Technická univerzita v Košiciach

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Zvyšovanie bezpečnosti integrácie dronov do leteckého priestoru

Bakalárska práca

2024 **Štefan Kando**

Technická univerzita v Košiciach

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Zvyšovanie bezpečnosti integrácie dronov do leteckého priestoru

Bakalárska práca

Študijný program:	Inteligentné systémy
Študijný odbor:	Informatika
Školiace pracovisko:	Katedra kybernetiky a umelej inteligencie (KKUI)
Školiteľ:	doc. Ing. Peter Papcun, PhD.

Košice 2024 **Štefan Kando**

Abstrakt v SJ

Táto bakalárska práca je zameraná na analýzu bezpečnosti aktuálnej integrácie dronov do leteckého priestoru vzhľadom na okolitú prevádzku a navrhuje technické riešenia, ako bezpečnosť tejto integrácie zvýšiť. Rozoberá, ako sa v letectve vymieňajú dáta a navrhuje, ako by pilot dronu mohol k takýmto dátam pristúpiť pre zvýšenie svojho prehľadu o okolitej letovej prevádzke. Výsledkom práce je plánovacia a varovná aplikácia, pomocou ktorej si vie pilot dronu zistiť bezpečnosť plánovaného letu, pričom využíva aj vlastné získané dáta. Táto aplikácia ho taktiež počas jeho letu varuje pred náhle naskytnutými hrozbami. Aplikácia vznikla v klient-server architektúre, čo maximalizuje jej všestrannosť a použiteľnosť.

Kľúčové slová

Dron, UAV, letecký priestor, letová prevádzka, bezpečnosť, rádiový signál

Abstrakt v AJ

This bachelor's thesis aims to analyze the safety of the current integration of drones into the airspace with respect to surrounding traffic and proposes technical solutions to enhance the safety of this integration. It discusses how data is exchanged in aviation and suggests how a drone pilot could access such data to increase their awareness of surrounding air traffic. The thesis results in an application for planning and alerting that drone pilots can assess the safety of their planned flight, while also utilizing their own collected data. This application also warns them of suddenly arising threats during their flight. The resulting application was developed in a client-server architecture, maximizing its versatility and usability.

Kľúčové slová v AJ

Drone, UAV, airspace, air traffic, safety, radio signal

73222

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Katedra kybernetiky a umelej inteligencie

ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študijný odbor: **Informatika**

Študijný program: **Inteligentné systémy**

Názov práce:

Zvyšovanie bezpečnosti integrácie dronov do leteckého priestoru

Increasing the safety of the integration of drones (UAV) into the airspace

Študent: **Štefan Kando**

Školiteľ: **doc. Ing. Peter Papcun, PhD.**

Školiace pracovisko: **Katedra kybernetiky a umelej inteligencie**

Konzultant práce:

Pracovisko konzultanta:

Pokyny na vypracovanie bakalárskej práce:

1. Možnosti získavania dát z letovej prevádzky
2. Aktuálna integrácia dronov v leteckom priestore
3. Návrh plánovacieho a varovného systému pre pilotov dronov vzhľadom na letovú prevádzku
4. Realizácia plánovacieho a varovného systému pre pilotov dronov
5. Vyhodnotenie realizovaného riešenia
6. Vypracovať dokumentáciu podľa pokynov vedúceho práce (hlavná časť minimálne 40 strán, prílohy – užívateľská a systémová príručka)

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský

Termín pre odovzdanie práce: 24.05.2024

Dátum zadania bakalárskej práce: 31.10.2023

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY -11-

v. z. P. Ludrová

prof. Ing. Liberios Vokorokos, PhD.

dekan fakulty

Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry.

Košice 24. 5. 2024 .....

Vlastnoručný podpis

Poďakovanie

Ďakujem vedúcemu práce, doc. Ing. Petrovi Papcunovi, PhD. za ochotu pristúpiť k tejto téme a jeho trpezlivosť a podporu pri vypracovaní tejto práce.

Ďakujem každému z rodiny a priateľov, ktorí mi vyjadrili podporu a motivovali ma k vypracovaniu tejto práce.

Ďakujem leteckej škole FUTURE FLY SK.ATO.11 Bidovce a môjmu inštruktorovi, pplk. Ing. Michalovi Truskovi za to, že mi umožnili splniť si môj sen stať sa pilotom, čo mi umožnilo získať skúsenosti a informácie z prvej ruky užitočné pri vypracovaní tejto bakalárskej práce.

Ďakujem môjmu nadriadenému, kolegovi a priateľovi, Ing. Františkovi Šingovskému za to, že vo mne pestoval moju záľubu v elektrotechnike a rádioamatérstve, bol mojim mentorom v týchto oblastiach, a za neoceniteľné skúsenosti, ktoré mi naše spoločné projekty v neskutočnom vzájomnom dopĺňaní v Auguste Cryogenics Slovakia s.r.o. priniesli; skúsenosti, ktoré boli vo veľkom využité v tejto bakalárskej práci.

Predhovor

Človek má už od pradávna prirodzenú túžbu lietať. Gravitácia má síce svoje výhody, drží nás pri zemi a vďaka nej je všetko pekne organizované a nepoletuje navôkol, ale každý, kto sa nebojí výšok, sa aspoň raz chcel pozrieť na svet, ako vyzerá zhora. Pohľad zhora dokáže človeka doslova dostať „nad vec“ a pripomenúť mu, že niektoré „pozemské“ starosti v skutočnosti nie sú až také vážne.

Gravitácia nám v tejto túžbe veľmi nepomáha a na to, aby sme s našou ľudskou váhou dokázali vzlietnuť, potrebujeme veľké množstvo energie. Čo ak by sme vedeli vzlietnuť len s našim zrakom, pričom my by sme ostali na zemi? Toto nám umožňujú drony, ktoré sú každým rokom lepšie, lacnejšie a prístupnejšie širokej verejnosti.

Avšak piloti dronov častokrát zabúdajú, že v leteckom priestore sa nevyskytujú sami. Letecký priestor je zdieľaný s pilotovaným (osobným) letectvom, pri ktorom ak by nebodaj nastala zrážka, sú v ohrození ľudské životy. Táto práca sa venovala technickému zvyšovaniu bezpečnosti tohoto zdieľania priestoru a predchádzania tomu, aby sa takéto nebezpečenstvo mohlo vyskytnúť.

Obsah

Úvod **19**

1 Formulácia úlohy **20**

2 Možnosti získavania dát z letovej prevádzky **21**

2.1 História získavania dát z letovej prevádzky 21

2.1.1 Prvá forma riadenia letovej prevádzky (1929) 21

2.1.2 Plánovanie letov (1935) 23

2.1.3 Vývoj nadväzujúci na vojenské letectvo 24

2.1.4 Radar a IFF 25

2.2 Sekundárny radar a ADS-B 26

2.2.1 Vývin SSR v ADS-B 26

2.2.2 Význam ADS-B pre letectvo 29

2.2.3 Nevýhody ADS-B 30

3 Integrácia dronov v leteckom priestore **32**

3.1 Aktuálna legislatíva pre pilotov dronov na Slovensku 32

3.2 Rozdelenie vzdušného priestoru Slovenska 34

3.3 Kde sa lietadlá môžu pohybovať? 36

3.4 Zhrnutie aktuálnej integrácie 38

4 Návrh plánovacieho a varovného systému pre pilotov dronov vzhľadom na letovú prevádzku **39**

4.1 Príklad výbavy pilota dronu a diagram ovládania dronu 39

4.2 Zhrnutie spôsobov získavania dát z letovej prevádzky – ich použitie a relevancia v aplikácii 40

4.2.1 Vizuálny kontakt 41

4.2.2 Zvuk 41
4.2.3 Rádiové vlny 42
4.2.4 Tabuľka s porovnaním spôsobov prijímania dát 44
4.3 Prijímanie rádiových signálov pomocou SDR 44
4.3.1 Vysvetlenie základných pojmov pri prijímaní rádiových signálov 45
4.3.2 Anténa 46
4.3.3 Spojenie antény a SDR a predspracovanie signálu 47
4.3.4 Softvérovo definované rádio 47
4.4 Spracovanie prijatých dát a architektúra aplikácie 49
4.4.1 Operačný systém a hardvér pre spracovanie 49
4.4.2 Spracovanie leteckej komunikácie 50
4.4.3 Spracovanie ADS-B 50
4.4.4 Napájanie a pripojenie internetu 51
4.4.5 Klient-server architektúra aplikácie 52
4.4.6 Získavanie polohy dronu 53
4.4.7 Bloková architektúra aplikácie 55
4.5 Softvérová architektúra aplikácie 56
4.5.1 Logging a práca s databázou 57
4.5.2 Back-end (Python + Flask) 61
4.5.3 Front-end (JS / React) 62
4.5.4 Vývojový diagram plánovacej a varovnej funkcionality 64

5 Realizácia plánovacieho a varovného systému 67
5.1 Výber hardvéru 67
5.2 Prototyp prijímača a prijímanie ADS-B z bytu 68
5.3 Stavba statického prijímača 69
5.4 Stavba a softvér hlavného servera 73

5.5 Vývoj aplikácie pre plánovanie a varovanie 74
5.6 Vizualizácia dát 76

6 Vyhodnotenie realizovaného riešenia 78
6.1 Vyhodnotenie získaných dát 78
6.2 Využitie aplikácie v praxi 83
6.3 Vyhodnotenie varovného systému 84
6.4 Zhodnotenie bakalárskej práce 86

7 Záver 88

Zoznam použitej literatúry 90

Zoznam príloh 95

Zoznam obrázkov

2 – 1 Prvý riadiaci letovej prevádzky, Archie W. League, riadiaci letovú prevádzku na letisku St. Louis s vlajkami [2] 22
2 – 2 Práca plánovacieho strediska v Newarku v roku 1936 [2] 23
2 – 3 Holandská osobná parabola na detekciu lietadiel z 30-tych rokov 20. storočia [4] 24
2 – 4 Sir Robert Alexander Watson-Watt, vynálezca IFF a SSR [7] . . 26
2 – 5 Diagram fungovania multilaterácie [12] 30
2 – 6 Mapa amatérskych prijímačov ADS-B na Slovensku a ich pokrytie vo výške 10 000 stôp nad morom [15] 31
3 – 1 Mapa vzdušných priestorov Slovenska relevantná pre pilotov dronov, dostupná na `mamdron.sk` [19] 35
4 – 1 Diagram ovládania dronu 40
4 – 2 Diagram prijímania rádiových signálov pomocou SDR 45
4 – 3 FlightAware Pro Stick Plus, SDR pre ADS-B s USB a SMA-F konektorom [35] 48
4 – 4 Bloková architektúra prijímania rádiových signálov a našej aplikácie 55
4 – 5 Softvérová architektúra aplikácie 56
4 – 6 Sekvenčný diagram aplikácie 57
4 – 7 Dátový model našej aplikácie v PostgreSQL 60
4 – 8 Návrh vzhľadu používateľského rozhrania 64
4 – 9 Vývojový diagram plánovacej a varovnej funkcionality aplikácie pre back-end 65
4 – 10 Vývojový diagram plánovacej a varovnej funkcionality aplikácie pre front-end 66
5 – 1 Prototyp prijímača a lacný prijímač dizajnovaný na prijímanie z bytu / domu 69

5 – 2 Zapojenie statického prijímača v podkroví 71
5 – 3 Vnútorná a vonkajšia štruktúra statického prijímača 72
5 – 4 Hardvérová architektúra statického prijímača 73
5 – 5 Stavba hlavného servera založeného na RPi5, s ventilátorom Noctua napojeným cez GPIO a NVMe SSD base 74
5 – 6 Finálna podoba aplikácie AeroGuardian 75
6 – 1 Výškový graf všetkej zachytenej letovej prevádzky 78
6 – 2 Vzdialenostný graf všetkej zachytenej letovej prevádzky 79
6 – 3 Graf dosahu prijímača pre nízko lietajúce lietadlá 80
6 – 4 Smerový graf nášho statického prijímača 81
6 – 5 Ukážka máp s výskytom letovej prevádzky 82
6 – 6 Príklad využitia našej aplikácie v praxi (Android a AR) 83
6 – 7 Ukážka varovania v Quest 3 počas predletovej prípravy 84
6 – 8 Graf predstihu varovania systému pri letovej zóne 500 m 85
6 – 9 Graf predstihu varovania systému pri letovej zóne 1 000 m 86

Zoznam tabuliek

2 – 1 Senzory na lietadle a veličiny, ktoré merajú [9] 27

4 – 1 Porovnanie rôznych spôsobov získavania dát o letovej prevádzke a ich relevancia k aplikácii podľa vybratých kritérií 44

Zoznam symbolov a skratiek

λ Fyzikálne označenie vlnovej dĺžky (meraná v metroch)

U Fyzikálne označenie elektrického napätia (jednotka Volt)

f Fyzikálne označenie frekvencie (meraná v Hertzoch)

2D, 3D Dvojrozmerný, trojrozmerný

ADC Analog to Digital Converter (konvertor analógového signálu na digitálny)

ADS-B Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (Automatické závislé sledovanie – vysielanie)

AIP Aeronautical Information Publication (Letecká informačná publikácia)

AM Amplitúdová modulácia

API Application Programming Interface (programátorské rozhranie)

AR Augumented Reality (zmiešaná realita)

ARM Advanced RISC Machines, typ procesorovej architektúry

ATZ Aerodrome Traffic Zone (Letisková prevádzková zóna)

B Bajt (8 bitov), v počítačovej vede jednotka informácie

BNC Bayonet Neill–Concelman, typ koaxiálneho konektoru

c Rýchlosť svetla (vo vákuu 299 792 458 metrov za sekundu)

CTR Control Zone (zóna riadenia)

DJI Da-Jiang Innovations, čínsky výrobca dronov

EASA European union Aviation Safety Agency (Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť letectva)

EU-DEM European Digital Elevation Model (Európsky digitálny výškový model)

FAPSP FlightAware Pro Stick Plus, SDR používané na prijímanie ADS-B

FM Frekvenčná modulácia

FTP File Transfer Protocol, protokol na prenos dát cez internet

GNSS Global Navigation Satellite System (globálny navigačný satelitný systém)

GPA Ground Plane Antenna (rovinová anténa)

GPIO General-Purpose Input/Output (univerzálny vstup/výstup)

GPT Generative Pre-Trained Transformer (generatívny predtrénovaný transformátor), model umelej inteligencie na spracovanie textu

GSM The Global System for Mobile Communications, typ mobilnej siete

HTTP Hypertext Transfer Protocol, internetový protokol

ICAO International Civil Aviation Organization (Medzinárodná organizácia civilného letectva)

ID Identifikátor, väčšinou číselný, používaný v databáze na dohľadávanie

IFF Identification – Friend or Foe (identifikácia – priateľ alebo nepriateľ)

IFR Instrument Flight Rules (pravidlá lietania podľa prístrojov)

IP Internet Protocol (internetový protokol), adresa prístupu cez internet

JS JavaScript, webový programovací jazyk

JSON JavaScript Object Notation, dátový formát

kn Uzol, jednotka rýchlosti v letectve, námorné míle za hodinu (≈ 1,85 km/h)

LZR Predpona pre slovenské obmedzené vzdušné priestory (LZ – predpona pre Slovensko, R – Restricted – obmedzené územia)

MCX Micro Coaxial Connector, typ koaxiálneho konektoru

MLAT Multilaterácia

NM Námorná míľa, jednotka vzdialenosti používaná v letectve, (≈ 1,85 km)

NVMe Nonvolatile Memory express, špecifikácia pre ukladanie dát

OS Operačný systém

OSM OpenStreetMap, open-source mapa hosťovaná na internete

PNG Portable Network Graphics, formát uloženia obrázku

PoE Power over Ethernet (napájanie cez ethernet)

PPM Pulse Position Modulation (modulácia polohou pulzu)

PSR Primary Surveillance Radar (primárny dohľadový radar)

PVC Polyvinyl chlorid, typ plastu

RADAR Radio Detection And Ranging (rádiová detekcia a meranie vzdialenosti)

RAM Random-Access Memory (pamäť s priamym prístupom, operačná pamäť)

RLP Riadiaci letovej prevádzky

RPi Raspberry Pi

RTL-SDR Realtek SDR, SDR využívajúce čip vyrobený spoločnosťou Realtek

SDK Software Development Kit (Súprava na vývoj softvéru)

SDR Software Defined Radio (Softvérovo definované rádio)

SIM Subscriber Identity Module (modul identity predplatiteľa)

SMA SubMiniature version A, typ koaxiálneho konektoru

SQL Structured Query Language, jazyk pre manipuláciu s databázou

SSD Solid-State Drive (mechanika s nepohyblivým médiom)

SSH Secure Shell, protokol na prístup k príkazovému riadku cez internet

SSR Secondary Surveillance Radar (sekundárny dohľadový radar)

STT Speech to text (Hlas na text)

UAV Unmanned Aerial Vehicle (bezpilotné lietajúce vozidlo)

UHF Ultra High Frequency, typ koaxiálneho konektoru

VFR Visual Flight Rules (pravidlá lietania za vidu)

VLOS Visual Line Of Sight (zorná čiara)

VMC Visual Meteorogical Conditions (Vizuálne meteorologické podmienky)

VPN Virtual Private Network (virtuálna súkromná sieť)

Slovník termínov

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) je spoločný názov pre bezpilotné lietajúce vozidlá, medzi ktoré patrí aj dron.

Dron je bezpilotné lietajúce vozidlo schopné diaľkovo riadeného letu. Táto práca sa venuje dronom, ktoré sú používané na súkromné a rekreačné účely.

Pilot dronu je osoba, ktorá ovláda dron diaľkovo pomocou riadiaceho zariadenia. Zodpovedá za bezpečný let, dodržiavanie predpisov a efektívne vykonávanie plánovaných operácií.

Letecký priestor je trojrozmerný priestor nad zemským povrchom, kde sa pohybuje letecká prevádzka. Je regulovaný príslušnými leteckými úradmi na zabezpečenie bezpečnosti a efektívnosti leteckej dopravy.

Letová prevádzka zahŕňa všetky činnosti súvisiace s pohybom lietadiel vo vzduchu a na zemi, vrátane vzletu, letu, pristátia a riadenia letovej prevádzky.

Integrácia znamená začlenenie do existujúceho leteckého priestoru a prevádzky, vrátane technických, regulačných a operačných aspektov.

Bezpečnosť v letectve zahŕňa ochranu pred rizikami a hrozbami, ktoré by mohli ohroziť ľudské životy, zdravie, majetok alebo životné prostredie.

Rádiový signál je elektromagnetická vlna používaná na prenos informácií. V letectve slúži na komunikáciu medzi lietadlami a riadiacimi strediskami, navigáciu a prenos dát.

Úvod

Drony sú každým rokom lacnejšie, lepšie a prístupnejšie širokej verejnosti, čo vedie k rýchlemu nárastu počtu ich pilotov. Títo noví piloti, najmä tí, ktorí sa predtým nezaujímali o letectvo, musia myslieť na to, že letecký priestor, ktorý využívajú, je zdieľaný s ostatnými účastníkmi letovej prevádzky, nech lietajú kdekoľvek. Ohľad je potrebné brať najmä na účastníkov pilotovanej (osobnej) prevádzky, pretože ak by s nimi nastala zrážka, je v ohrození nielen dron, ale aj ľudský život.

Narozdiel od cestnej premávky však vo vzduchu nemáme značky a semafory. Integrácia dronov do leteckého priestoru si vyžaduje riešenia nielen legislatívne, ale aj technické. Technický pokrok dronov by mal ísť ruka v ruke s technickým riešením bezpečnosti ich integrácie. Okrem technického vývoja dronov podliehali vývoju aj lietadlá, ktorým za roky ich používania boli vyvinuté systémy na efektívnu výmenu dát medzi nimi a bezpečnú prevádzku oproti ostatným lietadlám.

Táto bakalárska práca sa zameriava na analýzu aktuálnej integrácie dronov do leteckého priestoru a navrhuje a realizuje technické riešenia, ako bezpečnosť tejto integrácie zvýšiť. Letecký priestor je posudzovaný ako celok vzhľadom na všetkých jeho používateľov, pričom sa rešpektuje jednoznačná prednosť pilotovaného (osobného) letectva pred bezpilotným.

Práca analyzuje spôsoby, akými sa v letovej prevádzke vymieňajú dáta a sprístupňuje tieto dáta pilotom dronov. Analyzuje aktuálnu technickú a legislatívnu integráciu dronov do leteckého priestoru a uvádza základné pravidlá pre ostatných účastníkov letovej prevádzky, o ktorých by piloti dronov mali vedieť. Nadväzujúc na to navrhuje systém získavania dát o okolitej prevádzke, systém prezentácie týchto dát pilotom dronov a plánovaciu a varovaciu aplikáciu, ktorá pilotom dronov zvyšuje prehľad o okolitej prevádzke. Na záver sa riešenie realizovalo a vyhodnotilo.

1 Formulácia úlohy

V tejto bakalárskej práci máme vypracovať nasledujúce úlohy:

- **Možnosti získavania dát z letovej prevádzky** – analyzujeme rôzne možnosti získavania dát z letovej prevádzky. Navrhneme metódy, ako sa tieto možnosti získavania dát dajú digitalizovať pre ďalšie spracovanie. Spôsob, ktorý bude najpraktickejší a najlepší pre naše potreby rozoberieme viac do hĺbky a navrhneme systém na prijímanie týchto dát priamo pilotom dronu.
- **Aktuálna integrácia dronov v leteckom priestore** – analyzujeme aktuálnu technickú a legislatívnu integráciu dronov do leteckého priestoru a uvedieme si aj základné pravidlá pre ostatných účastníkov letovej prevádzky (pilotovanú (osobnú) prevádzku), o ktorých by piloti dronov mali vedieť. V aktuálnej integrácii budeme hľadať nedostatky, na ktoré bude naša práca nadväzovať.
- **Návrh plánovacieho a varovného systému pre pilotov dronov vzhľadom na letovú prevádzku** – navrhneme systém na spracovanie týchto dát a ich prezentáciu pilotovi dronu. Vytvoríme plánovací systém, podľa ktorého si bude vedieť pilot svoj let naplánovať a zistiť jeho bezpečnosť vzhľadom na okolitú prevádzku. Zároveň ho ten istý systém bude vedieť varovať pred náhle naskytnutými hrozbami.
- **Realizácia plánovacieho a varovného systému pre pilotov dronov** – navrhnutý systém na získavanie dát, ich spracovanie, prezentáciu, plánovanie a varovanie prevedieme do praxe.
- **Vyhodnotenie realizovaného riešenia** – na základe získaných dát spravíme analýzu nášho vybraného spôsobu získavania dát, ako aj pohybu letovej prevádzky v prijímanom okolí.

2 Možnosti získavania dát z letovej prevádzky

V tejto kapitole sa pozrieme na to, ako je možné získať dáta z letovej prevádzky vo všeobecnosti. Výmena dát v letovej prevádzke je pre pilotované (osobné) letectvo mimoriadne dôležitá. Aby sme našli najvhodnejší spôsob, ako tieto dáta poskytnúť pilotom dronov, inšpirujeme sa tým, ako táto výmena dát v pilotovanom (osobnom) letectve prebieha, vrátane historického hľadiska.

2.1 História získavania dát z letovej prevádzky

Keď porovnávame históriu vývoja letectva napríklad s históriou automobilizmu (resp. pozemnej dopravy), môžeme si všimnúť, že infraštruktúra pre pozemnú dopravu mala na čom zakladať. Napríklad infraštruktúra pre automobily nadväzuje na staršiu infraštruktúru pre kone a vozy.

Pri leteckej doprave to tak nebolo. Keď bratia Wrightovci v roku 1903 vykonali prvý úspešný let, infraštruktúra pre lietadlá vznikala úplne od základov. Komerčný letecký priemysel bol ešte v nedohľadne. V roku 1918 sa v Spojených štátoch amerických (USA) začala lietadlami rozvážať pošta. Riadenie letovej prevádzky v tejto dobe neexistovalo, pretože letová prevádzka bola tak riedka, že jej riadenie nebolo potrebné. Navyše, ešte neexistovali prístroje a technológia, ktorá by spoľahlivo umožňovala lietanie v noci a za zlého počasia, preto sa lietalo len počas dňa a dobrej viditeľnosti. Pokiaľ nastala situácia, že by sa k sebe priblížili dve lietadlá, používal sa princíp „viď a buď videný“ a lietadlá sa vyhýbali len na základe toho, čo videli piloti [1].

2.1.1 Prvá forma riadenia letovej prevádzky (1929)

Prvá forma akéhokoľvek riadenia letovej prevádzky vznikla až v roku 1929 na letisku St. Louis v Missouri (obrázok 2 – 1). Tá prebiehala formou riadiaceho letovej

prevádzky (RLP), ktorý mal stanovište pri vzletovo-pristávacej dráhe, kde mal vlajky, ktorými signalizoval okolitým lietadlám [1].

Obrázok 2 – 1: Prvý riadiaci letovej prevádzky, Archie W. League, riadiaci letovú prevádzku na letisku St. Louis s vlajkami [2]

Pokiaľ RLP mával so zelenou vlajkou, dával tým povolenie na pokračovanie vo vzlete alebo pristávaní. Pokiaľ mával červenou vlajkou, signalizoval tým lietadlám, že majú držať svoju aktuálnu pozíciu, kým RLP neuzná, že je bezpečné pokračovať [1].

Stánok pri vzletovo-pristávacej ploche neskôr vystriedala letisková veža, a vlajky vystriedali svetelné pištole. Tie umožňovali RLP smerovať ich pokyny na špecifické lietadlá a boli lepšie použiteľné v noci a v zlom počasí. Svetelné signály sa v letectve používajú dodnes na komunikáciu s lietadlami, ktoré nemajú letecké rádio, alebo mu nastala porucha [1].

Letecké rádio sa začalo používať v roku 1930 na riadiacej veži v Clevelande [2]. Prínos rádia pre bezpečnosť bol zjavný, avšak trvalo ešte dlho, kým sa zaviedli pravidlá a frazeológia pre zefektívnenie tejto formy komunikácie. Okrem toho bola rádiová technológia tej doby objemná, neefektívna a drahá, kvôli čomu si veľa prevádzkovateľov lietadiel svoje lietadlá rádiom nevybavila [1].

2.1.2 Plánovanie letov (1935)

Pri ďalšom rozkvete leteckého priemyslu, ako aj vývoji prístrojov umožňujúcich let v noci a za zlého počasia, začalo byť jasné, že sú potrebné ďalšie kroky na zabezpečenie letovej prevádzky. Vyťažené letiská nezvládali veľké počty lietadiel, ktoré chceli naraz pristávať alebo vzlietať. Preto okrem riadenia letovej prevádzky na letiskách sa začali lety aj dôkladnejšie plánovať s ohľadom na okolitú prevádzku [1].

V roku 1935 začali vznikať letecké plánovacie strediská (obrázok 2 – 2). Úlohou týchto plánovacích stredísk bolo plánovať a upravovať letové plány pilotov tak, aby sa počas ich letu minimalizovalo riziko stretu s iným lietadlom, ako aj aby sa minimalizovalo zaťaženie letísk. Tieto plánovacie centrá nemali priamy kontakt s lietadlami počas letu. Ak takéto plánovacie centrum dostalo dopyt na letový plán, v ktorom bola uvedená trasa, rýchlosť, letová výška, čas odletu a podobne, pracovníci takéhoto centra si daný let „nasimulovali“ na mape a porovnali ho s ostatnými lietadlami alebo letovými plánmi, o ktorých mali informácie. Pokiaľ nastalo riziko zrážky, takéto stredisko navrhlo úpravu letového plánu zmenou výšky alebo časom odletu. Kontakt medzi pilotom a plánovacím strediskom kvôli obmedzeniam doby musel prebiehať pomocou prostredníka, väčšinou skrz telefónnu linku s RLP [1].

Obrázok 2 – 2: Práca plánovacieho strediska v Newarku v roku 1936 [2]

2.1.3 Vývoj nadväzujúci na vojenské letectvo

Letectvo sa samozrejme rozširovalo a vyvíjalo aj mimo USA, najmä v Európe. Významným momentom pre rozšírenie verejného záujmu a dôvery, ako aj významný moment technického pokroku, bol Charlesov Lindberghov let cez Atlantický oceán v roku 1927 [3]. Lietadlá sa využívali v rôznych priemysloch, okrem iného aj na vojenské účely. Pri leteckých útokoch, ktoré sa vyskytovali už aj počas prvej svetovej vojny, nabrala otázka získavania dát o letovej prevádzke, najmä nepriateľskej, úplne iné rozmery. Približne od polovice prvej svetovej vojny do tridsiatych rokov 20. storočia sa na získanie polohy o nepriateľskej letovej prevádzke predtým, než sú viditeľné, používal zvuk. Na zvýraznenie zvuku, ako aj zistenie, odkiaľ zvuk prichádza, sa používali paraboly (obrázok 2 – 3) [4].

Obrázok 2 – 3: Holandská osobná parabola na detekciu lietadiel z 30-tych rokov 20. storočia [4]

Prvé stíhacie lietadlá na prúdové motory boli nasadené až v roku 1945 [5], avšak už v 30-tych rokoch vývoj vojenských lietadiel a ich rýchlosť pokročila natoľko, že akustická detekcia lietadiel už nestačila. Napätie v Európe bolo veľké a vedci boli pod tlakom vyvinúť novú technológiu na detekciu lietadiel čo najskôr. Z tejto

technológie vznikla najrevolučnejšia technológia v riadení leteckej prevádzky dodnes. Vznikol radar (slovo „radar“ je akronym pre „Radio Detection And Ranging“ – rádiová detekcia a meranie vzdialenosti). Prvý funkčný radar zhotovil Sovietsky zväz, konkrétne Piotr Oshchepkov, v roku 1934 [6].

2.1.4 Radar a IFF

Po Sovietskom zväze rýchlo nasledovala Veľká Británia, ktorá si uvedomovala význam vojenského letectva v prípade vojny vzhľadom na svoju polohu. Vo Veľkej Británii bol radar zhotovený v roku 1935, kde bol jeden z hlavných priekopníkov sir Robert Alexander Watson-Watt (obrázok 2 – 4) [7].

Radar funguje na princípe rádiových vĺn, ktoré sa odrážajú od pevných objektov. Na základe času návratu signálu sa vypočíta vzdialenosť lietadla. Moderný radar vie taktiež používať Dopplerov jav na to, aby zistil, ktorým smerom sa lietadlo pohybuje a ako rýchlo. Bez spolupráce lietadla je radar dodnes jeden z najlepších spôsobov získavania dát o letovej prevádzke, čo je dôvod, prečo moderné stíhacie lietadlá sa snažia svoju radarovú stopu minimalizovať [1].

Watson-Watt však prišiel na jednu nevýhodu použitia radaru vo vojenskom prostredí: keď sú vo vzduchu priateľské aj nepriateľské lietadlá, nedá sa jednoducho zistiť, ktoré lietadlo patrí na akú stranu. Dá sa samozrejme použiť rádio, ale vo vojenskom prostredí na frazeológiu nie je čas, keďže aj malé zaváhanie môže stáť ľudské životy. Vyvinul tak systém IFF (z angličtiny „Identification – Friend or Foe“ – identifikácia – priateľ alebo nepriateľ), ktorý funguje tak, že popri lokalizácii lietadla primárnym radarom (PSR – z angličtiny Primary Surveillance Radar – primárny dohľadový radar) môže byť lietadlo elektronicky dopytované na tajnej frekvencii, a na inej tajnej frekvencii automaticky odpovedá zašifrovaným kódom, ktorým potvrdzuje svoju identitu a náležitosť k bojujúcej strane. Vývin IFF položil základy fungovania sekundárneho radaru (SSR – z angličtiny Secondary Surveil-

lance Radar – sekundárny dohľadový radar), ktorý má veľké využitie v civilnom letectve [7].

Obrázok 2 – 4: Sir Robert Alexander Watson-Watt, vynálezca IFF a SSR [7]

2.2 Sekundárny radar a ADS-B

V tejto podkapitole si ďalej rozoberieme získavanie dát o letovej prevádzke pomocou SSR a ADS-B a vysvetlíme si význam týchto technológií pre letectvo, ako aj nadšencov letectva a našu aplikáciu.

2.2.1 Vývin SSR v ADS-B

Základná funkcionalita fungovania sekundárneho radaru je schopnosť lietadla automaticky odpovedať na dopyty na rádiovej frekvencii. Pri prvom IFF odpoveď na dopyt bol zašifrovaný identifikátor, avšak v civilnom letectve sa do odpovede dajú zakódovať akékoľvek informácie, najmä informácie potrebné pre RLP a ostatných účastníkov letovej prevádzky [7].

Prístroj, ktorý umožňuje lietadlu odpovedať na dopyty, sa nazýva odpovedač. Zaužívaná frekvencia na dopyt je 1030 MHz, na odpoveď 1090 MHz. Je dôležité poznamenať, že dáta, ktorými odpovedač odpovedá, pochádzajú zo senzorov, ktoré

sa nachádzajú na lietadle [8]. Základné senzory na lietadle s meranými veličinami a zaužívanými jednotkami v letectve sú znázornené v tabuľke 2 – 1.

Senzor	**Meraná veličina**	**Zaužívané jednotky**
Barometrický výškomer	Barometrická nadmorská výška	Stopy (ft)
Variometer	Vertikálna rýchlosť	Stopy za minútu (ft/min)
Pitotova trubica	Rýchlosť voči vzduchu	Uzly (kn)
Magnetický kompas	Kurz voči severnému magnetickému pólu	Stupne (°)
GNSS (Global Navigation Satellite System)	Geografická poloha	Stupne zemepisnej šírky a dĺžky (°) Geometrická nadmorská výška (ft) Geometrická rýchlosť voči zemi (uzly – kn)

Tabuľka 2 – 1: Senzory na lietadle a veličiny, ktoré merajú [9]

U SSR má každé lietadlo svoj vlastný identifikátor, do ktorého patrí aj tzv. „squawk“ kód, ktorý znázorňuje stav lietadla [8]. Squawk kód má štyri cifry, kde každá cifra má hodnotu od 0 do 7 (každá cifra má tri bity, celý squawk má 12 bitov). Existuje niekoľko squawk kódov, ktoré sú rezervované na špeciálne udalosti [1]:

- kód 7000 (1200 v USA) – rezervovaný pre lety, ktoré lietajú za vidu bez navádzania RLP,
- kód 7500 – rezervované pre lety zažívajúce núdzu únosu,

- kód 7600 – rezervované pre lety zažívajúce poruchu rádia,
- kód 7700 – rezervované pre lety zažívajúce núdzu.

Ostatné squawk kódy sú prideľované lietadlám skrz RLP podľa ich aktuálneho letového plánu. Keď sa RLP stretne s lietadlom, ktoré má squawk iný ako 7000, vie, že nasleduje letový plán [8].

SSR mala od začiatku len dva módy: mód `A` a mód `C`, kde mód `A` vysiela len squawk kód, a mód `C` ku squawk kódu vysiela aj svoju výšku. V sedemdesiatych rokoch 20. storočia sa začal používať mód `S`, ktorý okrem squawk kódu a výšky začal používať aj 24 bitový identifikátor. Ďalšia dôležitá funkcionalita módu `S` je selektívne dopytovanie RLP a rozšírenie typov informácií, ktoré cez SSR mohli byť vysielané (viď tabuľka 2 – 1, okrem GNSS). [8]

Z SSR módu `S` sa v roku 1983 po sprístupnení GNSS (Global Navigation Satellite System, z ančlitiny – globálny navigačný satelitný systém) verejnosti vyvinulo ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast, z angličtiny Automatické závislé sledovanie – vysielanie). ADS-B je [8]:

- automatické, pretože nepotrebuje žiaden vstup od RLP ani pilota,
- závislé, pretože je závislé na senzoroch lietadla a GNSS (viď tabuľka 2 – 1),
- vysielajúce – pôvodná infraštruktúra dopyt – odpoveď sa zmenilo na neustále vysielanie dát z lietadla ostatným lietadlám a RLP.

Zmenu infraštruktúry dopyt – odpoveď na neustále vysielanie umožnila vylepšená technológia SSR, ktorá umožňuje vysielať dáta vo veľmi malom čase a v malých náhodných intervaloch, čo dovoľuje viacerým lietadlám vysielať neustále na tej istej frekvencii s minimálnym rizikom interferencie [10].

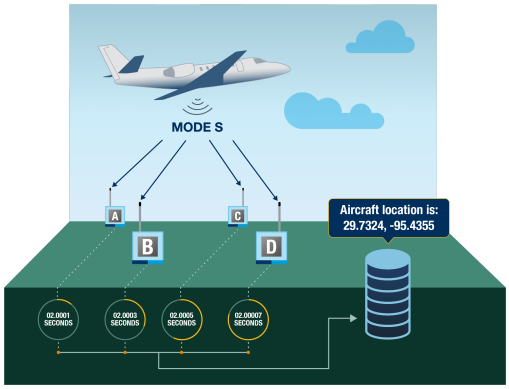
2.2.2 Význam ADS-B pre letectvo

Vývoj SSR a ADS-B výrazne zvýšil bezpečnosť v letovej prevádzke. Medzi základné výhody platí veľká cenová výhodnosť oproti klasickému radaru, ako aj zmena centralizovanej infraštruktúry dát pri PSR na možnosť výmeny dát medzi lietadlami. Pre moderné lietadlá bol vyvinutý TCAS (Traffic Collision Avoidance System, z angličtiny Systém predchádzania dopravným kolíziám), ktorý priamo z lietadla prijíma ADS-B signály z ostatných lietadiel, dokáže pilota varovať pred rizikami kolízie s ostatnými lietadlami a dokonca automaticky navrhnúť a dohodnúť s ostatnými lietadlami riešenie situácie (napr. ktoré lietadlo má stúpať a ktoré klesať) [11].

Implementácia ADS-B do lietadiel je jednoduchá. Keďže ADS-B závisí na senzoroch, ktoré sa nachádzajú na palube lietadla (viď tabuľka 2 – 1), a tieto senzory musia byť digitalizované (v letectve sa dosť často používajú analógové mechanické prístroje [9]), sú dáta vysielané cez ADS-B veľmi rôznorodé. Na lokalizáciu však stačí, aby dané lietadlo vysielalo len svoj identifikátor. Takúto lokalizáciu nám umožňuje technológia multilaterácie (MLAT) [12].

Mutlilaterácia funguje v princípe rovnako, ako systém GNSS – využíva čas, ktorý musí signál z ADS-B cestovať, aby došiel k prijímaču. Medzi troma a viacerými prijímačmi sa porovnáva čas, kedy od lietadla dorazil ADS-B signál, podľa čoho sa dá pomerne presne vypočítať jeho poloha [12]. Diagram fungovania MLAT je zaznačený na obrázku 2 – 5.

ADS-B bolo však okrem pilotov a RLP obrovským prínosom pre nadšencov letectva. Keďže lietadlá vysielajú informácie neustále bez dopytovania, a vysielané dáta nie sú zašifrované, ADS-B umožnilo vznik siete rádioamatérov, ktorí ADS-B signály prijímajú a tak sledujú lietadlá v okolí [8]. Existuje niekoľko stránok, ktoré sprístupňujú sledovanie lietadiel verejnosti. Jedna z najznámejších je `FlightRadar24.com`. Táto stránka získava dáta od dobrovoľníkov rádioamatérov



Obrázok 2 – 5: Diagram fungovania multilaterácie [12]

po celom svete, ktorí ADS-B prijímajú [13].

FlightRadar24 od svojho vzniku v roku 2006 zažil veľký úspech, a dnes ponúka svoje vlastné prijímače zadarmo verejnosti v miestach, kde nemá dobré pokrytie [13]. Tento prijímač sa však nedá kúpiť, na rozdiel od konkurenčnej firmy `FlightAware.com`, ktorá sa okrem poskytovaniu dát o lietadlách verejnosti hlbšie venuje prijímaniu ADS-B dát rádioamatérmi [12].

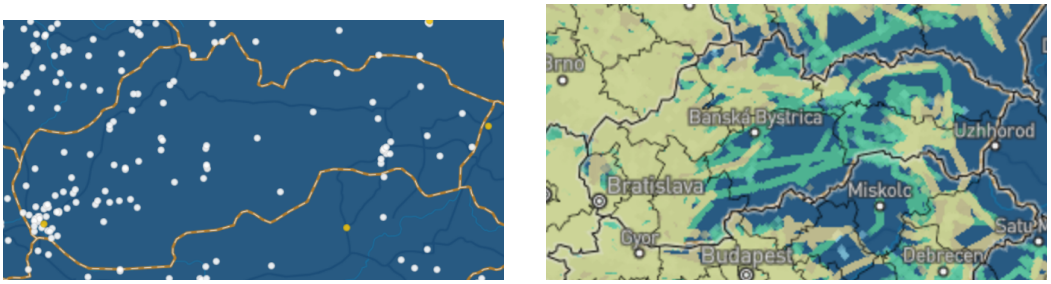
2.2.3 Nevýhody ADS-B

ADS-B vo svojej veľkej technickej pokrokovosti má jednu sociálnu nevýhodu: keďže sú dáta nezašifrované, vlastníci lietadiel, hlavne súkromných, majú pri vysielaní ADS-B dát obavy o svoje súkromie. Šifrovanie ADS-B by výrazne narušilo jeho výhodu prepojenej infraštruktúry, a letecké úrady amatérske prijímanie ADS-B podporujú a nechcú ho zakázať, keďže sa ukázalo, že zachytené ADS-B dáta vedia pomôcť pri vyšetrovaniach leteckých nehôd. Vlastníci lietadiel však môžu požiadať stránky zdieľajúce ich dáta, ako `FlightRadar24.com`, aby ich dáta nezdieľali [14].

Ďalšou nevýhodou ADS-B, ako aj samotného SSR je, že pre najlepšiu výmenu dát musí medzi lietadlom a prijímačom byť priamy kontakt (neprerušená čiara). Pre lietadlá to problém nie je, keďže z výšky prijímanie a vysielanie ADS-B nemá obštrukcie. Problém nastáva pri prijímaní zo zeme – ak máme prijímač pod kop-

com, nebudeme vedieť zachytiť lietadlá lietajúce v malej výške za kopcom [8]. RLP na letiskách v hornatých oblastiach tento problém riešia prijímaním ADS-B cez satelit, avšak takéto prijímanie nie je priamo dostupné verejnosti [13].

Druhý spomenutý problém je najzávažnejší v hornatých krajinách, akou je Slovensko. Aj keď sieť amatérskych prijímačov je pomerne rozsiahla, prijímače sa najčastejšie nachádzajú v mestách, ktoré sú v kotlinách alebo nížinách. Problém potom nastáva so zachytávaním lietadiel, ktoré lietajú nízko za kopcami, hlavne nad stredným a východným Slovenskom. Tento problém sa dá vizualizovať na mape pokrytia `FlightAware.com`, pri filtrovaní výšky do 10 000 stôp (približne 3 km) nad morom (obrázok 2 – 6) [15].



Obrázok 2 – 6: Mapa amatérskych prijímačov ADS-B na Slovensku a ich pokrytie vo výške 10 000 stôp nad morom [15]

3 Integrácia dronov v leteckom priestore

V tejto kapitole sa pozrieme na to, aká je aktuálna integrácia dronov v leteckom priestore a aké má chyby, aby sme vedeli, na čo sa musíme v našej aplikácii zamerať. Integrácia dronov v leteckom priestore je riadená legislatívou, ako legislatívou pre pilotov dronov, tak aj legislatívou pre ostatných účastníkov leteckého priestoru.

Slovensko ako člen Európskej únie spadá pod legislatívu EASA (European union Aviation Safety Agency, z angličtiny Agentúra Európskej únie pre bezpečnosť letectva) [16], ale zároveň je členským štátom ICAO (International Civil Aviation Organization, z angličtiny Medzinárodná organizácia civilného letectva) [17]. Obidve tieto organizácie poskytujú členským štátom rovnaký základ pre legislatívu pre používanie vzdušného priestoru, EASA pre Európsku úniu, a ICAO pre 193 členských štátov. ICAO je viac zamerané na pravidlá pre pilotované (osobné) letectvo, zatiaľ čo EASA intenzívne rieši aj otázku legislatívy pre drony v Európskej únii [16].

3.1 Aktuálna legislatíva pre pilotov dronov na Slovensku

Dronový priemysel sa bezpochyby veľmi rýchlo rozvíja, a minimálne na Slovensku za ním legislatíva donedávna nestíhala. EASA v roku 2019 vydala sériu nariadení pre používanie dronov v Európskej únii, a na Slovensku sa tieto pravidlá zaviedli do praxe až tohoto roku, o 5 rokov neskôr [18]. Legislatíva EASA okrem iného pre súkromných pilotov dronov nad 250 g a/alebo s kamerou / iným senzorom na zachytávanie osobných údajov nariadila povinnú registráciu. Formu tejto registrácie mal zabezpečiť každý členský štát. Väčšinou (tohoto roku aj u nás [18]) sa jedná o online test, po ktorom je súkromnému pilotovi dronu pridelený preukaz súkromného pilota dronu. Výhoda takéhoto preukazu je, že je platný v celej Európskej únii. Súkromnému pilotovi dronu sa rozumie ako pilotovi dronu, ktorý

s dronom nevykonáva letecké práce [16].

EASA rozlišuje tri kategórie operácií s dronmi na základe rizika: otvorená, špecifická, a certifikovaná. Súkromné, rekreačné aj komerčné lety s dronmi do 25 kg (čo je na komerčný dron veľmi veľa) spadajú do otvorenej kategórie. Otvorená kategória zahŕňa nízkorizikové operácie, ktoré nevyžadujú povolenie, ak dodržiavajú základné pravidlá [16]. Táto práca sa venovala najmä tejto kategórii.

V súvislosti s integráciou dronov do leteckého priestoru patria pre pilotov dronov v otvorenej kategórii tri základné pravidlá [16]:

- Pilotované (osobné) letectvo má absolútnu prednosť pred bezpilotným lietaním.
- Dron musí byť vždy na dohľad. Používa sa pojem VLOS (Visual Line Of Sight, z angličtiny zorná čiara). Medzi pilotom dronu a dronom musí byť neprerušená zorná čiara a dron musí byť viditeľný voľným okom. V prípade nebezpečenstva sa využíva prístup „viď a vyhni sa“.
- Maximálna povolená výška dronu je 120 m nad zemou (na toto sa vzťahujú ďalšie obmedzenia, ktoré budú objasnené v ďalšej kapitole).

Z ostatných pravidiel sa taktiež ešte oplatí zvýrazniť, že EASA zakazuje prevádzku dronov v blízkosti nehôd, kde prebieha snaha o záchranu majetku alebo života, bez priameho vedomia a povolenia záchranných zložiek [16].

Od začiatku roka 2024 musia taktiež byť drony vybavené systémom diaľkovej identifikácie. Viaceré novšie modely majú tento systém už zabudovaný, avšak pri dronoch vyrobených pred rokom 2023 je pre aktiváciu tejto identifikácie potrebné vykonať softvérovú aktualizáciu a registrovať sa so svojim preukazom pilota dronu. Diaľková identifikácia prebieha pomocou technológií ako sú Wi-Fi a Bluetooth a slúži na detekciu a identifikáciu dronov, ktoré nelietajú podľa pravidiel [18] [19].

Rozsiahle a občas ťažko pochopiteľné pravidlá pre lietanie s dronom na Slovensku zhŕňa a pilotom dronov poskytuje občianske združenie *Mám dron* [19], avšak oficiálne údaje a referencie sú dostupné na stránke Dopravného úradu, časť Bezpilotné letectvo [18].

3.2 Rozdelenie vzdušného priestoru Slovenska

Slovensko má v rámci ICAO aj EASA výlučnú a úplnú zvrchovanosť nad svojim vzdušným priestorom [20] [23].

ICAO v rámci Prílohy 11 definuje 7 klasifikačných tried vzdušného priestoru od A po G, kde A až E sú riadené vzdušné priestory, trieda F je poradný vzdušný priestor a trieda G je neriadený vzdušný priestor. Priestory A-E sú zoradené od najprísnejšie riadené po najmenej prísne riadené [21][23]. Pre výšky, ktoré sú relevantné pre drony (do 120 m nad zemou) sa na Slovensku vyskytujú len triedy D a G [23]. Letové priestory nad touto výškou v tejto kapitole neberieme do úvahy.

Do triedy D patria takzvané CTR (skratka pre Control Zone – zóna riadenia), čo sú riadené vzdušné priestory v okolí riadených letísk. Na Slovensku medzi takéto priestory patria CTR Štefánik v Bratislave, CTR Piešťany, CTR Žilina, CTR Tatry pre letisko pri Poprade, CTR Košice, a na východe Slovenska máme aj CTR presahujúce z letiska v Užhorode [23] [24]. V CTR je možné lietať s dronom, avšak minimálne vo vzdialenosti 3 námorné míle (NM) (5,5 km) od referenčného bodu letiska a maximálne do výšky 30 m nad zemou [19] [25]. Od roku 2024 je však možné RLP požiadať o povolenie lietať bližšie / vyššie minimálne 24 hodín pred vykonaním letu e-mailom. V prípade schválenia je ešte takýto let koordinovaný telefonicky 15 minút pred vzletom a v prípade potreby aj počas letu [25].

Priestor G je definovaný ako všetok vzdušný priestor, ktorý nezapadá do tried A-F. Existujú aj špeciálne prípady vzdušného priestoru [23] [24] [19]:

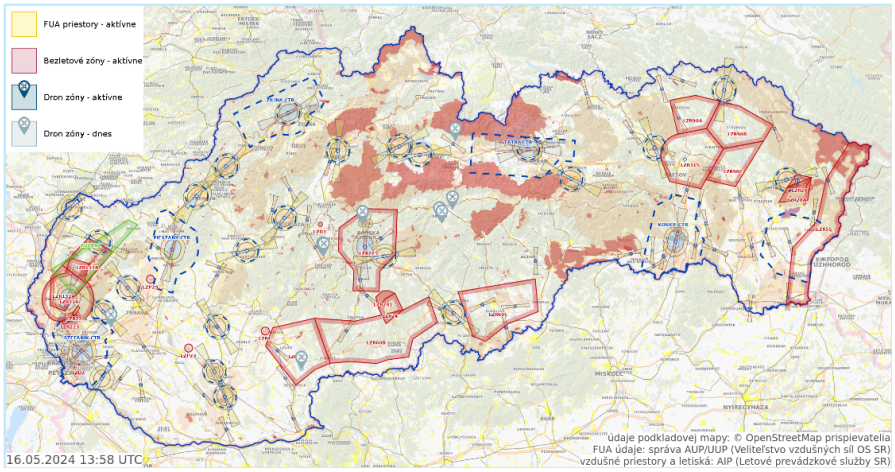
- ATZ (Aerodrome Traffic Zone – z angličtiny Letisková prevádzková zóna),

ktorá tvorí kružnicu s polomerom 3 NM (5,5 km) so stredom v neriadenom letisku. V ATZ je s dronom možné lietať len po koordinácii s prevádzkovateľom daného letiska [25].

- Obmedzený vzdušný priestsor – tvoria sa väčšinou v okolí vojenských objektov a letísk. Obmedzené priestory majú predponu LZR (LZ – predpona pre Slovensko, R – Restricted – obmedzené územia). Medzi takéto územia patrí napríklad LZR55 – bezpečnostné pásmo na hraniciach s Ukrajinou, ako aj územia okolo vojenských letísk Prešov, Sliač a Malacky. Pre vojenské letiská patria rovnaké pravidlá, ako pre CTR, s rovnakou možnosťou žiadosti o povolenie [19].

- Zakázaný vzdušný priestor – so zakázaným preletom akejkoľvek vzdušnej prevádzky. Na Slovensku ich máme tri: LZP1 Mochovce, LZP23 Šaľa a LZP29 Jaslovské Bohunice.

Všetky priestory relevantné pre pilotov dronov sú zaznačené aj na mape na stránke `mamdron.sk` (obrázok 3 – 1) [19].



Obrázok 3 – 1: Mapa vzdušných priestorov Slovenska relevantná pre pilotov dronov, dostupná na `mamdron.sk` [19]

3.3 Kde sa lietadlá môžu pohybovať?

Základné pravidlá lietania upravuje ICAO Príloha 2 [17]. Vrámci zvrchovanosti každého štátu nad vlastným územím má každý štát právo tieto pravidlá upravovať [20]. V Slovenskej republike tieto pravidlá spravuje Dopravný úrad, avšak s pilotmi ich komunikujú Letové prevádzkové služby Slovenskej republiky cez takzvaný AIP (Aeronautical Information Publication, z angličtiny Letecká informačná publikácia) [26].

Rozlišujú sa dva základné typy letov: VFR (Visual Flight Rules – pravidlá lietania za vidu) a IFR (Instrument Flight Rules – pravidlá lietania podľa prístrojov) lety. Rozdiel je v tom, či pilot na navigáciu používa prístroje, alebo lieta podľa toho, čo vidí z kabíny [17]. Dopravné lietadlá majú letovú výšku väčšinou nad 30 000 stôp (ft) (9 km), kde je redší vzduch, čo znamená menšie trenie, a umožňuje cestovať pri vyššej rýchlosti pri menšej spotrebe paliva. Mimo vzletu a pristátia (a núdzovej stiuácie) nie je dôvod, aby sa dopravné lietadlo vyskytovalo vo výškach, ktoré sú relevantné pre drony [27]. Vo veľkých výškach je kvôli veľkej rýchlosti efektívne využívanie princípu „viď a buď videný“ znemožnené, preto nad úrovňou 20 000 ft [17], resp. 19 500 ft [26] (v oboch prípadoch okolo 6 km) nad morom sú VFR lety zakázané. Aj kvôli tomuto lieta väčšina dopravných lietadiel podľa IFR. Je preto možné tvrdiť, že veľkú časť letov, pre ktorých sú drony nebezpečné, sú práve VFR lety, medzi ktoré patria hlavne rekreačné a vyhliadkové lety.

Aby pilot niečo z kabíny videl, VFR sa priamo viaže na VMC (Visual Meteorogical Conditions – z angličtiny Vizuálne meteorologické podmienky). VFR lety sa môžu vykonávať len v podmienkach VMC. Tie sú vo výškach relevantných pre drony nasledovné [26]:

- minimálna dohľadnosť musí byť minimálne 5 000 m,
- vo vzdušnom priestore triedy D je potrebné mať od oblakov minimálne

1 500 m horizontálny a 300 m (1 000 ft) vertikálny odstup,

- vo vzdušnom priestore triedy G sa smie lietať len mimo oblakov a s povrchom zeme v dohľade.

Vzhľadom na tieto pravidlá sa dá povedať, že lietať v zlom počasí (nesplňujúcom podmienky VMC) v dostatočnej vzdialenosti od letiska je paradoxne bezpečnejšie, než v dobrom počasí, keďže v zlom počasí sa VFR lety v malých výškach nemôžu legálne vyskytovať.

Ďalej pre lety VFR aj IFR mimo pristávania a vzletu platia tieto výškové minimá [26]:

- nad obývanými oblasťami miest, obcí alebo sídel, alebo nad zhromaždením osôb pod holým nebom, alebo nad oblasťou s citlivou faunou, je minimálna povolená výška 1 000 ft (300 m) nad najvyššou prekážkou v okruhu 600 m od lietadla,
- inde je minimálna povolená výška 500 ft (150 m) nad zemou alebo vodou alebo 500 ft (150 m) nad najvyššou prekážkou v okruhu 500 ft (150 m) od lietadla.

Tieto pravidlá vznikli kvôli tomu, aby lietadlo malo dostatok potenciálnej energie v prípade poruchy motoru na úspešné naplánovanie núdzového pristátia.

Ďalším dôležitým pravidlom pre VFR je, že aj keď VFR nelieta podľa letového plánu, vždy, keď vojde do riadeného priestoru, či už CTR alebo obmedzeného vzdušného priestoru vojenského letiska, musí sa nahlásiť minimálne 3 minúty vopred RLP [26]. Letecká rádiová komunikácia prebieha voľne dostupne a nešifrovane skrz amplitúdovú moduláciu (AM) na frekvenciách 117,975 MHz do 137,0 MHz [22] a frekvencie pre každý riadený priestor sú znázornené na ICAO mape Slovenska [24] alebo na rôznych stránkach, medzi ktoré patrí napríklad `airquest.cz`.

3.4 Zhrnutie aktuálnej integrácie

Zodpovedné úrady sa v dnešnej dobe snažia zvýšiť bezpečnosť integrácie dronov v leteckom priestore v prvom rade vzdelávaním, testovaním a registrovaním pilotov dronov. Ďalší zaužívaný spôsob je vertikálna a horizontálna segregácia vzdušného priestoru. Pre vyhýbanie sa pilotovanému (osobnému) letectvu sa využíva princíp VLOS a „viď a vyhni sa“. Na kontrolovanie dodržiavania pravidiel sa používa diaľková identifikácia.

Sú tieto spôsoby integrácie dostatočne bezpečné? Bohužiaľ, tieto spôsoby majú vážne bezpečnostné nedostatky. V prvom rade, predaj dronov nie je regulovaný a aj nové drony sa dajú kúpiť bez toho, aby musel byť pilot prv registrovaný. Aj keď limity horizontálnej a vertikálnej segregácie sú častokrát zakomponované do softvéru dronu, veľa dronov ich nemá alebo sú tieto limity nedostatočne prísne [28]. Taktiež neexistuje softvérová limitácia udržania VLOS a moderné drony majú dosah signálu aj viac ako 10 km, čo je nebezpečne ďaleko od VLOS [28]. Diaľková identifikácia sa dá ľahko obísť použitím dronu, ktorý tento systém nemá. Existujú prídavné moduly pre drony s diaľkovou identifikáciou, ale objektívna motivácia pre súkromných pilotov dronov si ich zabezpečiť je minimálna. Piloti lietadiel však tiež môžu nedodržiavať pravidlá a lietať nižšie ako je to povolené.

Najväčší problém je však ten, že aj keď všetci lietajú podľa pravidiel, stále môže vzniknúť riziko. Stať sa to môže hlavne pri helikoptérach, najmä záchranárskych, ktoré majú dôvod aj povolenie lietať nižšie ako je povolené [29].

S diaľkovou identifikáciou a podobnými systémami sa úrady snažia zvýšiť bezpečnosť tým, že budú mať prístup k informáciam, kde sú drony, a tieto informácie môžu napríklad RLP posúvať pilotom. Avšak vzhľadom na to, že pilotované (osobné) letectvo má mať prednosť pred bezpilotným, mal by aj existovať systém, ktorý by informoval a varoval pilotov dronov o letovej prevádzke v okolí. Takémuto systému sme sa venovali v tejto práci.

4 Návrh plánovacieho a varovného systému pre pilotov dronov vzhľadom na letovú prevádzku

V tejto kapitole navrhneme, ako by mohol fungovať plánovací a varovný systém pre pilotov dronov vzhľadom na letovú prevádzku. Z formulácie úlohy vyplýva, že naša aplikácia má obsahovať nasledujúce funkcionality:

1. mať schopnosť prijímať a spracovávať dáta o okolitej letovej prevádzke v reálnom čase, prípadne schopnosť dáta ukladať a archivovať pre ďalšiu analýzu a schopnosť predpovedať budúci vývoj situácie v letovej prevádzke,

2. mať schopnosť prijaté a spracované dáta prezentovať pilotovi dronu, umožniť mu naplánovať jeho let, zistiť, či je vykonanie jeho letu bezpečné vzhľadom na okolitú letovú prevádzku a mať schopnosť varovať ho pred hrozbami kolízie a narušenia bezpečnostnej letovej zóny v reálnom čase.

V predošlých kapitolách sme si vysvetlili problematiku aktuálnej integrácie ako aj históriu a rôzne spôsoby získavania dát z letovej prevádzky. Prv sa pozrieme, akú relevanciu majú tieto spôsoby pre našu aplikáciu. Tie najlepšie si rozoberieme a navrhneme systém ich prijímania, a nakoniec navrhneme aplikáciu, ktorá prijaté dáta bude spracovávať a premieňať na dáta potrebné a zrozumiteľné pre pilotov.

4.1 Príklad výbavy pilota dronu a diagram ovládania dronu

Návrh aplikácie bude nadväzovať na to, ako vyzerá bežná výbava pilota dronu a aká je infraštruktúra ovládania dronu. Diagram príkladu ovládania dronu je znázornený na obrázku 4 – 1.

Dron si počas letu udržuje komunikáciu s ovládačom rádiovo cez anténu. DJI Mini 3 Pro, ktorý sme používali my počas tvorby tejto práce, funguje na frekvenciách 2,4 GHz a 5,8 GHz. Dron je prepojený s mobilným telefónom s operačným

Obrázok 4 – 1: Diagram ovládania dronu

systémom Android cez kábel USB-C - USB-C. Mobilný telefón cez aplikáciu DJI Fly komunikuje s ovládačom a zobrazuje pilotovi výstup z kamery a aktuálne merané letové dáta, ktoré sú merané pomocou GNSS senzora a gyroskopu na palube dronu. Pilot dronu ovláda dron najmä cez ovládač (dron je plne ovládateľný ovládačom aj bez mobilného telefónu), avšak pilot dokáže meniť určité nastavenia, ako napríklad nastavenia kamery cez telefón. Cez telefón sa dajú ovládať taktiež základné automatické úkony (automatický vzlet, automatické pristátie a podobne). Zakreslená architektúra je s ovládačom DJI RC-N1, avšak existuje aj ovládač DJI RC, ktorý má displej aj operačný systém zabudovaný v sebe. [28]. Predpokladáme, že pilot má vždy pri sebe mobilný telefón.

4.2 Zhrnutie spôsobov získavania dát z letovej prevádzky – ich použitie a relevancia v aplikácii

Na to, aby sme posúdili, ako sa dajú použiť vymenované dôvody a akú majú relevanciu v aplikácii, ich budeme hodnotiť v nasledovných kategóriach: cena (dostupnosť) pre bežného pilota dronu, akú majú dáta digitalizáciu (ako dobre sa konvertujú na digitálne dáta), aká je presnosť zisťovania polohy a výšky okolitej pre-

vádzky, ako je táto presnosť ovplyvnená počtom účastníkov v okolí, a s akým predstihom / oneskorením vieme prijať dáta o danej prevádzke.

4.2.1 Vizuálny kontakt

Udržovanie VLOS je základným stavebným kameňom bezpečného lietania s dronom. Aj keď pilot dronu pozerá na displej a nie na drona, musí vždy vedieť, že keď zdvihne zrak z displeja na oblohu, kde sa jeho dron nachádza.

Získavanie dát o letovej prevádzke pomocou vizuálneho kontaktu však nie je také jednoduché. Predstavme si situáciu, že pilot dronu lieta na čistinke v lese. Pokiaľ bude lietať nad čistinkou alebo blízko čistinky nad stromami, môže síce udržiavať VLOS, ale stromy mu blokujú výhľad na oblohu, čím zmenšujú vzdialenosť, v akej má vizuálny prehľad o letovej prevádzke okolo neho.

Aj pri čistej oblohe by bola kamerová technika na sledovanie oblohy v okruhu 360 stupňov drahá – okrem použitia niekoľko kamier na pokrytie celej oblohy (alebo otočnej základne, čo spomaľuje zber dát) musia mať kamery dostatočne dobré rozlíšenie a/alebo zoom, aby počítačové videnie dokázalo lietadlá na oblohe rozoznať. Digitalizácia dát a spracovanie obrazu je relatívne jednoduchá záležitosť. Výpočet vzdialenosti pri počítačovom videní je náročný a nepresný vo veľkých vzdialenostiach. Presnosť sa dá zvýšiť použitím stereovízie, avšak aj presnosť stereovízie klesá so vzdialenosťou [31]. Vplyv počtu závisí od použitého algoritmu, avšak vo všeobecnosti je malý. Predstih závisí od použitej technológie a prostredia, ale v porovnaní s ostatnými spôsobmi je malý.

4.2.2 Zvuk

Použitie zvuku na monitorovanie letovej prevádzky môže byť užitočným doplnkom k vizuálnemu kontaktu, najmä v prostrediach, kde je vizuálny kontakt obmedzený. Problém (ktorý sme často mali aj my s ľudským sluchom) je, že zvuk lietadla,

najmä piestového, je ťažko klasifikovateľný. Je ťažké rozoznať napr. piestové lietadlo a hlučnú motorku.

Smer, odkiaľ zvuk prichádza, vzhľadom na to, že sa môže odrážať, môže byť pre človeka bez použitia parabol mylný. Odhad výšky zo zvuku sa taktiež robí veľmi ťažko, keďže pri dobrých podmienkach je na zemi počuť lietadlá aj z ich letovej výšky okolo 10 km nad zemou. Pre digitalizáciu ako aj určenie smeru by sme mohli použiť buď niekoľko parabolických mikrofónov natočených do rôznych strán, alebo viacero mikrofónov rozmiestnených ďaleko od seba využívajúce zvukovú trianguláciu, princíp podobný MLAT. Na rozdiel od elektromagnetických vĺn je však zvuk vysoko ovplyvniteľný vonkajšími vplyvmi, ako sú vietor, terén a iné prekážky, čo výrazne znižuje presnosť tejto metódy na veľké vzdialenosti. Taktiež táto metóda zlyháva pri viacerých zdrojoch zvuku naraz [32]. Na druhej strane tento spôsob môže teoreticky zaznamenať prevádzku s vyšším predstihom za možno nižšiu cenu oproti vizuálnej detekcii, ale nižšia cena nestojí za nevýhody, ktoré tento spôsob prináša.

4.2.3 Rádiové vlny

V predošlých kapitolách sme uviedli tri spôsoby získavania dát o letovej prevádzke pomocou rádiových vĺn: letecké rádio, PSR a SSR (ADS-B).

Bez ohľadu na legislatívu, ktorá súkromné využívanie PSR veľmi pravdepodobne zakazuje, je PSR mimo cenovej kategórie bežného rozpočtu pilota dronu (rádovo až v miliónoch €) [11].

Rádiové vlny, ktoré vysielajú lietadlá, ako je letecké rádio a ADS-B, sú na druhú stranu veľmi jednoducho zachytiteľné. Rádiové vlny totiž patria medzi elektromagnetické žiarenie, a rovnako ako klasické FM rádio sa aj tieto vlny dajú zachytiť obyčajnou anténou [8]. Výkon takejto antény závisí od viacerých faktorov, ktoré budú vysvetlené v ďalších podkapitolách.

Na digitalizáciu a spracovanie rádiových vĺn môžeme použiť pomerne lacnú súčiastku: SDR (Software Defined Radio, z angličtiny Softvérovo definované rádio), ktorý premieňa analógový signál antény na digitálny. V prípade ADS-B existujú knižnice dostupné na viacerých operačných systémoch, ktoré bez problémov a filtrácie preložia prijaté ADS-B signály na polohy lietadiel v okolí [8]. Letecké rádio využívajúce amplitúdovú moduláciu (AM) sa taktiež jednoducho digitálne premieňa na zvuk, avšak ďalšie digitálne spracovanie, napríklad použitím speech-to-text (STT, z angličtiny „hlas na text“) modelov je značne ťažšie kvôli šumu, ktorý AM do komunikácie vnáša.

Zatiaľčo presnosť ADS-B je neprekonateľná vzhľadom na priame použitie senzorov GNSS na palubách lietadiel, presnosť zistenia polohy z rádiovej komunikácie závisí od schopnosti pilota opísať svoju polohu (ak lieta VFR). Taktiež rádiová komunikácia nie je relevantná všade, pilot sa musí hlásiť 3 minúty pred vstupom do CTR, LZR a pri vstupe do ATZ (viď kapitoly 3.2 a 3.3), v ostatných priestoroch využívať rádiovú komunikáciu nemusí (ale môže využiť leteckú informačnú službu) [26]. V riadených priestoroch však už len binárna správa, či sa v riadenom priestore lietadlo nachádza alebo nie, môže byť pre pilota dronu veľmi cenná, a tento spôsob je taktiež veľmi spoľahlivý – pokiaľ do priestoru vojde lietadlo bez nahlásenia, RLP ho zachytí pomocou PSR / SSR a bude sa s ním snažiť spojiť na letiskovej frekvencii (čo je zachytiteľné) alebo bude varovať ostatné lietadlá pred jeho výskytom.

Čo sa týka vplyvu počtu, pri ADS-B je veľmi malý, zatiaľčo pri veľkom počte lietadiel na jednej letiskovej frekvencii môže vzniknúť chaos, avšak na to existujú efektívne frazeológie a postupy, a RLP sú trénovaní takéto situácie zvládať. Obmedzením je tak hlavne počúvajúci pilot dronu, ktorý musí stíhať nával informácií spracovávať.

4.2.4 Tabuľka s porovnaním spôsobov prijímania dát

Tabuľka 4 – 1 je zhrnutím hodnotiacich kritérií všetkých spôsobov vymenovaných v druhej kapitole, s ohľadom na ich využiteľnosť v našej aplikácii.

Spôsob	**Cena**	**Digitalizácia**	**Presnosť**	**Vplyv počtu**	**Predstih**
Vizuálny kontakt	Vysoká	Ľahká	Zlá	Malý	Malý
Zvuk	Stredná	Náročná	Zlá	Veľký	Stredný
Letecké rádio	Nízka	Stredne náročná	Stredná	Stredný	Stredný
ADS-B	Nízka	Ľahká	Veľmi dobrá	Veľmi malý	Veľký

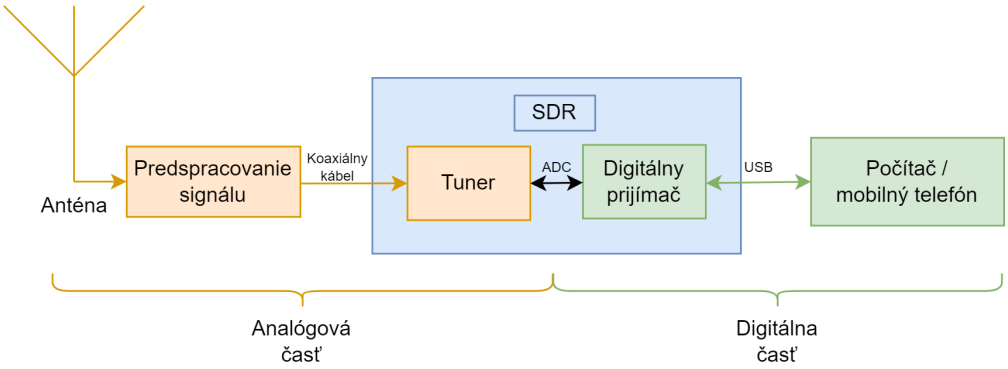
Tabuľka 4 – 1: Porovnanie rôznych spôsobov získavania dát o letovej prevádzke a ich relevancia k aplikácii podľa vybratých kritérií

Z tejto tabuľky je jasné, že táto práca sa hlavne venovala prijímaním a spracovaním ADS-B a leteckého rádia.

4.3 Prijímanie rádiových signálov pomocou SDR

Vzhľadom na nevýhody ADS-B uvedené v kapitole 2.2.3 navrhneme zariadenie na prijímanie, ktoré môže prevádzkovať akýkoľvek pilot dronu v okolí, v ktorom lieta. Ako sme v minulej kapitole spomenuli, na prijímanie a digitálne spracovanie rádiových signálov budeme používať SDR (Software Defined Radio). Všeobecný diagram prijímania rádiových signálov pomocou SDR je znázornený na obrázku 4 – 2. V tejto podkapitole si prv vysvetlíme základné pojmy týkajúce sa prijímania rádiových signálov, a potom si rozoberieme každý prvok prijímania a určíme

a vysvetlíme si kritériá, podľa ktorého sme vyberali hardvér pre prijímanie a spracovanie signálov pre našu aplikáciu.



Obrázok 4 – 2: Diagram prijímania rádiových signálov pomocou SDR

4.3.1 Vysvetlenie základných pojmov pri prijímaní rádiových signálov

Frekvencia (*f*, jednotka *Hertz (Hz)*) a vlnová dĺžka (λ, jednotka *meter (m)*) patria medzi základné charakteristiky rádiovej vlny a sú navzájom nepriamo úmerné ($\lambda = \frac{c}{f}$; c – rýchlosť svetla). Graf vzťahu medzi frekvenciou a vlnovou dĺžkou je hyperbola, čo znamená, že čím je frekvencia vyššia, tým je úbytok vlnovej dĺžky menší. Rozdiel vlnovej dĺžky medzi hornou hranicou FM rádia (108 MHz) a dolnou hranicou leteckého rádia (118 MHz) je 23 cm, zatiaľ čo rozdiel medzi GSM (The Global System for Mobile Communications – zastaralý systém mobilnej siete, avšak ešte stále používaný) (900 MHz) a ADS-B (1090 MHz) je len 5,8 cm [33].

Amplitúda je sila rádiovej vlny na danej frekvencii. Vyššia amplitúda rádiovej vlny prijatá na anténe sa premieňa na vyššie napätie alebo prúd. Na referenčné meranie sily rádiovej vlny sa používa jednotka *decibel (dB)*, ktorá sa počíta nasledovne (U – napätie, napätie a prúd sú zameniteľné) [33]:

$$\mathrm{dB} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{U}{U_{\mathrm{ref}}}\right)$$

Modulácia je spôsob zakódovania informácie pomocou rádiových vĺn. V leteckom rádiu sa používa amplitúdová modulácia (AM), čo je najjednoduchšia a najstaršia forma modulácie. Pri AM sa amplitúda rádiovej vlny na danej frekvencii mení v závislosti na okamžitej hodnote modulujúceho signálu (v tomto prípade zvuku). Pre letectvo je táto modulácia dôležitá, pretože v prípade vysielania viacerých zdrojov sa signály navzájom nezrušia a prenikne ten najsilnejší, čo je v letovej prevádzke najčastejšie RLP. Nevýhoda AM je náchylnosť na šum, ktorý je pri AM aditívny [33]. ADS-B využíva moduláciu PPM (Pulse Position Modulation, z angličtiny „modulácia polohou pulzu“), kde sa binárne dáta v čase kódujú do vysielania / nevysielania na danej frekvencii. Takáto modulácia je spoľahlivá, odolná voči šumu, a jednoducho dekódovateľná [8].

4.3.2 Anténa

Anténa je základným prvkom prijímania rádiových signálov všeobecne. Je to vstupný bod rádiových signálov do prijímača. Anténu tvorí vodič, ktorý nie je uzemnený, čo mu umožňuje reagovať na elektromagnetické žiarenie (rádiové vlny) v okolí. Čisto teoreticky akákoľvek anténa prijíma akékoľvek signály, avšak najviac reaguje na násobky vlnovej dĺžky svojou dĺžkou (ak chceme anténou prijímať špecifickú frekvenciu, najlepšie výsledky dosiahneme pri anténe dĺžky $\lambda/2$, $\lambda/4$ a podobne) [33].

Antény môžu mať okrem hlavného vodiča aj protiváhy alebo radiály, čo sú vodiče napojené na zem antény, ktoré túto anténu „uzemňujú“ vo vzduchu a pomáhajú jej získať správnu impedanciu, čím sa zvyšuje ich efektivita a výkon. Radiály taktiež pomáhajú smerovať a sústreďovať prichádzajúce signály. Podľa počtu radiálov môžeme rozlíšiť antény napríklad na monopólové (bez radiálov), dipólové (jeden radiál) a GPA (Ground Plane Antenna – rovinová anténa – 3 a viac radiálov). Špeciálny typ antény môže byť napríklad kolineárna anténa, ktorá je

tvorená z viacerých prijímacích prvkov v jednej línii, pričom každý prvok má inú smerovosť, čím sa výrazne zvyšuje zisk antény [33].

Je dôležité poznamenať, že anténa je sama o sebe len pasívnym prvkom, teda signál len prijíma a nepridáva do neho žiadnu energiu. Jej zisk sa meria s porovnaním s ideálnou izotropnou anténou, ktorá prijíma signály rovnako zo všetkých strán. Zisk antény sa teda určuje v decibeloch, ktoré sú počítané relatívne k izotropnej anténe v smeroch, z ktorých meraná anténa signály prijíma. Zisk je teda spôsobený vytvorením slepého miesta, najčastejšie priamo pod anténou, a sústreďovanie prijímania na ostatné strany. Takýto zisk má označenie *dBi* [33].

4.3.3 Spojenie antény a SDR a predspracovanie signálu

Na prenos analógového signálu vychádzajúceho z antény sa používa koaxiálny kábel, ktorý sa skladá z jedného vodiča nesúceho hlavný signál a pomerne hrubej izolácie, ktorá je medzi vrstvami opletená vodivým opletením, ktoré vedie uzemnenie. Straty analógového signálu pri veľkej dĺžke sú nezanedbateľné, najmä pri vysokých frekvenciách, a je žiadúce, aby bol tento kábel čo najkratší. Koaxiálne káble majú špeciálne konektory, ktoré sú navrhnuté tak, aby minimalizovali stratu pri prenose. Medzi také patria napríklad MCX, SMA, N konektor, BNC, UHF a podobne [33].

V prípade potreby je možné signál pred spracovaním s SDR ešte predspracovať, napríklad vyfiltrovať z neho určité frekvencie filtrom, alebo určité frekvencie zosilniť predzosilňovačom [33]. Niektoré súčiastky dokážu oboje, a v určitej miere sa predspracovanie vždy nachádza aj v SDR [34].

4.3.4 Softvérovo definované rádio

SDR je prvok, ktorý premieňa analógové rádiové signály na digitálne takým spôsobom, aby boli ľahko spracovateľné počítačom alebo mobilným telefónom. Medzi dve základné špecifikácie SDR patrí frekvenčný rozsah a šírka zachytávaného pásma

(bandwidth). Frekvenčný rozsah je minimálna a maximálna frekvencia, ktorú SDR dokáže spracovávať, zatiaľčo bandwidth je šírka pásma, ktorú SDR dokáže spracovávať naraz v reálnom čase. Posun zachytávaného pásma má na starosti časť SDR nazývaná tuner. Medzi tunerom a čipom digitálneho prijímača sa nachádza ADC (Analog to digital converter, z angličtiny „konvertor analógového signálu na digitálny“). Čip digitálneho prijímača potom už digitálny signál ďalej spracováva a poskytuje ho pripojenému počítaču alebo mobilnému telefónu [34].

Na trhu SDR je významným hráčom výrobca polovodičov Realtek, ktorý vyrába čipy použité na digitálne prijímanie rádiových signálov. SDR s použitím čipu od Realteku má označenie `RTL-SDR` [34].

Ako sme spomenuli, v SDR sa taktiež vyskytuje predspracovanie rádiového signálu, a to najmä v tuneri. Tuner pri ladení špecifického pásma čiastočne filtruje frekvencie mimo zachytávaného pásma, a zachytávané pásmo zosilňuje [34]. Kvôli tomuto faktu je dôležité vybrať SDR, ktorý má tuner prispôsobený na frekvenciu, ktorú chceme zachytávať, čo najviac je to možné. Pri pásme leteckého rádia je toto obmedzené veľkou šírkou pásma, avšak pri ADS-B toto problém nie je, keďže sa vyskytuje len na jednej frekvencii, a SDR dizajnované pre ADS-B, ktoré ADS-B aj interne filtrujú a zosilňujú, sú na trhu voľne dostupné. Jedným takým SDR je prijímač od FlightAware.com, FlightAware Pro Stick Plus, ktorý budeme v našej práci využívať (obrázok 4 – 3).

Obrázok 4 – 3: FlightAware Pro Stick Plus, SDR pre ADS-B s USB a SMA-F konektorom [35]

4.4 Spracovanie prijatých dát a architektúra aplikácie

V predošlej podkapitole sme si vysvetlili diagram a fungovanie prijímania rádiových signálov. V tejto podkapitole si vysvetlíme ich ďalšie digitálne spracovanie, čím prejdeme k hardvérovej architektúre našej plánovacej a varovnej aplikácie.

Funkcionalita SDR spočíva v zachytení frekvenčného pásma rádiových vĺn, jeho premenou na digitálnu formu a poskytnutie tohoto zachyteného pásma počítaču alebo mobilnému telefónu. Výstup z SDR je v podstate pole, kde poloha v poli reprezentuje frekvenciu, a hodnota v poli reprezentuje zachytenú amplitúdu danej frekvencie [34]. Pred ďalším spracovaním týchto signálov potrebujeme signály dekódovať, resp. demodulovať.

4.4.1 Operačný systém a hardvér pre spracovanie

Keďže je zatiaľ základným vybraným kameňom nášho prijímača SDR od FlightAware, mali by sme ako základný operačný systém (OS) a hardvér vybrať taký, pre ktorý je FlightAware Pro Stick Plus (FAPSP) navrhnutý a optimalizovaný. Medzi základné funkcionality FAPSP patrí prijímanie ADS-B od lietadiel v okolí a schopnosť poskytovať tieto dáta serverom FlightAware (na základe čoho sa napríklad spätne upresňujú a rozširujú nazbierané dáta pomocou MLAT [12]), ako aj schopnosť k týmto dátam pristupovať cez internetové API (Application Programming Interface - programátorské rozhranie) z iných koncových bodov.

Túto funkcionalitu vykonáva softvér vyvinutý FlightAware nazývaný PiAware [35]. PiAware je softvér vyvinutý pre mikropočítače Raspberry Pi (RPi), ktoré fungujú na operačnom systéme Linux s procesorovou architektúrou ARM (Advanced RISC Machines). OS Linux je ideálny pre spravovanie viacerých služieb naraz, čo z neho robí výborný OS pre serverové aplikácie. Medzi ostatné výhody RPi patrí nízka cena, nízka spotreba energie pri zachovaní dostatočného výkonu vďaka ARM, a obrovská komunita používateľov, ktorí využívajú RPi na prototypovanie,

vďaka čomu je na RPi naimplementovaný obrovský počet knižníc a služieb, ktoré sú na RPi optimalizované, čo zvyšuje jeho všestrannosť [36].

Naša aplikácia sa teda sústredí na OS Linux (konkrétne Raspbian, verzia Debianu pre RPi) a Raspberry Pi, avšak základná funkcionalita získavania dát a prehľadu o okolitej prevádzke bola testovaná aj s využitím operačného systému Windows na počítači alebo Android na mobilnom telefóne.

4.4.2 Spracovanie leteckej komunikácie

Demodulácia AM je softvérovo pomerne jednoduchá záležitosť. Pre naše potreby môžeme využiť softvér `RTLSDR-Airband`, ktorý je navrhnutý na prijímanie komunikácie na leteckom rádiu cez `RTL-SDR`. Tento softvér funguje na Linuxe a ARM architektúre, takže funguje na RPi. `RTLSDR-Airband` premieňa naladený rádiový signál na zvukový signál, ktorý sa dá ukladať do zvukových súborov, ale aj v reálnom čase vysielať na server poskytujúci zvukové vysielanie, akým je napríklad Icecast [37]. Takýto zvukový výstup v reálnom čase môže byť spracovaný modelmi STT, a výstup z STT môže byť spracovaný jazykovými modelmi, ako je ChatGPT, ktorý by mohol z leteckej komunikácie získať dáta relevantné pre pilota dronu.

Medzi užitočné funkcionality `RTLSDR-Airband` patrí technika zvaná „Auto Squelch“. Squelch je technika využívaná v telekomunikácii, pri ktorej sa potláča zvukový výstup pri absencii silného prijatého signálu. Auto Squelch dokáže automaticky zistiť hladinu šumu na frekvencii, čím pri nahrávaní automaticky filtruje rádiové ticho [37].

4.4.3 Spracovanie ADS-B

Na spracovanie ADS-B z SDR sa používa služba `dump1090` [8], ktorá je dostupná na viacerých operačných systémoch. Pre potreby PiAware FlightAware poskytuje úpravu tejto služby, `dump1090-fa`. Táto úprava demoduluje ADS-B dáta cez PPM

(viď 4.3.1), a zároveň organizuje zachytené dáta do formy zrozumiteľnej PiAware a ostatným koncovým bodom cez API. Na organizáciu dát používa formát JSON (JavaScript Object Notation) [35].

Prijaté dáta sa organizujú do súboru `aircraft.json`, ktorý má tri kľúče: `now` s unixovým timestampom (časovou značkou) zobrazených dát, `messages` ako počítadlo prijatých správ od začiatku prijímania, a `aircraft`, ktorý obsahuje pole dát o prijatých lietadlách. Súbor `aircraft.json` sa vytvára počas prijímania kontinuálne na prijímacom zariadení. Na vizualizáciu dát PiAware poskytuje lokálne hosťovanú stránku SkyAware, ktorá okrem iného obsahuje prípojné body na `aircraft.json` pre prístup k dátam cez API (`/data/aircraft.json`). Otvorením portu, ktorý SkyAware používa (predvolený 8080) sa SkyAware ako aj jeho hosťované API sprístupí z iných koncových zariadení [35].

4.4.4 Napájanie a pripojenie internetu

Na fungovanie aplikácie (s využitím internetu, minimálne pre MLAT) potrebuje RPi byť pripojené na elektrickú sieť a internet. Na napájanie môžeme použiť dostatočne silný 5 V zdroj a na pripojenie k internetu môžeme využiť ethernet alebo Wi-Fi. Problém s 5 V DC (DC – Direct Current – jednosmerný prúd) je, že má veľké straty na veľké vzdialenosti a pri použití dlhého napájacieho kábla RPi nemusí mať dostatok napätia pre vykonávanie svojej funkcie. Ako sme spomínali v podkapitole 4.3.3, chceme, aby aj koaxiálny kábel bol čo najkratší, preto je vhodné umiestniť RPi čo najbližšie antény, a taktiež vzhľadom na vlastnosti ADS-B uvedené v podkapitole 2.2.3 je vhodné anténu umiestniť čo najvyššie bez okolitých obštrukcií. Na vysokých miestach, ako na streche domu, môže byť prístup k napájaniu a internetu problematický.

Obidva tieto problémy rieši PoE (Power over Ethernet, z angličtiny „napájanie cez ethernet“), ktorý umožňuje napájať RPi cez ethernetový kábel, ktorý zároveň

poskytuje aj pripojenie k internetu. PoE má viacero štandardov, avšak my budeme používať pasívne 48 V PoE, a ako protikus PoE hat (prídavok k RPi, ktorý sa inštaluje na jeho vrch) schopný spracovávať pasívnych 48 V.

4.4.5 Klient-server architektúra aplikácie

Hardvér na prijímanie najmä ADS-B (pre jeho väčšiu informačnú hodnotu) nie je drahý ani príliš veľký na to, aby si ho mohol pilot dronu nosiť so sebou. Aj spracovanie ADS-B pomocou `dump1090` je jednoduchá záležitosť vykonateľná aj pomocou mobilného telefónu, ktorý nosí so sebou. Problém nastáva pri využívaní našej aplikácie, pri ktorej sme si uviedli, že bude využívať najmä RPi a Linux. Používanie RPi v prenosnom móde je možné, ale nepraktické, vzhľadom na nutnosť mať používateľské rozhranie (napr. dotykový displej), napájací zdroj (power banka) a pripojenie k internetu (prístupový bod z mobilného telefónu). Dobré miesto na pripevnenie antény v teréne tiež nie je samozrejmosťou.

RTLSDR-Airband využíva Icecast pre poskytovanie dát cez internet, a PiAware na rovnaký účel používa SkyAware s možnosťou API. Vybraný spôsob spracovania dát nám umožňuje tento problém vyriešiť architektúrou klient-server, pri ktorej pilot dronu nemusí mať žiaden hardvér so sebou a stačí mu akékoľvek koncové zariadenie s pripojením na internet. V takomto prípade môže mať prijímač staticky nainštalovaný niekde v okolí, v ktorom lieta, pričom musí myslieť na limitácie ADS-B a mať prijímač dobre umiestnený. Prípadne môže prijímač úplne vynechať a použiť API, napríklad AeroAPI od FlightAware, avšak stále musí myslieť na to, odkiaľ dáta prichádzajú a aké sú ich limitácie (kapitola 2.2.3).

V každom prípade na využitie Icecast, SkyAware alebo našej aplikácie musia tieto služby bežať na koncovom bode, ktorý je s koncovými zariadeniami pilota dronu spojený internetom. Najjednoduchšie riešenie je použiť verejnú IP adresu, ale tá nemusí byť vždy k dispozícii, v takom prípade sa dá použiť VPN (Vir-

tual Private Network, z angličtiny Virtuálna súkromná sieť) na prepojenie servera a koncového zariadenia. VPN sa dá použiť aj na prepojenie prijímačov bez verejnej IP a servera s verejnou IP tak, aby boli dáta dostupné cez server s verejnou IP. Presne na tento účel sme v našej aplikácii využili Wireguard VPN.

Je dôležité poznamenať, že táto architektúra nevylučuje použitie prenosného RPi v teréne. Ak je Icecast, SkyAware alebo naša aplikácia lokálne nainštalovaná na prenosnom RPi, je možné na tieto služby pristupovať cez prehliadač RPi a prezeraním lokálne hosťovaných stránok. Ak máme okrem prenosného RPi aj hlavný server s Wireguardom, môžeme prenosné RPi s ním cez Wireguard prepojiť. Prenosné RPi tak môže posielať dáta hlavnému serveru cez Wireguard a tieto služby môžu byť dostupné cez hlavný server.

4.4.6 Získavanie polohy dronu

Pre vizualizáciu polohy dronu vzhľadom na okolitú letovú prevádzku, ako aj niektoré (nie kritické) aspekty našej aplikácie môže byť užitočné našej aplikácii poskytnúť aktuálnu polohu dronu. Vzhľadom na určenú klient-server architektúru môžeme dáta o polohe dronu prijímať cez HTTP `POST` na našom serveri. Keď sa pozrieme na obrázok 4 – 1, vidíme niekoľko bodov, kde získavanie dát o aktuálnej polohe môžeme uskutočniť.

Keď ideme od zdroja ku koncovému bodu, v prvom rade môžeme získať túto polohu zo zariadenia priamo na drone. Toto je však redundantné, keďže dron už častokrát v sebe GNSS obsahuje a museli by sme riešiť problémy s napájaním a pripojením. Spojenie medzi ovládačom a dronom by teoreticky napadnuteľné mohlo byť, ale je nepraktické. Na napadnutie spojenia medzi ovládačom a mobilným telefónom môžeme použiť techniku zvanú „USB Proxy“, pri ktorej môžeme použiť RPi ako „prostredníka“, ktorý by USB komunikáciu preposielal, a medzitým túto komunikáciu pre seba dekódoval. O tejto funkcionalite vieme, že funguje, pre-

tože Cosmostreamer používa túto funkcionalitu na zbieranie živého prenosu videa z dronu [38]. Túto funckionalitu sa nám však nepodarilo replikovať a taktiež je pre naše potreby nepraktická z dôvodu potreby RPi, napájania a pod.

Najjednoduchšie a najpraktickejšie je získať dáta o polohe priamo z mobilného telefónu. Pre náš dron (DJI Mini 3 Pro) existuje SDK (Software Development Kit) na vývoj aplikácií pre dron, avšak problém je, že toto SDK predvolene nemá rovnaké funkcionality ako hlavná aplikácia na ovládanie dronu, DJI Fly, čo je opäť nepraktické. Na zber dát o polohe dronu priamo z telefónu sme zvažovali techniku zvanú „screen scraping“, ktorá využíva aplikáciu bežiacu v pozadí na snímanie obrazovky a zber dát z toho, čo je na obrazovke. Pri DJI Fly by sme využili telemetriu, ktorá je zobrazená v ľavom dolnom rohu obrazovky. Pri návrhu tohoto prístupu vznikli obavy o vplyv na batériu a výkon mobilného telefónu, avšak tieto obavy sme nevedeli potvrdiť ani vyvrátiť, pretože ani túto funkcionalitu sa nám implementovať nepodarilo (bežiacu priamo na telefóne). Podarilo sa nám však vytvoriť prototyp tejto techniky pomocou vysielania obrazu na počítač a analýzy obrazu cez počítač, avšak toto je v praxi nepraktické kvôli veľkému objemu dát, ktoré je potrebné cez internet posielať.

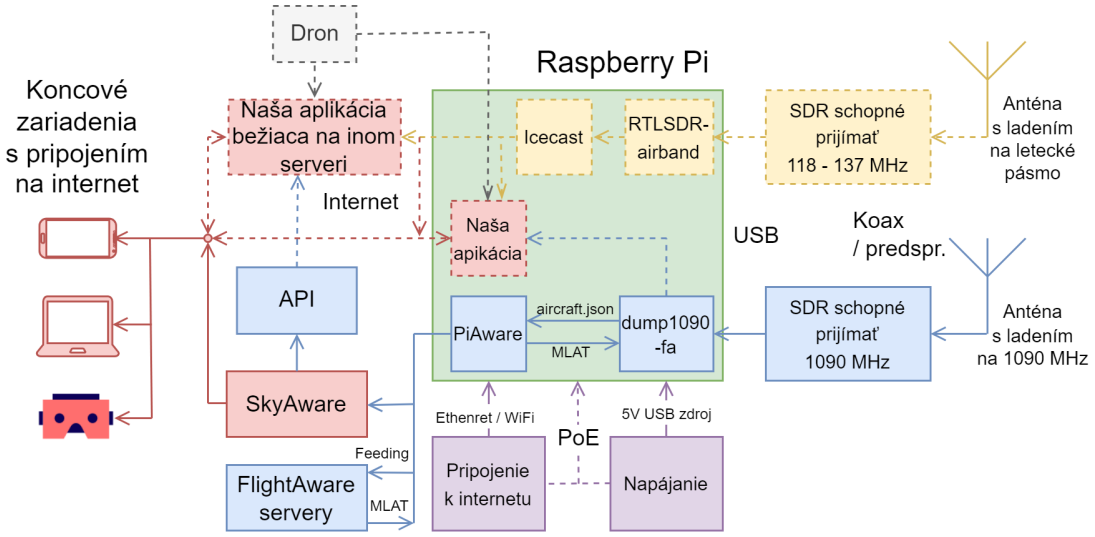
Na demonštráciu využitia polohy dronu v reálnom čase v našej aplikácii sme použili úpravu SDK, pri ktorej sme upravili mapový komponent. Tento upravený mapový komponent pri aktualizácii mapy posiela získanú polohu z dronu na náš server cez HTTP `POST`. Pri SDK je však dôležité poznamenať, že nie každý dron od DJI ho podporuje. SDK je taktiež obmedzené pri dronoch, ktoré využívajú ovládač DJI RC, keďže sa do neho nedajú inainštalovať aplikácie tretích strán.

Ako sme zvýraznili na začiatku, poloha dronu v našej aplikácii nie je kritická. Užívateľ si v našej aplikácii pred letom vie manuálne nastaviť letovú zónu a výšku, v ktorej sa bude pohybovať. Za letovou zónou sa nastaví niekoľko km varovnej zóny. Pokiaľ sú tieto zóny dostatočne veľké, poloha dronu má minimálny vplyv

na hlavnú funkcionalitu aplikácie.

4.4.7 Bloková architektúra aplikácie

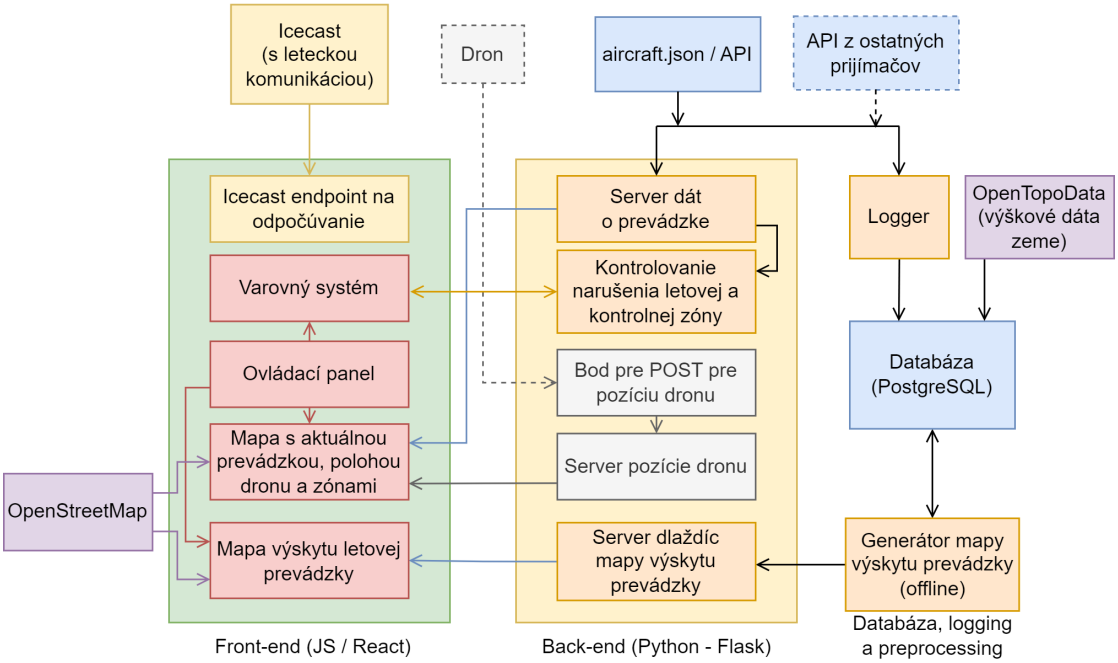
Bloková architektúra aplikácie je znázornená na obrázku 4 – 4. Časti dôležité pre hlavnú funkcionalitu sú zaznačené plnými čiarami, pričom nekritické časti sú zaznačené čiarkovane. Naša aplikácia je zaznačená čiarkovane, pretože použitie len samotného SkyAware, ktoré je jednoducho nainštalovateľné, môže výrazne zvýšiť bezpečnosť prevádzky dronu. Taktiež máme možnosť našu aplikáciu nainštalovať buď lokálne na rovnakom zariadení, ktoré ADS-B prijíma, alebo využiť iný server. Žltou farbou je znázornený zber hlasových dát z leteckého rádia, modrou farbou je znázornený zber dát z ADS-B a červenou farbou sú znázornené webové aplikácie.



Obrázok 4 – 4: Bloková architektúra prijímania rádiových signálov a našej aplikácie

4.5 Softvérová architektúra aplikácie

Architektúru a fungovanie našej aplikácie budeme navrhovať vzhľadom na požiadavky uvedené na začiatku kapitoly 4. Vzhľadom na určenú klient-server architektúru rozdelíme našu aplikáciu na back-end a front-end. Back-end bude naprogramovaný v programovacom jazyku Python a bude bežať na webovom frameworku Flask. Prototyp front-endu bol vytvorený v JavaScripte (JS), avšak neskôr bol preložený do JS knižnice React, v ktorom v ňom bola tvorená ďalšia funkcionalita. K ukladaniu dát sme použili databázu PostgreSQL. Finálna softvérová architektúra je znázornená na obrázku 4 – 5.

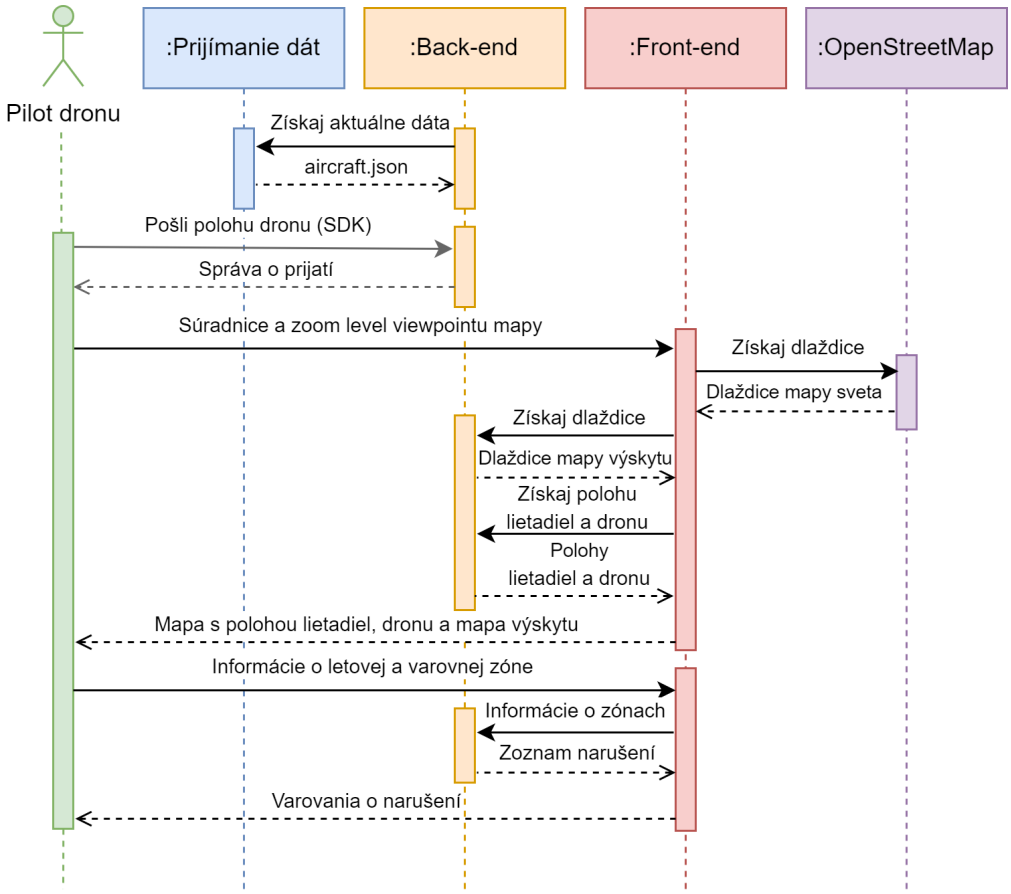


Obrázok 4 – 5: Softvérová architektúra aplikácie

Ako je v architektúre zakreslené, základom pre vizualizáciu mapovej aplikácie bude open source mapa sveta OpenStreetMap (OSM) [39]. OpenStreetMap je dlaždicová mapa, ktorá má vygenerované dlaždice v rôznych hladinách priblíženia a zemepisných šírkach a dĺžkach. Na zobrazenie mapy z OSM je v JS / Reacte

použitá JS knižnica `Leaflet`, ktorá okrem iného dokáže na webovej stránke zobrazovať dlaždice mapy podľa toho, kde sa práve používateľ pozerá a akú má hladinu priblíženia. Dlaždice OSM sú hosťované na serveroch OSM.

Podrobná komunikácia medzi modulmi základnej aplikácie (bez databázy a ukladania dát) je znázornená na sekvenčnom diagrame na obrázku 4 – 6.



Obrázok 4 – 6: Sekvenčný diagram aplikácie

4.5.1 Logging a práca s databázou

Logging (zapisovanie údajov) dát o letovej prevádzke prv prebiehal pomocou priebežného zálohovania súboru `aircraft.json` (viď 4.4.3) (cez deň každých 5 sekúnd, cez noc každých 20 sekúnd). Pre lepšie spracovanie dát sme neskôr prešli na vy-

užitie databázy, konkrétne PostgreSQL vďaka jeho výkonu pri spracovaní veľkého objemu dát. Prvá forma loggera (skriptu na zapisovanie údajov) bola vytvorená pre účel presunu uložených JSON údajov do PostgreSQL. Na to bola vytvorená tabuľka `aircraft_pointcloud`, ktorej kľúče sú `source_id` s ID prijímača (odkazuje na tabuľku `sources`, kde sa nachádza meno prijímača (`receiver_name`) a jeho webová adresa (`receiver_website`)), `capture_time`, ktorý obsahuje hodnotu kľúča `now` v `aircraft.json` a `hex_code`, ktorý je vysielaný unikátny identifikátor lietadla. Každý riadok v `aircraft_pointcloud` je jedno lietadlo zachytené jedným prijímačom v jednom čase.

Keďže sú dáta prijaté z ADS-B rôznorodé, ďalšie stĺpce tabuľky sú pridávané postupne; ak sa v nejakom prvku v zozname `aircraft` v `aircraft.json` objaví nový kľúč, pre ktorý ešte neexistuje stĺpec, vytvorí sa nový stĺpec. Aby nevznikli problémy s parsovaním dát (premenou na špecifický dátový typ), ukladajú sa všetky hodnoty ako text (problém s parsovaním môže nastať napríklad pri výške; vo vzduchu lietadlo vysiela výšku numericky, ale keď pristane, vysiela výšku ako 'ground'). Ak sú niektoré stĺpce potrebné pre numerické spracovanie, vytvorí sa pre nich stĺpec s príponou `_num` a tieto sú pri vkladaní dát parsované; ak pri parsovaní nastane chyba, nastavia sa ako `null`. Po prenose dát do PostgreSQL sme logger upravili tak, aby ukladal dáta priamo do PostgreSQL. Dáta sú rozdelené do subpartitions (podčastí tabuľky) podľa dní s príponou `_YYYYMMDD` (rok, mesiac, deň).

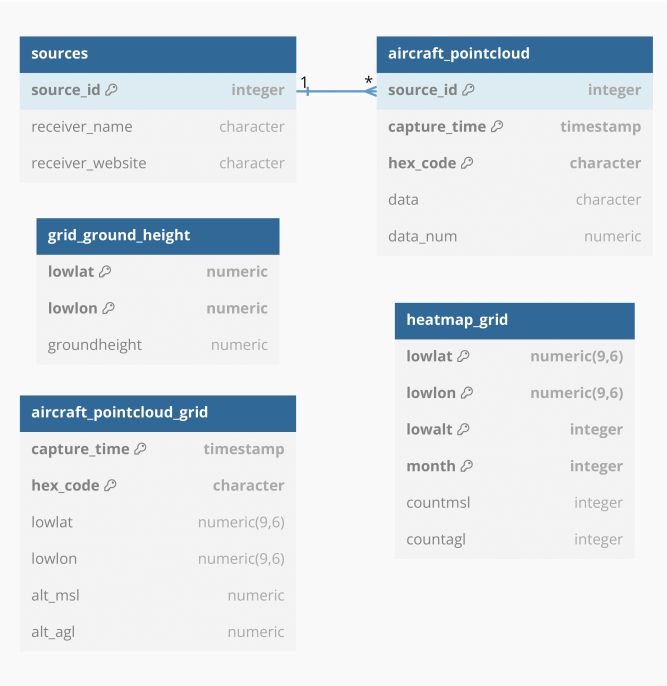
Tieto dáta môžeme využiť napríklad na vytvorenie mapy výskytu letovej prevádzky. Takúto mapu vytvoríme vytvorením 3D mriežky, ktorá je rozdelená podľa zemepisnej šírky a dĺžky, a výšky nad zemou. Potom počítame výskyt lietadiel v každej „kocke“ mriežky, a takúto mriežku môžeme preniesť do 2D podoby tak, že pre každú výšku počítame výskyt lietadiel v „kockách“ pod touto výškou. Nakoniec môžeme vykresliť pravdepodobnosť výskytu gradientom od najmenšieho

výskytu lietadiel po najväčší.

Na to, aby pre pilota dronu mala takáto mapa význam, musíme prepočítať nadmorskú výšku, ktorú lietadlá vysielajú, na výšku nad zemou. Na to potrebujeme výškové dáta zeme. Serverové riešenie s API a možnosťou vlastného hosťovania na získanie výšky nad zemou poskytuje služba OpenTopoData s použitím datasetu EU-DEM (European Digital Elevation Model, z angličtiny Európsky digitálny výškový model), ktorý má rozlíšenie 25 x 25 m [40]. Prácu s výškovými dátami však značne urýchlime, ak ich presunieme do databázy. Výškové dáta zeme potrebné pre našu aplikáciu budeme ukladať do tabuľky `grid _ground _height _(letisko) _(rozlíšenie)`, ktorá má kľúče `lowlat` a `lowlon`, ktoré určujú dolné hranice geografických súradníc bunky mriežky, a `groundheight`, ktorý obsahuje výšku zeme v m nad morom v strede bunky. Odčítaním výšky lietadla nad morom (ktoré musí byť prv prepočítané na metre zo stôp, ktoré sa v letectve používajú) výškou zeme získame výšku lietadla nad zemou. Pod rozlíšením sa rozumie, na koľko častí sa rozdelí jeden stupeň zemepisnej šírky alebo dĺžky. Vzhľadom na naše potreby a Shannonove vzorkovacie pravidlo môžeme použiť rozlíšenie 2 000, pri ktorom je výška jednej bunky približne 55 m.

Generátor mapy výskytu prevádzky ako vstup prijíma rozlíšenie geografických súradníc a výšky, v ktorom má mapu generovať. Na jeho fungovanie musí byť v rovnakých geografických hraniciach vygenerovaná aj výšková mapa. Generátor si prv dáta predpripraví pomocou PostgreSQL. Prv vytvorí tabuľku `aircraft _pointcloud _grid _(letisko) _(rozlíšenie)`, v ktorej rozdelí lietadlá do 2D mriežky podľa rozlíšenia (používa taktiež lowlat a lowlon), a podľa výškovej mapy vypočítava výšky lietadiel nad zemou. Uchováva aj výšky lietadiel nad morom, avšak ukázalo sa, že tieto výšky nemajú žiaden informačný význam pre pilotov dronov. Z tejto tabuľky potom vytvára `heatmap _grid _(letisko) _(rozlíšenie)`, ktorá má kľúče `lowlat`, `lowlon`, `lowalt`, `month`, `countmsl` a `countagl`. Mesiac je

extrahovaný z `capture_time` na možnosť vytvorenia sezónnej mapy, avšak na také mapy nemáme zatiaľ dostatok dát. Zvyšné stĺpce sú už predspracované dáta potrebné na generáciu máp. Pri generácii samotnej už s PostgreSQL nebudeme pracovať. Finálny dátový model je znázornený na obrázku 4 – 7.



Obrázok 4 – 7: Dátový model našej aplikácie v PostgreSQL

Generátor generuje mapy vo formáte PNG s vysokým rozlíšením pomocou knižnice `matplotlib`. Pri generovaní mapy je možné vynechať dáta v tesnej blízkosti letiska, keďže tieto polohy sú presýtené dátami a pre pilotov dronov nie sú relevantné (nad letiskom drony nemôžu lietať). Generátor teda generuje mapy vo všetkých výškových hladinách s nastaveným rozostupom a vo dvoch verziách podľa toho, či sa do gradientu zahŕňajú aj dáta z okolia letiska, alebo nie. Pokiaľ sa do gradientu nezahŕňajú, tak majú automaticky najsilnejší gradient.

Vygenerované PNG nie je použiteľné v mape pomocou `Leafletu` kvôli veľkej záťaži, ktorá je na `Leaflet` pri použití PNG vo vysokom rozlíšení vynaložená.

Pre efektívnejšie zobrazenie mapy však môžeme použiť schopnosť `Leafletu` zobrazovať dlaždice a prekonvertovať aj naše mapy na dlaždice podobné dlaždiciam OSM. Výsledok generátora je teda priečinok s dlaždicami, v ktorom sú mapy rozdelené podľa toho, či obsahujú letisko, potom podľa rozlíšenia, podľa výšky, pre ktorú sú vygenerované, a až potom podľa hladiny priblíženia a zemepisnej šírky a dĺžky.

4.5.2 Back-end (Python + Flask)

Back-end naprogramovaný v jazyku Python a knižnici Flask má za úlohu predspracovávať a poskytovať dáta používané vo front-ende, ako aj vykonávať zložité matematické operácie, ktorými nechceme vyťažovať front-end (keďže front-end beží na koncovom zariadení). Navrhovaný back-end má niekoľko prípojných bodov (mount pointov):

- `/heatmap` – pre hosťovanie dlaždíc pre mapu výskytu prevádzky. Za `/heatmap` sa nachádza `/<string:included>` na určenie toho, či chceme letisko zaradiť do gradientu alebo nie (`airport_included` alebo `airport_excluded`), potom `/res_<int:resolution>` na vyjadrenie požadovaného rozlíšenia, potom `/<int:height>` na vyjadrenie požadovanej výškovej hladiny, a až tak `/<int:z>/<int:x>/<int:y>.png` na vyjadrenie požadovanej dlaždice (ktorú dlaždicu je potrebné zobraziť ovláda `Leaflet`),
- `/drone_location` – s možnosťou metódy `POST` na zasielanie aktuálnej polohy dronu na server s validáciou dát,
- `/data` – poskytujúci dáta z prijímača vo formáte `aircraft.json` (viď 4.4.3),
- `/drone_data` – poskytujúci aktuálnu polohu dronu,
- `/check_breach` – s možnosťou metódy `POST`, ktorý prijíma informácie o nastavení letovej a varovnej zóny a vracia zoznam s vypočítanými narušeniami

zóny.

Koncový bod `/check_breach` je hlavná súčasť plánovacieho a varovného systému aplikácie. Medzi nastaveniami zón sa nachádza aj čas predikcie, v ktorom si užívateľ želá predpovedať vývin situácie v letovej prevádzke. Funkcionalita `/check_breach` spočíva vo výpočte, kde sa budú lietadlá za určený čas predikcie nachádzať, horizontálne aj vertikálne. Výpočet predpovedanej horizontálnej polohy funkcia robí pomocou dát, ktoré má k dispozícii, ako je aktuálna poloha lietadla, jeho rýchlosť a smer. Tento prístup je viac menej analogický k prístupu, ktorý sme si uviedli v kapitole 2.1.2. Potom vypočíta aj predpovedanú výšku lietadla za čas na základe jeho aktuálnej výšky a vertikálnej rýchlosti. Pokiaľ je akákoľvek aktuálna alebo vypočítaná výška menšia ako výšková hranica zóny + bezpečný vertikálny odstup, program skontroluje, či úsečka nízko letiaceho lietadla narušuje kružnicu niektorej zo zón, prv letovej, potom varovnej. Ak áno, tak aj vypočíta, že za ako dlho narušenie zóny nastane. Všetky narušenia ukladá do zoznamu, a tento zoznam posiela naspäť front-endu.

4.5.3 Front-end (JS / React)

Front-end slúži na prezentáciu nameraných, spracovaných a vypočítaných dát pilotovi dronu, ako aj na ovládanie mapy a určitých nastavení aplikácie. Táto podkapitola sa bude venovať front-endu vytvorenom v JS knižnici React, ktorý je súčasťou finálnej aplikácie. React používa komponentovú štruktúru. Pre potreby našej aplikácie sme vytvorili hlavný komponent, na ktorom sa nachádza mapa, ovládací panel, Icecast koncový bod a varovný systém. Front end je nadizajnovaný s prvkami Material Design (`https://mui.com/`).

Mapa bežiaca na `Leaflete` s OSM zobrazuje lietadlá v okolí vo forme šípok. Farba tejto šípky sa počíta podľa gradientu podľa toho, ako sú vysoko vzhľadom na nastavenú výšku zóny. Lietadlá vysoko, pre ktoré dron netvorí nebezpečenstvo,

majú zelenú farbu, zatiaľčo lietadlá s výškou pod výškou zóny + bezpečným odstupom majú červenú farbu. Všetky lietadlá majú štítky, na ktorých je zobrazená ich výška v metroch a rýchlosť v km/h. Dron je na mape taktiež zobrazený ikonkou, pod ktorou je štítok s jeho aktuálnou výškou. Zóny sú taktiež vyznačené; letová zóna je vyznačená červenou farbou, varovná žltou. Na mapu je možné klikať, a po kliknutí sa kliknutý bod stáva stredom letovej zóny. Pokiaľ je dron mimo zóny, či výškovo alebo vzdialenostne, nastavenie zóny sa upraví.

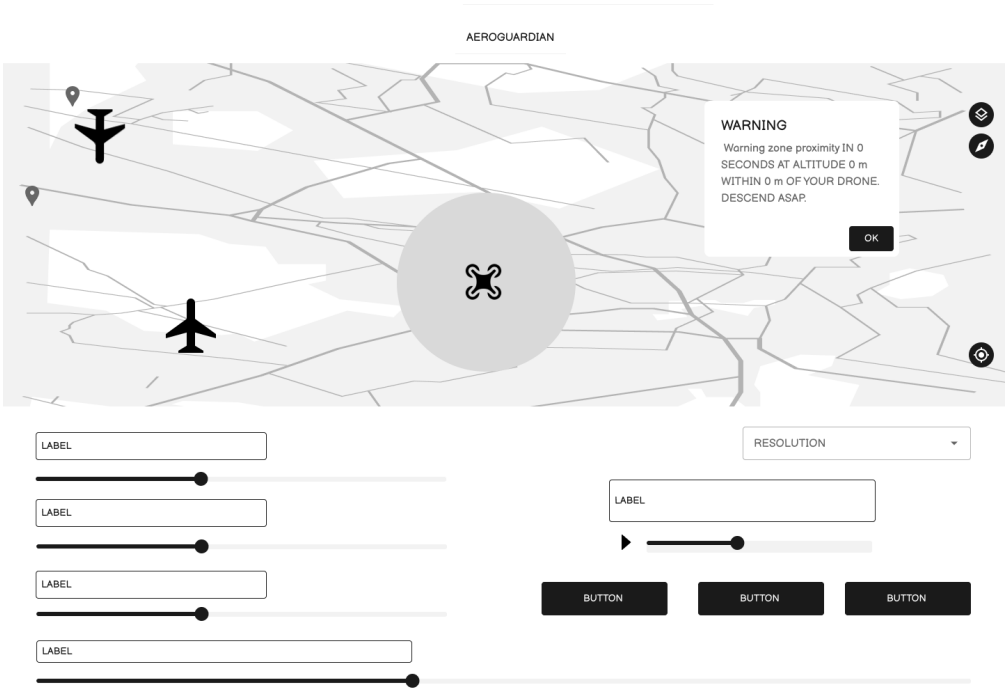
V ovládacom paneli sú ovládacie prvky na nastavenie letovej a varovnej zóny, ako aj nastavenie vrstvy s mapou výskytu prevádzky. Nastavenie je možné kombinovane pomocou `Slider` u, ako aj pomocou `TextField` u nastaveného na číselný typ, do ktorého sa dajú čísla vpisovať, ako aj upravovať pomocou šípok nahor a nadol. Hranice hodnôt, ako aj veľkosť jedného kroku, sa dajú prenastaviť v kóde. K hlavným nastaveniam zóny patria polomer a výška letovej zóny, veľkosť varovnej zóny a čas predikcie. K nastaveniu vrstvy s mapou výskytu patrí tlačidlo na prepínanie zaradenia letiska do gradientu, `FormControl` na výber rozlíšenia a ďalší `Slider` s `TextField` om na nastavenie priesvitnosti vrstvy. Výšková hladina mapy výskytu sa mení spolu s nastavenou výškou zóny. K ostatným ovládacím prvkom patrí tlačidlo na vypnutie / zapnutie štítkov lietadiel, tlačidlo na nastavenie polohy drona ako stred zóny, ako aj tlačidlo na centrovanie mapy na dron.

Koncový bod Icecastu slúži na odpočúvanie leteckého rádia pri lietaní s dronom.

Varovný systém vo front-ende sa skladá z dvoch prvkov: varovného boxu a špeciálneho varovného boxu. Ak front-end cez `/check_breach` dostane zoznam, ktorý nie je prázdny, to najzávažnejšie narušenie zóny (berie sa do úvahy, ktorá zóna bola narušená (letová/varovná) a za aký čas bude narušená) sa zobrazí vo varovnom boxe mimo mapy. Varovanie pred narušením letovej zóny sa zobrazí červenou farbou, pred narušením varovnej zóny sa zobrazí žltou farbou. Ak je akékoľvek varovanie pod výškou dronu + bezpečný vertikálny odstup, v strede obrazovky

sa zobrazí špeciálny varovný box, ktorý varuje pilota dronu, aby čo najskôr klesol na bezpečnú výšku.

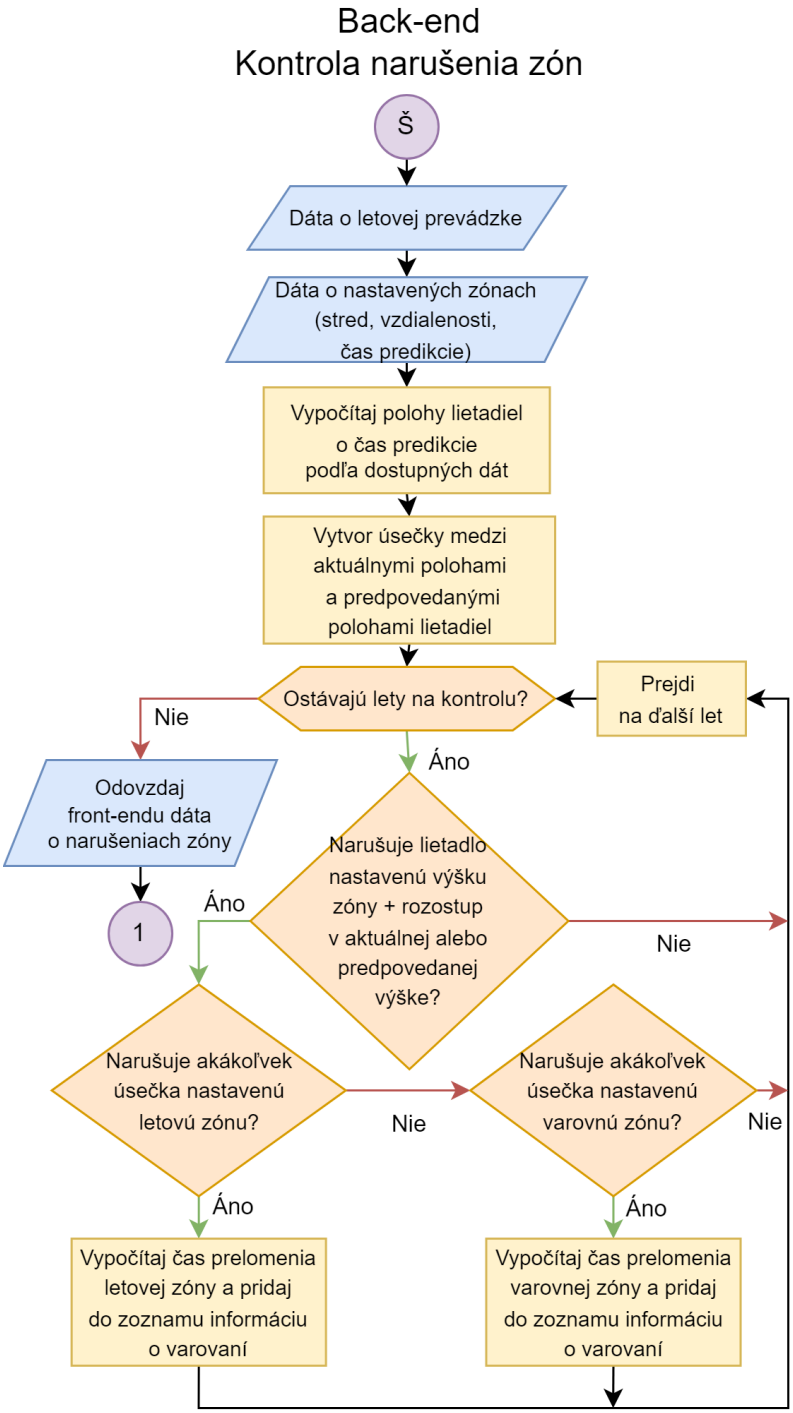
Návrh vzhľadu používateľského rozhrania je zobrazený na obrázku 4 – 8. Je nadizajnovaný tak, aby zobrazoval všetky potrebné informácie, ale aj mal všetky potrebné ovládacie prvky na fungovanie aplikácie. Zobrazované informácie sú všetky uložené v mape v hornej časti obrazovky, a ovládacie prvky sú dizajnované tak, aby sa dali jednoducho ovládať na akomkoľvek koncovom zariadení.



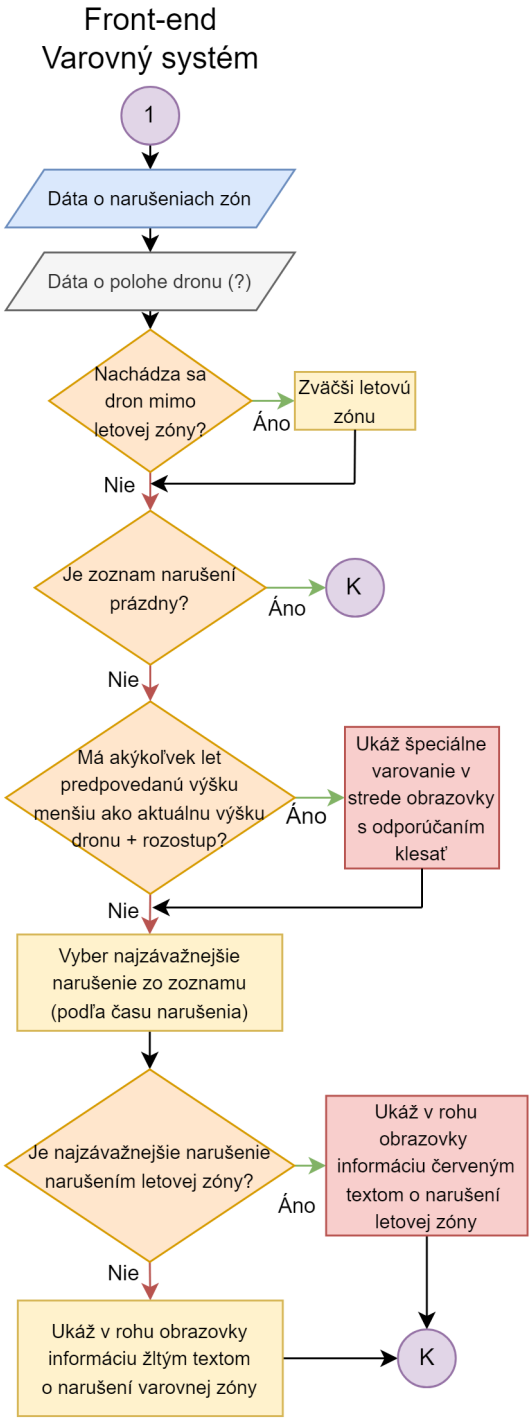
Obrázok 4 – 8: Návrh vzhľadu používateľského rozhrania

4.5.4 Vývojový diagram plánovacej a varovnej funkcionality

Vývojový diagram vysvetlenej plánovacej a varovnej funkcionality je znázornený na obrázkoch 4 – 9 a 4 – 10.



Obrázok 4 – 9: Vývojový diagram plánovacej a varovnej funkcionality aplikácie pre back-end



Obrázok 4 – 10: Vývojový diagram plánovacej a varovnej funkcionality aplikácie pre front-end

5 Realizácia plánovacieho a varovného systému

V tejto kapitole dokumentujeme premenu nášho návrhu na skutočnosť a postrehy, ktoré sme získali počas realizácie. Vyberieme hardvérové komponenty vzhľadom na ich určené opísané požiadavky, vytvoríme z nich infraštruktúru na prijímanie dát o letovej prevádzke, a nadväzujúc na to vytvoríme našu plánovaciu a varovnú aplikáciu. Pri stavbe a výbere hardvéru je dôležité podotknúť, že možností je veľa a každá má svoje výhody a nevýhody a netvrdíme, že naše riešenie je najlepšie možné. Hardvér sme vyberali a stavali vzhľadom na naše potreby, rozpočet a vývojovú charakteristiku projektu, ktorá si vyžadovala veľkú rezervu výkonu.

5.1 Výber hardvéru

V kapitolách 4.3.4 a 4.4.1 sme si určili, že najlepším prijímačom pre naše potreby bude FlightAware Pro Stick Plus (FAPSP) s využitím Raspberry Pi (RPi). Pri výbere RPi máme k dispozícii niekoľko typov, a niektoré typy majú na výber viacero možností operačnej pamäte. Výkonovo najslabšie a najlacnejšie RPi, na ktorom sme prijímanie ADS-B testovali a fungovalo bez problémov, je Raspberry Pi Zero 2W. Na prototyp, z ktorého sa potom stal hlavný prijímač, sme použili Raspberry Pi 4B so 4GB RAM. Neskôr na hlavný server sme použili Raspberry Pi 5 s 8GB RAM, aktuálne najlepšie RPi na trhu.

K FAPSP sme používali antény v dvoch cenových kategóriách: lacnú (prenosnú) s magnetickou základňou a ziskom 3 dBi (viď 4.3.2), a drahšiu (lepšiu) kolineárnu anténu určenú pre stálu inštaláciu (Vinnant COL1090/5-SU) so ziskom 7,14 dBi. Prvá spomenutá bola použitá na prototyp a lacné / prenosné prijímače, druhá spomenutá bola použitá na statický prijímač.

Na statické prijímanie leteckého pásma sme použili GPA anténu Sirio GPA 108-136. Ako SDR sme použili RTL-SDR V3 (viď 4.3.4). V rámci tejto práce

sa nám analýzou leteckého rádia STT a GPT nepodarilo vyprodukovať použiteľný výsledok. Na prijímanie leteckého pásma v teréne, ak nie je dostupné počúvanie cez Icecast, preto používame obyčajné AM rádio schopné sa naladiť na letecké pásmo, konkrétne Retekess TR105.

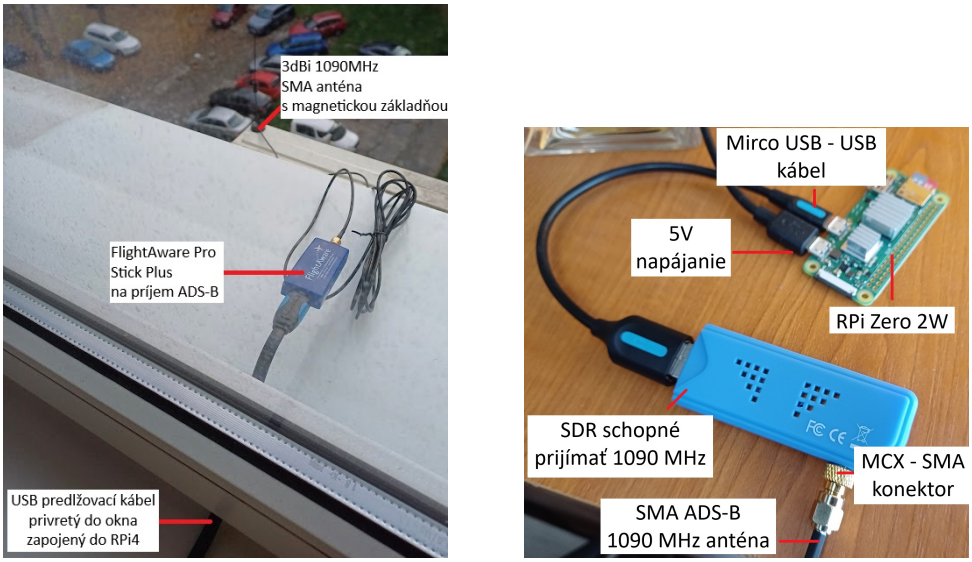
Na otestovanie predspracovania signálu (viď 4.3.3) sme v statickom prijímači pre ADS-B použili 14 dB filtrovaný predzosilňovač vyrábaný firmou Uputronics. Pre letecké pásmo sme použili 20 dB predzosilňovač od českej firmy DDAMTEK.

5.2 Prototyp prijímača a prijímanie ADS-B z bytu

Ako prototyp sme použili RPi 4B 4GB s FAPSP a anténu s magnetickou základňou, ktorú sme prichytili na jednotku klimatizácie z okna na šiestom poschodí (v 7 poschodovom bytovom dome), ale dá sa pripevniť na akýkoľvek kovový povrch, ako napríklad na hliníkovú parapetu. Zo začiatku sme sa báli poškodenia káblu antény, tak sme do okna privreli USB predlžovací kábel a FAPSP sme mali na parapete blízko antény (USB kábel sme považovali za lacnejšiu súčiastku na výmenu ako anténu) (obrázok 5 – 1). Nevýhodou však bolo, že hrozilo poškodenie FAPSP pri zlom počasí. Pri analýze štruktúry prijímača a koaxiálneho káblu sme prišli na to, že keďže koaxiálny kábel je jednoduchý vodič s hrubou izoláciou (viď 4.3.3), hrozba jeho poškodenia pri privretí do okna je minimálna. V takom prevedení v zlom počasí jedine hrozí, že anténa zhrdzavie, ale potrvá dlho, kým vplyv vonkajšieho prostredia bude viditeľný na výkone antény. Vzhľadom na to, že je takáto anténa 5x lacnejšia, ako jej odolná alternatíva, je lacnejšie v prípade poruchy takú anténu vymeniť ako si v byte / dome zariaďovať odolnú anténu, ak výkon takej antény nepotrebujeme.

Pri prepojení PiAware s FlightAware nám FlightAware generuje graf, z ktorého môžeme vyčítať smerovosť nášho prijímača. Pri prijímaní ADS-B z okna narážame na nevýhodu ADS-B, ktorú sme si uviedli v kapitole 2.2.3, a je zjavné, že prijímanie

je obmedzené na stranu, na ktorú z okna nevidíme. Pri využití hlavného servera a viacerých prijímačov môžu však aj dáta prijaté z okna bytu byť pre aplikáciu cenné a limitácia prijímania môže byť vyriešená použitím viacerých prijímačov, prípadne aj v rámci jedného bytu na oknách na rozličné svetové strany. Preto sme po zavedení hlavného servera vytvorili lacný prototyp prijímača, vďaka ktorému môžeme jednoducho rozširovať našu sieť prijímačov (obrázok 5 – 1). Úbytok v počte prijímaných lietadiel lacným prijímačom je však oproti FAPSP veľmi viditeľný.



Obrázok 5 – 1: Prototyp prijímača a lacný prijímač dizajnovaný na prijímanie z bytu / domu

5.3 Stavba statického prijímača

Predtým, než sme mali vyvinutý systém pre vytvorenie siete prijímačov, sme chceli postaviť odolný, výkonný a statický prijímač, ktorý by bol solídnym vstupným bodom pre našu aplikáciu, a zároveň by nám začal zbierať dáta, ktoré budeme používať na ďalšiu analýzu. Chceli sme ho postaviť niekde, kde by mal dobrý

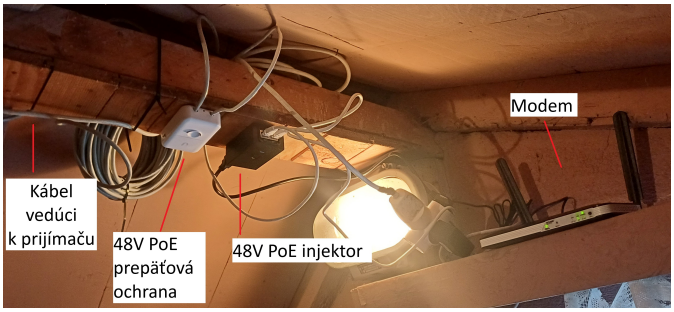
výhľad na oblohu zo všetkých smerov, a zároveň by mal dobrý príjem od lietadiel na letisku, v jeho okolí a v línii pristávacej dráhy. Ako miesto na inštaláciu sme si vybrali našu chatu na Ľudvíkovom dvore, ktorá sa nachádza približne štyri kilometre vzdušnou čiarou od letiska, a je mierne na kopci, vďaka čomu má dobrý príjem nad Košicami a z okolia letiska. Nie je však na vrchu kopca a kopce mierne tienia príjem zo západu, avšak na naše potreby je to stále vynikajúce miesto.

Na naše RPi 4B 4GB, ktoré sme mali z prototypu, sme nainštalovali PoE hat (viď 4.4.4) a uzatvorili sme ho do krabičky, ktorá bola pre RPi + PoE hat dizajnovaná. PoE hat sa pri premene 48 V na 5 V zahrieva, ale je vybavený aj ventilátorom, ktorý RPi udržuje v prijateľnej teplote. Toto RPi sme potom pripevnili na vnútorný bok inštalačnej krabice. Vďaka PoE jediný kábel, ktorý je potrebný ako vstup do krabice, je ethernetový kábel, ktorý do krabice vchádza cez odolný panelový PoE konektor. Na ľavú vonkajšiu stranu krabice sme pripojili našu odolnú ADS-B anténu (viď 5.1) a na pravú stranu sme pripevnili PVC rúru, na ktorú sme pripevnili našu GPA anténu na prijímanie leteckého spektra. Košice Veža na riadenie CTR Košice (viď 3.2) používa frekvenciu 120,4 MHz, ktorá má vlnovú dĺžku približne 2,49 m (viď 4.3.1). Naša anténa sa dá ladiť zmenou dĺžky hlavnej antény a radiálov na $\lambda/4$ (viď 4.3.2), takže nastavíme všetky dĺžky približne na 62 cm. Použité SDR sme spomenuli v kapitole 5.1 (obrázok 5 – 3).

Na našej chate sme nemali prístup k internetu. Tento problém sme vyriešili nainštalovaním modemu, ktorý zo začiatku mal SIM kartu od mobilného operátora Orange, ktorý pre SIM karty modemov ponúkal službu verejnej IP, vďaka ktorej sa k prijímaču dalo pristupovať odkiaľkoľvek cez internet. Toto umožňuje okrem iného RPi diaľkovo ovládať a vyvíjať na ňom softvér, napríklad cez protokol SSH (Secure Shell), ktorý umožňuje prístup k príkazovému riadku cez internet. Pre zabezpečenie SSH cez internet silno odporúčame používať na SSH vygenerovaný kľúč, nepoužívať typické užívateľské mená (pi, admin a podobne), pri fungujúcej auten-

tifikácii cez kľúč vypnúť prihlasovanie heslom a použiť iný port ako 22, napríklad cez presmerovanie portu routeru / modemu (nám osobne otvorený port 22 pravdepodobne našiel bot a ešte keď sme nemali autentifikáciu kľúčom, a aj keď sa mu do RPi neporadilo dostať, spôsobil spadnutie a reštart systému).

Modem sme cez ethernet spojili so 48 V PoE injektorom, za ktorým sme ešte ethernet prepojili cez PoE prepäťovú ochranu pre aspoň čiastočnú ochranu pred bleskami (obrázok 5 – 2). Neskôr po implementácii hlavného servera s Wireguardom (viď 4.4.5) už verejná IP nie je potrebná a SIM sa dá vymeniť za akúkoľvek inú (lacnejšiu) s prístupom na internet.

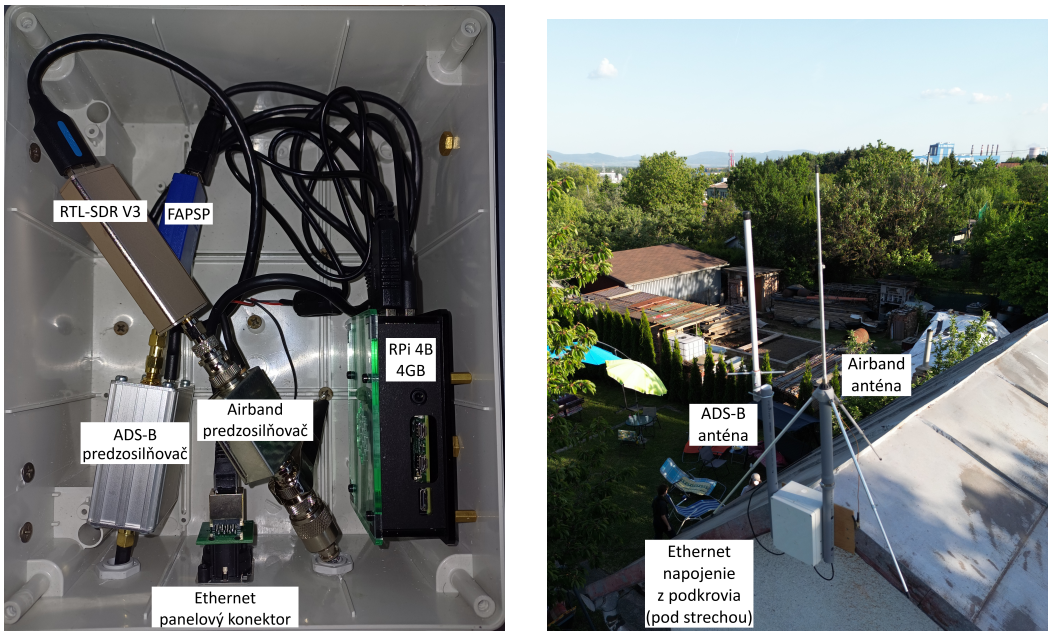


Obrázok 5 – 2: Zapojenie statického prijímača v podkroví

Po nainštalovaní prijímača sme boli prekvapení z toho, že kvalita prijímania lietadiel v okolí letiska bola zlá. Neskôr sme prišli na to, že prijímanie bolo také kvalitné, že prijaté vysielanie z lietadiel, ktoré boli blízko bolo také silné, že preťažili FAPSP a nedali sa dekódovať. Problém bol v tom, že `dump1090-fa` sa podľa pôvodných nastavení sústredí na lietadlá, ktoré sú ďaleko, a vzhľadom na to nastavuje zisk (viď 4.3.4) a príliš silné signály ignoruje. Toto sa dá opraviť prenastavením `adaptive-dynamic-range` na `yes` v `/etc/default/dump1090-fa`.

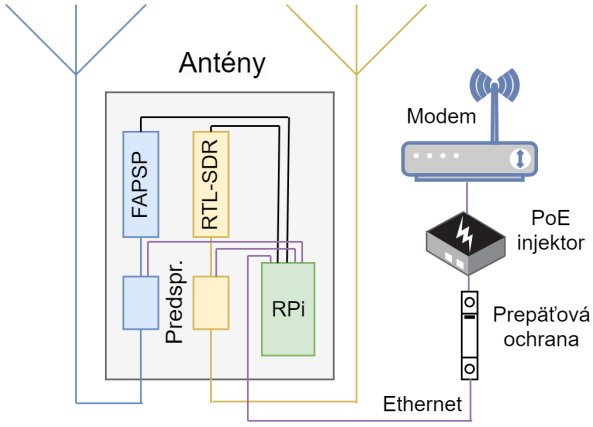
Toto sme však v tom čase nevedeli, a aj v rámci vývoja sme chceli do statického prijímača nainštalovať predspracovanie signálu. Použité predspracovanie je uvedené v 5.1. Okrem toho sme obidve antény zdvihli minimálne o štvrť metra nad strechu použitím PVC rúr (obrázok 5 – 3). Vzhľadom na charakteristiku opí-

saného problému predsozilnenie ADS-B problém nevyriešilo, a po vyriešení problému nemá na dosah prijímača výrazný vplyv. Predzosilňovač však pomáha prijímať výrazne čistejší signál (čo sa potvrdilo najmä pri prijímaní leteckého rádia, viď 4.4.2), avšak na prijímanie ADS-B to má v našom prípade minimálny vplyv. Je vhodné spomenúť, že predzolsilňovače sú aktívne súčiastky a potrebujú byť napájané. Predzosilňovač na ADS-B je napájaný priamo ďalším USB-C káblom, zatiaľčo predzosilňovač na letecké pásmo funguje na 12 V a musel byť napájaný 5 na 12 V step-up konvertorom, ktorého rušenie bolo minimalizované feritovým jadrom. Kábel +12 V bol napájkovaný priamo na predzosilňovač, kábel 0 V bol spojený s krokosvorkou s kostrou antény.



Obrázok 5 – 3: Vnútorná a vonkajšia štruktúra statického prijímača

Finálna hardvérová architektúra je zobrazená na obrázku 5 – 4.

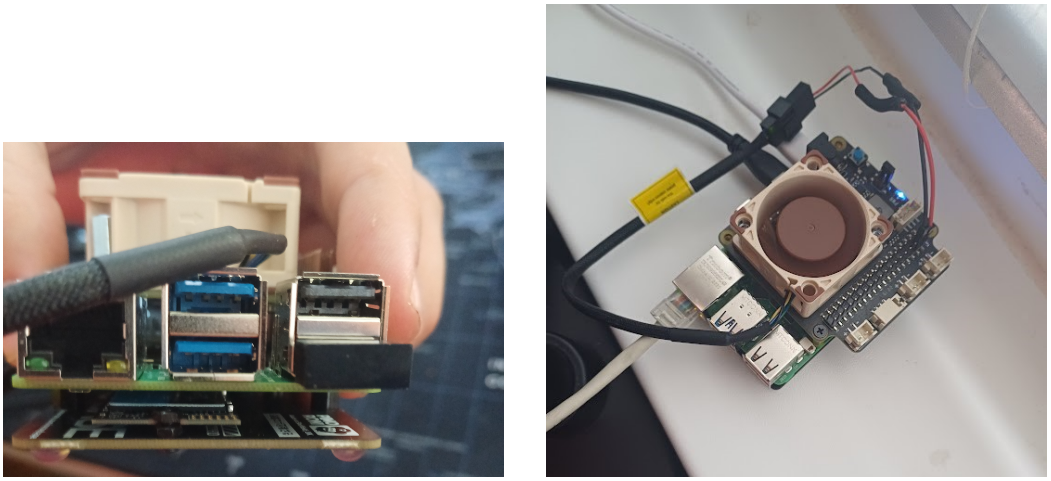


Obrázok 5 – 4: Hardvérová architektúra statického prijímača

5.4 Stavba a softvér hlavného servera

Ako sme uviedli v 5.1, na hlavnom serveri sme s hardvérom nešetrili a šli sme do toho najlepšieho, čo RPi vedelo ponúknuť (RPi 5 8GB). Na tomto serveri neskôr prebiehali zložité operácie, ako spracovávanie dát, a prilepený pasívny chladič na chladenie nestačil. Mali sme z predošlého experimentovania k dispozícii napájaciu dosku s ventilátorom, ktorá však bola určená pre RPi4 a RPi5 nedodávala dostatok napätia. Ventilátor sa však dal napájať spätne cez GPIO (General-Purpose Input/Output – univerzálny vstup/výstup) RPi5. Ventilátor sme neskôr vymenili za Noctua NF-A4x20 5 V pre menší hluk a efektívne chladenie. Pre rýchlejšie a spoľahlivejšie ukladanie dát sme použili NVMe base s NVMe SSD (obrázok 5 – 5).

Hlavný server beží v byte, kde je sieť prístupná cez verejnú IP. Hlavnou službou, ktorá toto využíva, je Wireguard (viď 4.4.5), na ktorý sa cez vytvorené profily a bezpečnostné kľúče vedia pripojiť iné zariadenia, v našom prípade ostatné prijímače, ale je možnosť sa aj pripojiť s iným mobilným zariadením na zvýšenie bezpečnosti a iné porty nepoužívať, ak by si to používateľ vyžadoval. Wireguard sa dá kombinovať s nástrojom `iptables`, cez ktorý sa dá nastaviť presmerovanie portov zo servera na zariadenie pripojené cez Wireguard. Keď dané porty otvoríme



Obrázok 5 – 5: Stavba hlavného servera založeného na RPi5, s ventilátorom Noctua napojeným cez GPIO a NVMe SSD base

cez router a presmerujeme ich na server, server ich zasa presmeruje na zariadenia pripojené na Wireguard, čo nám umožňuje pristupovať k službám bežiacich na zariadeniach, ktoré nemajú verejnú IP.

Hlavný server je okrem iného aj hlavným uzlom pre ukladanie, zálohovanie a spracovanie dát. Pred implementáciu PostgreSQL (kapitola 4.5.1) sa zálohovanie a prístup k súborom vykonával manuálne cez FTP (File Transfer Protocol) a automaticky cez nástroj `rsync`, ktorý dáta zálohuje bezpečne cez SSH a efektívne s využitím inkrementálnych zmien.

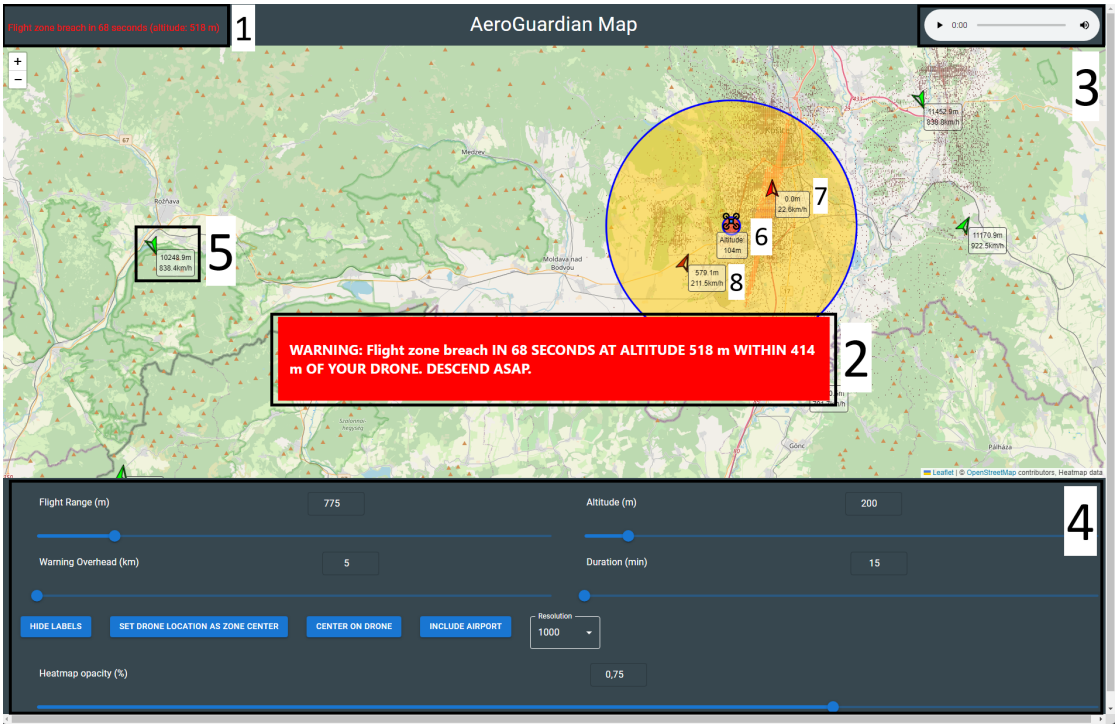
Server sa po implementácii týchto hlavných funkcionalít stal hlavným bodom pre hosťovanie a vývoj našej aplikácie podľa architektúry uvedenej v kapitole 4.5.

5.5 Vývoj aplikácie pre plánovanie a varovanie

Ako sme uviedli v kapitole 4.5, prototyp aplikácie vznikol v JS a vznikal už v dobe, keď jediné dostupné dáta boli z prototypu na okne (obrázok 5 – 1). Jeho funkcionalita bola okrem implementácie Leafletu a vizualizácie nazbieraných dát obmedzená.

Bola však vytvorená dôležitá časť aplikácie; jej názov, AeroGuardian.

Vývoj AeroGuardianu stagnoval popri vývoji získavania polohy dronu (viď 4.4.6). Keď sa nám podarilo vytvoriť pracovnú verziu zasielania dát na back-end vo Flasku (viď 4.5.2) pomocou DJI SDK a vytvorili sme hlavný server (viď 5.4), vývoj aplikácie pokračoval so snahou hosťovať aplikáciu na hlavnom serveri. Ako sme uviedli v kapitole 4.5, funkcionalita sa z JS preložila do Reactu pre zreteľnejšiu štruktúru aplikácie a jednoduchšiu implementáciu ďalšej funkcionality (viď 4.5.3). Výsledná aplikácia je znázornená na obrázku 5 – 6.



Obrázok 5 – 6: Finálna podoba aplikácie AeroGuardian

Na obrázku sú znázornené nasledovné časti front-endu:

1. Hlavný varovný box – momentálne ukazuje varovanie o narušení letovej zóny za 68 sekúnd vo výške 518 m,

2. špeciálny varovný box – rozdiel výšky dronu a narušenia letovej zóny je menej

ako 500 m (čo je v kóde nastavený bezpečný vertikálny odstup), tým pádom sa ukazuje špeciálne varovanie, ktoré varuje pilota, aby klesol (výška dronu je v tomto prípade simulovaná),

3. koncový bod Icecastu na odpočúvanie leteckého rádia,
4. ovládací panel (viď. 4.5.3),
5. príklad lietadla (v reálnom čase zachyteného) (viď 4.5.3),
6. ikonka dronu s jeho výškou a nastavená letová zóna, v okolí letiska je taktiež vykreslená mapa výskytu lietadiel pre aktuálnu výšku a určené nastavenia,
7. lietadlo, ktoré je na zemi vo varovnej zóne; varovanie o ňom sa nezobrazuje, pretože je aktuálna väčšia hrozba,
8. lietadlo smerujúce smerom k letovej zóne dronu letiace v malej výške.

Front-end aplikácie bol kvôli jeho vývojovému charakteru nahratý na hlavný server bez kontajnerizácie. Na jeho spustenie sa používa platforma `Node.js`. Pri vývoji beží aplikácia priamo na `Node.js`, pri jej nasadení sa používa webový server `Nginx`. Pre back-end bola vytvorená Linuxová služba, ktorá Python skript backendu spúšťa cez jeho virtuálne prostredie.

5.6 Vizualizácia dát

Dlaždice mapy výskytu letovej prevádzky vygenerované z nazbieraných dát boli vytvorené podľa postupu podrobne opísaného v kapitole 4.5.1. Vzhľadom na súradnice vzťažného bodu Košíc (48,7164°, 21,2611°) sme ako geografické hranice generovania vybrali 48,5° – 49° zemepisnej šírky a 21 – 21,5° zemepisnej dĺžky (oblasť približne 60 x 60 km). Vyberali sme dáta o lietadlách pod výškou 8 km, tesne pod letovou výškou dopravných lietadiel (viď 3.3). Z vybraných hraníc sme

pracovali s datasetom, kde bolo 1,8 milióna polôh lietadiel. Mapy sa generovali do výšky 5 km nad zemou s rozostupmi 50 m, pričom lietadlá nad touto výškou boli zahrnuté do hornej mapy. Použili sme horizontálne rozlíšenia 100 (≈ 1,1 km), 250 (≈ 440 m), 500 (≈ 220 m), 1 000 (≈ 110 m) a 2 000 (≈ 55 m) (rozlíšením sa rozumie, na koľko častí sa rozdeľuje jeden stupeň zemepisnej šírky alebo dĺžky, viď 4.5.1). Jedna mapa má rozlíšenie 11 569 x 11 570 pixelov (jeden pixel má na mape rozlíšenie približne 5 m). Mapy s výškou nad 1 500 m nemajú informačnú hodnotu pre pilotov dronov, preto boli z generácie dlaždíc vylúčené. Výsledný dataset dlaždíc obsahuje 5 336 960 dlaždíc rozdelených v 63 562 súboroch a na disku zaberá 22,9 GB.

Okrem opísanej 2D vizualizácie sme dáta vizualizovali v 3D editore Blender. Vytvorili sme Python skript, ktorý z dát PostgreSQL vytvára `.ply` súbor (Polygon File Format, typ súboru na ukladanie 3D údajov). Tento je spracovateľný v programe Blender a môžeme ním zachytené polohy lietadiel zobraziť napríklad ako gule, vďaka čomu vieme vizualizovať zachytené dáta v 3D.

6 Vyhodnotenie realizovaného riešenia

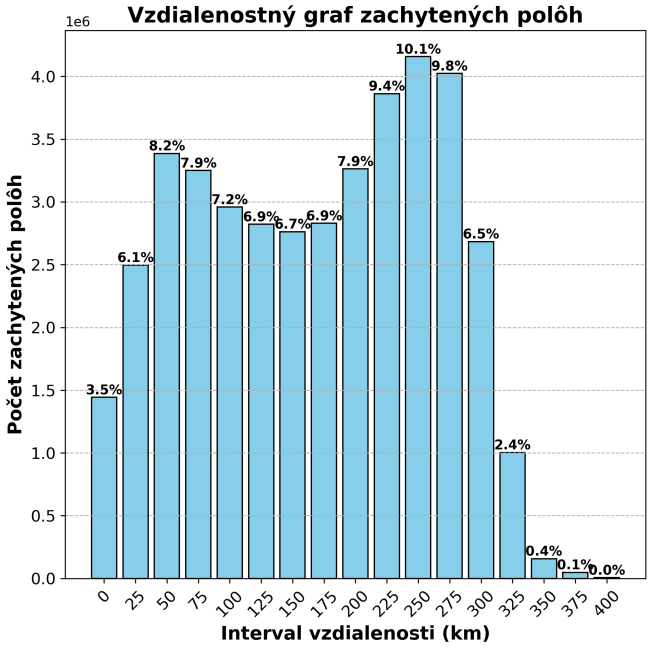
V tejto kapitole vyhodnotíme kvantifikovateľné výsledky získané z realizácie, ako aj využiteľnosť našej aplikácie v praxi.

6.1 Vyhodnotenie získaných dát

V týždni odovzdávania tejto bakalárskej práce sa nám cez logger (viď 4.5.1) v PostgreSQL nahromadilo viac ako 60 miliónov zaznamenaných polôh lietadiel. Z dát v databáze môžeme jednoduchými SQL dopytmi a spracovaním v Pythone, napríklad cez knižnicu `matplotlib` vyčítať niekoľko zaujímavých štatistík, predovšetkým z akých výškových hladín (obrázok 6 – 1) a vzdialeností zachytené lietadlá pochádzajú (obrázok 6 – 2).

Obrázok 6 – 1: Výškový graf všetkej zachytenej letovej prevádzky

Z charakteristiky ADS-B (viď 2.2.3) vyplýva, že keď si predstavíme 3D graf teoretického dosahu, bude to obrátený kužeľ. Kde nám v prijímaní nebráni reliéf,

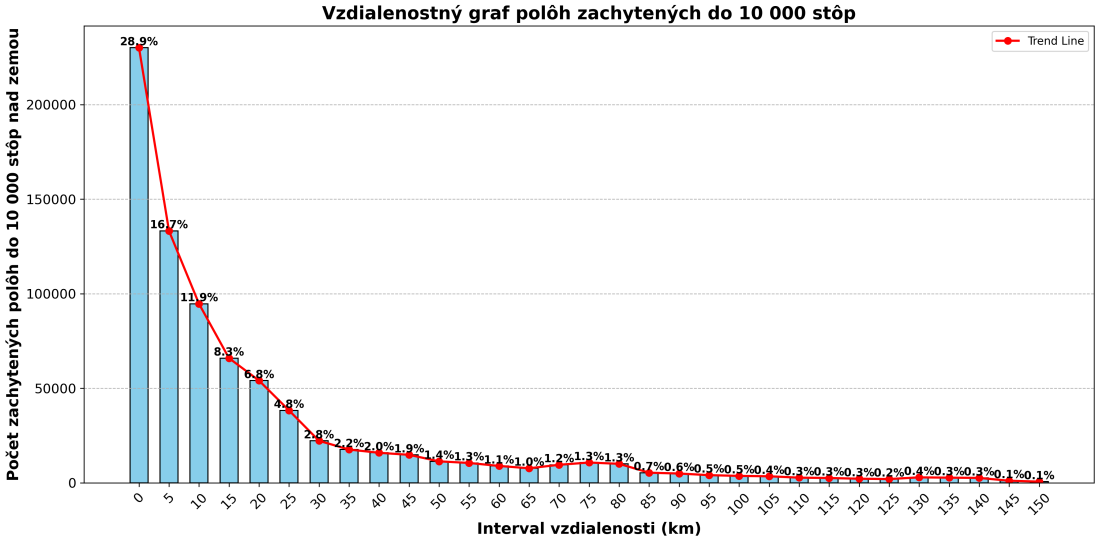


Obrázok 6 – 2: Vzdialenostný graf všetkej zachytenej letovej prevádzky

bude nám brániť zakrivenie Zeme. Preto aj vzhľadom na charakteristiku pohybu lietadiel uvedenú v kapitole 3.3 dáva zmysel, že drvivá väčšina prijatých dát je z letovej výšky dopravných lietadiel. Dáta relevantné pre pilotov dronov tvoria menej ako 3% všetkých zachytených dát. Vo vzdialenostnom grafe vidíme, že celkový maximálny dosah ADS-B je približne 350 až 400 km. Z grafu je možno vyčítať menší stúpajúci trend, ale toto je podmienené matematickým faktom, že pri väčšej vzdialenosti od stredu medzikružie dosahu pokrýva väčšie územie.

Čo sa týka vzdialenosti, oveľa podstatnejší pre našu aplikáciu je dosah pre lietadlá lietajúce vo výške relevantnej pre drony (do 10 000 ft, približne 3 km). Graf takého dosahu je znázornený na obrázku 6 – 3.

Z grafu je možné vyčítať hyperbolický úbytok zachytených polôh nízko lietajúcich lietadiel pri veľkej vzdialenosti. Je dôležité poznamenať, že statický prijímač sa nachádza 4 km od letiska, avšak aj bez ohľadu na to je úbytok pri vzdialenosti zjavný. Treba taktiež spomenúť, že pri typickej rýchlosti malých piestových lieta-

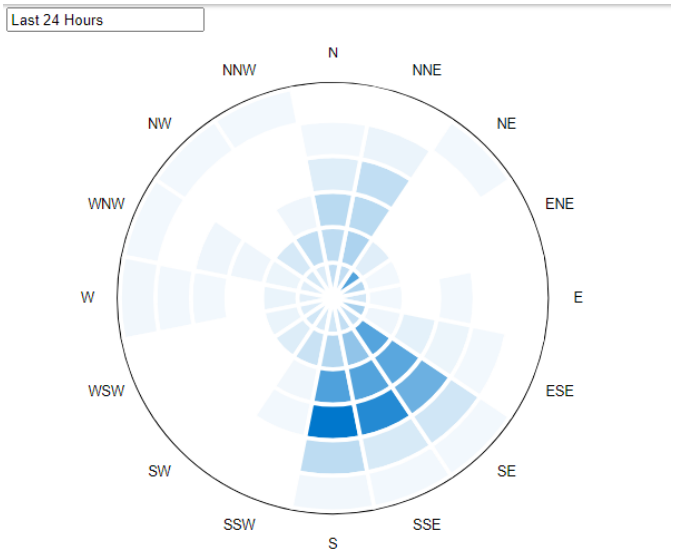


Obrázok 6 – 3: Graf dosahu prijímača pre nízko lietajúce lietadlá

diel (počítajme s rýchlosťou 80 kn, ≈ 150 km/h) sa vzdialenosť 5 km uletí za dve minúty. Dve minúty môžu v zmysle predstihu varovania znamenať veľa. Toto opodstatňuje naše snahy sprístupniť pilotom dronov prijímanie ADS-B v okolí, v ktorom lietajú.

Smerovosť prijímania sa dá vyčítať z grafu generovaného na FlightAware (viď 5.2). Pre náš statický prijímač (viď 5.3) je smerový graf zobrazený na obrázku 6 – 4. Z grafu je možné vyčítať tienenie na západ spôsobené kopcami. Graf bol vytvorený v čase konfliktu na Ukrajine, počas ktorého nad ním žiadne lietadlo ADS-B nevysielalo, čo vysvetľuje neprijímanie signálov z východu. Najlepšie prijímanie signálov je smerom priamo na letisko a smerom na Maďarsko, ktoré je svojím reliéfom rovné.

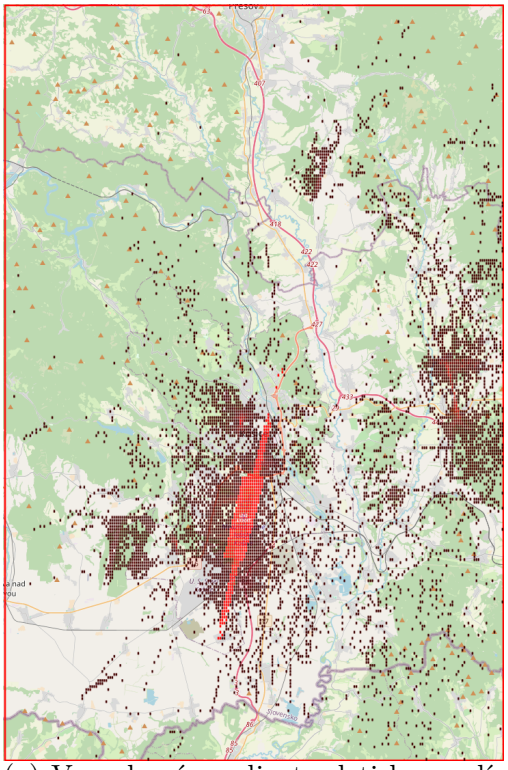
Konkrétne miesta najväčšieho výskytu nízko letiacich lietadiel nad Košicami sa dajú znázorniť na mapách výskytu, viď 4.5.1. Tieto mapy sú znázornené na obrázku 6 – 5. Mapa je podložená OSM. Pre ilustráciu bola vybratá mapa s rozlíšením 500 z výšky 150 m nad zemou a vynechaným gradientom z letiska, a mapa s rozlíšením 2 000 z výšky 5 000 m nad zemou so zahrnutým gradientom letiska. Na druhej



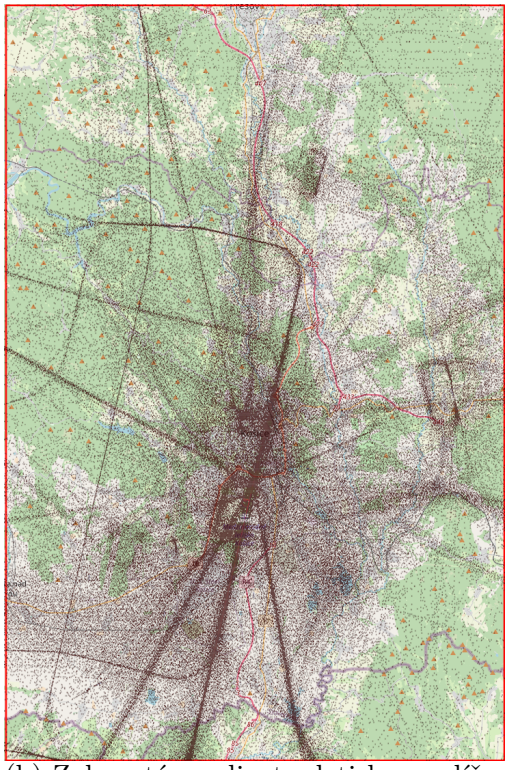
Obrázok 6 – 4: Smerový graf nášho statického prijímača

mape je dobre vidieť letové cesty, ktorými lietadlá do výšky 8 km nad zemou lietajú. Na prvej mape je vidno niekoľko bodov, kde je zvýšený výskyt lietadiel v malej výške a nemalo by sa v ich blízkosti lietať s dronom. Medzi najkritickejšie patrí niekoľko oblastí, medzi ktoré okrem iného patria práškovacie a športové letiská, a nemocnice s heliportom pre záchranárske vrtuľníky:

- bezprostredné okolie letiska Košice, predovšetkým oblasť východného a západného letiskového okruhu (referenčné body sú cesta 16 Červený rak – Šaca a cesta 17 úroveň Hanisky – Barca),
- okolie Univerzitnej nemocnice L. Pasteura v Košiciach a súkromnej nemocnice AGEL v mestskej časti Košice-Šaca,
- okolie športového letiska Bidovce a letísk Mirkovce, Čečejovce, Buzica, Veľká Ida,
- okolie Ruskova a Ďurkova, priestor vstupného bodu LZKZ:E do CTR Košice.



(a) Vynechaný gradient z letiska, rozlíšenie 500, 150 m nad zemou



(b) Zahrnutý gradient z letiska, rozlíšenie 2 000, 5 000 m nad zemou

Obrázok 6 – 5: Ukážka máp s výskytom letovej prevádzky

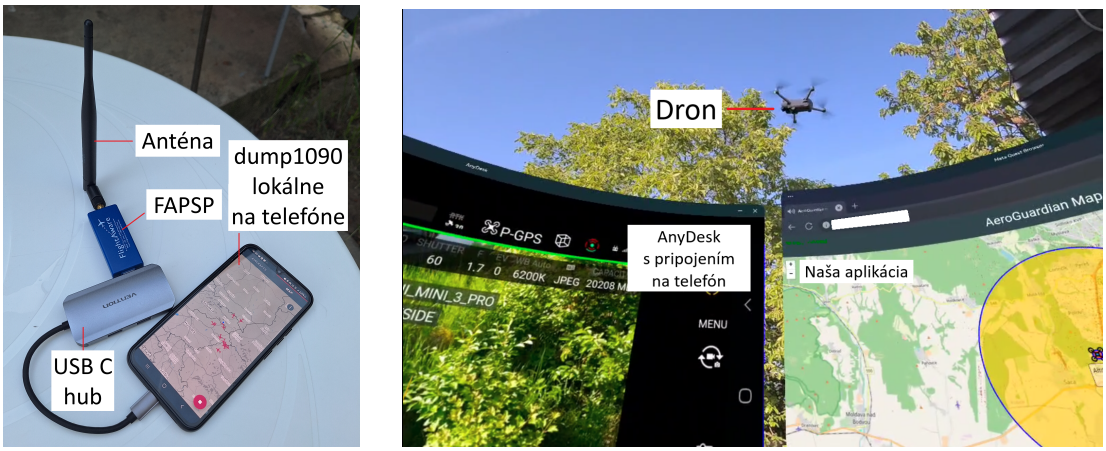
Je dôležité poznamenať, že uvedené miesta boli s prevádzkou zachytenou z nášho prijímača a manuálne hľadané na vygenerovaných mapách. V okolí Košíc sa môžu nachádzať aj iné nebezpečné miesta. Je dôležité vždy lietať s opatrnosťou, hlavne blízko letísk a CTR.

Z ostatných meraných metrík prijímača môžeme ešte spomenúť zisk prijímača. Náš statický prijímač používajúci FAPSP s vnútorným predzosilňovačom (viď 4.3.4), ešte skombinovaný s externým predzosilňovačom, používa zisk približne 16 až 20 dB, ale tento zisk schádza až na 0 dB pri veľkom počte blízkej prevádzky (viď 5.3). Lacné prijímače, ktoré používajú lacnú anténu a lacné nefiltrované SDR (viď 5.2) fungujú neustále na maximálnom zisku, 58,6 dB.

6.2 Využitie aplikácie v praxi

Vďaka klient-server architektúre je všestrannosť využitia našej aplikácie veľká. V kapitole 4.5 sme na obrázku 4 – 4 znázornili niekoľko koncových zariadení, ktoré môžu našu aplikáciu využívať; medzi najzaujímavejšie využitie pre nás patrí rozšírená realita (AR). Meta Quest 3 dokáže našu aplikáciu spustiť v AR prehliadači, a v ďalšom AR okne sa vie pripojiť cez AnyDesk na telefón, ktorý ovláda dron. Funkcionalita AR mu taktiež pomáha udržiavať vizuálny kontakt s dronom, pričom má zároveň pred očami to, čo vidí dron, na veľkej obrazovke, a vedľa toho môže mať otvorené okno s našou aplikáciou, ktorá ho informuje a varuje o prevádzke v okolí.

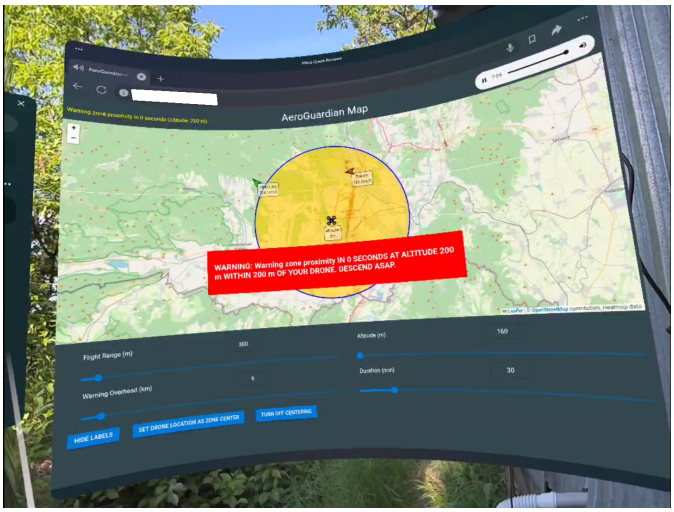
Čo sa týka prijímania ADS-B, v kapitole 4.4.1 sme spomenuli, že sa neobmedzuje len na RPi, a testovali sme prijímanie aj cez notebook s OS Windows a mobilný telefón s OS Android. Na obrázku 6 – 6 je znázornený príklad využitia našej aplikácie v praxi.



Obrázok 6 – 6: Príklad využitia našej aplikácie v praxi (Android a AR)

6.3 Vyhodnotenie varovného systému

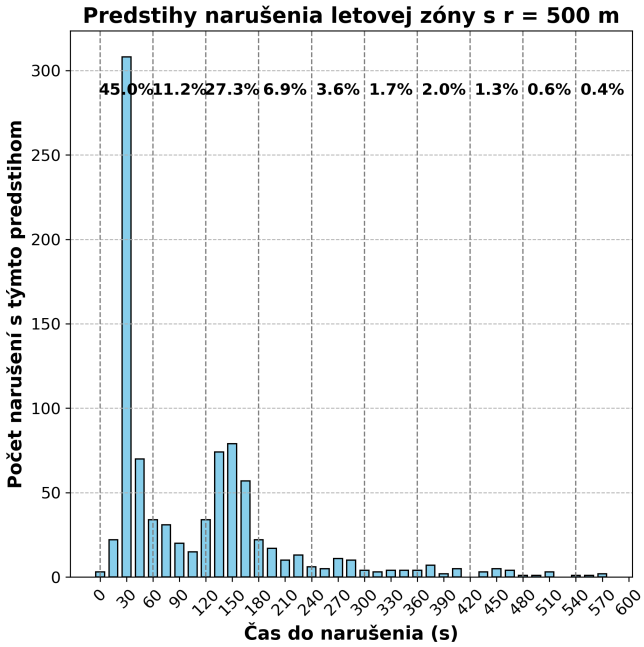
Náš varovný systém, predovšetkým špeciálne varovanie vyzývajúce pilota, aby klesol, by sme mohli prirovnať k airbagom v aute – tie bezpochyby prispievajú k bezpečnosti, ale pri šoférovaní robíme všetko preto, aby sme ich nemuseli použiť. Rovnako je to s našou aplikáciou – ak lietame zodpovedne, a lietajú zodpovedne aj všetci ostatní účastníci letovej prevádzky, nie je dôvod, aby nás naša aplikácia varovala. Počas lietania také špeciálne varovanie nedostali. Dostali sme ho však počas predletovej prípravy, a je zobrazené na obrázku 6 – 7. Zistili sme, že nad Košicami prebiehal vyhliadkový let, tak sme počkali, kým lietadlo odletelo preč.



Obrázok 6 – 7: Ukážka varovania v Quest 3 počas predletovej prípravy

Pokiaľ by sme však také varovanie dostali počas letu, je veľmi dôležitý čas predstihu, v ktorom ho dostaneme. V kapitole 6.1 sme si uviedli, že bežné malé piestové lietadlo preletí 5 km za dve minúty. Pre simuláciu, ako dlho pred narušením letovej zóny by sme dostali upozornenie, sme vytvorili jednoduchý Python skript s využitím databázy, ktorý pre každú polohu, smer a rýchlosť lietadla v malej výške z nazbieraných dát použil koncový bod `/check_breach` (viď 4.5.2) na zistenie, či by takéto lietadlo vletelo do našej simulovanej zóny, ktorá má stred v polohe

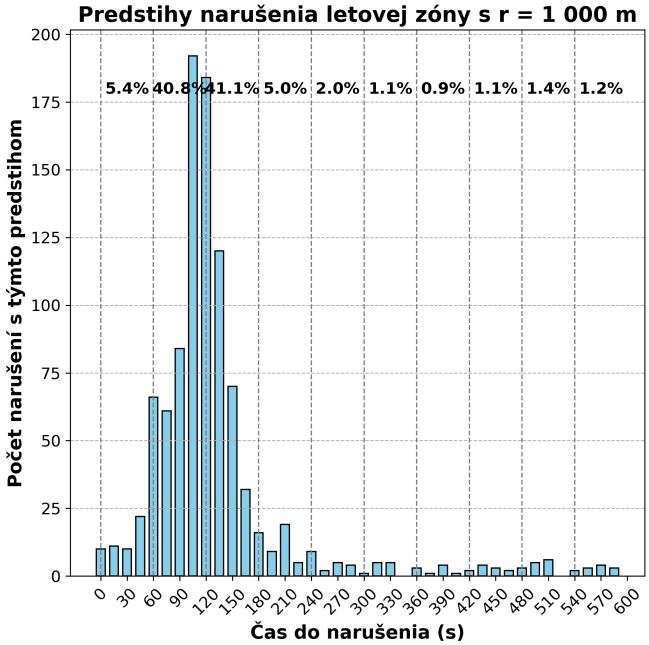
prijímača. Letovú zónu sme simulovali s výškou 500 m a polomerom 500 m a 1 000 m. Vypočítané časy do narušenia zóny sme ukladali pre analýzu. Výsledné grafy sú zobrazené na obrázkoch 6 – 8 a 6 – 9. Zobrazené narušenia sú jedinečné podľa jedinečného ADS-B identifikátora za deň.



Obrázok 6 – 8: Graf predstihu varovania systému pri letovej zóne 500 m

Zaujímavé zistenie je, že čím je zóna väčšia, tým väčší máme predstih. To je kvôli tomu, že aktuálny varovný systém pracuje len s dátami, ktoré má k dispozícii, a nevie predpokladať, kam sa bude ďalej lietadlo pohybovať. DJI Mini 3 Pro má klesanie 5 m/s [28], takže na pristátie z výšky 120 m potrebuje 24 sekúnd. Väčšina varovaní pri zóne s polomerom 500 m je s predstihom 30 až 45 sekúnd, čo je s reakčným časom tak akurát na prerušenie letu. Daná štatistika zvýrazňuje nebezpečenstvo s lietaním vysoko a bez VLOS. Piloti by vždy mali lietať zodpovedne a podľa pravidiel.

Treba však pripomenúť, že podľa pôvodných nastavení je za letovou zónou ešte 3 km varovnej zóny. Graf predstihu varovania narušenia varovnej zóny je podobný



Obrázok 6 − 9: Graf predstihu varovania systému pri letovej zóne 1 000 m

grafu predstihu letovej zóny s r = 1 000 m (najčastejší predstih je 1 až 3 minúty), a keď sa tieto predstihy spoja, pilot dronu by mal mať vždy dostatok času na prevenciu nebezpečenstva.

6.4 Zhodnotenie bakalárskej práce

Teoretické prínosy bakalárskej práce:

- bolo vymenovaných niekoľko rôznych historických aj aktuálnych spôsobov získavania dát z letovej prevádzky, pre každý spôsob bol stručne navrhnutý systém, ako by pilot dronu mohol pomocou tohoto spôsobu zbierať dáta o okolitej prevádzke, rôzne spôsoby boli navzájom porovnávané a ten najlepší a najrelevantnejší pre našu aplikáciu (rádiové vlny a ADS-B) bol rozobraný do hĺbky,
- boli zhrnuté základné pravidlá pre pilotov dronov, ako aj pravidlá pre os-

tatných účastníkov letovej prevádzky, bola analyzovaná aktuálna integrácia dronov do letového priestoru a boli vytýčené jej nedostatky.

Praktické prínosy bakalárskej práce:

- bol navrhnutý a v praxi realizovaný prijímač ADS-B v rôznych konfiguráciách, bolo otestované prijímanie ADS-B pomocou rôznych SDR a rôznych zariadení a operačných systémov, analýzou prijímania ADS-B boli potvrdené a kvantifikované jeho limitácie, ako aj bola opodstatnená snaha sprístupniť prijímanie ADS-B pilotom dronov v okolí, v ktorom lietajú,
- bol navrhnutý a realizovaný systém vzájomného prepojenia viacerých prijímačov pomocou hlavného servera a VPN, nadväzujúc na čo sa aplikácia vyvíjala v klient-server architektúre,
- bola vyvinutá a otestovaná plánovacia a varovná aplikácia pre pilotov dronov vzhľadom na okolitú letovú prevádzku, ktorá výrazne zvyšuje prehľad pilota dronu o okolitej prevádzke, dokáže určiť bezpečnosť plánovaného letu a zároveň pilota dronu včas varovať pred naskytnutými hrozbami.

7 Záver

Hlavnými cieľmi práce bolo analyzovať možnosti získavania dát z letovej prevádzky, analyzovať aktuálnu integráciu dronov v leteckom priestore, navrhnúť plánovací a varovný systém pre pilotom dronov vzhľadom na letovú prevádzku, daný systém realizovať a vyhodnotiť.

Pri analýze možností získavania dát v kapitole 2 sa použil prístup historickej analýzy, kde sa okrem možnosti získavania dát v súčasnosti vymenovali a analyzovali historické spôsoby získavania dát a bezpečnostné opatrenia v letovej prevádzke. Medzi iným bol vysvetlený význam systémov IFF, SSR a ADS-B pre letectvo a nadšencov letectva, čo podložilo základ aj pre našu aplikáciu.

V kapitole 3 venovanej analýze aktuálnej integrácie dronov sa vysvetlilo, ktoré organizácie určujú pravidlá pre účastníkov letovej prevádzky a aké sú základné pravidlá relevantné pilotov dronov. Bolo vysvetlené, kde na základe legislatívy môže pilot dronu očakávať účastníkov pilotovanej (leteckej) prevádzky, a uviedli sa niektoré nedostatky aktuálnej integrácie.

Pri návrhu plánovacieho a varovného systému v kapitole 4 boli na začiatku presnejšie definované požiadavky na vyvíjaný systém. Nadväzujúc na analýzu možností získavania dát bolo uvedené, ako relevantné sú tieto možnosti pre náš systém, pričom pri každej možnosti prijímania bol uvedený návrh, ako by systém založený na takejto možnosti prijímania mohol fungovať. S porovnaním s ostatnými možnosťami sa odôvodnilo, prečo je prijímanie signálu pomocou rádiových vĺn a hlavne ADS-B najrelevantnejšie pre potreby aplikácie. Podrobne sa vysvetlilo fungovanie prijímania rádiových signálov pomocou SDR, ako aj ostatných súčiastok prijímania. Nadväzujúc na to bol navrhnutý systém na spracovanie prijatých dát, v ktorom sa okrem iného vysvetlila klient-server architektúra aplikácie a spôsob získavania polohy dronu v reálnom čase. Na základe vonkajšej architektúry navrhnutého systému bola navrhnutá softvérová architektúra aplikácie.

Počas realizácie v kapitole 5 bol vybraný konkrétny hardvér pre vyvíjaný systém a bol popísaný postup vývoja prototypu, statického prijímača a hlavného servera. Bola ukázaná a vysvetlená finálna podoba fungujúcej aplikácie a použité metódy na vizualizáciu dát.

Vyhodnotenie v kapitole 6 sa zameralo na získané dáta a potvrdili sa niektoré nevýhody zbierania dát pomocou ADS-B, ktoré boli uvedené už v analýze. Potvrdilo sa opodstatnenie vytvorenia systému, ktorý pilotom dronov umožňuje ADS-B prijímať v okolí, v ktorom lietajú. Bola ukázaná vytvorená mapa výskytu letovej prevádzky na základe nameraných dát a bolo vymenovaných niekoľko oblastí, o ktorých sa dá na základe nameraných dát vyčítať, že sú nebezpečné pre pilotov dronov. Ukázali sa spôsoby využitia aplikácie v praxi a alternatívne spôsoby prijímania ADS-B bez využitia našej aplikácie. Varovný systém aplikácie sa kvantitatívne vyhodnotil.

Celkovo sa podarilo dosiahnuť stanovené ciele. Bola vytvorená rozšíriteľná sieť prijímačov dát o letovej prevádzke cez ADS-B, ktoré výrazne zlepšujú prehľad pilota dronu o okolitej prevádzke. Bol vytvorený aj funkčný plánovací a varovný systém, ktorý dokáže predpovedať budúci vývin situácie v letovej prevádzke a varovať pilota dronu včas pred budúcimi hrozbami. Ďalší vývoj by mohol smerovať na implementáciu iných spôsobov získavania dát o letovej prevádzke, predovšetkým leteckého rádia, ktoré by bolo možné spracovať algoritmami na potlačenie šumu a špeciálne trénovanými STT algoritmami. Mohol by sa aj vyvinúť univerzálny systém na prijímanie polohy dronu v reálnom čase. Okrem iného by ďalší vývoj mohol ešte viac prehĺbiť klient-server architektúru a umožniť prístup pilotom dronov bez toho, aby si museli inštalovať celý systém prijímania a hosťovania.

Literatúra

[1] Nolan, M.S., 2011. *Fundamentals of air traffic control - fifth edition.* Purdue University, ISBN-13: 978-1-4354-8272-2: kapitola 1 - história, kapitola 8 - radar.

[2] Federal Aviation Administration, 2021. *Air Traffic Control history.* Dostupné na internete: `https://www.faa.gov/about/history/photo_album/air_traffic_control` (citované 14.5.2024).

[3] Kožović, D.V., Đurđević, D.Ž., Dinulović, M.R., Milić, S. and Rašuo, B.P., 2023. *Air traffic modernization and control: ADS-B system implementation update 2022: A review.* FME Transactions, 51(1), pp. 117-130.

[4] Rare Historical Photos, 2022. *Aircraft detection before radar, 1917-1940.* Dostupné na internete: `https://rarehistoricalphotos.com/aircraft-detection-radar-1917-1940/` (citované 14.5.2024).

[5] Smith, H., 1962. *Jet Aircraft Of World War II.* The Air Power Historian, 9(3), pp. 166-172.

[6] Chernyak, V.S. and Immoreev, I.Y., 2009. *A brief history of radar.* IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 24(9), pp. B1-B32.

[7] Trim, R.M., 2003. *Air defence 1940–1970 military IFF and secondary radar - a historical review.* Measurement and Control, 36(8), pp. 246-251.

[8] Sun, J., 2021. *The 1090 megahertz riddle: a guide to decoding mode S and ADS-B signals.* TU Delft OPEN Publishing, 2.

[9] Moir, I., Seabridge, A. and Jukes, M., 2013. *Civil avionics systems.* John Wiley & Sons.

[10] International Civil Aviation Organization, Asia and Pacific Office, 2022. *ADS-B implementation and operations guidance document*. Edition 15.0 - September 2022.

[11] Dunstone, G., 2005. *ADS-B Introduction / Tutorial*. Airservices Australia.

[12] FlightAware.com, 2017. *Multilateration (MLAT) Overview*. Dostupné na internete: `https://www.flightaware.com/adsb/mlat/` (citované 15.5.2024).

[13] Flightradar24.com, 2024. *How flight tracking works*. Dostupné na internete: `https://www.flightradar24.com/how-it-works` (citované 15.5.2024).

[14] Jackson, K.S., 2023. *Aircraft tracking issues: Are you being watched?*. Dostupné na internete: `https://jetlaw.com/aircraft-tracking-issues-are-you-being-watched/` (citované 15.4.2024).

[15] FlightAware.com, 2024. *FlightAware ADS-B Coverage Map*. Dostupné na internete: `https://www.flightaware.com/adsb/coverage/` (citované 15.5.2024).

[16] European Union Aviation Safety Agency (EASA), 2021. *Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and (EU) 2019/945)*.

[17] International Civil Aviation Organization (ICAO), 2005. *Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation: Rules of the Air*. Tenth edition.

[18] Dopravný úrad Slovenskej republiky, 2024. *Aktuálne informácie pre bezpilotné letectvo*. Dostupné na internete: `http://letectvo.nsat.sk/bezpilotne-letectvo/aktualne-informacie/` (citované 15.5.2024).

[19] Občianske združenie Mám Dron, 2024. *Pravidlá používania dronov*. Dostupné na internete: `https://mamdron.sk/legislativa/` (citované 15.5.2024).

[20] Pudíková, A. and Novák Sedláčková, A., 2020. *Právna úprava medzinárodného civilného letectva*.

[21] International Civil Aviation Organization (ICAO), 2018. *Annex 11 to the Convention on International Civil Aviation: Air Traffic Services*. Fifteenth edition, July 2018.

[22] Stacey, D., 2008. *Aeronautical radio communication systems and networks*. John Wiley & Sons.

[23] Letecká fakulta, Technická Univerzita v Košiciach, 2021. *Vzdušný priestor*. Projekt KEGA č. 051TUKE-4/2021. Dostupné na internete: `https://eduaviation.lf.tuke.sk/wp-content/uploads/7_Vzdusny-priestor.pdf` (citované 16.5.2024).

[24] Letecká informačná služba Slovenskej republiky, 2024. *Letecká mapa - ICAO 1 : 500 000*. S dátumom účinnosti 18.4.2024.

[25] Dopravný úrad Slovenskej republiky, 2024. *Rozhodnutie č. 1/2024 zo dňa 24. apríla 2024, ktorým sa určujú podmienky vykonania letu bezpilotného lietadla alebo bezpilotného leteckého systému v riadených okrskoch (CTR) a okrskoch letísk (ATZ)*.

[26] Letové prevádzkové služby Slovenskej Republiky, 2024. *AIP - Aeronautical Information Publication of the Slovak Republic*. Dostupné na internete: `https://aim.lps.sk/eAIP/eAIP_SR/AIP_SR_EFF_16MAY2024/html/LZ-frameset-en-SK.html` (citované 16.5.2024).

[27] Ekici, S., Murat, A., Ilkay, O. and Tahir, H.K., 2024. *Cruise altitude patterns for minimizing fuel consumption and emission: A detailed analysis of five prominent aircraft*. Energy, 295, 130989.

[28] Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd., 2023. *DJI Mini 3 Pro User Manual*. v1.6, April 2023.

[29] Salaj, J., 2018. *Nepovolený vstup do vzdušného priestoru*. Odbor štátnej správy vo vojenskom letectve Ministerstva Obrany Slovenskej Republiky - verejné. 20.9.2018.

[30] Shenzhen DJI Sciences and Technologies Ltd., 2020. *DJI Mobile SDK Documentation*. Dostupné na internete: `https://developer.dji.com/mobile-sdk/documentation/introduction/index.html` (citované 16.5.2024).

[31] Tomori, Z., 2014. *Počítačové videnie*. V Košiciach, 9.1.2014.

[32] Lam, A., 2017. *3D Sound-Source Localization using triangulation-based methods*. Doctoral dissertation, University of British Columbia.

[33] Balanis, C.A., 1992. *Antenna theory: A review*. Proceedings of the IEEE, 80(1), pp. 7-23.

[34] Laakso, M., 2019. *Multichannel coherent receiver on the RTL-SDR*. Aalto University, School of Electrical Engineering, Espoo.

[35] FlightAware.com, 2024. *Dokumentácia k softvéru PiAware*. Dostupné na internete: `https://www.flightaware.com/adsb/piaware/` (citované 18.5.2024).

[36] Richardson, M. and Wallace, S., 2012. *Getting started with raspberry PI*. O'Reilly Media, Inc.

[37] Lemiech, T. and charlie-foxtrot, 2024. *RTLSDR-Airband*. Dostupné na internete: `https://github.com/charlie-foxtrot/RTLSDR-Airband` (citované 18.5.2024).

[38] Cosmostreamer, 2024. *Cosmostreamer for DJI Fly drones*. Dostupné na internete: `https://cosmostreamer.com/wiki/index.php?title=Cosmostreamer_for_DJI_Fly_drones` (citované 19.5.2024).

[39] OpenStreetMap contributors, 2023. *OpenStreetMap*. Dostupné na internete: `https://www.openstreetmap.org` (citované 19.5.2024).

[40] Nisbet, A., 2020. *OpenTopoData dokumentácia, použitý dataset EU-DEM*. Dostupné na internete: `https://www.opentopodata.org/datasets/eudem/` (citované 19.5.2024).

Zoznam príloh

Príloha A Užívateľská príručka (dostupné na SharePointe: `Archiv_ZP_IKS_KKUI/Dokumenty/2023_2024/BP/Kando Štefan/dokumenty`)

Príloha B Systémová príručka (dostupné na SharePointe: `Archiv_ZP_IKS_KKUI/Dokumenty/2023_2024/BP/Kando Štefan/dokumenty`)

Príloha C CD médium – záverečná práca v elektronickej podobe, prílohy v elektronickej podobe (dostupné na `https://github.com/IKS-TUKE-studenti-2023-2024/BP-Kando/tree/main/aeroguardian-BP-release`)