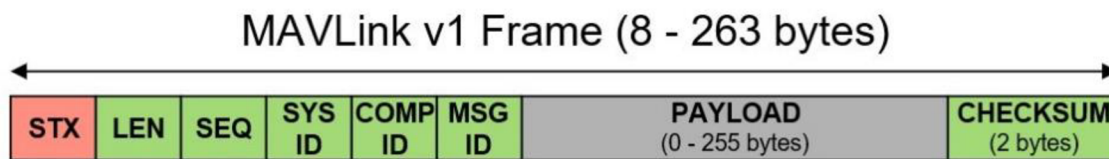
Datová spojení mezi drony a pozemní stanicí mohou být navázána pomocí komunikačního protokolu MAVLink. Protokol MAVLink je síťový protokol typu point-to-point používaný k přenosu telemetrických dat velení a řízení mnoha bezpilotních letounů neboli UAV (Unmanned Aerial Vehicle) [8].

Bezpilotní letoun lze ovládat buďto autonomně palubním počítačem nebo dálkově operátorem pomocí pozemní řídicí stanice. Pozemní řídicí stanice je vybavena moduly, které slouží k odesílání a přijímání telemetrických dat z jednotlivých dronů. Jedním způsobem komunikace je s pomocí protokolu MAVLink a knihovny DroneKit, telemetrie zajišťuje přenos informací o stavu roje dronů. Používá se pro obousměrnou komunikaci mezi dronem a pozemní řídicí stanicí [8].

### 2.5.1 MAVLink

MAVLink je protokol sloužící pro posílání zpráv, komunikaci pozemní stanice s drony a taky slouží ke komunikaci mezi řídicí jednotkou a pozemní řídicí stanicí. Protokol samotný je bezstavový, skládající se z definovaných zpráv a z předepsaných funkcí. Pozemní řídicí stanice odesílá příkazy a ovládací prvky dronům, zatímco drony přeposílají data o telemetrii a informace o stavu. V protokolu MAVLink nalezneme 18 typů zpráv a 91 definovaných zpráv v MAVLink dokumentaci. Jednotlivé zprávy určují parametry kódování, jako je typ architektury, nastavení konfigurace a typ příkazu (např. typ letounu, hardware součástek či příkazy pro motory). Zprávy jsou odesílány jako datové pakety mezi pozemní stanicí a zařízením UAV. Minimální délka paketu v protokolu je 8 bitů (např. Potvrzení bez zatížení) a maximální délka paketu je 263 bitů s plným zatížením. Dron by měl pravidelně (každou sekundu) posílat povinnou zprávu HEARTBEAT do pozemní stanice, aby poskytl zpětnou vazbu o svém stavu, že je stále aktivní a připojen. Protokol MAVLink podporuje propojení až 255 UAV řízených jednou pozemní stanicí [9].

Díky protokolu MAVLink, který je vyzobrazen na Obrázek 2.2, lze zjistit aktuální stav letounu a stav všech senzorů, které jsou připojeny k letové jednotce viz Tabulka 2.1. MAVLink taktéž zajišťuje celkové zadávání příkazů letu a konfiguraci parametrů řídicí jednotky. S MAVLinkem se dron stává autonomním letounem a lze na základě souřadnic naplánovat dráhu letu, rychlost dronu, nastavit chování v případě nepříznivých povětrnostních podmínek nebo při odchýlení z naplánované dráhy letu [10].



Obrázek 2.2 Délka protokolu MAVLink [10]

Tabulka 2.1 Obsah protokolu MAVLink

Název položky	Popis zprávy
Packet start sign	Indikuje začátek zprávy, má vždy hodnotu 0xFE.
Payload length	Indikuje délku těla.
Packet sequence	Sekvence, inkrementuje se s každou další zprávou. Umožňuje také detekci ztráty paketů.
System ID	Identifikační číslo zdroje (zařízení), které posílá tuto zprávu. Slouží na rozlišení jednotlivých zařízení v okolí.
Component ID	ID podsystému nebo komponentů, které posílají tuto zprávu. Umožňuje rozlišit různé komponenty systému.
Message ID	Identifikační číslo zprávy. Definiuje, jak bude vypadat tělo zprávy.
Data	Tělo zprávy, označováno také jako Payload. Obsah a velikost závisí na Message ID.
Checksum	Kontrolní součet pro detekci chyb.

## 2.6 Telemetrická data

Telemetrie slouží k zjištění a odeslání řídicích instrukcí, nastavení parametrů a letových stavů bezpilotního letounu. Jedná se o zjištění stavu baterie, o pozici dronu, o funkčnosti jednotlivých součástí atd. Pro ovládání dronu a následovně pro rojové létání je potřeba znát telemetrická data všech dronů, od stavu baterie po polohu GPS, proto je přenos telemetrických dat důležitý pro správnou funkčnost letového systému. Telemetrické systémy lze rozdělit na tři kategorie: systémy nezávislé na soustavě, systémy polonezávislé a systémy integrované do soustavy [11].

Pro přenos telemetrických dat se používají telemetrické moduly, které přijímají a odesílají telemetrická data do dronu. Pro použití v případě rojového létání lze použít jeden vysílací modul a více modulů přijímacích, z nichž každý má jedinečné identifikační číslo. Musí dojít k ověření identifikačních čísel mezi moduly, aby se zajistila bezpečná komunikace. Pro

komunikaci se používá již zmíněný MAVLink protokol. Telemetrická data obvykle obsahují polohu GPS, nadmořskou výšku, směr letu, stav mise, zprávy o nastavení dronu a konfiguraci, letové příkazy [11].

### 2.6.1 Wi-Fi telemetrická data

V sektoru telekomunikací jde o jednu z nejslibnějších aplikací UAV jako použití zařízení na rozšíření kapacity a pokrytí bezdrátových systémů prostřednictvím vzdušné komunikační sítě. Wi-Fi je zatím nejrozšířenější přístupová síť pro poskytování připojení k bezdrátovému zařízení koncovým uživatelem. Specifikováno standardem (IEEE 802.11) poskytuje dva různé typy provozu: režim infrastruktury nebo režim ad-hoc, s jejich odpovídajícími výhodami a nevýhodami v závislosti na použití. Pro oba režimy jsou podporovány Wi-Fi standardy (IEEE 802.11a /b /g /n /ac) se zvýšenou přenosovou rychlostí pomocí 2,4 GHz (802.11b /g /n) a 5,8 GHz (802.11a /ac). Propojení přes Wi-Fi telemetrické moduly může být realizováno s pomocí 2,4 GHz nebo 5 GHz frekvence. Pro navázání spojení se využívá nejčastěji UDP protokol, který z pozemní řídicí stanice odesílá data do dronů. Vybírá se z neregistrovaných UDP portů, kdy každý dron využívá jiný port kvůli adresování. Jedná se o alternativní protokol k protokol. Avšak UDP protokol nenavazuje přímé spojení mezi komunikujícími počítači. Operátor jen odešle data a dále se nestará, zda data dorazila či nikoliv. TCP narozdíl od UDP navazuje přímé spojení mezi komunikačními jednotkami, ale v případě použití pro komunikaci mezi pozemní řídicí jednotkou a drony je protokol UDP lepší, jelikož přenos nepotřebuje žádné potvrzení a tím pádem lze komunikovat s drony v reálném čase bez zpoždění [12].

Nejčastěji se využívají Wi-Fi moduly ESP8266 v závislosti na velikostech, paměti a vstupních a výstupních pinech. Jedná se o typy ESP-01, 07, 201, 12 atd., každý typ disponuje jinou anténou a různou velikostí paměti. Na Obrázek 2.3 lze vidět modul Wi-Fi ESP-07 8266 použitý pro komunikaci mezi drony a pozemní řídicí stanicí. Moduly ESP8266 zpravidla dokážou vyvinout dosah až do vzdálenosti 300 m, avšak s externí anténou se vzdálenost značně zvyšuje [13][14][15].



Obrázek 2.3 Použitý ESP-07 8266 Wi-Fi modul [13]

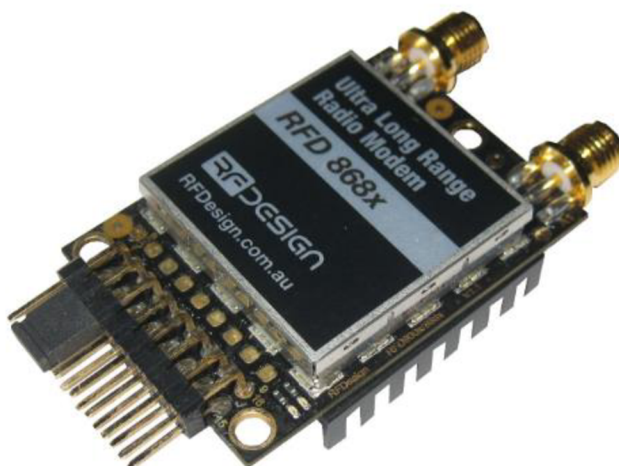
## 2.6.2 Radiová telemetrická data

Použití frekvence 433 MHz pro komunikaci je jedna z levnějších záležitostí a tomu odpovídá i funkce. Uživatel může pouze odesílat data jednostranně, jde o tzv. Half-duplex komunikace, kdy uživatel může odesílat data z pozemní řídicí stanice do dronu, ale už ne z dronu nazpět do pozemní řídicí stanice ve stejném okamžiku. Moduly mohou teoreticky pokrýt vzdálenost až do 100 metrů v závislosti na výkonu vysílačů [16].



Obrázek 2.4 Vysílací modul Robsense Swarmlink [16]

Jednou z možností je použití Modulu Robsense Swarmlink s vysílací frekvencí 433 Mhz, který podporuje rojové létání a není zde potřeba více vysílacích antén na pozemní řídicí stanici, jelikož modem je schopen vysílat na více letových jednotek vizObrázek 2.4 [17].



Obrázek 2.5 Vysílací modul s vysílací frekvencí 868 MHz [17]

Alternativou je použití komunikační frekvence 900 MHz, se kterým se uživatel může dostat až na ovladatelnou vzdálenost 15 km. Rádiový modem RFD900 je schopen odesílat potřebné komunikační příkazy a telemetrii na více zařízení současně. Dle legislativy nelze v Evropě použít komunikační frekvenci 900 MHz pro rádiové vysílače, pro použití na evropském území lze použít 868 MHz modemy s povoleným výkonem do 25 mW a vysílacím dosahem 800 m viz Obrázek 2.5. Vysílací frekvenci 900 MHz u nás nelze použít z důvodu využívání sítě mobilními operátory [18][19].

Pro realizaci komunikace mezi drony a pozemní řídicí stanicí lze využít i rádiové moduly XBEE, které dosahují až vzdálenosti 60 km viz Obrázek 2.6, avšak nejsou povoleny na území Evropské Unie [20].



Obrázek 2.6 Wi-Fi modul XBEE PRO [20]

Rádiová telemetrie v pozemní řídicí stanici je zapojena pomocí USB portu a na dronech je anténa, která slouží k přijímání signálů zapojena do portu telemetrie TELEM1. Řídicí jednotka dronů je poté nastavena na přijímání příkazů např.: protokolu MAVLink 2 [21].

### 2.6.3 Telemetrická data přenášena přes mobilní síť

Jde o možnost vysílání a přijímání údajů potřebných k řízení dronu prostřednictvím mobilních datových kanálů. Bohužel tyto kanály nejsou nastaveny na stálé připojení v reálném čase, ale na krátkodobé přenášení paketů dat např.: načítání webové stránky. V důsledku toho by mohlo dojít k častému vypadávání spojení mezi dronem a pozemní stanicí i mimo města, ve kterých by bylo ovládání ještě více ztíženo přetížením sítě. Řešením by bylo vybudovat infrastrukturu sítě, ale jedná se o drahé a nákladné řešení a nejsou k tomu řešení ani volné řídicí frekvence [22].

Dalším řešením by bylo využití hovorových kanálů, které jsou mnohdy dostupnější a stabilnější i v oblastech, ve kterých jsou datové kanály špatně dostupné či nedostupné vůbec. Jelikož se jedná o jednoduché hovorové spojení, stačilo by vlastnit předplacenou SIM kartu. Ovládací povely na kontrolu dronu jsou převedeny na audiosignál a na dronu jsou zpětně převedeny na řídicí povely. Využití hovorových kanálů je velice stabilní systém po celé Zemi. Kdyby i přesto došlo k výpadku komunikace, lze přepnout komunikaci ze standardu LTE na GSM (Global System for Mobile Communications) nebo UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). LTE povoluje tři typy rychlostí a to 2 Mb/s pro vysokorychlostní uživatele dronů (250 km/h), dále 20 Mb/s pro středně rychlé uživatele (60 km/h) a pro vnitřní použití dronů až 100 Mb/s [22].

Díky 4G modulům se z dronu dokáže přenášet video na pozemní stanici i v kvalitě HD. Tento typ přenosu podporuje i rojové létání a přenášení telemetrických informací. Díky modulu 4G se prodlouží dráha letu až na desítky kilometrů, tím pádem se uživatel nemusí bát o ztrátu komunikace dronu s pozemní stanicí. Tento typ přenosu byl vyvinut především, aby předcházel problémům, se kterými se 2,4 GHz a 5,8 GHz sítě často setkávali, šlo především o rádiové rušení v zabydlených oblastech. 4G připojení používá pásma 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz 2100 MHz a 2600 MHz pro vysílání a je oproti 2,4 GHz a 5,8 GHz stabilnější v městských částech a dokonce i ve venkovských oblastech a díky tomu se nám eliminuje problém s dosahem komunikace [23].

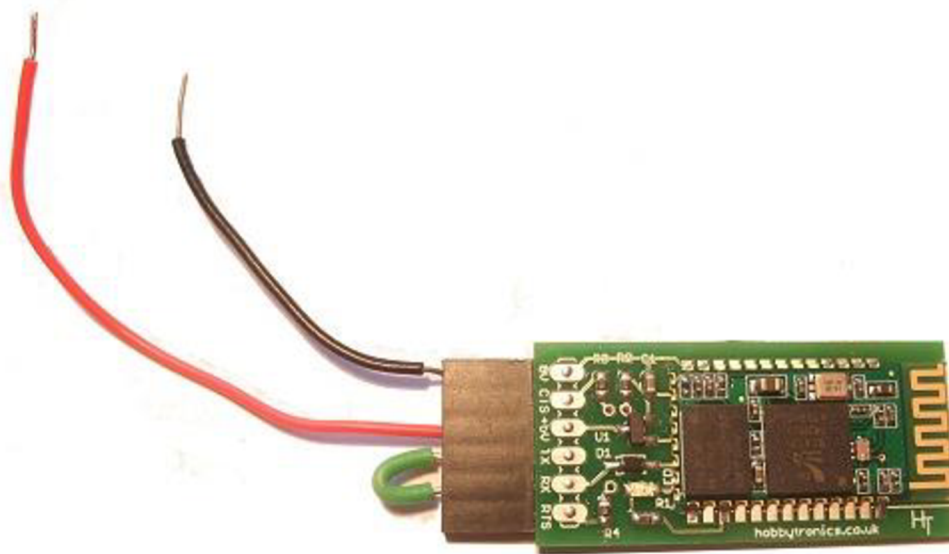
Problémem 4G propojení je nestálost IP adresy, která se změní, kdykoliv přejde dron do nové celulární sítě. Adresa IP je u serverů statická, avšak u dronů se mění s připojením do nové sítě [23].

S vyvíjením technologií a nástupem technologie 5G bude možné s nižší latencí přenášet větší množství dat. S technologií 5G by bylo možné přenášet video z dronů do pozemní řídicí stanice v kvalitě 4K a využít je k dodávkovým službám citlivých předmětů např.: orgány pro transplantaci, které se musí doručit v co nejkratším čase [24].

#### **2.6.4 Bluetooth telemetrická data**

Přes Bluetooth modul lze provést připojení mezi bezpilotním letounem a pozemní stanicí. Bluetooth přináší omezení dosahu do 50 metrů a to navíc záleží, zda operátor letu není v blízkosti žádného rušivého elementu, který by ještě více snižoval dosah modulu [25].

V dnešní době s přibývajícím technologií se nezavřelo ani na Bluetooth komunikaci a s technologií Bluetooth 5 má operátor větší toleranci ke vzdálenosti letu dronu. modul Onboard Bluetooth 5 Transceiver (OBT) podporuje maximální datovou rychlost 2 Mbps, což umožňuje vysokorychlostní přenos dat na dronech. Navíc OBT detekuje a brání interferenci s LTE nebo Wi-Fi tím že neustále přizpůsobuje frekvence pro správnou funkčnost, aby nedocházelo k rušení. Na Obrázek 2.7 je znázorněn Bluetooth modul, který se využívá pro komunikaci mezi pozemní řídicí stanicí a řídicí letovou jednotkou [25].



Obrázek 2.7 Bluetooth modul pro připojení [25]

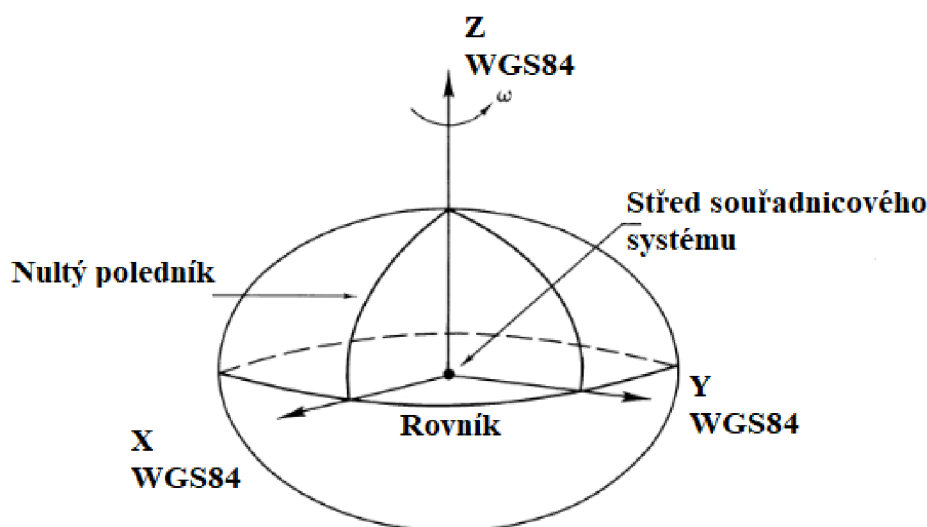


### 3. REALIZACE ROJOVÉHO LÉTÁNÍ

Náplň této práce spočívá v realizaci zapojení a komunikace roje dronů s pozemní řídicí stanicí. Komunikace s drony probíhá vzájemným připojením pozemní řídicí stanice a dronů. Pro spojení slouží připojený Wi-Fi modul ESP8266 ESP-07 pracující na frekvenci 2,4 GHz, moduly jsou k řídicí stanici a dronu připojené sériovou linkou [26].

Komunikaci mezi drony a pozemní řídicí stanicí zajišťuje již zmíněný protokol MAVLink. Řídicí pokyny jsou realizovány softwarovou aplikací v jazyce Python, která odesílá MAVLink rámce z pozemní stanice frekvencí 2,4 GHz pomocí socketů UDP protokolu do modulu připojeného k dronům, rámce dat zpracovává řídicí jednotka dronu. Připojeným komunikačním kanálem se pomocí MAVLink rámců nepřenáší jenom řídicí signály, ale také se zpětně přenáší telemetrická data o stavových parametrech dronů. Tato data jsou následně vypisována pozemní řídicí stanicí a slouží jako kontrolní informace o stavech dronů [26].

Pro realizaci této práce bylo využito souřadnicového systému WGS84, což je geodetický standard pro navigaci ve vojenském a civilním průmyslu viz Obrázek 3.1. Pro komunikaci mezi pozemní řídicí stanicí a letovou jednotkou se využily souřadnice ve stupních pro nejjednodušší zápis a přenos zadaných souřadnic do letových jednotek dronů [27].



Obrázek 3.1 Souřadnicový systém WGS84 [27]

#### 3.1 Knihovny použité v programu

Pro správnou funkčnost celého programu jsou použity tři knihovny a jeden modul. Použité knihovny slouží k využití určitých funkcí, tříd a konstant, které jsou potřebné pro správné fungování programu. Každá z knihoven zajišťuje určitou funkci, kterou operátor při spuštění programu využívá.

### **3.1.1 Knihovna DroneKit**

Knihovna DroneKit slouží k vytvoření komunikačního kanálu v jazyce python mezi pozemní řídicí stanicí a letovými jednotkami ArduPilot. Komunikace je zajištěna protokolem MAVLink, který obsahuje data a instrukce o provedení letového manévru a taktéž slouží k přijímání telemetrických dat a letových stavů dronů.

### **3.1.2 Knihovna Pymavlink**

Tato knihovna slouží k implementaci protokolu MAVLink v pytohnu. S jejíž pomocí je možné vytvořit python skript, který slouží pro čtení dat ze senzorů a k odesílání a přijímání příkazů do jednotlivých dronů.

### **3.1.3 Knihovna GetKey**

Jedná se o knihovnu, která slouží ke zpětné odezvě při stlačení dané klávesy osobního počítače. Díky této knihovně je možné ovládat drony s pomocí kláves počítače a zvolit si funkce pro jednotlivé klávesnice, pomocí kterých může operátor kdykoliv zasáhnout do naplánované mise.

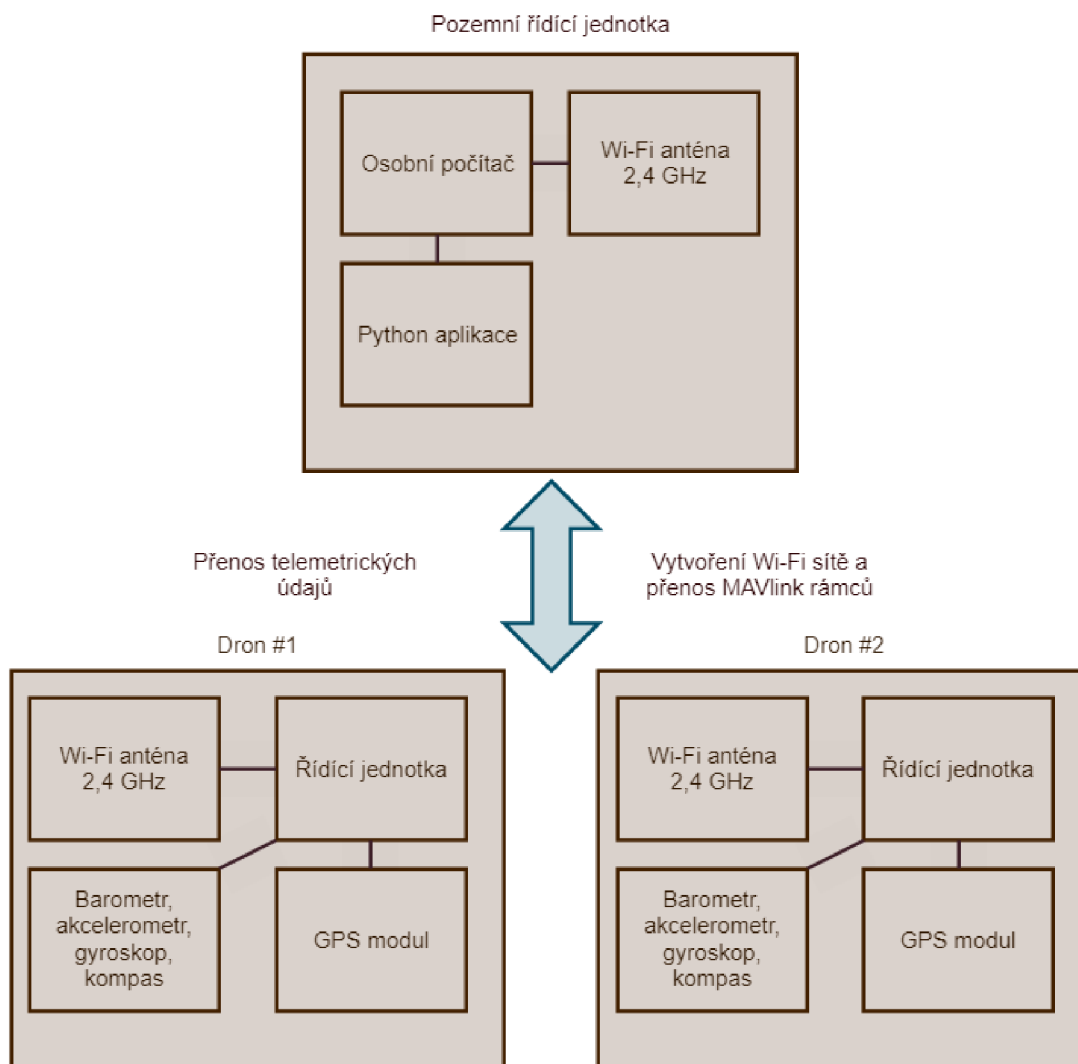
### **3.1.4 Modul time**

Modul time slouží k importování reálného času v počítači, který slouží k fungování programu v reálném čase. Modul je využíván při vytvoření určitému zpoždění, aby mohl dojít k pravidelnému porovnávání souřadnic a zároveň k nezahlcení programu.

## **3.2 Propojení řídicích jednotek a pozemní stanice**

Komunikace mezi drony a pozemní řídicí stanicí je realizována Wi-Fi sítí komunikující na frekvenci 2,4 GHz. K řídicí letové jednotce jsou připojeny senzory pro správnou stabilizaci dronů ve vzduchu. GPS modul na dronu je připojen k letové jednotce pomocí UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) portu, což je sériový port na letové jednotce. Wi-Fi modul s řídicí jednotkou komunikuje adresované síťové spojení pomocí UDP protokolu. Připojení bylo realizováno v programovacím jazyku Python. Navázání spojení bylo naprogramováno s použitím knihovny DroneKit-SITL a knihovny MAVProxy pro definování portu UDP.

Na Obrázek 3.2 je znázorněno realizované zapojení a komunikace mezi drony a pozemní řídicí stanicí. S pomocí Wi-Fi modulu ESP-07 8266 je zajištěn přenos řídicích pokynů z pozemní řídicí stanice do dronů a taktéž přenos telemetrických údajů o aktuálních stavech dronů do pozemní řídicí stanice. Drony jsou opatřeny GPS moduly, které slouží k vyhodnocení jejich aktuální polohy pro naplánování dráhy letu a antikolizní systém.



Obrázek 3.2 Schéma zapojení a komunikace dronů s pozemní řídicí stanicí

Základ plánování trasy řízení dronů tvoří textový soubor, který je složen z GPS souřadnic zeměpisné šířky, zeměpisné délky a výšky, které dron dostává po dosažení záchytného bodu. Celý program je koncipován pro řízení skrze jednotlivá tlačítka osobního počítače pro usnadnění ovládání. Program se skládá z několika částí, od inicializace dronů, přes čtení z textových souborů až po antikolizní systém, který slouží pro zabezpečení operátora i okolí proti nebezpečí nárazu či pádu.

### 3.3 Inicializace zařízení

Úvodní částí programu je připojení a identifikace dronů. Ta probíhá připojením dronů k určité adrese s pomocí protokolu UDP a definování příslušných UDP portů. Na Obrázek 3.3 je znázorněna část programu, která se zasluhuje o pozemní řídicí stanice k dronům.

```

#-- Připojení
wait_ready=False
print('Connecting...')
vehicle1 = connect('udp:127.0.0.1:14550',wait_ready=False,baud=57600)
vehicle1.wait_ready(True, raise_exception=False)
print('Connected vehicle1')

vehicle2 = connect('udp:127.0.0.1:14560',wait_ready=False,baud=57600)
vehicle2.wait_ready(True, raise_exception=False)
print('Connected vehicle2')
vehicle=vehicle1

```

Obrázek 3.3 Ukázka připojení dronů k pozemní řídicí stanici

Při simulaci se vytvoří simulované drony v příkazovém řádku pomocí knihovny DroneKit-SITL a nadefinují se jejich souřadnice vzletu viz Obrázek 3.4. Prostředí pro vizualizaci dráhy letu a letového stavu byla použita aplikace Mission Planner. Na obrázku je následně vypsán příkaz realizující vytvoření UDP portu pro připojení na daný dron, který je definován IP adresou 127.0.0.1 a stanoveným číslem UDP portu, které je v tomto případě 14550 a 14560 viz Obrázek 3.4. Na Obrázek 3.5 je znázorněno připojení a definování typu připojení z protokolu TCP na protokol UDP.

```

C:\Users\jozka>dronekit-sitl copter-3.3 --instance 0 --home=48.9669353,17.5805094,0,353
os: win, apm: copter, release: 3.3
SITL already Downloaded and Extracted.
Ready to boot.
Execute: C:\Users\jozka\dronekit\sitl\copter-3.3\apm.exe --instance 0 --home=48.9669353,
17.5805094,0,353 --model=quad -I 0
SITL-0> Started model quad at 48.9669353,17.5805094,0,353 at speed 1.0
SITL-0.stderr> bind port 5760 for 0
Starting sketch 'ArduCopter'
Serial port 0 on TCP port 5760
Starting SITL input
Waiting for connection ....

C:\Users\jozka>dronekit-sitl copter-3.3 --instance 1 --home=48.9669373,17.5805074,0,353
os: win, apm: copter, release: 3.3
SITL already Downloaded and Extracted.
Ready to boot.
Execute: C:\Users\jozka\dronekit\sitl\copter-3.3\apm.exe --instance 1 --home=48.9669373,
17.5805074,0,353 --model=quad -I 0
SITL-0> Started model quad at 48.9669373,17.5805074,0,353 at speed 1.0
SITL-0.stderr> bind port 5770 for 0
Starting sketch 'ArduCopter'
Serial port 0 on TCP port 5770
Starting SITL input
Waiting for connection ....

```

Obrázek 3.4 Vytvoření simulace dronů

```

C:\Users\jozka>mavproxy --master tcp:127.0.0.1:5760 --out udp:127.0.0.1:14560
--master tcp:127.0.0.1:5770 --out udp:127.0.0.1:14550
Connect tcp:127.0.0.1:5760 source_system=255
Connect tcp:127.0.0.1:5770 source_system=255
Running script (C:\Users\jozka\AppData\Local\mavproxy\mavinit.scr)
Running script C:\Users\jozka\AppData\Local\mavproxy\mavinit.scr
-> set moddebug 2
-> module load help
Loaded module help
Unknown command 'graph timespan 30'
Log Directory:
Telemetry log: mav.tlog
Waiting for heartbeat from tcp:127.0.0.1:5760
online system 1
Mode STABILIZE
APM: Calibrating barometer
APM: Initialising APM...
APM: barometer calibration complete
APM: GROUND START
APM: barometer calibration complete
APM: GROUND START

```

Obrázek 3.5 Definování připojení k UDP portu

### 3.4 Nahrání letového plánu

Čtení souboru s GPS souřadnicemi, který tvoří letový plán probíhá pro každý jednotlivý dron zvlášť, tím pádem lze zaručit možnost společného ovládání roje dronů či ovládat každý dron samostatně. Tím pádem by bylo efektivnější využít drony např. k zabezpečení oblasti před vniknutím nežádoucí osoby nebo je využít při pátracích akcích. Na Obrázek 3.6 je zobrazena část programu, která slouží k nahrávání textového souboru se zeměpisnými souřadnicemi záchytných bodů do každého dronu zvlášť.

```

radky1=len(open("trasa1.txt").readlines())
trasa1=open("trasa1.txt","r")
radky2=len(open("trasa2.txt").readlines())
trasa2=open("trasa2.txt","r")
print("Zahájení letového plánu")

```

Obrázek 3.6 Ukázka kódu čtení z textového souboru

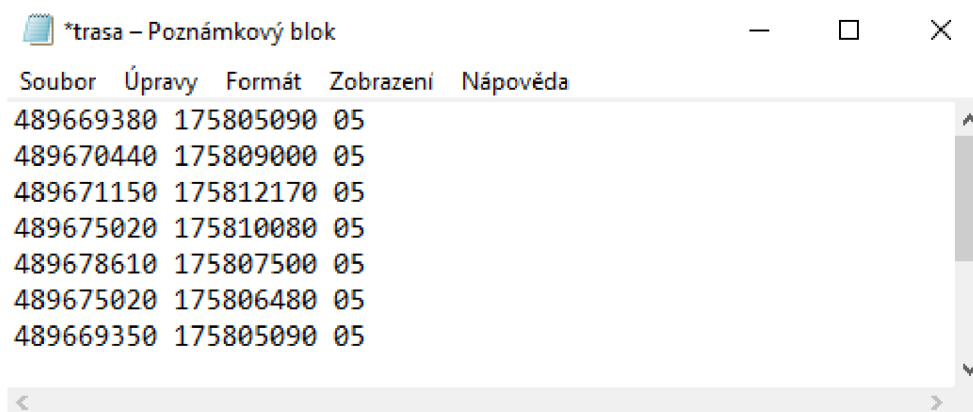
### 3.5 Naplánování dráhy letu

Plánování trasy probíhá pomocí GPS souřadnic. Operátor letu vypíše do textového souboru souřadnice záchytných bodů, které drony v daném pořadí proletí. Souřadnice se píšou ve formátu zeměpisná šířka, zeměpisná délka a dále výška letu dronu. Souřadnice je potřeba sepisovat jako celé číslo, namísto čísla desetinného, jelikož je potřeba odesílat pokyny se souřadnicemi ve formátu *integer* namísto *float*. To řeší tato část programu, která se zasluhuje o vytváření celých čísel.

```
vehicle = vehicle1
v_lat1 = int(10000000*vehicle.location.global_relative_frame.lat)
v_lon1 = int(10000000*vehicle.location.global_relative_frame.lon)
vehicle = vehicle2
v_lat2 = int(10000000*vehicle.location.global_relative_frame.lat)
v_lon2 = int(10000000*vehicle.location.global_relative_frame.lon)
```

Obrázek 3.7 Přepis souřadnic do formátu integer

V textovém souboru je zapotřebí zapisovat GPS souřadnice ve formátu zeměpisná šířka, zeměpisná délka a výška dráhy letu viz Obrázek 3.8.



Obrázek 3.8 Ukázka naplánované dráhy letu v souřadnicích

### 3.6 Ovládání naplánované mise

Celkové ovládání roje dronů je nastaveno na klávesy pozemní řídicí stanice. Jedná se o uživatelsky jednoduché a přívětivé ovládání, kdy po stisknutí klávesy program vyšle do letové jednotky dronů požadovaný letový manévr viz Obrázek 3.9. Ovládání slouží jako bezpečnostní prvek, který umožňuje kdykoliv převzít nad rojem dronů plně manuální kontrolu v případě selhání programu.

```

if key == 'l':
    print("Pristavaci mod aktivovan LAND")
    vehicle.mode = VehicleMode("LAND")
if key == 'm':
    print("rezim LOITER za 3s")
    time.sleep(3)
    vehicle.mode = VehicleMode("LOITER")
if key == 'g':
    print("rezim GUIDED")
    vehicle.mode = VehicleMode("GUIDED")
if key == 'a':
    print("Armuji, vzlétám do 5m")
    vzlet(vyska,dohromady)

```

Obrázek 3.9 Ukázka kódu pro ovládání skrze klávesy pozemní řídicí stanice

### 3.7 Antikolizní systém

Antikolizní systém programu funguje na principu porovnávání souřadnic dronů v reálném čase. Během programu dochází k porovnávání souřadnic zeměpisné šířky a zeměpisné délky obou dronů a v případě již malé vzájemné vzdálenosti se drony zastaví a nebudou dále pokračovat v letu. Antikolizní systém funguje i při vzletu dronů, kdy program porovnává souřadnice jejich místa vzletu vůči sobě a v případě blízkosti dronů program nedovolí dronům odemknout motory a drony nevzlétí.

Antikolizní systém není schopen předpovídat možnou srážku dronů např. v půlce dráhy letu, jelikož drony vzlétají každý z jiné pozice a program netuší, kdy se jednotlivé drony dostanou k zadanému místu určení. V programu není definováno přepočítávání a předvídaní možné srážky dronů, jelikož program není schopen předpovídat a počítat s povětrnými podmínkami a možnými vlivy počasí na let dronů a vychýlení dronů z dráhy letu, tím pádem je zvolení antikolizního systému, který funguje na principu porovnávání GPS souřadnic v reálném čase, nejlepší možnou variantou. Ukázka části programu, který slouží pro porovnávání souřadnic dronů v reálném čase, znázorňuje Obrázek 3.10.

```

if (abs(v_lat1-Lat1)<40) and (abs(v_lon1-Lon1)<40) and radky1!=1:
    Lat1=int(trasa1.read(10))
    Lon1=int(trasa1.read(10))
    Alt1=int(trasa1.read(2))
    trasa1.read(1)
    vehicle = vehicle1
    let_trasa(vehicle,Lat1,Lon1,Alt1,dohromady)
    radky1=radky1-1

if (abs(v_lat2-Lat2)<40) and (abs(v_lon2-Lon2)<40) and radky2!=1:
    Lat2=int(trasa2.read(10))
    Lon2=int(trasa2.read(10))
    Alt2=int(trasa2.read(2))
    trasa2.read(1)
    vehicle = vehicle2
    let_trasa(vehicle,Lat2,Lon2,Alt2,dohromady)
    radky2=radky2-1

```

Obrázek 3.10 Ukázka kódu pro porovnávání souřadnic zeměpisné šířky a délky

Antikolizní systém nejen porovnává zeměpisnou šířku a zeměpisnou délku dronů vůči sobě, ale i jejich letovou výšku. Dronům je od vzletnutí kontrolována jejich letová výška a tím pádem jsou drony schopny provést letový manévr i nad sebou viz Obrázek 3.11.

```

Armuji, vzlétám do 5m
ARM , probíhá vzlet
>> Výška = 0.0 m
>> Výška = 0.0 m
>> Výška = 0.1 m
>> Výška = 0.9 m
>> Výška = 2.1 m
>> Výška = 3.0 m
>> Výška = 4.3 m
výška dosažena

```

Obrázek 3.11 Výpis letové hladiny při vzletnutí dronů

Při dosažení nízké vzájemné vzdálenosti dronů vyše program příkaz do letových jednotek dronů k okamžitému zastavení pohybu, jelikož by došlo ke střetu. Antikolizní systém na nastaven na dvou metrovou vzdálenost, která je dostačující pro zastavení dronů. Znázornění simulace střetu dronů v aplikaci Mission Planner viz Obrázek 3.12. Po zaznamenání nízké vzájemné vzdálenosti obou dronů program drony zastaví a informuje operátora letu o provedení potřebného manévru viz. Obrázek 3.13.





Obrázek 3.12 Simulace antikolizního systému

```

ARM , probíhá vzlet
>> Výška = 0.0 m
>> Výška = 0.0 m
>> Výška = 0.3 m
>> Výška = 1.6 m
>> Výška = 3.0 m
>> Výška = 4.3 m
výška dosažena
Zahájení letového plánu
Drony jsou nebezpečně blízko, trasa nebude pokračovat

```

Obrázek 3.13 Výpis údajů při zastavení dronů před střetem

Druhá část antikolizního systému spočívá ve čtení textového souboru a zaslání letových souřadnic do dronů. Drony jsou ovládány skrze osobní počítač a program, který jim postupně zasílá souřadnice dalšího bodu, jakmile doletí k bodu předchozímu. Tím je zaručena bezpečnost

letu v případě jakéhokoliv nežádoucího jevu např. vypnutí počítače či neodpovídání programu. V případě neočekávaného vypnutí osobního počítače se drony zastaví na poslední zaslání souřadnic v zadané výšce a nebudou pokračovat dále dokud opět nedostanou pokyn o dalším letovém úkonu.

### 3.8 Hledání ideální letové odchylky

Při vykonávání dráhy letu drony obletí předem naplánovaná místa a s pomocí GPS modulu program porovnává jejich aktuální pozici vůči pozici bodu, ke kterému mají doletět a pokračovat dále. V programu je nastavitelná citlivost porovnávání GPS souřadnic, která slouží k vyhodnocení dosažení daného bodu. Jestliže by byla přesnost příliš vysoká, dronům by trvalo déle, než by se vystředily přesně na daný bod. V závislosti na velikosti odchylky drony zpomalí svou rychlost blíže se k danému bodu, vystředí se na požadovanou přesnost, splní dosažený bod, a tehdy je dronům zaslána GPS souřadnice dalšího záchytného bodu. Odchylku je možné si libovolně v programu nastavovat v závislosti na využití roje dronů.

Pro získání informací o přesnosti letu dronů byl proveden experiment, který měl za cíl zjistit nejlepší poměr odchylky GPS modulu a času provedeného letu. Ve vyzkoušeném letu při naplánované dráze o celkové délce 252 m s nulovou odchylkou nebyly drony schopny se přesně vystředit na daný záchytný bod, a tudíž nebyly schopny pokračovat dále v naplánované misi. S rostoucí odchylkou lze zpozorovat zkracující se dobu potřebnou k vystředění dronů a ke splnění naplánované mise.

Po provedení pěti experimentů s rozmezí odchylky 0 až 100 cm se jakožto ideální letové odchylka jeví hodnota 25 cm, při které drony obletely a splnily naplánovanou trasu za 1:24 min. Největší naměřený rozdíl času letu byl zaznamenán při odchylce 5 a 10 cm, kdy je rozdíl mezi danými lety 1:25 min. Se zvyšující se odchylkou byly drony schopné se rychleji vystředit k danému bodu a rychleji splnit požadovanou misi. Rozdíl času letu mezi 10 a 15 cm je téměř zanedbatelný. Mezi odchylkami 15 a 20 cm je poměrně velký časový rozdíl, avšak s odchylkou 25 cm se začíná odchylka letu ustalovat. Se stále se zvyšující odchylkou se hodnota času letu snižuje jen nepatrně v řádu jednotek sekund, což nelze považovat za přípustnou hodnotu pro využití při skutečném letu. Při zavedení odchylky 100 cm bylo dosaženo sice nejlepšího času pro splnění naplánované mise, avšak za cenu výrazného zkreslení dráhy letu drony a jejich vystředění vůči naplánovanému záchytnému bodu.

Odchylka 25 cm se jeví jako dostatečně přesná hodnota pro dosažení záchytného bodu a pro splnění naplánované mise v co nejideálnějším čase. Hodnoty z provedeného experimentu jsou zapsány v Tabulka 3.1.

Tabulka 3.1 Vyhodnocení experimentu pro zjištění ideální odchylky letu dronů

odchylka [cm]	pokus 1 čas letu [min]	pokus 2 čas letu [min]	pokus 3 čas letu [min]	pokus 4 čas letu [min]	pokus 5 čas letu [min]	průměrná doba letu [min]
0	---	---	---	---	---	---
5	2:43	3:28	3:15	3:21	3:30	3:15
10	1:51	1:59	1:44	1:45	1:55	1:50
15	1:50	1:58	1:56	1:54	1:52	1:54
20	1:30	1:40	1:34	1:42	1:33	1:35
25	1:17	1:32	1:26	1:20	1:25	1:24
30	1:22	1:25	1:20	1:26	1:22	1:23
40	1:24	1:20	1:21	1:22	1:20	1:21
50	1:18	1:16	1:15	1:16	1:17	1:16
100	1:10	1:08	1:14	1:11	1:10	1:10

### 3.9 Testování softwaru v reálném řízení

Po dostatečném odsimulování programu skrze aplikaci Mission Planner bylo možné přejít k provedení experimentu letu dronů ve skutečném venkovním prostředí. Na počátku byla vytvořena letová trasa, kterou měly drony splnit, proletět záchytné body a úspěšně splnit misi. Odsimulovaný program, který byl následně použit při reálném experimentu se osvědčil. Předem naprogramované algoritmy fungují a tím pádem je možné software využít pro různé aplikace. Při testování rojového létání ve skutečném prostředí byla naplánována trasa pro 4 drony a otestování jejich reakcí na povětrnostní podmínky a testování antikolizního systému lze považovat za úspěšné viz Obrázek 3.14.

Komunikaci mezi drony a pozemní řídicí stanicí zabezpečovala Wi-Fi síť, skrze kterou pozemní řídicí stanice odesílala MAVLink rámce do dronů a ty nazpět posílaly telemetrické informace o svém letovém stavu. Vytvořená Wi-Fi síť je dostatečně silná a stabilní pro přenášení rámců z pozemní řídicí stanice do dronů a pro přenášení letových instrukcí z pozemní řídicí stanice do dronů. Provedení a naplánování dráhy letu s odchylkou 25 cm, potřebnou pro vystředění dronů vůči záchytnému bodu a s antikolizním systémem nastaveným na 1,5 m vzájemné polohy dronů, byl experiment proveden bezpečně a stabilně.

Rozdíl mezi simulací letových jednotek dronů a provedením reálného experimentu je pomalejší odezva mezi drony a pozemní řídicí stanicí. Odezva mezi zasláním požadované instrukce do dronů a následné provedení dané instrukce je sice delší než při simulaci v aplikaci Mission Planner, avšak na bezpečnost a plynulost letu dronů nemá zásadní vliv. V simulaci nebylo možné zavést a počítat s vlivem povětrnostních podmínek, které při skutečném experimentu sehrály velkou roli. Za pomoci GPS modulu a gyroskopu byly drony schopny se dostatečně udržet na pozici a splnit naplánovanou misi i při vychýlení z jejich pozice vlivem povětrnostních podmínek.



Obrázek 3.14 Využití softwaru v reálném prostředí

### 3.9.1 Specifikace použitých dronů

Při testování předem naprogramované dráhy letu byly použity drony s karbonovým rámem o velikosti 5". Karbonové konstrukce o rozměrech 5" jsou ideální pro rojové létání, jelikož jsou drony prostorově a energeticky úspornější. V další fázi práce by bylo tyto drony použít pro světelnou show. Mozek dronů tvoří řídicí jednotka Holybro Kakute F7 mini V2 s firmware Ardupilot. Tato řídicí letová jednotka je menší než konkurenční řídicí jednotky Pixhawk, které obsahují stejný firmware Ardupilot, tudíž jsou ideální pro menší konstrukce dronů při zachování stejných řídicích funkcí. K získávání GPS souřadnic byl použit GPS modul Ublox Neo-M8N, který slouží dronům k jejich koordinaci ve vzduchu a zvládnutí naplánované mise. Tento GPS modul byl využit pro svou malou velikost, snadnou a jednoduchou komunikaci a skvělý poměr cena výkon. Díky své malé velikosti a velkému výkonu byly použity motory BetaFPV 2004 1700KV, které se hodí k dané velikosti použitého rámu a zajišťují skvělou manévrovatelnost. Všechny použité komponenty jsou napájeny skrze baterii Murata VTC6 4S.

## 4. ZÁVĚR

Výsledkem práce je plnohodnotný roj dronů, který lze ovládat skrze vytvořený program v jazyce Python. Komunikace mezi drony a pozemní řídicí stanicí je realizována Wi-Fi moduly ESP8266-07 s pomocí protokolu UDP, který přenáší MAVLink rámce a řídicí pokyny do dronů.

Naplánování dráhy letu dronů probíhá vypsáním souřadnic GPS do textového souboru a jeho následné čtení v programu. Roj dronů lze ovládat jakožto jeden celek a naplánovat pro roj shodnou dráhu letu nebo lze každý jednotlivý dron ovládat a řídit separátně. Bezpečný průběh letu zajišťuje antikolizní systém, který se skládá ze dvou částí, a to z porovnávání aktuální pozice dronů v reálném čase, kdy v případě blízkosti a možné srážky se drony pozastaví, zůstanou na svých aktuálních pozicích a předejdou tak kolizi. Drony jsou však schopny s využitím porovnávání jejich letové výšky provést manévr i nad sebou. Druhá část antikolizního systému se sestává z posílání souřadnic z řídicí pozemní jednotky do letových řídicích jednotek dronů, kdy v případě neočekávaného vypnutí pozemní jednotky či neodpovídání programu se drony zastaví na posledním záhytném bodu, ke kterému se měly dostavit a vyčkají na další pokyny, tím se předejde možnému riziku ohrožení okolního prostředí a osob. Taktéž lze antikolizní systém vylepšit a drony opatřit senzory proti nárazu a tím zajistit větší plynulost letu a bezpečí okolí. Ovládání bezpilotních dronů probíhá využitím kláves osobního počítače, kdy v případě jakéhokoliv problému může operátor kdykoliv zasáhnout do programu a převzít manuální ovládání dronů.

Provedený experiment letového plánu dronů ve venkovním prostředí lze považovat za úspěšný a jen nepatrně se liší od výsledků provedených v simulačním prostředí Mission Planner. Celá letecká mise proběhla bez kolize a bez ztráty kontroly nad drony. Tím lze považovat vytvořenou komunikaci mezi pozemní řídicí stanicí a drony za dostatečně stabilní.

Roje dronů lze využít při hlídání oblasti proti nežádoucímu vniknutí nepověřených osob nebo při pátracích akcích. Díky možnosti naplánování různé trasy pro každý dron je možné zaujmout širší oblast pátrání a tím i snížit dobu potřebnou k nalezení požadovaného cíle. To vše je možné zajistit připevněním kamerového systému na drony a přenášením obrazu z dronů do pozemní řídicí jednotky a tím realizovat zabezpečení perimetru dané oblasti. Roj dronů lze využít i v civilním průmyslu jakožto ekologickou variantu ohňostroje. Světelná show, která se skládá z desítek koordinovaných dronů, je ekologicky nezávadná a mnohdy i zajímavější, než klasické ohňostroje.

## LITERATURA

- [1] Brief analysis of drone swarms communication [online]. [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8278390>
- [2] FANET: Communication, mobility models and security issues [online]. [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128618309034#fig0005>
- [3] Ardupilot [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/index.php/about>
- [4] MAVProxy [online]. [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/mavproxy/>
- [5] Swarming [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/planner/docs/swarming.html>
- [6] Setting up a Simulated Vehicle (SITL) [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: [https://dronekit-python.readthedocs.io/en/latest/develop/sitl\\_setup.html](https://dronekit-python.readthedocs.io/en/latest/develop/sitl_setup.html)
- [7] About DroneKit [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://dronekit-python.readthedocs.io/en/latest/about/overview.html>
- [8] Packet Serialization [online]. [cit. 2020-10-23]. Dostupné z: <https://mavlink.io/en/guide/serialization.html>
- [9] MAVLink Developer Guide. <https://mavlink.io/en/> [online]. [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: <https://mavlink.io/en/>
- [10] KOLÍSEK, Josef. PRECISION CONTROL OF AUTONOMOUS DRONE. <https://www.fekt.vut.cz/> [online]. [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: [https://www.fekt.vut.cz/conf/EEICT/archiv/sborniky/EEICT\\_2020\\_sbornik\\_1.pdf](https://www.fekt.vut.cz/conf/EEICT/archiv/sborniky/EEICT_2020_sbornik_1.pdf)
- [11] Drone ground control station with enhanced safety features [online]. [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8226318>
- [12] Discussion on Communication Control Method of Cluster UAV [online]. [cit. 2020-11-8]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8982657>
- [13] ESP-07 s ESP8266 [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/esp-07-s-esp8266>
- [14] Basics: ESP8266 Types and Boards [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: [https://www.letscontrolit.com/wiki/index.php/Basics:\\_ESP8266\\_Types\\_and\\_Boards](https://www.letscontrolit.com/wiki/index.php/Basics:_ESP8266_Types_and_Boards)
- [15] ESP8266 Range. <https://forum.arduino.cc> [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/t/esp8266-range/432785>
- [16] 433 MHz RF Transmitter Module [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://components101.com/433-mhz-rf-transmitter-module>
- [17] Robsense SwarmLink [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-telemetry-robsense-swarmlink.html>
- [18] RFD900 Radio Modem [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-rfd900.html>
- [19] Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300200\\_300299/30022002/03.02.01\\_30/en\\_300220\\_02v030201v.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/03.02.01_30/en_300220_02v030201v.pdf)

- [20] Radio module eXtra Long Range (XLR) + Antenna [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/product/radio-module-extra-long-range/>
- [21] SiK Radio. Px4.io [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: [https://docs.px4.io/master/en/telemetry/sik\\_radio.html](https://docs.px4.io/master/en/telemetry/sik_radio.html)
- [22] Brief analysis of drone swarms communication [online]. [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8278390>
- [23] Make your personal drone fly even farther with a 4G network connection [online]. [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: <https://wiredcraft.com/blog/drone-copter-uav-4g-network/>
- [24] 5G and drones: Enabling mission critical use cases [online]. [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: [https://www.rcrwireless.com/20161019/qualcomm\\_5g/5g-and-drones-enabling-mission-critical-use-cases](https://www.rcrwireless.com/20161019/qualcomm_5g/5g-and-drones-enabling-mission-critical-use-cases)
- [25] K. Li, N. Lu, P. Zhang, W. Ni and E. Tovar, "Poster Abstract: Multi-Drone Assisted Internet of Things Testbed Based on Bluetooth 5 Communications," 2020 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Sydney, Australia, 2020, pp. 345-346, doi: 10.1109/IPSN48710.2020.00-14.
- [26] Síťové protokoly (VII. část), Protokol UDP [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.banan.cz/serialy/sitove-protokoly/Sitove-protokoly-VII-cast-Protokol-UDP>
- [27] Dodatek: Geodetický systém WGS 84. Path.cz [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.path.cz/forum/viewtopic.php?f=4&t=19>



## SEZNAM ZKRATEK

Zkratky:

GCS	Ground Control Station
FANET	Flying Ad-Hoc Wireless Networks
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDP	User Datagram Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
OBT	Onboard Bluetooth Transceiver
SITL	Software In The Loop
GPS	Global Positioning System
Wi-Fi	Wireless Fidelity
MAVLink	Micro Air Vehicle Link
GSM	Global System for Mobile Communications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
GPRS	General Packet Radio Service
FPV	First Person View
USB	Universal Serial Bus