

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

Trackovací systém pro UAV

Bakalářská práce

Autor: Jan Mareš

Vedoucí práce: PhDr. Milan Novák, Ph.D.

České Budějovice 2017

Bibliografické údaje

Mareš J., 2017: Trackovací systém pro UAV [UAV tracking system. Bc.. Thesis, in Czech] - 76 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Předmětem bakalářské práce je realizace sledovacího systému pro bezpilotní zařízení. Teoretická část mapuje principy komunikace a určování polohy bezpilotních zařízení. Praktická část pojednává o použitých komponentech, jejich konfiguraci a následné otestování. Výsledkem práce je systém, který automaticky zaměřuje anténu na sledovaný cíl. Tento systém se používá především pro zvýšení dosahu komunikačního kanálu.

Klíčová slova

Bezpilotní zařízení, sledování, rádio, GPS, Pixhawk

Annotation

Subject of the bachelor thesis is a development of UAV tracking system. Theoretical part maps principles of communication and localization of UAV. Practical part describes used components and their configuration and testing. Result of the thesis is system that automatically points antenna towards followed target. This system is being used particularly for enhancement range of communication channel.

Key words

Unmanned Aerial Vehicle , tracking, radio, GPS, Pixhawk

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce PhDr. Milanu Novákovi, Ph.D. za podnětné rady, zapůjčené komponenty a za čas věnovaný vedení této práce. Také děkuji rodině za podporu při studiu.

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod | 1 |
| 1. Cíle | 2 |
| 2. Metodika | 3 |
| 3. Bezpilotní prostředky | 4 |
| 3.1 Klasifikace UAV | 4 |
| 4.1.1 Klasifikace dle Konstrukce | 5 |
| 4.1.2 Klasifikace dle autonomie | 7 |
| 4.1.3 Klasifikace dle technických parametrů | 8 |
| 4.2 Aplikace UAV | 8 |
| 4.2.1 Klasifikace civilních UAV | 11 |
| 4.3 Omezení pro provoz UAV v ČR | 13 |
| 4. Komunikace | 15 |
| 5.1 Pozemní operační stanice | 15 |
| 5.2 Telemetrie | 16 |
| 5.3 Prostředky komunikace | 16 |
| 5.3.1 Optické vlákno | 16 |
| 5.3.2 Mobilní telekomunikace | 17 |
| 5.3.3 Satelitní komunikace | 17 |
| 5.3.4 Rádiové modemy | 18 |
| 5. Radiová komunikace | 18 |
| 6.1 Rádiové vlny | 18 |
| 6.2 Vlastnosti rádiových vln | 19 |
| 6.3 Šíření rádiových vln | 20 |

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 6.3.1 | Přímá vlna | 20 |
| 6.3.2 | Povrchová vlna..... | 21 |
| 6.3.3 | Odražená vlna | 21 |
| 6.3.4 | Ionosférická vlna..... | 22 |
| 6.4 | Polarizace..... | 23 |
| 6.5 | Frekvence..... | 25 |
| 6.5.1 | Volná frekvenční pásma | 25 |
| 6.6 | Typy Antén | 27 |
| 6.6.1 | Všesměrové antény | 28 |
| 6.6.2 | směrové antény | 28 |
| 6.6.4 | Panelové antény | 29 |
| 6 | Navigace | 31 |
| 7.1 | GPS..... | 31 |
| 7.2 | Segmenty GPS | 32 |
| 7.2.1 | Kosmický segment..... | 33 |
| 7.2.3 | Řídící segment | 33 |
| 7.2.4 | Pozemní segment | 34 |
| 7.3 | Princip určení polohy GPS | 34 |
| 7 | Shrnutí řešerše..... | 36 |
| 8 | Návrh systému | 38 |
| 9.2 | Řídící jednotka Pixhawk..... | 40 |
| 9.3 | Rádio..... | 41 |
| 9.4 | Regulátor napětí..... | 42 |
| 9.5 | Napájecí Modul | 43 |

| | |
|--|----|
| 9.6 Přijímač RC832 | 45 |
| 9.7 Vysílač TS 832 | 47 |
| 9.8 Všesměrové antény | 47 |
| Fatshark SpiroNET 5.8GHz anténa | 48 |
| 9.9 FPV Kamera | 49 |
| 9.10 OSD modul | 50 |
| 9.10 Ostatní komponenty | 51 |
| 9.11 Mission Planner | 51 |
| 9.12 MAVLink | 52 |
| 9.12.1 Zpráva | 52 |
| 9.12.2 Struktura packetu | 53 |
| 10. Sestavení | 54 |
| 10.1 Sestavení Sledovacího systému | 54 |
| 10.2 Úprava sledovaného cíle | 57 |
| 10.3 Pozemní stanice | 57 |
| 11. Konfigurace | 58 |
| 11.1 Instalace Mission Planner | 58 |
| 11.2 Instalace firmware Antenna Tracker v1.0 | 58 |
| 11.3 Kalibrace systému | 59 |
| 11.4 Režim systému | 59 |
| 12. Testování | 60 |
| 12.1 Test sledovacího systému | 60 |
| 12.2 Test přenosu videa | 61 |
| 12.2.1 Dosah všesměrové antény | 61 |

| | |
|--|----|
| 12.2.2 Překážky při použití všesměrové antény..... | 63 |
| 12.2.3 Dosah směrové antény | 64 |
| 12.2.4 Překážky při použití směrové antény | 64 |
| 12.3 Závěr testování | 65 |
| 13. Závěr..... | 67 |
| 14. Literatura | 68 |

1. Úvod

Nezpochybnitelným trendem posledních let je dynamický vývoj v oblasti bezpilotních zařízení (angl. „unmanned aerial vehicle“, UAV). Dostatečně výkonná výpočetní technika a klesající ceny jednotlivých dílů způsobily, že se o toto technické odvětví začalo zajímat široké spektrum lidí od hobby nadšenců přes odborníky v průmyslu až po komerční sféru. Bepilotní zařízení nabízejí nepřeberné možnosti využití od průzkumu nebezpečných míst, kde tak není nutné nasazovat lidské životy, až po transport materiálu či zboží. Na rostoucí poptávku přirozeně odpovídá technologický rozvoj, který se snaží vyhovět nejrůznějším požadavkům. Důsledkem je neustálé zdokonalování schopností bezpilotních zařízení, které jsou ve stále větší míře schopné vykonávat složité úkoly.

Jednou ze základních úloh, kterými se počítačovní vědci a vývojáři zabývají, je sledování bezpilotních (angl. tracking) zařízení. Znalost o současné pozici zařízení je nezbytným předpokladem pro řešení navazujících a složitějších úloh. Jako příklad lze uvést plánování trajektorie letu pro zvolené zařízení, sledování postupu plnění mise daného zařízení či synchronizace celého hejna zařízení.

Detekce a sledování bezpilotních zařízení však nezajímá pouze jejich uživatele. Činnost zařízení může být i nežádoucí. Nezodpovědní majitelé mohou narušovat bezletový prostor a stát se tak ohrožením bezpečnosti svého okolí. Samostatnou kapitolou je pak vědomé využití zařízení k nelegální činnosti jako špehování či transport nebezpečných látek. Z těchto důvodů stoupá taktéž zájem o systémy, které dovedou detekovat bezpilotní zařízení, sledovat jej a v případě nutnosti nakonec zneškodnit.

1. Cíle

Hlavním cílem této práce je sestavení sledovacího systému pro bezpilotní prostředky. Tento systém bude na základě přijímané GPS telemetrie posílané sledovaným cílem zaměřovat anténu směrem na tento cíl. Rozšíří tak možnou vzdálenost komunikačního kanálu. Základním předpokladem tohoto systému je cenová dostupnost a snadná rozšiřitelnost oproti komerčním řešením.

S uvedeným hlavním cílem práce souvisí provedení analýzy a charakterizování pojmů:

- Bepilotní prostředek
- Komunikace s bezpilotním prostředkem
- Navigace
- Sledovací systém

Teoretická část práce charakterizuje jednotlivé skupiny a možné klasifikace bezpilotních prostředků společně s jejich aplikacemi. Dále bude provedena analýza možností zprostředkování komunikačního kanálu s důrazem na radiové signály. Předmětem poslední části jsou navigační systémy. Zde bude vysvětlen pojem navigace a princip fungování amerického systému GPS.

Praktická část práce se zabývá návrhem systému, popisem použitých komponent a postupnou konfigurací systému. Jednotlivé součástky budou charakterizovány společně s postupem sestavení. Výsledný systém bude přijímat GPS telemetrii a na základě těchto dat natáčet anténu na cíl. Ze sledovaného zařízení bude sledovací systém přijímat video zachycené kamerou.

2. Metodika

Realizaci sledovacího systému bude předcházet analýza dané problematiky. Jedná se o pojmy bezpilotní prostředky, komunikace s bezpilotními prostředky a navigační systémy.

V teoretické části bude definován pojem bezpilotní prostředek. Následně budou uvedeny jeho možné klasifikace společně s důležitými informacemi o provozování. Dále bude provedena analýza možných komunikačních metod používaných pro zprostředkování komunikačního kanálu s bezpilotním zařízením. Vzhledem k faktu, že jádrem toho systému je anténa, bude se analýza zaměřovat především na rádiovou komunikaci. Společně s pojmem komunikace s bezpilotními prostředky bude též definován pojem navigační systém. Tento systém bude pracovat s geografickou polohou sledovaného cíle. Z tohoto důvodu bude rovněž hlouběji rozebrána lokalizace pomocí systému GPS včetně elementárních principů určení polohy.

Praktická část se bude zabírat konkrétními komponenty použitými ve sledovacím systému. Sledovací systém může být vybaven velkou variací různých antén naladěných na rozdílných frekvencích. Bude potřeba zvolit anténu, která nebude podléhat rušením a zprostředkuje stabilní komunikační kanál potřebný pro přijímání dat posílaných sledovaným cílem. Systém bude řízen řídicí jednotkou, která má za úkol přijímat GPS polohu cíle a následně podle této polohy ovládat servomotory, které natočí anténu směrem k cíli. Celý systém musí mít dostatečně silné servomotory pro otáčení antény a stabilní podporu, aniž by byl systém v nějakém bodě příliš namáhán.

3. Bezpilotní prostředky

Bezpilotní prostředek (angl. Unmanned Aerial Vehicle, zkr. UAV) je zařízení, u kterého není nutná jakákoliv přítomnost posádky ve stroji. Je buď dálkově ovládáno ze země nebo se jedná o zařízení, která mají předem naprogramovaný letový plán a samostatně plní zadaný cíl. Tato zařízení se nejprve začala vyvíjet a používat pro vojenské účely. Jejich hlavní myšlenkou bylo snížit riziko ztrát na životech v nebezpečných oblastech [1]. Bezpilotní letouny se nejčastěji nasazují pro průzkum, eliminaci cílů nebo u monotónních misí, při kterých lidská posádka může ztratit koncentraci na svůj úkol.

Vývoj začal, opomeneme-li prvotní pokusy, ke konci 1. světové války. Tehdy byl vytvořen dvouplošník osazený trhavinou. Jeho navigační systém se skládal z gyroskopů a barometrů. Za první skutečné efektivní nasazení dálkově řízených strojů lze spíše považovat až německou raketu V1 z 2. světové války. Tato raketa byla odpalována ze vzduchu z platformy upevněné na letadle. Operátor poté z letadla pomocí rádiových vln raketu navigoval. Častým použitím bezpilotního letounu bylo také jako cvičný cíl. Asi nejznámějším je dvouplošník Queen Bee, který se používal v letech 1931–1947. Jednalo se o první cvičný znovu použitelný cíl. Od názvu Queen Bee (Včelí královna) se později utvořilo označení drone (trubec) pro bezpilotní letouny [3].

S postupným pokrokem ve vývoji, který následoval po 2 světové válce, se dostáváme do doby, kdy bezpilotní letouny jsou jedním z hlavních prostředků moderního bojiště. Současné technologie pokročily na takovou úroveň, že se staly dostupnější, výkonnější a celkově se snížila jejich velikost. Tím byly odbourány limity, které bránily bezpilotním prostředkům využití v civilní sféře. Pomocí senzorů a přídatných zařízení našla tato zařízení široké uplatnění v mnoha průmyslových oblastech v zemědělství či ve sportovním létání.

3.1 Klasifikace UAV

Podobně jako je tomu i u jiných technologií, tak ani bezpilotní letouny netvoří homogenní skupinu. Naopak, jejich podoba, vlastnosti a účel mohou být značně variabilní. Pro snazší

orientaci mezi jednotlivými modely lze bezpilotní letouny třídit a klasifikovat do skupin na základě řady kritérií.

Klasifikace UAV se provádí pro usnadnění volby daného zařízení pro konkrétní aplikaci. Při klasifikaci se bere zpravidla v potaz celý systém (UAS). Jedná se o dílčí podsystemy, které se podílejí na provozu UAV. V praxi bývá používáno několik klasifikací; typicky podle některých významných parametrů (hmotnost, letová hladina, výdrž atd.), podle kterých se následně jednotlivá zařízení třídí do skupin. Kritéria se často prolínají a vznikají tak rozdílné kategorie a třídy, podle toho, jakou autoritou byla vytvořena.

4.1.1 Klasifikace dle Konstrukce

Jednou z nejzákladnějších klasifikací je dělení podle konstrukce. Rozděluje bezpilotní zařízení do dvou skupin:

- 1) Zařízení s pevným křídlem
- 2) Zařízení s rotory

Typ s pevným křídlem (Obr. 1) konstrukčně vychází z letadel. Mechanika jejich letu je stejná – profil křídel vytváří za letu vztlakovou sílu. Díky tomu je snížena potřebná energie pro pohyb a zařízení je schopno delšího letu než rotorové typy. Také jsou technologicky méně náročná, protože zde není potřeba složitého vyvažování rotorů pro správný let.



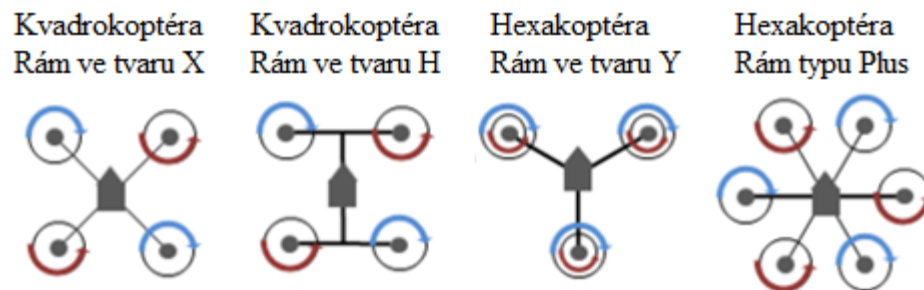
Obrázek 1, UAV s pevným křídlem [23]

Rotorové modely konstrukčně vycházejí z helikoptér. Pohybují se pomocí otáčení vrtulí na rotorech. Podle počtu rotorů je lze ještě dále dělit na helikoptéry a multikoptéry (Obr. 2). V současné době jsou nejpoužívanější multikoptéry. Právě ony tvoří v současné době nejrozšířenější skupinu pro jejich lepší ovladatelnost a modularitu. Na rozdíl od typu s pevným křídlem mají větší spotřebu energie a při ztrátě výkonu z rotorů s nimi nelze bezpečně přistát, zatímco model s pevným křídlem dokáže plachtit. Oproti tomu jsou schopny vertikálního vzletu a vznášet se na místě. Dostanou se tak do běžně nepřístupných míst a pomocí lze s nimi pořídit detailnější snímky.



Obrázek 2, Multikoptéra [54]

Multikoptéry jsou oproti vrtulníkům mechanicky jednoduché na úkor elektronické složitosti. Pro správný let je potřeba palubní počítač na vyrovnávání rychlosti jednotlivých rotorů. Multikoptéry mají více možných variant rámu a rozložení rotorů. Na spodním obrázku (Obr. 3) jsou uvedeny nejčastější typy konstrukce a rozložení rotorů.



Obrázek 3, typy rámu multikoptér

Do konstrukce lze zahrnout i typ motoru. Civilní bezpilotní zařízení jsou poháněná především elektromotory a typem konstrukce se jedná převážně o multikoptéry nebo menší modely s pevným křídlem. Vojenská bezpilotní zařízení jsou převážně modely s pevným křídlem, poháněné pístovými motory. Tento typ konstrukce s daným motorem dosahuje největší výdrže a operační vzdálenost.

4.1.2 Klasifikace dle autonomie

Jedna z výhod bezpilotních zařízení je jejich samostatnost (autonomie). Mezitím co zařízení samostatně plní předem naplánovanou misi, se operátor může zabývat jinými úkoly. Klasifikace specifikuje nulovou autonomii, tedy plně dálkově ovládané zařízení, částečnou a plnou autonomii [19]:

Dálkově ovládané zařízení je pilotováno operátorem ve všech fázích letu. Udržuje se konstantní datové spojení a po jeho přerušení dojde ke zřícení zařízení.

Částečně autonomní zařízení je schopné samostatného letu po bodech, které byly předem naplánovány. Zařízení však není schopné reagovat na náhlé překážky a nečekané situace. Je proto potřeba, aby operátor tyto situace řešil a upravoval směr letu zařízení. Za částečně autonomní lze také považovat drony, které jsou po většinu času řízeny člověkem, avšak při ztrátě spojení jsou schopny detekovat tuto událost a vrátit se zpět na místo startu.

Plně autonomní zařízení je schopno zcela samostatného pohybu a nevyžaduje žádnou interakci s operátorem. Prostřednictvím senzorů dokáže reagovat na své okolí a adaptivně měnit dráhu letu podle okamžitých podmínek. Technologicky se jedná jednoznačně o nejsložitější řešení. Zatímco dálkově ovládaná a částečně autonomní zařízení jsou již relativně dobře probádaná, plně autonomní zařízení jsou v posledních letech předmětem intenzivního výzkumu a vývoje. Při jejich nasazení totiž existuje riziko špatného vyhodnocení situace a způsobení kolize. Tím představuje potenciální nebezpečí ve veřejném prostoru. V současné době jsou plně autonomní zařízení v ČR zakázána.

4.1.3 Klasifikace dle technických parametrů

Bezpilotní zařízení lze rovněž třídit do jednotlivých kategorií na základě technických parametrů, které mohou hrát zásadní roli při výběru letounu pro konkrétní užití. Jednotlivé zařízení dále spadají do kategorií podle jejich technických parametrů. Tyto kategorie nám pomáhají správně určit aplikaci pro dané zařízení. Kategorie jsou pouze obecné, nelze očekávat stejný výkon u zatíženého a nezatíženého zařízení. Takto se může lišit délka a rychlost letu u stejného modelu. Nejčastěji se jedná tyto parametry:

- velikost
- letová hladina
- délka letu
- rychlost letu
- užité zatížení

Parametry letová hladina a délka letu se převážně týkají vojenských zařízení, která jsou schopná letět až 48 hodin a nasímat tisíce km^2 . Pokud se zaměříme na civilní typy, jsou nejpoužívanější převážně multikoptéry, kde jsme často limitováni rozměry a výdrží baterie. Délka letu je v řádech minut a vzdálenost v jednotkách kilometrů. Letová hladina je v civilní sekci kvůli bezpečnosti limitována na 300 m s nejvyšším povolením. Pravidla pro létání jsou hojně diskutována a lze se setkat s množstvím zdrojů, které tvrdí rozdílné informace. Pro létání v ČR by měl uživatel vycházet z předpisu **L2 – Pravidla létání Doplněk X** [29].

Parametry velikost a užité zatížení spolu úzce souvisí. Těžká UAV mají zpravidla více rotorů a nejvyšší výkon. Lze s nimi převážet méně rozměrný náklad (doručování balíčků), nebo pořizovat kvalitnější snímky (kamery).

4.2 Aplikace UAV

V posledních letech je trendem urychlovat nebo zjednodušovat celou řadu aplikací pomocí bezpilotních prostředků od vědeckého po průmyslové prostředí. Tomu odpovídá i vysoký nárůst

počtu civilních bezpilotních zařízení oproti předešlým rokům. Civilní zařízení z kategorie lehkých rotorových zařízení již dnes početně mnohonásobně převažují nad vojenskými. Nárůst civilních modelů byl zapříčiněn vzrůstajícím zájmem o vývoj. Širšímu rozšíření civilních zařízení v minulosti bránila především cena, velikost a nedostupnost komponent.

Jak již bylo zmíněno, největší předností bezpilotních prostředků je bezpečnost posádky. Dále jsou to především nízké náklady na provoz a výcvik. Bepilotní zařízení jsou mobilní a skladná. Následující tabulka (Tabulka 1) znázorňuje možné aplikace bezpilotních prostředků, pro civilní a vojenské aplikace [1].

Tabulka 1, Aplikace UAV [1]

| Kategorie | Aplikace |
|------------------------|---------------------------------------|
| Zemědělství | Postřik pesticidy a hnojiv |
| Zemědělství | Monitoring plodin |
| Životní prostředí | Sledování a sběr dat o počasí |
| Geologie | Průzkumy v těžko dostupných oblastech |
| Pobřežní stráž | Monitoring pobřeží |
| Zpravodajství | Panoramatické záběry |
| Letectví | Sledování leteckého provozu |
| Pozemní doprava | Monitoring dopravních sítí |
| Boj | Eliminace cílů |
| Průzkum | Průzkum neznámé oblasti |
| Vyhledávání a záchrana | Vyhledávání pohřešovaných osob |
| Dohled a ochrana | Pomáhají bezpečnostním složkám |

Věda a výzkum

Bezpilotní systémy jsou pro vědu velmi významné. Rozmanitost jejich využití pokrývá širokou škálu vědních oborů. Jsou ideální zejména pro výzkum a měření v atmosféře. Pomáhají při snímání vulkánů nebo hurikánů. Lze takto bez ohrožení života získat důležité informace.

Co se týče shromažďování dat po delší časový úsek, jsou UAV mnohem levnější a výkonnější než lidské osádky. S ohledem na jejich modulárnost a velké množství senzorů se jedná o lepší volbu s porovnáním se satelity. Práce se satelity může být dosti problematická, omezená o některé funkce a především nákladná.

Prevence a zvládnutí katastrof

Bezpilotní zařízení pomáhají předcházet a posléze pomáhat při katastrofách. Hlavně díky možnosti rychlého nasazení a pořizování snímků aktuální situace, se hodí pro pozorování a ulehčují následnou analýzu situace. Používají se při pozorování úniku ropy, lesních požárech, zemětřeseních nebo při povodních. Ve stejnou chvíli dokáží kooperovat se záchrannými složkami a pomáhat při hledání pohřešovaných osob nebo prohledávání trosek.

Ochrana klíčových infrastruktur

Další oblastí využití UAV je ochrana infrastruktury. Ta zahrnuje hlídání ropovodů, plynovodů, elektrické sítě, pozorování železniční a silniční dopravy nebo námořních cest. U některých infrastruktur je nezbytné, aby byly neustále monitorovány a zabránilo se případným nehodám [2]. UAV ulehčují kontroly především v oblastech s extrémními podmínkami jako je Rusko nebo Aljaška. Jsou levnější možností pro pozorování než satelity, které jsou drahé, méně dostupné a mají velmi omezené možnosti.

Bezpečnost

Bezpečnostní aplikace jsou především kontroly a ochrana hranic. Sledování pobřeží a zajištění bezpečnosti na velkých veřejných akcích. UAV jsou zvláště důležitá pro státní složky. Pomáhají jak policii, hasičům tak i záchranným složkám.

Ochrana životního prostředí

Ochrana životního prostředí úzce souvisí s prevencí katastrof. UAV se používají pro měření emisí nebo kontrolu úniků škodlivých látek. Dále pozorování ropných skvrn, ochrana vodných nádrží a mnoha dalších.

Komunikace

UAV lze použít i pro zprostředkování komunikace jako tzv. relay, kdy UAV slouží jako prostředník komunikace mezi dvěma body. Jedná se o náhradu satelitní komunikace.

Průzkum a boj

Hlavním úkolem bezpilotních zařízení je minimalizovat ztráty na lidských životech. Protože se využívají pro raketové údery nebo pro detailní průzkum bojiště [2].

4.2.1 Klasifikace civilních UAV

Evropský úřad pro bezpečnost leteckého provozu vydal návrh na rozdělení do tří hlavních kategorií, který obsahuje zásady pro téměř všechny kategorie provozované ve volném prostranství, a to včetně hraček a hobby modelů. Jedná se o poměrně striktní návrh, kdy prakticky každý stroj musí být registrován [28].

Specific (Zvláštní)

Vyšší kategorie bezpilotních prostředků vyžadující schválení od autorizovaných orgánů a licenci operátora.

Certified (Certifikovaná)

Jedná se především o vojenské UAV a další stroje pro profesionální využití.

Open (Otevřená)

Jde o stroje s nejnižším provozním rizikem. Za předpokladu, že se nepohybujeme v zakázaných zónách definovaných vnitrostátním leteckým úřadem, není potřeba pro let předběžného povolení.

Open se dále dělí na podkategorie A0-A3, dle parametrů uvedených v tabulce, viz Tabulka 2.

Tabulka 2, Open kategorie

| kategorie | hmotnost | napětí baterie | max. výška | další podmínky |
|-----------|----------|-------------------|------------|---|
| A0 | do 250 g | 24 V | 50m | max. rychlost 54 Km/h |
| A1 | do 25 kg | 24 V | 50m | |
| A2 | do 25 kg | 48 V | 50m | Fail-save funkce, lokalita s GPS, vyškolený operátor |
| A3 | Do 25 kg | 48 V | 150m | min. věk 15 let, zdvojení navigačních systémů |

4.3 Omezení pro provoz UAV v ČR

Bezpilotní zařízení představují mnohá bezpečnostní rizika. Tím prvním, které každého napadne, je přímý kontakt letícího stroje s člověkem či zvířetem. Zejména větší a výkonnější modely mohou vyvinout značnou kinetickou energii, která se při případné srážce uvolní. Samostatnou kapitolou jsou potom rychle rotující vrtule, které mohou vážně ublížit na zdraví i v případě menších modelů.

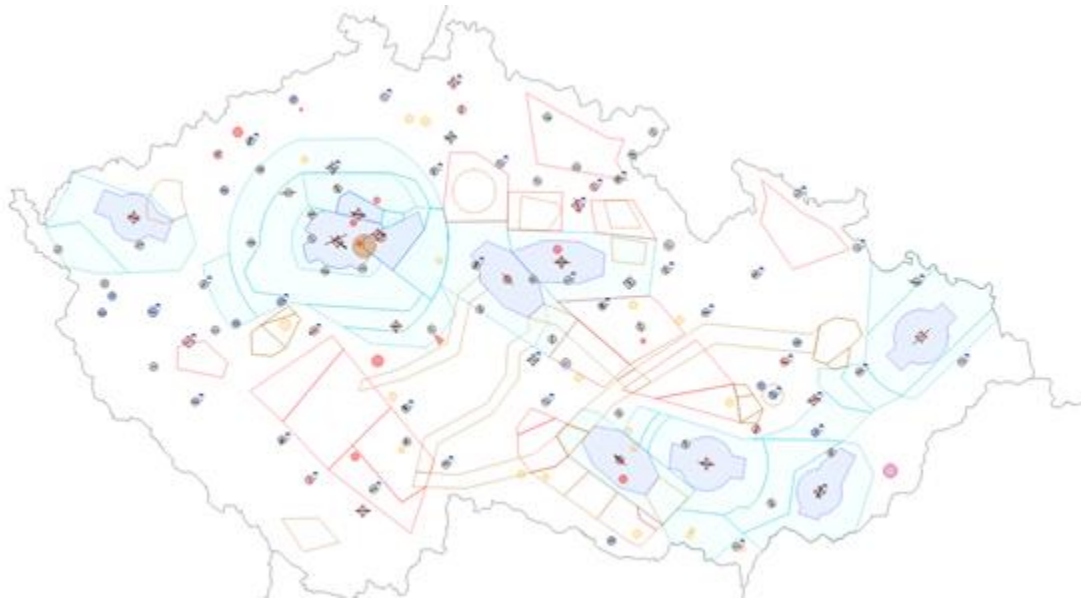
Úřad pro civilní letectví vydal předpisy pro provoz bezpilotních prostředků, které jsou popsány v předpisu **L2 – Pravidla létání Doplněk X** [29]. Při pořízení bezpilotního zařízení je nejprve nutné si uvědomit, do jaké spadá kategorie. Pokud má člověk létání pouze jako koníček a jeho zařízení spadá do nejnižší kategorie, pak nemusí vlastnit žádné povolení. Jakmile je bezpilotní zařízení používáno pro komerční účely nebo přesahuje hmotnost 20 kg, je nutná evidence zařízení a pořízení povolení k leteckým činnostem s bezpilotními letadly dle § 52 *zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví ve znění pozdějších předpisů*. Nelegální provoz bezpilotních prostředků může být chápán jako neoprávněné podnikání s trestní sazbou až 8 let. Úřad pro civilní letectví může udělit pokutu za ilegální létání až ve výši 5 000 000 Kč [30].

Při provozu bezpilotního letounu je nutné dodržovat bezpečné vzdálenosti (50 m/100 m/150 m) od osob a obydlených oblastí při všech fázích letu. Vzdálenosti jsou škálované podle hmotnosti bezpilotního zařízení (<0,91 Kg, 0,91 Kg – 20 Kg, >20 Kg). Vertikálně mohou bezpilotní zařízení opět podle váhy do výšky 100 m pro lehká zařízení (do 0,91 kg) nebo 300 m pro těžší zařízení (nad 0,91 Kg). Bez ohledu na možnost zařízení, nelze letět dále než 1500 m horizontálně a 300 m vertikálně viz. Tabulka 3 [25].

Tabulka 3, povolené vzdálenosti

| Hmotnost zařízení | < 0,91 Kg | 0,91 Kg- 7 Kg | 7 Kg – 20 Kg | > 20 Kg |
|-----------------------------|-----------|---------------|--------------|---------|
| Vertikální vzdálenost | 100 m | 300 m | 300 m | 300 m |
| Horizontální vzdálenost | 1500 m | 1500 m | 1500 m | 1500 m |
| Bezpečná vzdálenost od osob | 50 m | 100 m | 150 m | 150 m |

Před letem je důležitá znalost prostředí, ve kterém uživatel létá. Informace o oblastech, ve kterých lze létat, nalezneme na letecké mapě na webovém portále AisView [24] (Obr. 3). Veškeré nutné informace o provozu bezpilotních letounů jsou uvedené v příloze č.1.



Obrázek 3, Letecká mapa AisView [24]

4. Komunikace

Předpokladem pro bezpečnou integraci bezpilotního zařízení do letového provozu je spolehlivé a bezpečné ovládání zařízení. To zahrnuje veškeré technické prostředky, které umožňují obousměrný datový přenos mezi zařízením s příslušnou pozemní operační stanicí [4]. Bzpilotní systém tvoří následující komponenty:

- Pozemní řídicí stanice (GCS), pomocí které je možné ovládat UAV a sledovat jeho aktuální stav.
- Komunikační kanál (nejčastěji pomocí rádia).
- Bzpilotní zařízení.
- Lze uvažovat i o čtvrté složce, užité zatížení.

5.1 Pozemní operační stanice

Operační stanice slouží pro datové spojení s UAV. Prostřednictvím stanice posíláme pokyny k letu nebo sledujeme aktuální stav zařízení a data pořízená senzory. Jedná se o jednu ze tří hlavních částí bezpilotního systému.

Spolehlivá a stabilní komunikace je vyžadována především u dálkově ovládaných nebo částečně autonomních zařízení. Pokud zařízení disponuje vyšší autonomií, řídicí signály obsahují pouze úkoly k misi, kterou zařízení aktuálně vykonává. Jedná se např. o body, které musí zařízení proletět. Samotný let zvládá zařízení samo a není nutné jeho trajektorii opravovat.

Na datové spojení jsou kladeny následující požadavky [4]:

- Výkonnost – dostupnost, integrita, stabilita, doba přenosu
- Dostupnost frekvenčního spektra
- Bezpečnost přenášených informací

Komunikační kanál může být buďto simplexní nebo duplexní. Pomocí simplexního kanálu pouze posíláme data UAV, např. jaké body má proletět, ale žádná data nepřijímáme. Pomocí

duplexního kanálu je možno přijímat dodatečné informace, jako jsou telemetrie nebo nasnímaná data (fotky, video).

Komunikační kanál lze zprostředkovat za přímé i nepřímé viditelnosti. Za přímé viditelnosti je pozemní stanice přímo spojená s cílem. Za nepřímé viditelnosti je v komunikačním kanálu přítomen prostředník, který předává signály. Může to být například satelit nebo jiné bezpilotní zařízení. Komunikace nemusí být pouze mezi zařízením a pozemní stanicí, ale i přímo mezi více zařízeními. Takto lze například koordinovat hejno zařízení, která spolu spolupracují. Snižují se tak rizika kolize.

5.2 Telemetrie

Důležitým pojmem v oblasti bezpilotních zařízení je telemetrie. Jedná se o automatické měření a bezdrátový přenos dat. Tato data jsou získávána z odpovídajících senzorů na přístroji. Lze přijímat informace o napětí baterie, síle signálu, vzdálenosti, výšce, rychlosti oproti zemi, náklonu atd. Základním způsobem přenášení telemetrických dat je pomocí rádiového modemu.

5.3 Prostředky komunikace

Hlavním důvodem sledování bezpilotního zařízení je rozšíření dosahu komunikačního kanálu a zajištění co největší stability. To je zejména důležité pro tzv. FPV (First Person View), tedy řízení z pohledu první osoby. Operátor se plně soustředí na pilotáž a potřebuje, aby se anténa sama zaměřovala a udržovala tak konstantní spojení. Nicméně FPV bez další osoby, která fyzicky sleduje zařízení není v ČR povolena. Ke zprostředkování komunikace slouží více metod, které jsou popsány v následujících sekcích.

5.3.1 Optické vlákno

Spojení pomocí optického vlákna je navazováno za přímé viditelnosti. Informace se přenáší pomocí modulovaného světla. Tuto technologii limituje zásadní nevýhoda – pro správnou a

stabilní komunikaci je nutno sledovat laserovým paprskem přijímač na bezpilotním zařízení. Pokud jsme ale schopni tuto podmínku splnit, lze dosáhnout propustnosti desítek Gbps na velké vzdálenosti.

Jednou ze zásadních nevýhod je také závislost na počasí. Například déšť může pohlcovat nebo rozptylovat paprsky, což destabilizuje komunikaci. Na rozdíl od rádia je optické vlákno energeticky méně náročné a je těžké komunikaci odposlouchávat. Optické vlákno si zachovává všechny své výhody jako je imunita proti EMI a RFI [2].

5.3.2 Mobilní telekomunikace

Mobilní sítě poskytují vysokorychlostní připojení v bezdrátové mobilní síti. Topologie sítě je celulární. Síť je distribuovaná pomocí buněk. Každá buňka má vlastní pevný vysílač, který vysílá na rozdílné frekvenci než jeho sousedé, aby se zabránilo interferenci. Společně tyto buňky poskytují pokrytí pro rozlehlou geografickou oblast.

Standart LTE (4G) poskytuje rychlost stahování až 100 Mbps a nahrávání 50 Mbps za ideálních podmínek. Konkrétnější hodnoty jsou závislé na kvalitě signálů a výpočetní síly komunikačních jednotek. Kromě spolehlivého datového spojení disponuje LTE také velmi malými rozměry komunikační jednotky. Hardwarově je LTE levné řešení, ale je nutné počítat s vyššími náklady za datové služby. Nevýhodou této technologie je horší pokrytí signálem v nezabydlených a v odlehlých oblastech [2].

5.3.3 Satelitní komunikace

Pokud se zařízení nachází za vzdáleností možné přímé komunikace, lze využít satelitní spojení jako prostředníka komunikace. Komerční satelitní síť poskytuje dobré pokrytí. Pro spolehlivé připojení musí být satelit k dispozici po celou dobu připojení. Pro satelitní spojení v oblasti polárních kruhů je celé spojení složitější a je pro to nutno využít speciální satelity [2]. Největší nevýhoda tohoto řešení je vysoká latence a velikost potřebného vybavení pro komunikaci. To znemožňuje toto spojení zprostředkovat na malých UAV.

5.3.4 Rádiové modemy

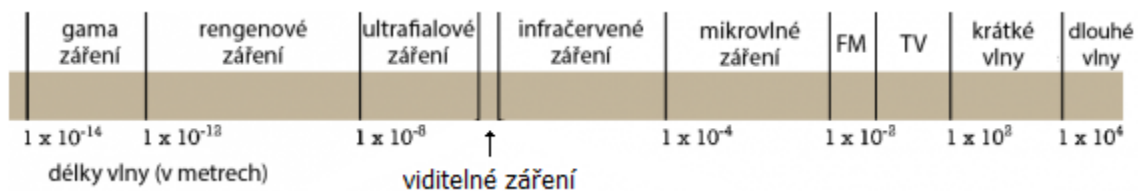
Rádiové modemy se používají pro spojení za přímé viditelnosti. Poskytují stabilní kanál s šířkou pásma v řádu až Mbps a dosahem několika km. Komunikační kanál je náchylný na okolní rušení a útlum. Kvalita signálu je také značně ovlivněna překážkami mezi pozemní stanicí a UAV. Rádiové modemy lze vylepšit výměnou antény a zlepšit tak kvalitu přenosu a příjem signálu. Výhodou tohoto systému je nízká latence a pořizovací cena. Rádiový modem je také malý a lehký, tudíž lze osadit na menší zařízení [2]. Současně se jedná o nejpoužívanější komunikační spojení pro bezpilotní prostředky. Největší nevýhodou tohoto řešení je malý rozsah, který záleží na frekvenci a výkonu antény [3].

5 Radiová komunikace

Sledovací systém, který je předmětem praktické části této bakalářské práce, pracuje na principu rádiové komunikace. Tato kapitola pojednává o důležitých vlastnostech elektromagnetického vlnění a problematice šíření těchto vln, kterou je vhodné znát pro provoz sledovací antény.

6.1 Rádiové vlny

Rádiové vlny patří do spektra elektromagnetického záření, které mimo jiné zahrnuje mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření, rentgenové a gama paprsky (Obr. 4). Všechna výše zmíněná záření se šíří rychlostí světla. Jediným rozdílem mezi nimi je jejich vlnová délka (vzdálenost, kterou vlna urazí za dobu jedné periody). To přímo souvisí s energií, kterou vlna nese. Čím kratší vlnová délka, tím je energie vyšší [38].



Obrázek 4, Elektromagnetické spektrum [56]

Celá oblast elektromagnetického záření využitelná pro vysílání a příjem začíná kolem 30 kHz (vlnová délka 10 km). Její horní mezní kmitočet se s vývojem stále zvyšuje. Polarizace rádiových vln určuje směr elektrické složky pole. Většina antén vyzařuje vlny, které jsou polarizované ve směru délky kovového vyzařujícího prvku. Běžně se využívají kmitočty v řádu stovek MHz až jednotek GHz s vlnovou délkou řádově několika milimetrů.

6.2 Vlastnosti rádiových vln

Odraz – Při dopadu rádiové vlny na pevný podklad dochází k jejímu odrazu. Směr odražené vlny se řídí zákonem odrazu. Nejvíce energie vlna ztratí při odrazu o předmět blízko vysílače nebo přijímače signálu [13].

Absorpce – Část energie elektromagnetického vlnění se mění na jiné formy energie (např. teplo), čímž vznikají ztráty a vlnění se zeslabuje. V některých prostředích je pohlcování větší, v jiných se téměř neprojevuje [13].

Ohyb – Vlnění má tu vlastnost, že se dovede „ohnout“ kolem překážky. Pokračuje tak v šíření i za překážkou. K tomu dochází tehdy, když je vlnová délka vlnění alespoň srovnatelná nebo větší než rozměr překážky.

Lom – Když vlnění přechází z jednoho prostředí do druhého, může na jejich rozhraní změnit směr šíření. Změna směru přitom závisí na rychlostech šíření vlnění v těch dvou prostředích.

Útlum – Jedná se o rozptyl elektromagnetické vlny ve volném prostoru.

Interference – Jedná se o vzájemné ovlivňování elektromagnetických vln. Nejčastěji k tomuto jevu dochází vlivem odrazu vlny od zemského povrchu, kdy k přijímači dorazí vyslaná a odražená vlna ve stejný čas. Interference především způsobuje poruchy příjmu signálu.

6.3 Šíření rádiových vln

Šíření rádiových vln je stejné jako šíření světla. Atmosférický tlak, vodní páry a další vlivy mají mnohem větší váhu při šíření mikrovlnných vln než světlo. Ve volném prostoru se rádiové vlny šíří všemi směry rychlostí světla. Ve vodivém prostředí nastává útlum. Platí zde přímá úměra – rádiové vlny jsou více tlumeny, čím vyšší mají frekvenci. Pokud vlna narazí na dvě odlišně vodivá prostředí, nastává odraz nebo lom vlny. Pokud vlna přechází přes přírodní nebo jinou překážku a její vlnová délka je větší, část energie mění směr a nastává ohyb vlny [15].

Šíření probíhá zpravidla v zemské atmosféře, která je rozdělena do vrstev. Každá z vrstev má rozdílné vlastnosti pro šíření elektromagnetických vln [14].

- První vrstva začíná u zemského povrchu a sahá do výše 10 km (troposféra).
- Druhá vrstva začíná ve výšce 10 km a sahá až do 50 km (stratosféra).
- Od 50 km do 500 km se rozpíná ionosféra. Svůj název má od ionizovaných molekul v atmosféře vlivem slunečního záření.

Existují dva základní způsoby šíření rádiových vln. Jedním ze způsobů je pozemní vlnou přímo od vysílače k přijímači. Tyto vlny mohou být buďto přímé, povrchové, nebo odražené. Vlny jsou v tomto případě ovlivňovány především terénem a atmosférou, protože zemský povrch je vodivý, záření se o něj odráží [10]. Na druhé straně jsou vlny, které se odrážejí v ionosféře zpět k zemskému povrchu [38].

6.3.1 Přímá vlna

Přímá vlna putuje přímo z vysílače na přijímač [11]. Přímé vlny jsou omezené přímým dohledem na cíl a vzdáleností mezi vysílací a přijímací anténou. Vlna se cestou odráží, ohýbá a také se nedostane za horizont. Prodloužit dosah signálu lze zvýšit postavením antény do větší výšky [38].



Obrázek 5, Přímá vlna

6.3.2 Povrchová vlna

Sleduje a ohýbá se podle zemského povrchu na hranici dvou elektricky odlišných prostředí [11].



Obrázek 6, Povrchová vlna

6.3.3 Odražená vlna

Přijímač zachytí vlnu až poté, co byla odrazena od zemského povrchu. Může nastat rušení, pokud odražená vlna a přímá vlna dorazí ve stejný čas a jsou o 180° na sebe fázově posunuté [38]. K odrazům dochází vlivem změny hustoty vzduchu s přibývajícím výškou a tím i rozdílným indexem lomu. Na rozdíl od ohybu je odražená vlna většinou pohlcena z důvodů malé šance na odražení od elektricky vodivého povrchu [11].



Obrázek 7, Odražená vlna

6.3.4 Ionosférická vlna

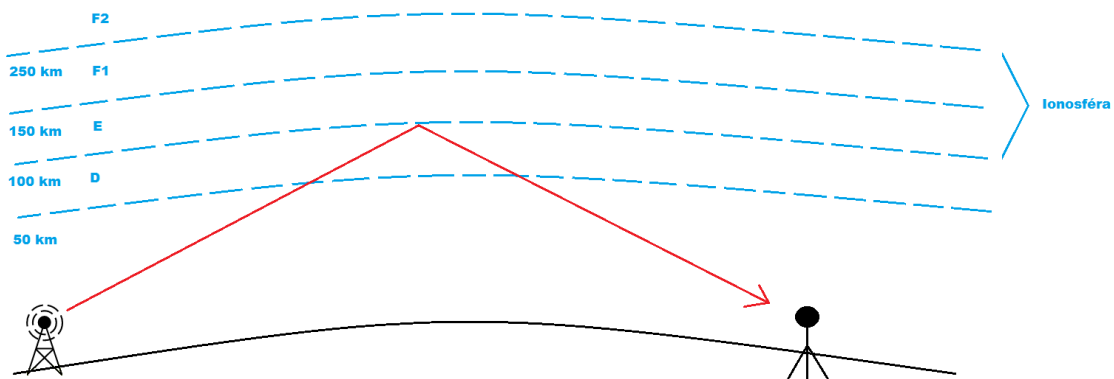
Ionosféra má 4 vrstvy rozdělené podle molekulární hustoty. Tyto vrstvy se nazývají D, E, F1 a F2.

Vlnění směřuje z antény šikmo vzhůru do prostředí více či méně elektricky vodivého ve vzdálenosti přibližně 100 km od povrchu Země. Vlnění o vhodné frekvenci je odraženo zpět k povrchu země [11]. Působením slunečního záření se mění stav ionosféry a tím působením jednotlivých vrstev na radiové vlny, které je odlišné ve dne a v noci. Stupeň ionizace působí na schopnost odrážet elektromagnetické vlnění. Na obrázku níže je dále přibližné rozdělení atmosféry ve dne.

Vrstva F vzniká ve výškách od 150 do 300 km. Ve dne se rozděluje na dvě části F1 a F2. V noci zůstává jednolitá vrstva F ve výšce nad 250 km a slouží ke spojům na dlouhé vzdálenosti (nad 2500 km) [16]. Vrstva F2 zůstává použitelná pro komunikaci na dlouhou vzdálenost i vzhledem k faktu, že přes den kolísá její míra ionizace.

Vrstva E Vzniká ve výškách 90 až 130 km. Je velmi závislá na denním chodu Slunce, a je tudíž nestabilní pro pravidelné vysílání. Používá se především pro dlouhé vlny o vzdálenosti spoje do 2 400 km [38].

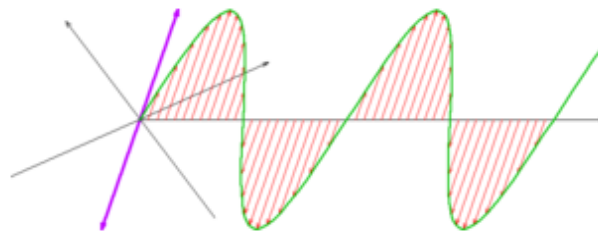
Vrstva D vzniká ve výšce 50 až 90 km pouze ve dne. Po západu Slunce okamžitě zaniká. Odráží především dlouhé vlny, ostatní jsou průchodem touto vrstvou zeslabovány. Po jejím zániku se dosah dlouhovlnných a středovlnných vysílačů výrazně zvýší [38].



Obrázek 8, Prostorová vlna

6.4 Polarizace

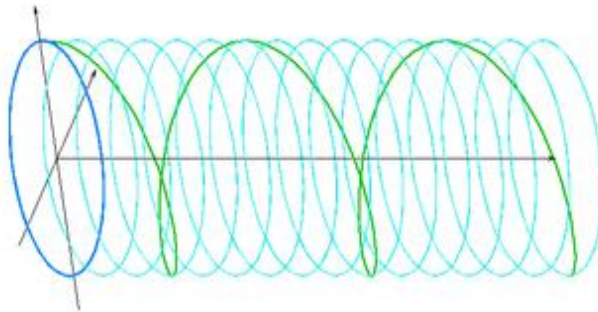
Polarizace určuje směr siločar elektrického pole (Obr. 9). V případě, že jsou siločáry v pravém úhlu k zemskému povrchu, hovoříme o vertikálně polarizované vlně. Pokud jsou siločáry vodorovně k zemskému povrchu, jedná se o horizontální vlnovou polarizaci. Vertikální antény přijímají pouze vertikálně polarizované a vlny a horizontální pouze horizontálně polarizované vlny [38].



Obrázek 9, polarizace [26]

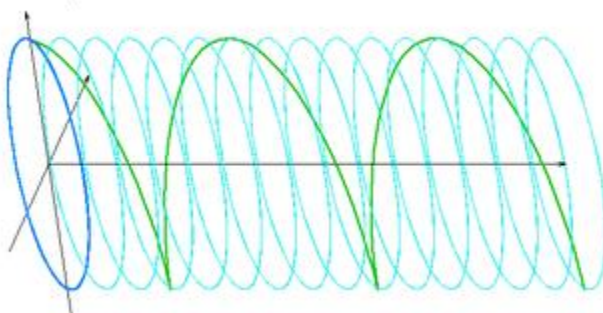
Při nízkých a středních frekvencích se často využívá pozemní vlna. Aby bylo docíleno co nejlepšího signálu a nejmenších ztrát, je nutné použít vertikální polarizaci. Zemský povrch je dobrý vodič, proto jsou horizontální vlny na nízké frekvenci tlumeny [38].

Při vyšších frekvencích a použití ionosférické vlny, je rozdíl mezi vertikální a horizontální polarizací malý. Poté co vlna odražená od ionosférické vrstvy dorazí k přijímači elipticky polarizovaná (jejich výsledný vektor vykresluje elipsu (Obr. 10). Proto může být přijímací anténa namontována vertikálně nebo horizontálně. Nejpoužívanější jsou v tomto případě horizontální antény, protože pokrývají širší úhel a mají lepší směrové vlastnosti [38].



Obrázek 10, eliptická polarizace [26]

Jestliže signál rotuje kolem osy, hovoříme o kruhové polarizaci (Obr. 11). U kruhové polarizace se signál šíří oběma rovinami. Jeho charakteristika připomíná spirálu. Podle směru otáčení se dělí na pravotočivé nebo levotočivé. Směr šíření je dané konstrukčním řešením. Kruhově polarizované antény jsou navíc odolné proti rušení odraženého signálu. Protože ten po odražení mění svůj směr rotace a poté, co se na anténě setkají dva různě polarizované signály, jeden je potlačen a druhý je přijat [27]. Velkou nevýhodou těchto antén je vysoká cena a z toho vyplývající horší dostupnost.



Obrázek 11, Kruhová polarizace [26]

6.5 Frekvence

Frekvence je rychlost, za kterou se vykoná perioda střídavého proudu. Napětí se dostane z nuly do maxima a zpět do nuly, poté do minima a zpět do nuly. Základní jednotkou jsou hertzi (Hz), 1 Hz je jeden vykonaný cyklus za 1 sekundu [37].

Frekvenční spektrum je rozděleno na jednotlivá frekvenční pásma, která však nelze libovolně používat. Přidělování pásem jejich účelům podléhá Českému telekomunikačnímu úřadu, který rozdělení popisuje v dokumentu **Plán přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka)** [20].

6.5.1 Volná frekvenční pásma

Využívání jednotlivých frekvenčních pásem je stanoveno ve všeobecných oprávněních Českého telekomunikačního úřadu (ČTÚ). V těchto oprávněních jsou stanovené podmínky pro využívání těchto pásem. Konkrétně se jedná o **všeobecném oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3** [54].

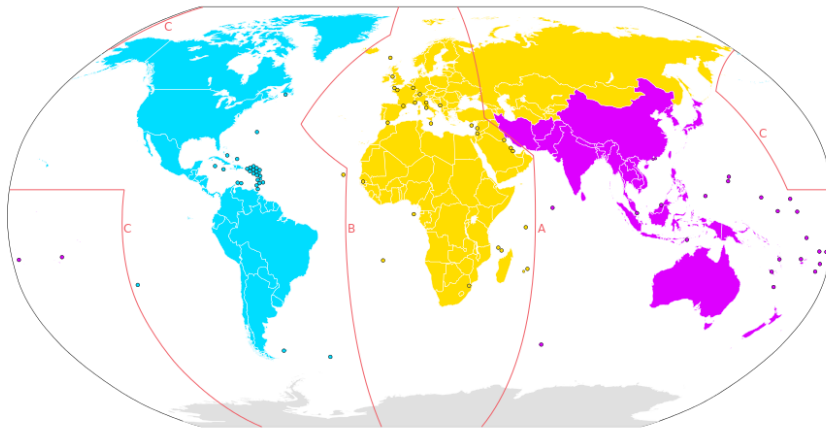
Pro provozování zařízení v jiném než volném pásmu je nezbytná licence vydaná ČTÚ. Pro běžného uživatele je tato licence obtížně dostupná a velice nákladná. Nicméně je mu dovoleno využívat volné frekvenční pásmo, které nepodléhá licenčním poplatkům ČTÚ.

Sledovací anténa pro účely této práce může pracovat na frekvenci 433 MHz nebo 2.4 GHz, spadá tak do kategorie „zařízení krátkého dosahu“. Provoz je upraven článkem 3 dokumentu **všeobecné oprávnění č. VO-R/10/04.2012-7 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu**. Dokument vymezuje podmínky pro „nespecifikované stanice sloužící zejména pro telemetrii, dálkové ovládání, signalizaci a přenos poplachových informací“ [9]. Nejdůležitější frekvence jsou dále rozepsány v Tabulce 4.

Pro příjem telemetrických dat se v Evropě využívá nejčastěji pásmo 433 MHz. Nicméně lze ji také posílat v pásmu 2.4 GHz. Pro toto pásmo nabízí trh širší výběr komponent, které jsou také cenově dostupnější. Nevýhodou pásma 2,4 GHz může být zahlcení v městských oblastech, protože na této frekvenci pracují sítě WI-FI. Vzhledem k tomu, že bezpilotní zařízení nesmějí

létat v blízkosti obydlených oblastí, není tento problém tak podstatný. Avšak RC ovladače pracují na frekvenci 2,4 GHz, s tímto faktem je nutné počítat.

Pokud pořizujeme součástky na mezinárodním trhu lze objednat rádia v pásmu 915 MHz určené pro Region 2 (Obr. 12). Vysílat na této frekvenci je v Evropě zakázané.



Obrázek 12, Mapa regionů – Modrá region 2, žlutá region 1, fialová region 3 [32]

Tabulka 4, Nejpoužívanější frekvence

| frekvence | výhody | nevýhody |
|----------------------|--|---|
| 433,050 - 434,79 MHz | malé zkreslení méně náchylné na počasí | nelze vysílat kvalitní video |
| 900 MHz | umožňuje vysílat video dostupnost a cena komponent | interference v obydlených oblastech v ČR zakázáno |
| 2400 - 2483.5 MHz | umožňuje vysílat video dostupnost a cena komponent | interference v obydlených oblastech ovlivněno počasím potřeba přímé viditelnosti na cíl |
| 5725 – 5875 MHz | umožňuje vysílat video rozměry antény pásmo není tak zatížené jako 2.4 GHz | slabý výkon v FM modu cena komponent ovlivněno počasím nutnost přímé viditelnosti na cíl |

6.6 Typy Antén

Antény slouží k vysílání a přijímání elektromagnetického záření a jsou tak klíčovým prvkem pro správnou funkci sledovacího systému. Při výběru antény bereme v potaz následující:

- Zisk
- Polarizaci
- Směrovou charakteristiku

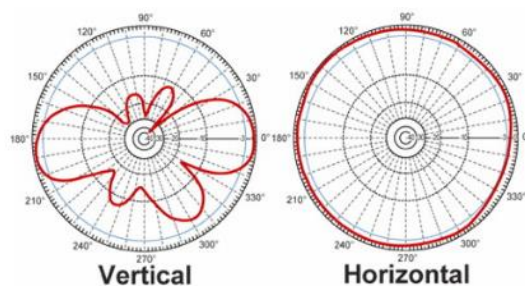
Zisk – Popisuje vyzařovaný výkon antény a zpravidla se udává na logaritmické stupnici v decibelech [dB]. Je definován jako o poměr intenzity vyzařování antény k intenzitě vyzařování izotropní antény (ideální všesměrová neexistující anténa vyzařující všemi směry stejně bez ztrát, která má zisk 0 dBi). Zisk přímo souvisí se směrovostí antény. Zpravidla antény s vyšším ziskem jsou směrové a s nízkým ziskem všesměrové.

Směrová charakteristika – Míra šíření výkonu v určitém směru, horizontálně i vertikálně.

Polarizace – Antény se dělí na kruhově a lineárně polarizované. Každá typ má své výhody a nevýhody a používá se k rozdílným účelům. Při výběru antény musíme brát v úvahu její výkon, který je omezen ČTÚ.

6.6.1 Všesměrové antény

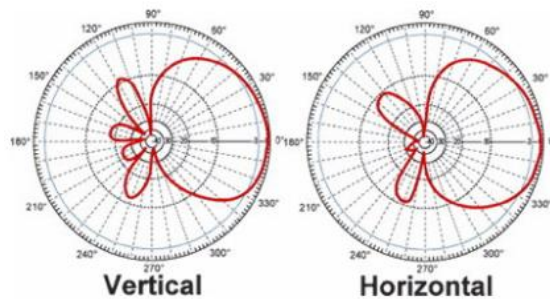
Signál se šíří všemi směry stejně v úhlu 360° . Nejčastěji jsou tyto antény vertikálně polarizované. Polarizace je dána konstrukčním řešením a při změně polohy antény zůstává polarizace stejná. Anténu není nutné směřovat na cíl, ale nemají takový rozsah jako směrové antény. Grafické znázornění je anuloid. Po okrajích je signál konstantní a nejsilnější. S přibývajícím výškou se bude snižovat a přímo nad nebo pod anténou není signál žádný.



Obrázek 13, Vyzářovací Charakteristika všesměrové antény [27]

6.6.2 směrové antény

Směrová anténa soustředí signál pouze jedním směrem. Takové antény mají větší zisk na úkor užšího paprsku. Je nutné jejich přesné směřování na zvolený cíl [39].



Obrázek 14, Vyzařovací Charakteristika směrové antény [27]

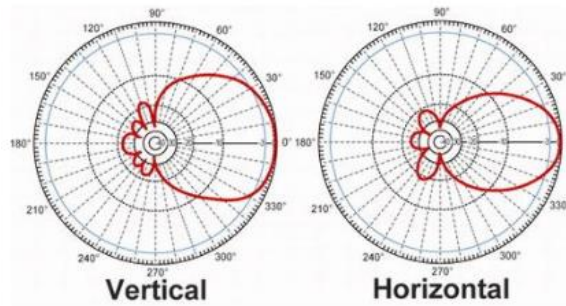
6.6.3 Yagi antény

Konstrukci antény tvoří dipól, reflektor a direktory. Reflektor je umístěn na zadní části antény a slouží ke snížení výkonu za anténou a direktory se nacházejí v přední části antény a slouží ke zvýšení výkonu [38]. Tyto antény se v telemetrii vyskytují nejčastěji v pásmu 433 MHz. Mají také větší rozměry než panelové, které jsou nejčastější možností v pásmu 2,4 GHz.

6.6.4 Panelové antény

Panelové antény jsou na trhu jedním z nejlevnějších a nejdostupnějších řešení, obzvláště v nejpoužívanějších frekvencích 2,4 GHz. Základ panelové antény tvoří plech ve tvaru antény, nejčastěji čtverec nebo obdélník. Před plechovým základem je umístěna PCB deska s vyleptaným zářičem. Podle způsobu instalace má anténa buďto vertikální nebo horizontální polarizaci. Tyto antény se také vyznačují malými rozměry, proto se hodí např. pro instalaci na sledovací systém.

Panelové antény mají dobrý signál ve směru osy antény. Signál nad anténou a po jejím boku se ztrácí. Nejčastěji mají tyto antény zisk 9 dBi nebo výkonnější až 14 dBi. Čím bude mít anténa větší zisk, tím bude více směrová a bude potřeba přesnějšího zaměření na cíl.



Obrázek 15, Vyzařovací Charakteristika panelové antény [27]

6 Navigace

Navigace je definována jako věda o přesunu věcí nebo osob z jednoho místa na druhé [33]. S určitým druhem navigace se setkáváme každý den. Pro člověka to znamená orientace pomocí zraku nebo pomocí různých orientačních bodů. Ve známém prostředí se tak dokáže orientovat a najít cíl.

Nejpoužívanější způsob navigace, kromě toho přirozeného, je skrze satelitní systémy. Pomocí těchto satelitů lze určit geografická pozice a navigace přijímače téměř kdekoli na světě. Pro získání přesnějších údajů o aktuální poloze slouží radionavigační zařízení, které na základě dat přijímaných z družic dokáže určit polohu s přesností na desítky až jednotky metrů. V současné době z globálních navigačních systémů, které jsou v činnosti, jsou nejznámější následující implementace: NAVSTAR GPS (USA), GLONASS (Rusko) a GALILEO (EU). GALILEO je společný projekt států Evropské unie a má přinést nezávislost na americkém navigačním systému GPS, případně ruském systému GLONASS. Mimo jiné existují další systémy jako BeiDou (Čína), IRNSS (Indie) nebo QZSS (Japonsko).

7.1 GPS

Systém GPS, celým názvem NAVSTAR GPS (NAVigation Signal Timing And Ranging Global Positioning System), poskytuje po celém světě nepřetržité trojrozměrné určování polohy, pokud uživatel disponuje patřičným vybavením. Nejčastěji používanými funkcemi GPS jsou [34]:

- Stanovení směru a vzdálenosti mezi dvěma body.
- Přesné měření času.
- Navádění po určené trase.

Celý systém GPS se skládá z 24 satelitů na 6 oběžných drahách a pozemních stanic rozmístěných po celém světě, které mají za úkol monitorovat a udržovat satelity aktivní. GPS dokáže poskytovat služby neomezenému množství uživatelů, protože uživatelské přijímače

pracují pasivně. Pro určení vzdálenosti mezi družicí a anténou přijímače se využívá měření doby šíření elektromagnetického vlnění [22]. Satelitní vysílání je vztaženo na velice přesné atomové hodiny. Satelity vysílají kódy a navigační data na různých kanálech využívajíc metodu code division multiple access (CDMA), což znamená přenos více signálů po jednom sdíleném kanálu, kde se signály rozlišují rozdílným kódováním. Kanály se nazývají L1 (1,575.42 MHz) a L2 (1,227.6 MHz). K těmto dvěma přibudou nové, které umožní kooperovat s jinými navigačními systémy, přesnější určení polohy pro civilní sektor nebo přesné řízení letového provozu [36].

Frekvence jsou modulovány pseudonáhodnými (PRN) kódy. Jedná se o sekvence nul a jedniček, které umožňují stanovit čas, za jaký se signál dostane ze satelitu k přijímači. Tyto kódy také slouží k identifikaci jednotlivých satelitů. Jedná se o kódy hrubé akvizice (coarse/acquisition, C/A), nebo precizní (precision, P). Na základě těchto kódů lze také identifikovat konkrétní satelit.

GPS poskytuje navigaci separátně pro civilní neautorizované uživatele a pro autorizované, zpravidla armádní složky USA, jejich spojence v organizaci NATO. Nazývají se Standard Positioning Service (SPS) a Precise Positioning Service (PPS). Přirozeně je určení polohy pro autorizované uživatele přesnější než pro neautorizované. Civilní určování polohy je ale i tak velmi přesné, proto se přistoupilo na záměrně degradování přesnosti a v některých oblastech (např. v oblastech vojenských operací) k úplnému vypnutí, aby nemohla být zneužita nepřítelem.

7.2 Segmenty GPS

Celý systém GPS se dělí do tří základních segmentů, které oddělují navigační družice od operačních stanic pro řízení systému a koncových uživatelů. Díky neustálé modernizaci jsou jednotlivé segmenty proměnlivé. Družice nemají dlouhou životnost, proto se počet a typ družic různí na základě jejich technického stavu. Nutnost obměňování techniky se také dotýká i koncových uživatelů, protože se stále vyvíjí používané standardy, a je tak nutné pořizovat nová zařízení.

7.2.1 Kosmický segment

Jedná se o soustavu družic obíhajících kolem Země. Vzhledem k tomu, že systém je obměňován průběžně, nachází se na oběžné dráze současně více generací [36]. Družice neustále vysílají pseudonáhodné PRN kódy, pomocí kterých se provádí měření a určování polohy [21]. Společně s PRN kódy se vysílá navigační zpráva obsahující telemetrii, dráhu družice a korekční data. Signály vysílané družicemi uživatelé pasivně přijímají. Každá družice je vybavena přijímačem, vysílačem, atomovými hodinami a dalšími komponentami nutnými pro správný běh celého systému.

7.2.2 PRN kódy

C/A – Je modulován na nosné vlně L1 a není šifrovaný. Jeho příjem je umožněn neautorizovaným uživatelům. Jeho přesnost je záměrně omezena a pohybuje se v řádech jednotek metrů.

P(Y) - Je určen pouze pro autorizované uživatele. Kód je modulován na nosných vlnách L1 a L2. Kombinace dvou frekvencí umožňuje přesnější zaměření. Samotný P kód není stejně jako C/A kód šifrovaný. Pokud je ale zapnut režim A-S¹, je P kód šifrovaný Y kódem.

7.2.3 Řídící segment

Řídící segment se skládá z jedné hlavní, čtyř monitorovacích a tří vysílacích stanic. Monitorovací stanice sledují jednotlivé satelity a přijímají hrubá data, která se preposílají do hlavní řídicí stanice na vyhodnocení. Vysílací stanice jsou ovládány z řídicí stanice a mají za úkol přenášet řídicí signály z hlavní stanice na satelity na oběžné dráze [34]. Řídící segment je zodpovědný za správnou funkčnost satelitů. To zahrnuje udržování na satelitů ve správné orbitální dráze a sledování technického stavu komponent satelitu. Také sleduje stav solárních panelů, baterií a pohonných jednotek pro manévrování. Jelikož řídicí segment má za úkol udržovat satelit aktuální,

¹ Anti-Spoofing – ověření pravosti signálu z družic

minimálně jednou denně posílá navigační zprávu se synchronizací atomových hodin, efemeridy² a almanach³. V případě výpadku satelitu aktivuje náhradní satelit z důvodu udržení dostupnosti služby [17].

7.2.4 Pozemní segment

Jedná se o pasivní přijímače satelitních signálů. Přijímače lze dělit na jednokanálové, které postupně přijímají a zpracovávají data z každé družice a vícekanálové přijímače, které mají pro signál z každé družice vyhrazený samostatný kanál [22].

Přijímače by měli zvládat následující funkce [18]:

- Rozpoznat viditelné satelity a průběžně dekodovat jejich informaci.
- Měřit čas příchodu signálu z vysílače na přijímač tzv. TOA (Time of arrival).
- Vyhodnocovat polohu a čas.

7.3 Princip určení polohy GPS

Přijímače určují polohu pomocí PRN kódů, resp. vzdálenost od družice. Určení polohy lze rozdělit na dvourozměrné (2D) a třírozměrné (3D). Pokud se jedná pouze zeměpisnou šířku a délku, bavíme se o 2D poloze. Při zohlednění nadmořské výšky se jedná o 3D polohu. Pro určení 2D polohy je dostačující signál ze tří družic. Ke zjištění 3D polohy musí přijímač detekovat minimálně čtyři satelity.

Trilaterace – jedná se o určení polohy na základě geometrického protínání naměřených vzdáleností mezi přijímačem a vysílačem (Obr. 17). Tyto kružnice jsou ve skutečnosti sféry

² Pro každý satelit jsou unikátní. Obsahují přesnou pozici satelitu na oběžné dráze. Společně s almanachem slouží k předpovědi, kde se v daný čas bude satelit nacházet.

³ Záznam technického stavu a pozice satelitu. Pomáhá určit GPS přijímačům, které satelity se na dané polokouli nacházejí a kde v jaký čas budou.

s družicemi jako jejich středy (Obr. 16). Nejčastěji se tyto vzdálenosti měří na základě PRN kódů C/A nebo P(Y) obsažených v signálech vysílaných družicí [22].

Vzorec pro výpočet vzdálenosti:

$$\rho = c (t_k - t^i) \quad (1)$$

c – rychlost světla

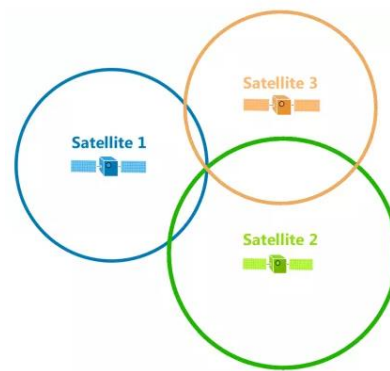
t_k – čas zachycení signálu přijímačem

t^i – čas odeslání čtení družicových hodin zakódovaných do signálu.

Nejprve přijímač přijme signál z první družice a určí tak první vzdálenost. Přijímač zná pouze vzdálenost nikoliv úhel vůči družici. Proto je poloha vyjádřena kružnicí. To znamená, že přijímač se může nacházet kdekoliv v této kružnici [34]. Po přijetí signálu z druhé družice se oblast, ve které se přijímač nachází, zmenšuje na průnik těchto dvou kružnic. Pomocí třetího signálu se utvoří průsečík tří kružnic a výsledná poloha přijímače (Obr. 17). Základní princip při určení 3D polohy je stejný jako u 2D polohy. Pro určení nadmořské výšky je nutný čtvrtý signál (Obr. 16).



Obrázek 17, Sféry šíření signálu satelitu [35]



Obrázek 16, Trilaterace [35]

7 Shrnutí rešerše

Z provedené rešerše stávajícího stavu vývoje bezpilotních zařízení vyplývají následující poznatky.

Sledovací systém slouží především pro:

- Rozšíření vzdálenosti komunikačního kanálu.
- Automatické zaměřování při FPV, kdy operátor nemůže anténu ručně zaměřovat.
- Příjem telemetrických dat.
- Přenos videa / snímků.

Provedenou analýzu pro návrh sledovacího systému lze shrnout do následujících poznatků:

- Provoz bezpilotních zařízení není možný na kterémkoliv místě.
- Je nutné znát pravidla pro provoz bezpilotních zařízení dané země.
- V ČR nelze provozovat plně autonomní zařízení.
- Při pilotáži z první osoby je nutné zúčastnění druhé osoby, která fyzicky kontroluje bezpilotní zařízení.

Při implementaci systému je nezbytné řídit se platnými normami, z nichž vyplývají především tato omezení:

- Lze používat pouze volná frekvenční pásma, definovaná ČTÚ.
- ČR spadá do ITU regionu 1, ve kterém se liší používané frekvence pro příjem telemetrie
- Přijímat telemetrii lze i na 2.4 GHz.

Během analýzy principu sledování byly rovněž identifikovány následující předpoklady, jejichž splnění je nutnou podmínkou pro správné fungování systému:

- Systém musí mít pro správnou funkci přímou viditelnost na zařízení.
- Překážky způsobují absorpci nebo odraz signálu a ztrátu komunikačního kanálu.
- Sledované bezpilotní zařízení musí být vybaveno GPS modulem schopným pracovat s C/A kódem na frekvenci L1 pro určování polohy.

- Sledované bezpilotní zařízení musí mít viditelnost alespoň na 4 navigační satelity pro určení jeho trojrozměrné polohy.

Při nákupu komponent ze zahraničí je nutné dbát na správné parametry součástek. Není vyloučeno, že všeobecná nabídka bude obsahovat, mimo jiné, rádia pracující na frekvenci, která je v daném regionu vyhrazena pro jiné účely nebo s nevhodným vyzářeným výkonem. Před samotným sestavením je nutné prostudovat dokumentace součástek a příslušné dokumenty ČTÚ (**všeobecné oprávnění č. VO-R/10/04.2012-7 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu**).

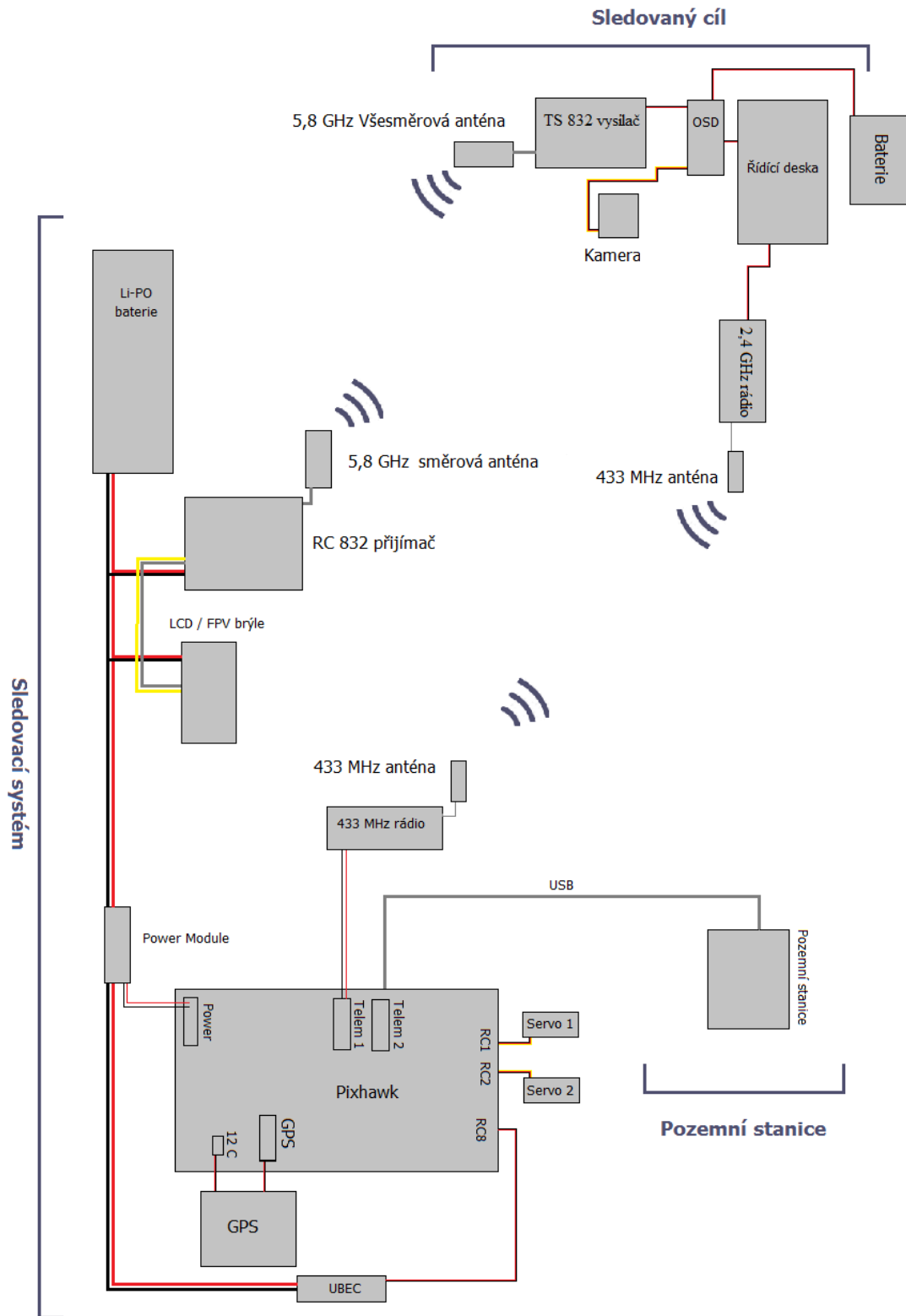
8 Návrh systému

Jádrem navrženého sledovacího systému je řídicí jednotka, k níž je připojena dvojice servomotorů, které ovládají pohyby antény. První z motorů zajišťuje otáčení kolem svislé osy, čímž ovládá azimut antény, zatímco druhý servomotor slouží k otáčení kolem vodorovné osy a nastavuje elevaci antény.

Řídicím vstupem pro ovládání antény je GPS telemetrie ze sledovaného objektu. Komunikace mezi sledovacím systémem a objektem je uskutečněna prostřednictvím rádiových signálů. Dle dostupnosti lze volit mezi dvěma hladinami - 433 MHz nebo 2,4 GHz. Je přitom nezbytné zajistit, aby anténa připojená ke sledovacímu systému a rádio namontované na UAV byly naladěny na stejnou frekvenci, jinak bude komunikace nemožná. Při použití pásma 2,4 GHz je možná interference s řídicími signály sledovaného cíle, proto je vhodnější použít pásmo 433 MHz.

Výsledný sledovací systém může být spojen s pozemní stanicí více způsoby. Nejčastější jsou bezdrátové spojení pomocí dvou telemetrických rádií nebo fyzické spojení pomocí USB kabelu z řídicí desky do počítače. Při použití kabelu jsme omezeni především jeho délkou. Na druhou stranu použití telemetrických rádií může znamenat náklady navíc, ale sledovací systém nemusí stát nutně přímo u pozemní stanice. Při použití bezdrátové komunikace na frekvenci 433MHz by nemělo dojít k žádné interferenci, pokud je ale i telemetrie přijímána na tomto pásmu, je nutné rádia odlišit rozdílným NetID.

Sledovací systém bude vybavena rovněž sub-systémem pro příjem videa nasnímaném kamerou připevněnou na sledovaném UAV. Tento systém nalezne využití především v ovládání zařízení z pohledu první osoby, tzv. FPV (z angl. First Person View). Za tímto účelem je nutné vybavit sledovaný cíl vysílačem (nejčastěji v pásmu 5,8 GHz), ke kterému je připojena libovolná videokamera. Pro kvalitnější obraz se doporučuje v systému použít kruhově polarizované antény, které nejsou náchylné na otočení antény zařízení vzhledem k anténě na sledovacím zařízení, jako se tomu děje například u akrobatického létání. Na sledovacím systému bude upevněn přijímač, ke kterému je připojeno zobrazovací zařízení (tablet, mobil apod.).



Obrázek 18, Blokové schéma sledovacího systému

9.2 Řídící jednotka Pixhawk

Pixhawk je open-hardware projekt zaměřený na pokročilou autopilotáž dostupnou pro akademické, hobby nebo průmyslové využití za co nejnižší cenu. Je vhodný pro řízení modelů letadel, multikoptér, aut, lodí nebo jakéhokoliv robotického zařízení. Pixhawk kombinuje funkčnost PX4FMU (autopilot) + PX4IO⁴. Pixhawk lze jednoduše konfigurovat pomocí softwaru Mission Planner.

Parametry uvedené výrobcem [42]:

Procesory

- 32 bitový ARM Cortex M4 core with FPU
- 168 Mhz/256 KB RAM/2 MB Flash
- 32 bitový failsafe co-processor

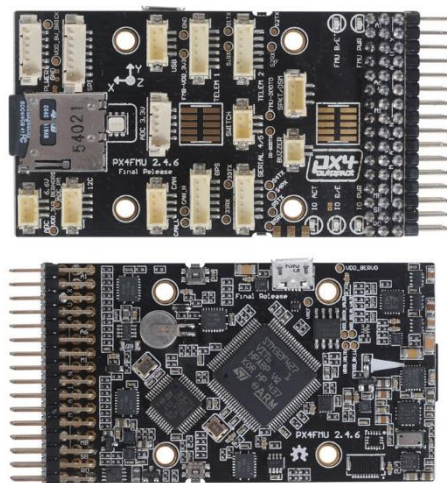
Rozhraní

- Spektrum DSM/DSM2/DSM-X Satellite input
- Futaba S.BUS input
- PPM sum signal
- RSSI (PWM or voltage) input
- 5x UART serial ports, 1 high-power capable, 2 with HW flow control

Senzory Pixhawk:

- 16 bitový ST Micro L3GD20H gyroskop pro určení orientace.
- 14 bitový akcelerometr a kompas pro určení vnějších vlivů a směr kompasu.
- Umožňuje připojit externí kompas a automaticky mezi nimi přepínat.
- MEAS MS5611 barometrický senzor pro určení výšky.
- Snímač napětí a proudu pro určení stavu baterie.
- Port pro externí GPS modul.

⁴ Napájecí zdroj, poskytuje výstupy pro servomotory a vstupy pro přijímače, rozšiřující modul pro PX4FMU



Obrázek 19, Pixhawk [42]

Výhodou Pixhawk pro naše účely je jeho přímé určení na autopilotáž, má tudíž všechny potřebné senzory přímo na desce a nemusí se doplňovat externími moduly. Náhradou za Pixhawk může být starší jednotka APM 2.6, která podporuje pouze starší firmware. Na rozdíl od Pixhawk nemá APM veškeré senzory na desce (chybí jí například GPS). Další alternativou může být Navio2 na základu jednodeskového počítače Raspberry Pi. Pro konfiguraci Navio2 lze stejně jako u Pixhawk použít Mission Planner. Obsahuje veškeré senzory, jaké má Pixhawk a navíc obsahuje přijímač globálního polohovacího systému schopný pracovat s GPS, GLONASS a Beidou. Pro sledování nemusí být použit autopilot. Lze také zapojit například Arduino Uno + ServoShield nebo Arduino Mega. Nakonec je možno použít i jednodušší desky jako např. Micro Maestro Servo Controller, ale propojení s Mission Plannerem je složitější než u Arduina nebo Pixhawk.

9.3 Rádio

K řídicí jednotce Pixhawk je připojeno telemetrické rádio komunikující v pásmu 433 MHz, které se používá pro přenos telemetrie. V případě sledovacího systému je nejdůležitější příjem GPS telemetrie pro určení polohy sledovaného cíle. Co se týče pásma 2,4 GHz, je zde velmi pravděpodobné rušení vysílačkou sledovaného cíle, která je standardně naladěna v tomto pásmu.

Právě proto bylo zvolené pásmo 433 MHz. Telemetrické rádio může sloužit pro komunikaci s pozemní stanicí. Lze použít stejná rádia ve stejném pásmu. Je ale nutné každou z dvojic rádií odlišit různými NetID.

Tabulka 5, Specifikace 433 MHz rádia [48]

| | |
|-----------|-----------------------|
| Frekvence | 433 MHz |
| Napájení | DC 3.7-6 V 25mA |
| Výkon | 100 mW (20 dBm) |
| Rozhraní | 3.3 V UART, Micro-USB |



Obrázek 20, Telemetrická rádia 433 MHz [48]

9.4 Regulátor napětí

BEC je lineární spínaný DC regulátor vysokého napětí z baterie převádějící ho následně na stabilní bezpečné napětí nejčastěji 5 V. Ve sledovacím systému je zapojen z důvodu potřeby externího napájení výstupů s připojenými servomotory, jelikož samotný napájecí modul (viz následující sekce) neposkytuje dostatečný výkon pro tyto výstupy.

HobyWing Ubec specifikace [46]:

- Při použití 2 až 6 článkových Li-PO baterií nabízí konzistentní bezpeční napětí pro přijímače, gyroskopy nebo servomotory.
- Ochrana proti přepólování baterie
- Kovový plášť chránící elektroniku
- Led indikátor stavu



Obrázek 21, UBEC [46]

9.5 Napájecí Modul

Elektronický obvod sloužící k napájení řídicí desky z Li-Po baterie. Zároveň poskytuje údaje o napětí a spotřebě baterie. Jeho maximální napětí činí 18 V (max. 4 článková Li-PO baterie). Neposkytuje dostatečný výkon pro napájení výstupů Pixhawk ale dostačující pro napájení desky a telemetrického rádia.

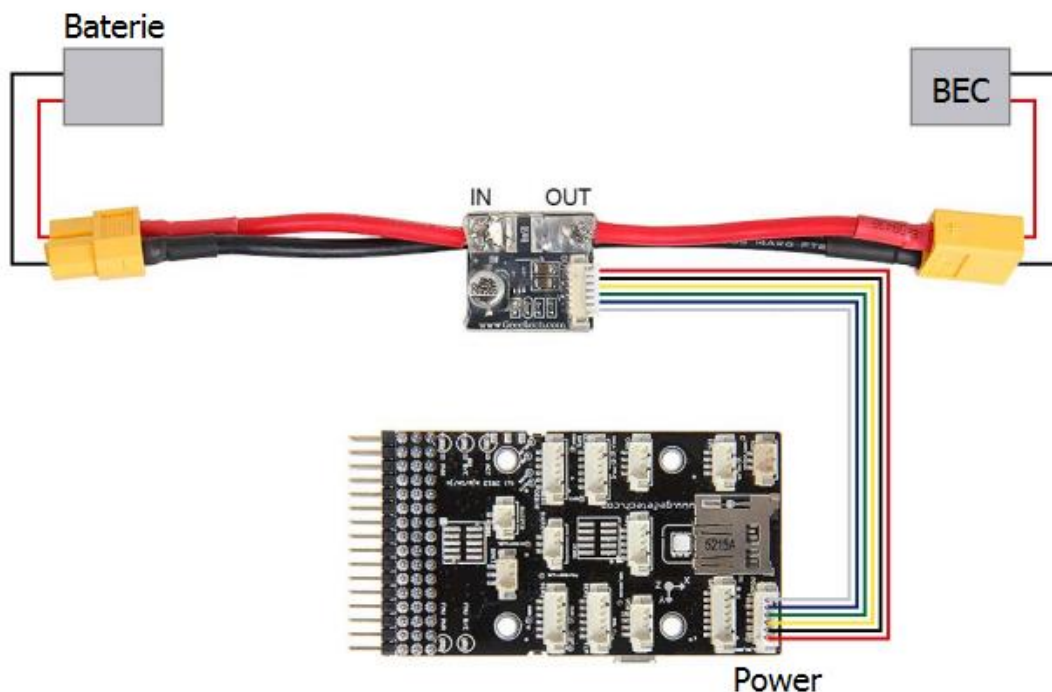


Obrázek 22, Napájecí modul [47]

Specifikace:

- Maximální vstupní napětí – 18 V
- Minimální výstupní napětí – 4,5 V

- Měření proudu a napětí
- DF13 (6pinů) napájecí kabel

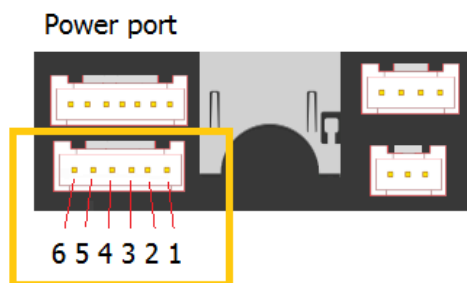


Obrázek 23, zapojení napájecího modulu [49]

Při použití více jak 4-článkové Li-PO baterie je potřeba původní napájecí modul nahradit jiným napájecím modulem schopným napájet desku skrze vícečlánkové baterie. Jedním z možných řešení je modul Attopilot, který je také zmíněn na oficiálních stránkách Ardupilot.org. Tento modul sám o sobě neposkytuje napájení, ale pouze měří stav baterie. Je proto nutné ho zkombinovat s odpovídajícím BEC obvodem podle použité baterie.

Piny power portu DF13 na Pixhawk:

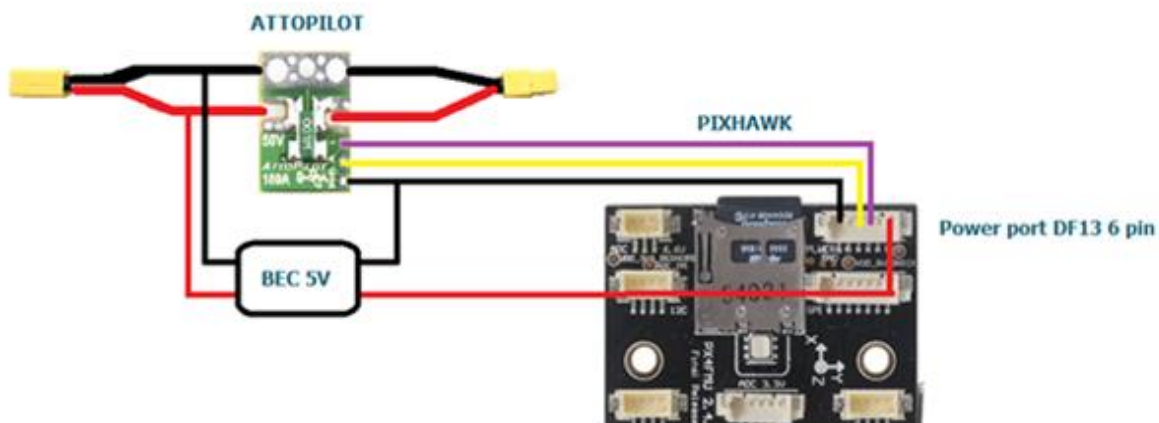
1. GND
2. GND
3. V - měření napětí
4. I – měření proudu
5. Vcc (5 V)
6. Vcc (5 V)



Obrázek 24, piny na power portu

Attopilot je připojen k těmto pinům (Obr. 24):

- 1. pin GND (černá)
- 3. pin V (žlutá)
- 4. pin I (fialová)
- 6. pin BEC připojené k Vcc



Obrázek 25, zapojení Attopilot

9.6 Přijímač RC832

Jedná se o přijímač audio-video signálu v pásmu 5.8 GHz s rozsahem 48 kanálů ve čtyřech frekvenčních pásmech (Obr. 26), které jsou nejpoužívanější výrobci kamerových systémů a vysílačů. Kromě frekvencí FR1-FR4 je zde i frekvence FR5, používaná pro FPV létání. Přijímač je vybaven displejem pro zobrazení kanálu se dvěma tlačítky pro zvolení pásma a kanálu. Dále vybaven třemi výstupy. Jeden slouží k napájení přístroje a zbylé dva jsou audio/video výstupy. Jeden lze například použít pro brýle a druhý pro monitor.

| FR [Ⓢ] | | CH [Ⓢ] | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | CH1 [Ⓢ] | CH2 [Ⓢ] | CH3 [Ⓢ] | CH4 [Ⓢ] | CH5 [Ⓢ] | CH6 [Ⓢ] | CH7 [Ⓢ] | CH8 [Ⓢ] |
| FR [Ⓢ] | FR1(A) [Ⓢ] | 5865MHz [Ⓢ] | 5845MHz [Ⓢ] | 5825MHz [Ⓢ] | 5805MHz [Ⓢ] | 5785MHz [Ⓢ] | 5765MHz [Ⓢ] | 5745MHz [Ⓢ] | 5725MHz [Ⓢ] |
| | FR2(B) [Ⓢ] | 5733MHz [Ⓢ] | 5752MHz [Ⓢ] | 5771MHz [Ⓢ] | 5790MHz [Ⓢ] | 5809MHz [Ⓢ] | 5828MHz [Ⓢ] | 5847MHz [Ⓢ] | 5866MHz [Ⓢ] |
| | FR3(C) [Ⓢ] | 5705MHz [Ⓢ] | 5685MHz [Ⓢ] | 5665MHz [Ⓢ] | 5645MHz [Ⓢ] | 5885MHz [Ⓢ] | 5905MHz [Ⓢ] | 5925MHz [Ⓢ] | 5945MHz [Ⓢ] |
| | FR4(D) [Ⓢ] | 5740MHz [Ⓢ] | 5760MHz [Ⓢ] | 5780MHz [Ⓢ] | 5800MHz [Ⓢ] | 5820MHz [Ⓢ] | 5840MHz [Ⓢ] | 5860MHz [Ⓢ] | 5880MHz [Ⓢ] |
| | FR5(H) [Ⓢ] | 5658MHz [Ⓢ] | 5695MHz [Ⓢ] | 5732MHz [Ⓢ] | 5769MHz [Ⓢ] | 5806MHz [Ⓢ] | 5843MHz [Ⓢ] | 5880MHz [Ⓢ] | 5917MHz [Ⓢ] |
| | FR6(L) [Ⓢ] | 5362MHz [Ⓢ] | 5399MHz [Ⓢ] | 5436MHz [Ⓢ] | 5473MHz [Ⓢ] | 5510MHz [Ⓢ] | 5547MHz [Ⓢ] | 5584MHz [Ⓢ] | 5621MHz [Ⓢ] |

Obrázek 26, kanály RC832 [51]

Tabulka 6, Specifikace přijímače RC832 [43]

| | |
|---------------------|--------------------------------|
| Přijímací citlivost | <-90dBm |
| Přijímací frekvence | ISM 5.8GHz 8k |
| Anténa port | RP-SMA |
| Napájení | DC 12 V 200 mA |
| Frekvenční pásmo | FR1(A), FR2(B), FR3(E), FR4(F) |
| Rozměry | 80x65x15mm |
| Hmotnost | 85 g |



Obrázek 27, přijímač RC832 [43]

9.7 Vysílač TS 832

Bezdrátový audio-video vysílač v pásmu 5.8GHz s rozsahem 32 kanálů. Má stejné funkce jako RC832. Displej s aktuálním kanálem a dvojice tlačítek pro výběr pásma a kanálu.

Tabulka 7, Specifikace vysílače TS 832[44]

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| Výstupní výkon | 600 mW / 27 dBm |
| Port | RP-SMA |
| Počet kanálů | 48 |
| Frekvenční pásmo: | FR1(A), FR2(B), FR3(E), FR4(F) |
| Rozměry | 54 x 32 x 10 mm |



Obrázek 28, vysílač TS 832 [44]

9.8 Všesměrové antény

Antény pracují na frekvenci 5.8 GHz. TX je určena pro vysílač a RX pro přijímač. Antény jsou všesměrové kruhově polarizované, kvalita signálu tak není závislá na aktuální poloze antény

vysílače ku anténě přijímače. S klasickou směrovou anténou by docházelo k rozdílné polarizaci vlivem rozdílného natočení antény a tím ke ztrátě signálu.



Obrázek 29, všesměrové antény [45]

Fatshark SpiroNET 5.8GHz anténa

Při výběru antény se řídíme několika faktory. Jedním z faktorů je cena, kterou je uživatel ochoten zaplatit a vyplatí se vzhledem k ceně ostatních komponent. Anténu také vybíráme podle účelu využití. Pro sledovací systém se hodí výhradně směrové, díky jejich většímu dosahu. Ideální jsou panelové, které mají dobrou pokrytí v perimetru před sebou a mají malé rozměry, tudíž se lehce ovládají. Nicméně antény pro FPV systémy jsou kruhově polarizované, aby nedocházelo ke ztrátě signálu vlivem rozdílné polarizace antén. Tato anténa byla do systému zařazena po otestování antény přijímače z kapitoly *9.8 Všeměřové antény*.



Obrázek 30, Kruhově polarizovaná panelová anténa [52]

Tabulka 8, Specifikace Fatshark SpiroNET anténa [52]

| | |
|---------------|-------------------------------|
| Polarizace | Kruhová |
| Zisk | 13 dBi |
| Frekvence | 5,8 Ghz |
| Konektor | SMA |
| Šířka paprsku | 35° vertikálně / horizontálně |
| Rozměry | 92 x 92 mm |

9.9 FPV Kamera

FPV kamera slouží k pořizování video záznamu v reálném čase, podle kterého pilot ovládá zařízení. Výběr kamery závisí na požadované kvalitě obrazu, nosnosti zařízení a účelu. Kamera je umístěná v čele zařízení. Většinou se nejedná o obraz ve vysoké kvalitě, ale tyto kamery mají nízkou latenci. Pořizují se především pro závodění. Pro záznam z letu je na zařízení druhá kvalitnější kamera. Pokud se pořizují snímky a zařízení letí pomaleji používají se naopak kvalitnější kamery nebo fotoaparáty umístěné na podvěsné otočné konstrukci.

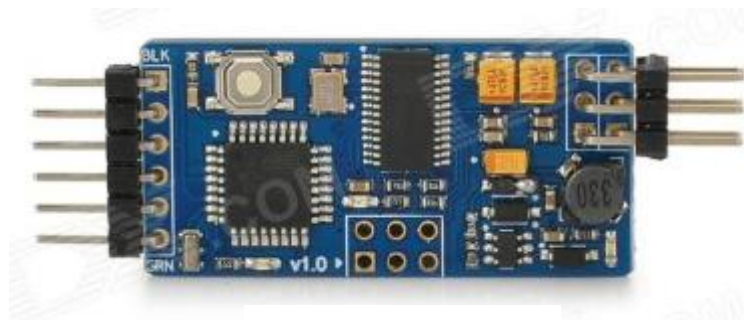
Použitá kamera splňuje evropskou normu PAL a disponuje horizontálním rozlišením 700 TVL⁵. Jádrem kamery je senzor CCD, který má nízkou latenci, dobré vlastnosti při vysokém nebo naopak nízkém jasu a v obraze se neprojevují vibrace vytvářené zařízením.



Obrázek 31, FPV kamera [53]

9.10 OSD modul

Samotné telemetrické údaje lze zakódovat přímo do videa. Při pilotování jsou veškeré důležité informace zobrazovány přímo na displeji. Tato telemetrie, jelikož je ve videu zakódována, nelze dále použít pro navádění antény. V softwaru k OSD lze nastavit jaké informace budou zobrazovány a jejich rozložení informací na obrazovce.



Obrázek 32, OSD modul [57]

⁵ Zjednodušeně rozlišení kamery. Udává kolik černých a bílých linek je horizontálně zobrazeno.

9.10 Ostatní komponenty

Baterie – S použitým napájecím modulem lze připojit maximálně 4-čláčkovou Li-PO baterii. Na druhou stranu je nutná minimálně 2-čláčková baterie kvůli dostatečnému napětí potřebné pro napájení řídicí desky a servomotorů.

Stativ – Měl by být co nejvyšší, aby anténa byla v dostatečné výšce a zem nerušila vysílání. Dále by měl být stabilní, aby při záběru servomotorů udržel celý systém.

Kabeláž – Dodatečné propojky rozdílných konektorů nebo rozdvojky napájecích kabelů.

9.11 Mission Planner

Jedná se o software pro pozemní stanici určený převážně pro letadla, helikoptéry a multikoptéry, ale i pozemní vozidla. Mission Planner je konfigurační nástroj pro programování autonomních zařízení. Pro komunikaci používá protokol MAVLink.

Funkce toho softwaru zahrnují:

- Nahrání firmware do autopilota (v našem případě Pixhawk).
- Nastavení, konfigurace a podrobnější ladění.
- Jednoduché a intuitivní plánování misí.
- Analýza logů získaných z autopilota.

Pomocí telemetrického rádia se funkce rozšiřují o:

- Monitorování aktuálního stavu zařízení v reálném čase.
- Záznam telemetrických dat, která obsahují podrobné informace o zařízení.
- Zobrazení a analýza telemetrických dat.
- Možné ovládání skrze pohled první osoby (angl. First person view – FPV).

9.12 MAVLink

Micro Air Vehicle Link je jednoduchý komunikační protokol, který se nejčastěji používá pro komunikaci mezi pozemní stanicí a bezpilotním prostředkem. Protokol je určený pro přenos dat potřebných pro řízení bezpilotních prostředků [8].

Protokol MAVLink je bezstavový protokol, tzn. informace potřebné k reakci na požadavky a odpovědi jsou obsaženy v samotných zprávách [6]. Protokol se skládá z definovaných zpráv, výčtových typů a ze sady předepsaných a obslužných funkcí. Fyzický přenos probíhá po USB kabelu nebo bezdrátově, pomocí telemetrického radia.

9.12.1 Zpráva

Zpráva je základní jednotkou komunikace prostřednictvím protokolu MAVlink, která obsahuje přenášené informace. Jednotlivé zprávy jsou rozlišené různými ID, které definuje obsah zprávy.

K odesílání zpráv potřebujeme Mission Planner, který jednotlivé zprávy zakóduje a posílá je příslušnému zařízení. Toto zařízení následně zprávu dekoduje a vykoná příslušnou akci. Komunikace funguje i obráceně, kdy zařízení může například posílat telemetrické údaje zpět kontrolní stanici. Veškeré zprávy jsou zdokumentovány na oficiálních stránkách PX4 Autopilot (<https://pixhawk.ethz.ch/mavlink/>).

Následující výčet uvádí některé z nejdůležitějších zpráv, které jsou v protokolu definovány [57]:

HEARTBEAT (#0)

Nejdůležitější zpráva indikující, zda je přístroj přítomen a reaguje. Pozemní stanice stále tuto zprávu posílá autopilotu (např. PX4) aby zjistila, zda je stále připojen. Jakmile autopilot nepřijme po nějakou dobu tuto zprávu, Heartbeat, obvykle spustí systém pro předcházení kolize (to nejčastěji znamená se samostatně vrátit na svoji zadanou výchozí pozici nebo se vznášet na místě a čekat na obnovení spojení).

SYS_STATUS (#1)

Obecný stav systému, který je definován především těmito stavy:

- LOCKED – motory jsou vypnuty.

- MANUAL – systém je dálkově ovládan.
- GUIDED – systém autonomně sleduje body, které jsou určovány ručně.
- NAV_MODE – definuje současný stav letu (vzlet, přistání, bod na trase).

SYSTEM_TIME (#2)

Systémový čas hlavních hodin nacházejících se na řídicí desce.

PING (#4)

Stejně jako u počítačových sítí ping měří latenci systému.

GPS_RAV_INT (#24)

Poloha určená systémem GPS. Nejedná se přímo o údaje o poloze ale nezpracovaná data ze senzoru.

GPS_STATUS (#25)

Tato zpráva je určena pro zobrazení aktuální polohy satelitů, na které přijímač vidí.

GLOBAL_POSITION_INT (#2)

Aktuální pozice, ve které se přístroj nachází.

ATTITUDE (#30)

Aktuální výška, ve které se přístroj nachází.

9.12.2 Struktura packetu

Každý paket MavLink bez payloadu má délku minimálně 8 bajtů. Hlavička má 6 bajtů, kontrolní součet 2 bajty. Maximální délka je 263 bajtů. Software nejprve kontroluje validitu zprávy, pokud nesouhlasí kontrolní součet, zprávu zahodí. Proto nesmíme volit příliš vysoké přenosové rychlosti. Pomalejší přenos je méně náchylný na chyby, ale na druhou stranu budeme mít méně častěji aktualizovaná data.

10. Sestavení

Základ systému sledovací antény tvoří stabilní stativ, na kterém je upevněná konstrukce ovládaná servomotory, které zajišťují otočení o 360° kolem svislé osy a náklon až 180°. Systém je díky tomu schopen pokrýt celý perimetr kolem sebe i nad sebou. Řídící jednotka je umístěná na pohyblivé části tak, aby směřovala stejným směrem, kterým směřuje anténa. Alternativně je možné v Mission Planneru nadefinovat úhel o který je otočena vůči směru antény, pokud se oba směry liší.

Výsledná konstrukce je individuální; vzhledově i rozložením se může lišit podle použitých konkrétních prvků. Je důležité, aby byl systém stabilní při všech fázích natočení antény. Při upevňování konstrukce je nezbytné zajistit správné vedení kabelů, aby nedocházelo k zamotání při otáčení systému.

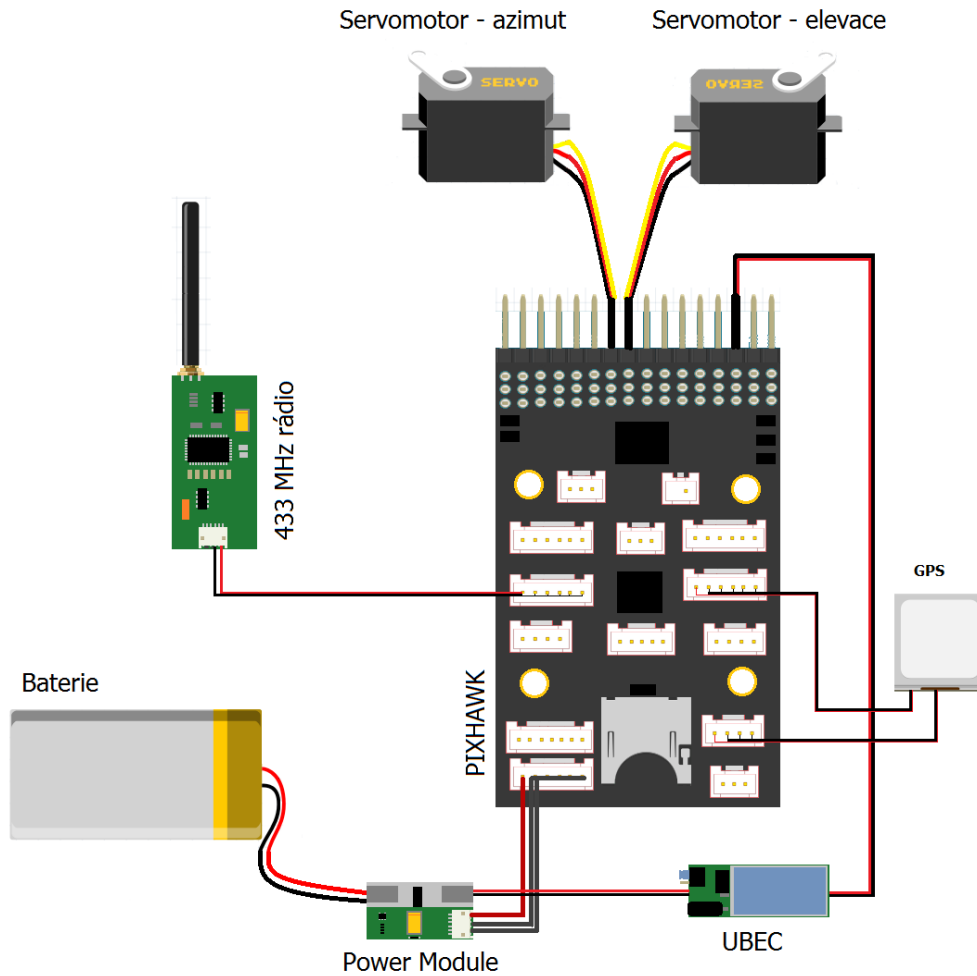
10.1 Sestavení Sledovacího systému

Centrálním bodem sledovacího systému je řídicí deska Pixhawk, ke které je na portu telem1 připojeno telemetrické rádio. Ve druhém portu telem2 může být připojené druhé rádio sloužící ke komunikaci s pozemní stanicí. Tato rádia mají referenční anténu dodávanou výrobcem. Popřípadě lze druhé rádio nahradit USB kabelem; nelze však použít obě řešení najednou.

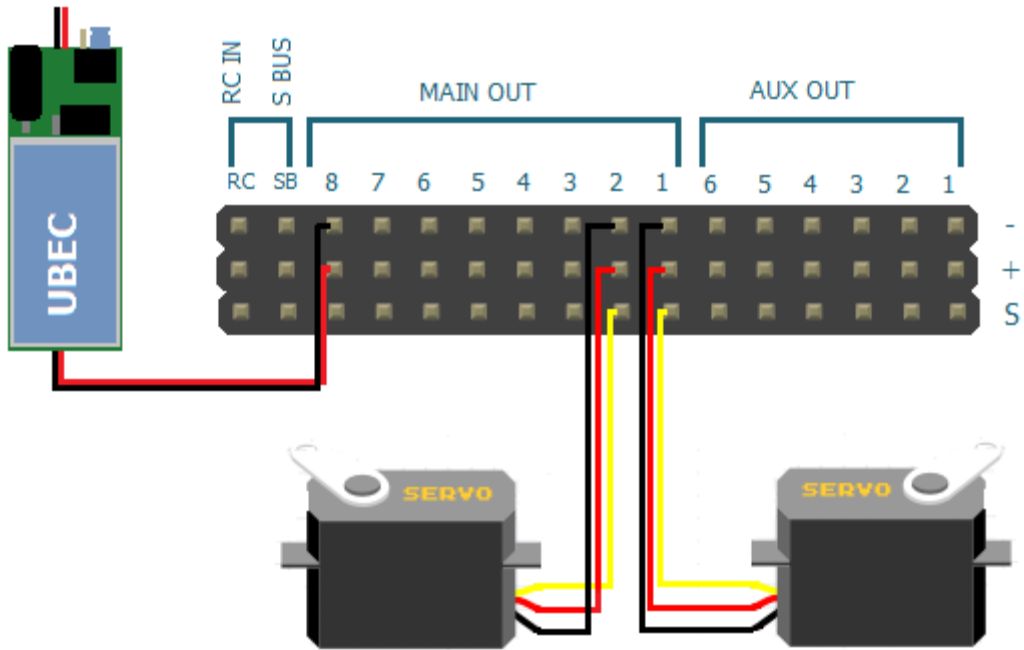
Na výstupu Pixhawk jsou zapojené servomotory. Na vstup je přiveden regulátor napětí UBEC, který dodává stabilní napětí 5V a napájí výstupy desky se servomotory, jelikož Pixhawk tyto výstupy sám nenapájí. V portech GPS a 12C je připojen externí GPS modul. Řídící deska Pixhawk je napájena skrze z Li-Po baterie prostřednictvím napájecího modulu, ke kterému je připojena Li-Po baterie. Podle zvoleného napájecího modulu volíme i baterii viz *kapitola 9.3 napájecí modul*.

Pro příjem videa je sledovací systém doplněn přijímačem RC832, u kterého byla referenční lineárně polarizovaná anténa nahrazena výkonnější směrovou panelovou anténou. Celý systém pro příjem videa pracuje v pásmu 5,8 GHz. Pro zobrazení videa lze použít tablet, mobil nebo LCD

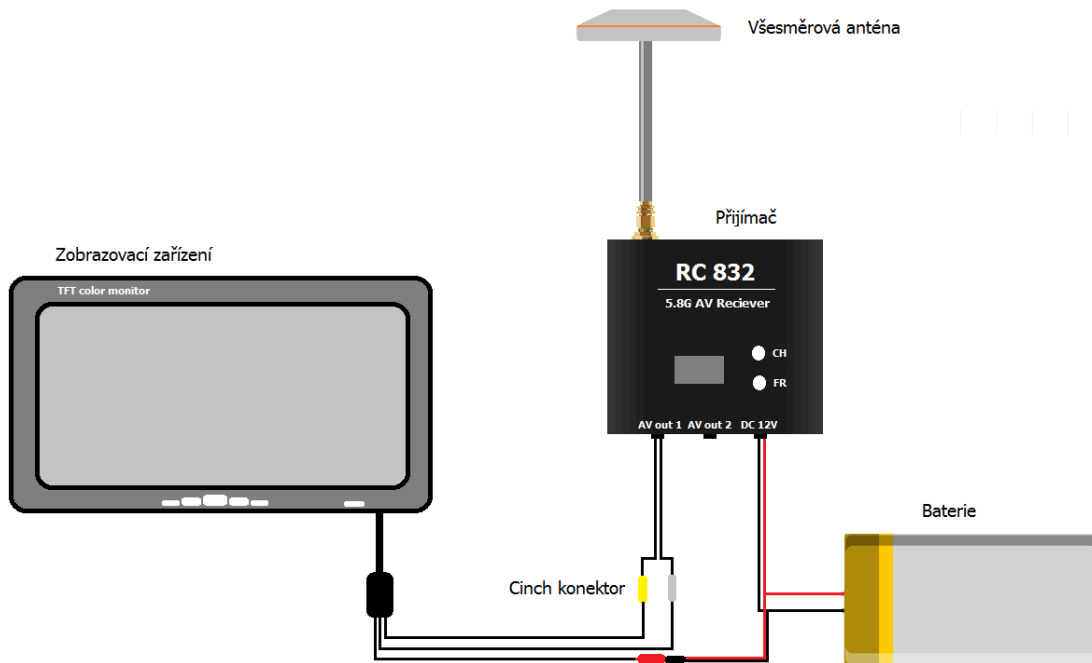
displej. Přijímač a LCD panel je napájen ze stejné baterie jako sledovací systém. Přijímač je taktéž umístěn na pohybující se části konstrukce.



Obrázek 33, Schéma sledovací antény



Obrázek 34, Detailní náhled zapojení na výstupech Pixhawk



Obrázek 35, FPV systém



Obrázek 36, Sledovací systém bez stativu

10.2 Úprava sledovaného cíle

Aby bylo možné sledovat požadované zařízení, je nutné ho vybavit telemetrickým rádiem na stejné frekvenci jako je rádio sledovacího systému, tedy 433 MHz. Dále je nutné, aby bylo zařízení vybaveno GPS modulem a schopné určit svoji polohu, na jejímž základě poté sledovací systém zaměří anténu.

K posílání videa je potřeba vysílač v pásmu 5,8 GHz. Poté je nutné přijímač a vysílač na pozemní stanici sladit na stejný kanál a frekvenci. Vysílač je vybaven všesměrovou kruhově polarizovanou anténou a je k němu připojena libovolná FPV kamera. Napájení je skrze baterii zařízení. Pokud hodláme zobrazovat telemetrická data přímo ve videu lze toho docílit připojením OSD modulu mezi řídicí desku a vysílač.

10.3 Pozemní stanice

Jako pozemní stanice poslouží PC s nainstalovaným programem Mission Planner. Pokud je zvolena bezdrátová cesta spojení s Pixhawk, tak je zde i druhé rádio do dvojice s rádiem v pásmu 433 MHz. Rádio stačí pouze připojit pomocí mikro USB kabelu k PC. Blikající diody na rádiích se po spárování zeleně rozsvítí. Pokud se tak nestane může být problém v operačním systému, který nenainstaloval ovladače, a musí tak být doinstalovány ručně.

11. Konfigurace

Po složení celého systému je potřeba nahrát firmware do řídicí desky, seřadit servomotory a zkalibrovat řídicí desku. Nakonec sladit přijímač a vysílač FPV systému. Pro připojení k počítači, na kterém běží Mission Planner, je více možných cest. Na základě zvolené cesty je nutné také zvolit příslušnou bitovou rychlost spojení, aby nedocházelo ke ztrátám paketů a přerušení spojení. Pro USB 115 200 bps a pro rádia 57 600 bps.

11.1 Instalace Mission Planner

Mission Planner vyžaduje operační systém Windows. Před instalací je potřeba mít nainstalovaný .Net Framework 4.0. Při spuštění na jiném operačním systému je nutné systém Windows emulovat. Konkrétní hardwarové nároky nejsou na oficiálních stránkách uvedené.

Software je volně dostupný na adrese <http://firmware.eu.ardupilot.org/>.

11.2 Instalace firmware Antenna Tracker v1.0

Antenna Tracker sleduje polohu cíle a tyto informace využívá pro směřování antény směrem k cíli. Díky tomu lze rozšířit dosah komunikace pro přijímače i vysílače. Firmware podporuje dva způsoby sledování. V obou případech se jedná o určení polohy cíle na základě GPS telemetrie cíle a GPS polohy antény [40]. Tyto dva způsoby se poté liší závislostí na pozemní stanici. První možností je použít řídicí desku, resp. autopilota, který kalkuluje směr otáčení antény. Druhá možnost je systém závislý na pozemní stanici, která určuje aktuální polohu. Není potřeba autopilot pro ovládání antény, ale postačí levnější servo kontrolér.

Nejprve je nutné, aby řídicí deska podporovala firmware Antenna Tracker. V této práci je použit autopilot Pixhawk, který tuto podporu má. Pro nahrání postačí připojit řídicí desku k PC. V Mission Planneru lze poté intuitivně zvolit požadovaný firmware, který se následně nahraje na řídicí desku. Podrobný popis nahrání firmware v příloze č.2.

11.3 Kalibrace systému

Ke správnému fungování systému je nutné provést několik kalibračních procedur, aby řídicí deska mohla nasbírat potřebné údaje pro správné vyhodnocení její polohy. Její poloha je statická, systém by např. na jedoucím autu nefungoval. Podrobný popis kalibrace se nachází v příloze č.2. Jedná se o tyto položky.

- **Akcelerometr** – orientace řídicí desky.
- **Kompas** – aktuální poloha řídicí desky.
- **Servomotory**⁶ – maximální, minimální a výchozí pozice natočení.

Častou chybou může být špatná kalibrace řídicí desky nebo špatné směřování řídicí desky a GPS modulu. Výchozí nastavení počítá, že bílá šipka na plastovém krytu GPS modulu a Pixhawk bude směřovat směrem kam míří anténa. Pokud tomu tak není je nutné při konfiguraci servomotorů a kalibrace GPS, uvést o jaký úhel je modul natočený oproti směru antény. Jinak bude docházet k zaměřování špatným směrem.

11.4 Režim systému

Systém může operovat v těchto režimech.

- **Manual** – Uživatel přímo ovládá servomotory.
- **Stop** – Sledovací systém je vypnut.
- **Scan** – Sledovací systém automaticky prohledává okolí a hledá cíl.
- **Auto** – Systém opět hledá zařízení, pokud ztratí kontakt.
- **Servo_Test** – Ve speciální obrazovce Mission Planneru uživatel testuje servomotory pomocí ladění.

⁶ Pro testování je nutné mít připojený Safety Switch, ale lze ho v nastavení deaktivovat viz. Příloha č.2

12. Testování

Primárním předmětem testování byl zkonstruovaný sledovací systém. Cílem bylo zjistit, zda řídicí deska bude správně detekovat svojí geografickou polohu a geografickou polohu cíle, od kterého přijímá telemetrická data. Pomocí těchto dat by řídicí deska sledovacího systému měla prostřednictvím servomotorů nasměrovat anténu na cíl. Po celou dobu příjmu telemetrie by měl být cíl stále automaticky sledován a tím udržován stabilní komunikační kanál. Testování proběhlo bez fyzicky přítomného bezpilotního zařízení. Toto zařízení bylo nasimulováno programem Mission Planner, detailní popis konkrétního postupu je uveden v příloze č.3.

Sekundárním předmětem testování byl přenos videa pomocí vysílače TS832 a přijímače RC832 s kruhově polarizovanými anténami. Testování také proběhlo bez přítomnosti bezpilotního zařízení. Vysílač s kamerou byl umístěn na vyvýšeném místě (rozhledna, kopec) jako výchozí bod. Od tohoto bodu se pomocí přijímače testoval dosah signálu a vliv různých překážek na jeho kvalitu. Celkem byly provedené testy na dvou rozdílných místech. První místem byla městská oblast. Druhé místo byla lokace vzdálená od města. V obou případech byla kvalita spojení měřena ve stejných ekvidistantních vzdálenostech. Ve všech případech při měření vzdálenosti byla zajištěna přímá viditelnost přijímače na vysílač. Testování proběhlo na frekvenci FR1/CH8 a FR5/CH8. Na obou frekvencích byl zachycen stejně kvalitní obraz.

Po prvním otestování systému byla původní všesměrová anténa na přijímači, nahrazena směrovou anténou. Se kterou bylo následně provedeno nové testování. Tato anténa má vyšší zisk, který je navíc soustředěn jedním směrem. Lze s ní tedy komunikovat na delší vzdálenosti, což se také potvrdilo.

12.1 Test sledovacího systému

Sledovací systém byl testován s pomocí programu Mission Planner, který mimo jiné poskytuje simulátor virtuální multikoptéry a dalších zařízení, díky čemuž bylo možné testovat systém v laboratorních podmínkách. Detailnější popis nástroje je přiložen k práci, viz příloha č. 3. Příprava pro testování proběhla v následujících krocích:

- Sledovací systém byl zapojen dle schématu, viz Kapitola 8.
- Fyzické UAV bylo nahrazeno simulátorem běžícím na PC, přičemž simulovaná telemetrie byla vysílána rádiem připojeným na USB port.
- Deska Pixhawk byla oživena.
- GPS modul určil polohu sledovacího systému.

Samotný test pak měl následující průběh:

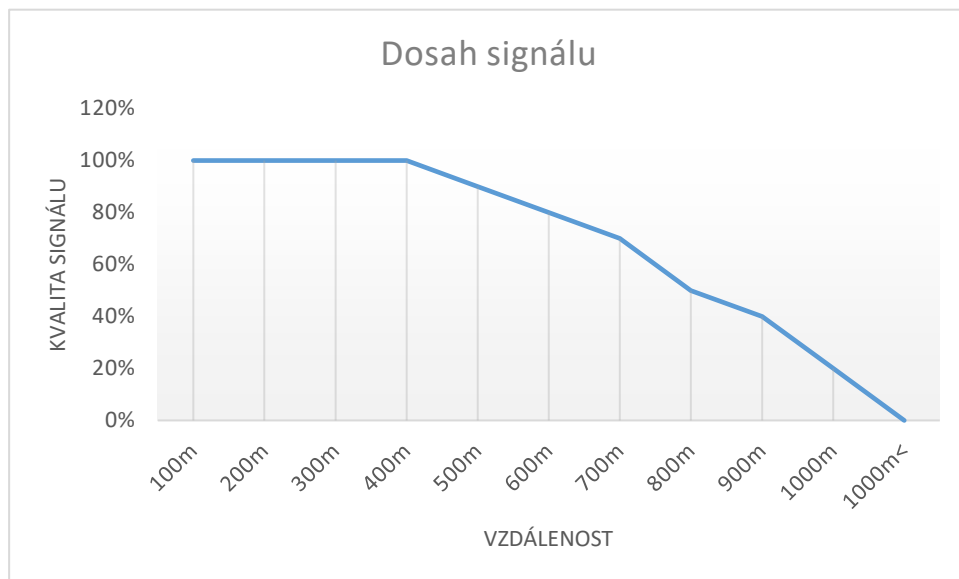
- Byla definována trajektorie simulovaného letu UAV, která opisovala půl kruh před anténou se středem v bodě, kde se nacházel sledovací systém.
- Simulace byla spuštěna – rádio připojené k PC začalo vysílat simulovaná telemetrická data.
- Sledovací systém přijímal tato data a podle nich upravoval směřování antény k virtuálnímu cíli.

Několikanásobné provedení testu ukázalo, že anténa sledovacího systému je skutečně směřována k simulovanému cíli.

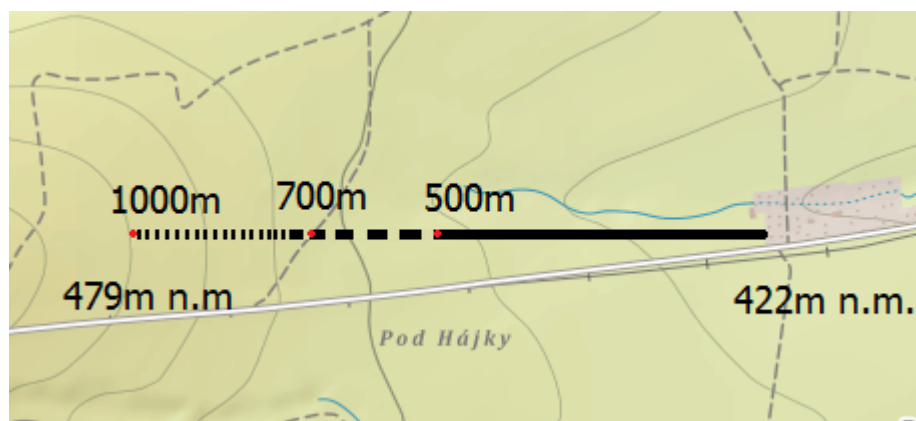
12.2 Test přenosu videa

12.2.1 Dosah všesměrové antény

Dosah antény se testoval postupně ve vzdálenostech od 100 m do 1500 m v pravidelných 100 metrových odstupech (obr. 35). Do 500 m byl přenos bezproblémový a na obrazu se neprojevovalo žádné rušení. Při vzdálenosti okolo 700 m vysílače docházelo k mírnému šumu na obrazu. Ve vzdálenosti okolo 1000 m nebylo navázáno stabilní spojení a obraz problikával. Na vzdálenost 1500 se nepodařilo přijímat obraz žádný. V okolí do 400 m, za podmínek při testu by dalo hovořit o kvalitním přenosu obrazu pro FPV.



Obrázek 37, Graf dosahu signálu



Obrázek 38, dosah signálu na mapě

Na obrázku 38 je vyobrazena zeměpisná mapa místa testování. Vysílač se nacházel zhruba 50 m nad vysílačem v nejvyšším bodě. Zhruba v okolí 500 m od vysílače se nacházel horizont za kterým byl signál ztracen úplně. Ve vzdálenosti 700 m byla opět přímá viditelnost na vysílač, ale docházelo k šumu v obraze. Na hranici 1000 m nebyl zachycen dostatečně silný signál pro přenos obrazu vhodného k létání.

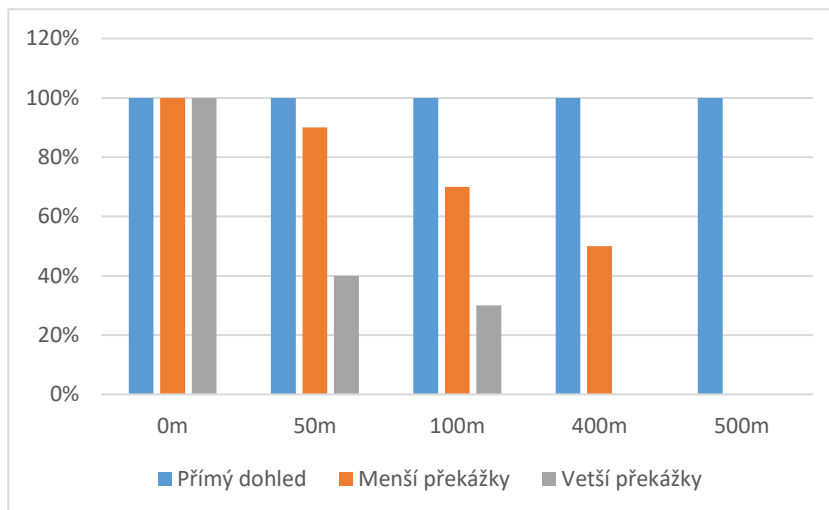
12.2.2 Překážky při použití všesměrové antény

Během tohoto testu byla měřena kvalita přijímaného signálu z všesměrové antény v závislosti na výskytu překážek různých velikostí mezi vysílačem a přijímačem. Pro účely tohoto testu byly definovány 3 kategorie překážek:

- Přímý dohled – mezi anténami se nacházejí překážky zanedbatelných rozměrů.
- Menší překážky – keře, menší stromy.

Větší překážky – velké stromy, zdi.

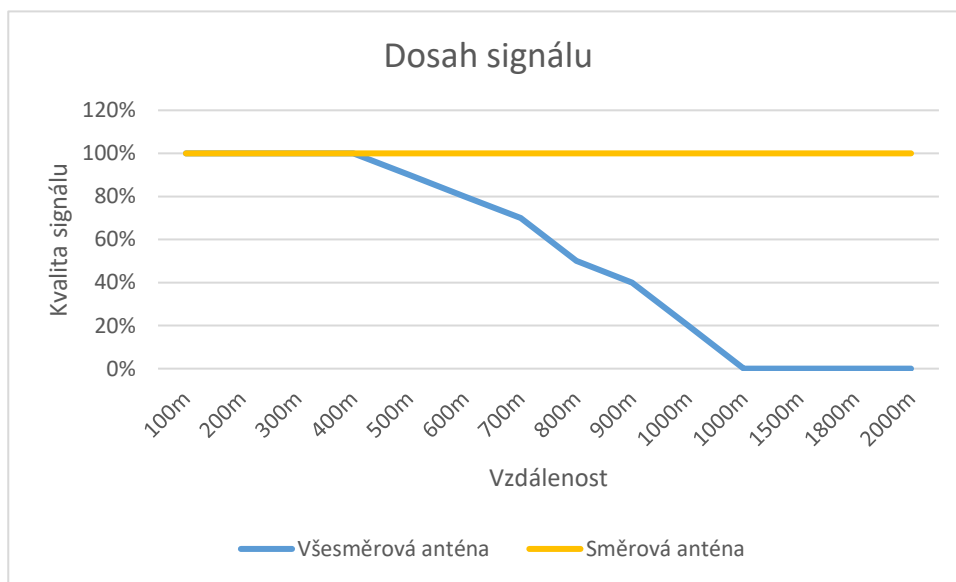
Bylo provedeno několik měření při různých vzdálenostech antén a různých velikostech překážek. Výsledky ukazují, že pevné překážky (zdi, sloupy, stromy) mohou způsobovat citelné zhoršení kvality signálu (obr. 37). Anténa na bezpilotním zařízení musí být umístěna tak aby se při různém manévrování zařízení nedostala do pozice kdy je něčím stíněna (např. GPS modulem, konstrukcí zařízení). Co se týče menších překážek v podobě korun stromů a keřů, nastával drobný šum v obraze. Na vzdálenost 50 m neměly keře na signál žádný vliv a obraz byl čistý. Na vzdálenost 100 m – 400 m nebyl obraz tak čistý, ale zkušenější pilot by dokázal zařízení z překážky navést zpět na místo přímé viditelnosti na přijímač.



Obrázek 39, Závislost kvality signálu při průchodu překážkou

12.2.3 Dosah směrové antény

Byl aplikován stejný postup jako u měření dosahu všesměrové antény. Maximální možná vzdálenost, které bylo možné dosáhnout v téže dané lokalitě, aby byla zajištěna přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem, činila 1800 m. Na tuto vzdálenost byl obraz čistý. Je tedy pravděpodobné, že s touto anténou bude možné udržovat spojení na vzdálenost řádově až několik km. Je ale nutné stále touto směrovou anténou mířit na všesměrovou anténu na vysílači. Na grafu níže je graficky znázorněná vzdálenost, kdy byl zachycen signál.

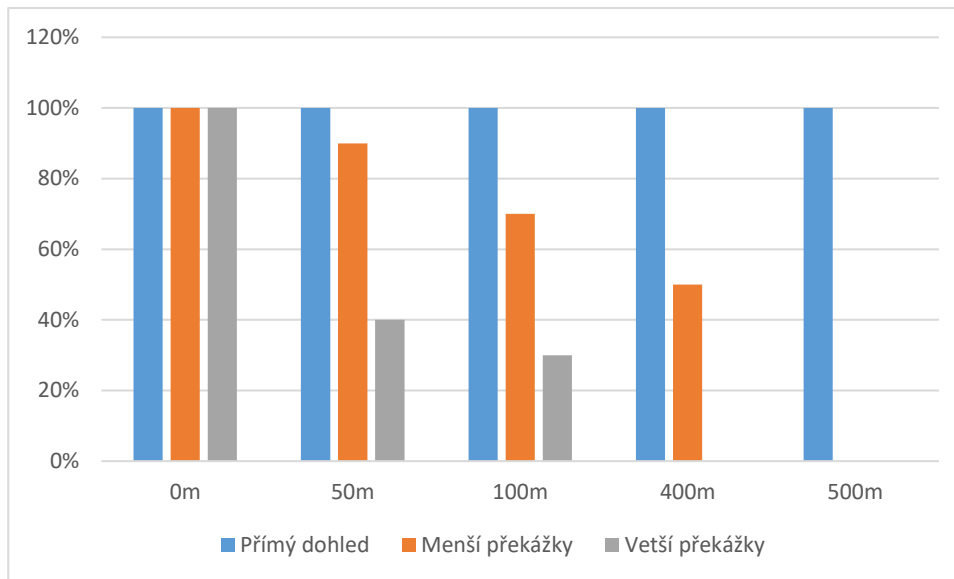


Obrázek 40, Závislost kvality přijímaného signálu na vzdálenosti pro různé typy přijímače

12.2.4 Překážky při použití směrové antény

Testování kvality přijímaného signálu směrovou anténou v závislosti na výskytu překážek bylo provedeno shodným způsobem jako u všesměrové antény. Výsledky měření ukázaly, že Stejně jako u všesměrové antény byla kvalita signálu náchylná na různé překážky. Především betonové

sloupy, stromy, resp. jakékoliv pevné překážky. Závislost kvality signálu je tedy přibližně stejná jako v kapitole 12.2 *Překážky při použití všesměrové antény*.



Obrázek 41, Graf kvality signálu průchodem překážkou obou antén

12.3 Závěr testování

Hlavním cílem testování bylo dokázat funkčnost systému a otestovat očekávané chování obrazu při různých situacích. Krajinný ráz v testovací lokalitě je značně kopcovitý a bylo těžké najít dostatečně dlouhou a rovnou plochu k testování dosahu. Při použití bezpilotního zařízení je možné, že vzdálenost přenosu bude delší a kvalitnější. Nicméně, rušení signálu vlivem překážek, se bude přenosu signálu dotýkat podobně jako při testech na zemi. Penetrační vlastnosti rádiových vln v pásmu 5,8 GHz, nejsou zcela uspokojivé. Obvyčné listoví nebo koruny stromů způsobují šum na obraze, kmeny a podobné větší překážky způsobují ztrátu signálu. Ačkoliv při schování přijímače za ocelovou konstrukci mostu ke ztrátě signálu nedošlo.

Po nainstalování výkonnější směrové antény na přijímač byl příjem signálu značně zlepšen. Při testech byla zaznamenána dvojnásobná vzdálenost dosahu. Tímto bylo empiricky ověřeno, že se směrovou anténou lze dosáhnout podstatně kvalitnějšího příjmu signálu i na větších vzdálenostech, a zvýšit tak podstatně akční radius UAV. Při testech se všesměrovou anténou na

přijímači nezáleželo na směru přijímače. Jakkoliv bylo s přijímačem manipulováno a nebyla přitom nastíněna anténa, signál byl stále přijímán. Při použití směrové antény došlo při vychýlení z přímého směru okamžitě ke ztrátě signálu. Aby nemusel pilot manuálně natáčet anténu, byl sestaven sledovací systém, který tuto dílčí úlohy řeší automaticky.

Sledovací systém sestavený v této práci byl zároveň úspěšně otestován pomocí simulovaného UAV. Anténa se během testů natáčela za virtuálním cílem, od kterého přijímala telemetrii.

13. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo sestavení sledovacího systému pro bezpilotní zařízení.

Teoretická část slouží především jako ucelený úvod do oblasti bezpilotních zařízení. Pokrývá problematiku týkající se těchto strojů, přičemž zvláštní důraz byl kladen na technické oblasti nezbytné pro sestavení sledovacího systému, zejména pak na rádiovou komunikaci a principy šíření rádiových vln. Rovněž byl podrobně vysvětlen princip určení polohy cíle na zemi i ve vzduchu pomocí geolokačního systému GPS.

Praktická část pak popisuje konstrukci sledovacího systému založeného na kartě Pixhawk, která pro komunikaci se sledovaným bezpilotním zařízením využívá protokol MAVLink. Pixhawk přijímá telemetrická data, jež jsou vysílána anténou, která bude v budoucnu nainstalována na sledovaném zařízení. Poté porovná vzájemnou polohu (určenou pomocí systému GPS) sledovacího systému a sledovaného zařízení v trojrozměrném prostoru, načež upraví polohu přijímací antény, aby směřovala přímo k UAV.

Takto lze podstatně zlepšit kvalitu přijímaného signálu. Provedená měření totiž ukázala, že se správně nastavenou směrovou přijímací anténou lze dosáhnout stabilní komunikace na více než dvojnásobnou vzdálenost oproti všesměrové přijímací anténě.

Funkčnost tohoto systému byla prozatím ověřena na simulovaných datech z PC generovaných programem Mission Planner. Dalším krokem bude pořízení reálného UAV, na které bude vysílací anténa nainstalována.

Sledovací systém je rovněž vybaven sub-systémem pro příjem videa z kamery umístěné na sledovaném cíli. Skládá se z panelové směrové antény, přijímače audio/video signálu a LCD displeje pro zobrazení videa. Právě díky vhodnému směřování antény bude možno zajistit kvalitní příjem obrazového signálu, což výrazně usnadní práci operátorovi bezpilotního zařízení a zvýší jeho akční radius.

14. Literatura

- [1] *Perner's Contacts* [online]. Copyright ©4 [cit. 11.03.2017]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Schwarz.pdf
- [2] AUSTIN, Reg. *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development, and deployment*. Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-05819-0.
- [3] EDITED BY RICHARD K. BARNHART .. [ET AL.]. *Introduction to unmanned aircraft systems*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2012. ISBN 9781439835210.
- [4] *Integration of Unmanned Aerial Vehicles into Future Air Traffic Management* [online]., 153 [cit. 2017-03-11]. DOI: 85521. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/documents/projects/CARE/iabg-finalreport.pdf>
- [6] SOSINSKY, Barrie A. *Mistrovství - počítačové sítě: [vše, co potřebujete vědět o správě sítí]*. Brno: Computer Press, 2010. ISBN 978-80-251-3363-7.
- [8] MAVLink Micro Air Vehicle Communication Protocol. *Qgroundcontrol* [online]. 2016 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>
- [9] Český telekomunikační úřad [online]. Copyright © [cit. 11.03.2017]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2012/vo-r_10-04_2012-07.pdf
- [10] Specifické charakteristiky šíření rádiových vln v pozemních kanálech. *Radio.feld.cvut* [online]. Praha, 2005 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://radio.feld.cvut.cz/personal/mikulak/MK/MK05_semestralky/19Specifika_sireni.pdf
- [11] MAZÁNEK, Miloš a Pavel PECHAČ. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03032-6.
- [13] Šíření rádiových signálů. *Český Radioklub* [online]. Praha, 2006 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.crk.cz/SIRENIC>

- [14] Rozdělení radiových vln a jejich šíření. *Josef Volmut* [online]. 2001 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://dlabos.wz.cz/en/Rozdeleni_radiovych_vln_a_jejich_sireni.html
- [15] Šíření radiových vln. *Leporelo.info* [online]. [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <https://leporelo.info/sireni-radiovych-vln>
- [17] ŠEBESTA, Jiří. *Globální navigační systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. ISBN 978-80-214-4500-0.
- [18] Globální navigační systémy. *Mendelova univerzita v Brně* [online]. Brno: mendelu [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=6390
- [19] Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework. *Www.nist.gov* [online]. Gaithersburg: National Institute of Standards & Technology, 2004 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/el/isd/ks/NISTSP_1011_ver_1-1.pdf
- [20] Kmitočtová tabulka | Český telekomunikační úřad. Český telekomunikační úřad [online]. Copyright © 2016 [cit. 11.03.2017]. Dostupné z: <http://www.ctu.cz/kmitoctova-tabulka>
- [21] *Aldebaran bulletin: Kosmický segment GPS a jeho budoucnost* [online]. Praha: AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, 2005, 3(2) [cit. 2017-03-24]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_02_gps.php
- [22] Úvod do GPS. *Přírodovědecká fakulta Univerzita Karlova* [online]. Praha: CITT Praha Akademie kosmických technologií oblast Galileo, GMES, 2008 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps/>
- [23] X8 Flying Wing Kit. In: *Airelectronics* [online]. Španělsko: Science and Technology campus of Montegancedo, 2006 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.airelectronics.es/products/thirdparty/x8/?PHPSESSID=782dktrev502kgsvqgl7mh3e44>
- [24] Aisview. In: *Aisview* [online]. Praha: Řízení letového provozu České republiky, 2016 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://aisview.rlp.cz/>

- [25] Předpisy pro létání s drony v ČR. *DroneWeb* [online]. Praha: droneweb.cz, c2016 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.droneweb.cz/legislativa-provozu-dronu/item/37-predpisy-pro-letani-s-drony-v-cr>
- [26] Polarizace. In: *Wikipedia: Polarizace* [online]. Wikipedia, 2016 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Polarizace_\(elektrodynamika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Polarizace_(elektrodynamika))
- [27] Směrová charakteristika. In: *Rc-eagleeye* [online]. 2014 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.rc-eagleeye.cz/rc-eagleeye/0/0/2/93>
- [28] Civil drones (Unmanned aircraft). *PX4 Autopilot* [online]. EU: easa european aviation safety agency, c2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas>
- [29] ČESKÁ REPUBLIKA. *LETECKÝ PŘEDPIS: PRAVIDLA LÉTÁNÍ L 2*. In: . Praha: MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, 2016, 153/2014-220. Dostupné také z: https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/data/print/L-2_cely.pdf
- [30] Jak získat Povolení k létání a Letecké práce. *Česká Asociace Profesionálních Provozovatelů Bezpilotních Letadel: Legislativa CZ* [online]. Petr Lněnička, 2014 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.apbl.cz/cz/odborne-informace/jak-ziskat-povoleni-k-letani-a-letecke-prace-3>
- [32] ITU Region. In: *Wikipedia* [online]. Wikipedia, 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/ITU_Region#/
- [33] KAPLAN, Elliott D. a C. HEGARTY. *Understanding GPS: principles and applications*. 2nd ed. Boston: Artech House, c2006. ISBN 1-58053-894-0.
- [34] Principles of GPS. *Texas Tech University Departments* [online]. Texas: Texas Tech University Departments, c2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: http://www.depts.ttu.edu/geospatial/center/gist4310/documents/lectures/Fall%202012/4310-03%20Principles%20of%20GPS%20I_Trilateration.pdf
- [35] Triangulation. In: *GisGeography* [online]. GISGeography, 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/>

- [36] New Civil Signals. *GPS* [online]. GPS.gov, 2016 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- [37] HALLAS, Joel R. *Basic antennas: understanding practical antennas and design, includes details of easy-to-build antennas!*. Newington, CT: ARRL, c2008. ISBN 978-0-87259-999-4.
- [38] MCRP 3-40.3C Antenna Handbook. , United States Government US Marine Corps. *Marine Corps Reference Publication* [online]. 3. Albany: Createspace Independent Publishing Platform, 2001, s. 68 [cit. 2017-03-26]. ISBN 1540853381. Dostupné z: <http://www.zerobeat.net/r3403c.pdf>
- [39] Elektromagnetické vlny: Yagiho anténa. *Multimediální učebnice* [online]. Brno: FEEC VUT Brno, c2010 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=10-7-A>
- [40] AntennaTracker. *Ardupilot* [online]. ArduPilot Dev Team, c2016 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://ardupilot.org/antennatracker/index.html#home>
- [41] MAVLink - Step-by-Step. *Ardupilot* [online]. 2016 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://discuss.ardupilot.org/t/mavlink-step-by-step/9629>
- [42] Pixhawk-PX4. In: *Amazon* [online]. amazon [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Pixhawk-2-4-6-Flight-Controller-Card/dp/B0179A3GU4>
- [43] Přijímač RC832. In: *Hobbyking* [online]. hobbyking [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/skyzone-fpv-5-8-ghz-32ch-rc832-receiver-with-a-v-and-power-cables.html
- [44] Vysílač TS832. In: *Hobbyking* [online]. hobbyking [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/skyzone-fpv-5-8ghz-600mw-32ch-a-v-transmitting-tx-module-ts832-rp-sma.html
- [45] Kruhově polarizované antény. In: *Hobbyking* [online]. hobbyking [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/boscam-5-8ghz-cloud-spirit-circular-polarized-antenna-set-sma.html
- [46] Hobbywing 5V/6V 3A Switch-Mode Ultimate BEC. In: *Banggood* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: [http://www.banggood.com/Hobbywing-5V-or-6V-3A-Switch-Mode-Ultimate-BEC-\(UBEC\)-p-908018.html](http://www.banggood.com/Hobbywing-5V-or-6V-3A-Switch-Mode-Ultimate-BEC-(UBEC)-p-908018.html)
- [47] Power Module. In: *PX4 Autopilot* [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: https://pixhawk.org/peripherals/power_module

- [48] 433 MHz rádio. In: *Hobbyking* [online]. hobbyking [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/hk-pilot-500mw-transceiver-telemetry-radio-set-v2-433mhz.html
- [49] Attopilot zapojení. In: *ArduPilot* [online]. ardupilot [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-using-a-current-sensor.html>
- [50] Calibration. In: *ArduPilot* [online]. ArduPilot Dev Team, c2016 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-compass-calibration-in-mission-planner.html#common-compass-calibration-in-mission-planner>
- [51] Tabulka frekvencí a kanálů. In: *Egiganten* [online]. egiganten [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://egiganten.se/products/fpv-5-8ghz-600mw-48ch-wireless-av-av-transmitter-receiver-ts832rc832-tx-rx-set-for-professional-drones-rc-plane-dji-gopro/>
- [52] Fatshark SpiroNET anténa. In: *HobbyKing* [online]. HobbyKing [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/immersion-fatshark-spiroNET-cp-patch-5-8ghz-antenna-sma-13dbi-gain.html
- [53] Sony FPV Camera. In: *4props* [online]. 4props [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <https://buy.4props.com/accessories/sony-700tvl-ccd-fpv-camera-with-metal-case.html>
- [54] Hexacopter. In: *Electronics Technology* [online]. Electronics Technology, 2016 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <https://dccbkt.blogspot.cz/2016/07/quadcopter-vs-hexacopter-vs-octacopter.html>
- [55] ČESKÁ REPUBLIKA. Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu. In: <http://www.ctu.cz/vseobecne-opravneni-c-vo-r10052014-3>. Praha: Český telekomunikační úřad, 2014, ročník 2005, číslo 127.
- [56] Elektromagnetické spektrum. In: *Pion* [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.pion.cz/cs/clanek/elektromagneticke-spektrum>
- [57] OSD. In: *DX* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.dx.com/p/mavlink-osd-minimosd-compatible-dc-dc-voltage-stabilizer-blue-223354#.WPH0LIjyiUk>

Slovník pojmů

| | |
|-------------|--|
| RPAS | Remotely Piloted Aircraft System (systém dálkově pilotovaných letadel) |
| UAS | unmanned aircraft system (systém bezpilotních letounů) |
| FMU | Flight Management Unit (řídicí jednotka) |
| IO | Input/Output (vstup a výstup) |
| FPU | floating-point unit (matematický koprocessor) |
| GCS | Ground Control Station (pozemní stanice) |
| ICAO | International Civil Aviation Organization (Mezinárodní organizace pro civilní letectví) |
| RFI | Radio frequency interference (elektrické rušení v kmitočtovém rozsahu) |
| EMI | Electromagnetic interference (Elektromagnetické rušení) |
| RPA | Remotely Piloted Aircraft (dálkově ovládané zařízení) |
| GND | Ground (uzemnění) |
| VCC | power-supply pin (napájecí pin) |
| FPV | First person view (pohled z první osoby) |
| DC | Direct current (stejnosměrný proud) |
| TVL | TV line (televizní řádky – rozlišení analogových kamer) |
| PAL | Phase alternating line (kódování analogového signálu) |
| OSD | on-screen display (informace zobrazované na obrazovce) |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1, UAV s pevným křídlem [23] | 5 |
| Obrázek 2, Multikoptéra [54] | 6 |
| Obrázek 3, Letecká mapa AisView [24] | 14 |
| Obrázek 4, Elektromagnetické spektrum [56] | 18 |
| Obrázek 5, Přímá vlna | 21 |
| Obrázek 6, Povrchová vlna..... | 21 |
| Obrázek 7, Odražená vlna | 21 |
| Obrázek 8, Prostorová vlna | 23 |
| Obrázek 9, polarizace [26]..... | 23 |
| Obrázek 10, eliptická polarizace [26]..... | 24 |
| Obrázek 11, Kruhová polarizace [26]..... | 24 |
| Obrázek 12, Mapa regionů – Modrá region 2, žlutá region 1, fialová region 3 [32] | 26 |
| Obrázek 13, Vyzařovací Charakteristika všesměrové antény [27] | 28 |
| Obrázek 14, Vyzařovací Charakteristika směrové antény [27] | 29 |
| Obrázek 15, Vyzařovací Charakteristika panelové antény [27] | 30 |
| Obrázek 16, Trilaterace [35]..... | 35 |
| Obrázek 17, Sféry šíření signálu satelitu [35] | 35 |
| Obrázek 18, Blokové schéma sledovacího systému..... | 39 |
| Obrázek 19, Pixhawk [42] | 41 |
| Obrázek 20, Telemetrická rádia 433 MHz [48]..... | 42 |
| Obrázek 21, UBEC [46] | 43 |
| Obrázek 22, Napájecí modul [47]..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 23, zapojení napájecího modulu [49]..... | 44 |
| Obrázek 24, piny na power portu | 44 |
| Obrázek 25, zapojení Attopilot..... | 45 |
| Obrázek 26, kanály RC832 [51]..... | 46 |
| Obrázek 27, přijímač RC832 [43] | 46 |
| Obrázek 28, vysílač TS 832 [44]..... | 47 |
| Obrázek 29, všesměrové antény [45] | 48 |
| Obrázek 30, Kruhově polarizovaná panelová anténa [52] | 49 |
| Obrázek 31, FPV kamera [53]..... | 50 |
| Obrázek 32, OSD modul [57]..... | 50 |
| Obrázek 33, Schéma sledovací antény | 55 |
| Obrázek 34, Detailní náhled zapojení na výstupech Pixhawk..... | 56 |
| Obrázek 35, FPV systém | 56 |
| Obrázek 36, Sledovací systém bez stativu..... | 57 |
| Obrázek 37, Graf dosahu signálu | 62 |
| Obrázek 38, dosah signálu na mapě | 62 |
| Obrázek 39, Závislost kvality signálu při průchodu překážkou | 63 |
| Obrázek 40, Závislost kvality přijímaného signálu na vzdálenosti pro různé typy přijímače..... | 64 |
| Obrázek 41, Graf kvality signálu průchodem překážkou obou antén | 65 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1, Aplikace UAV [1] | 9 |
| Tabulka 2, Open kategorie..... | 12 |
| Tabulka 3, povolené vzdálenosti | 14 |
| Tabulka 4, Nejpoužívanější frekvence | 27 |
| Tabulka 6, Specifikace 433 MHz rádia [48]..... | 42 |
| Tabulka 7, Specifikace přijímače RC832 [43] | 46 |
| Tabulka 8, Specifikace vysílače TS 832[44]..... | 47 |
| Tabulka 5, Specifikace Fatshark SpiroNET anténa [52] | 49 |

Seznam vzorců

| | |
|---|----|
| Vzorec 1, Vzorec pro výpočet vzdálenosti..... | 41 |
|---|----|

Seznam příloh

Příložené CD obsahuje elektronickou verzi práce a detailní popis konfigurace sledovacího systému a simulaci bezpilotního zařízení ve formátu PDF. Veškerá práce byla provedena v programu Mission Planner verze 1.3.46.

Příloha č.1 Informace o provozu civilních UAV

Příloha č.2 Konfigurace sledovacího systému

Příloha č.3 Simulace bezpilotního zařízení