



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Vít Vojtěch

Monitorování vysílání palubních SSR odpovídačů
v reálném prostředí

Diplomová práce

2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Vít Vojtěch

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Monitorování vysílání palubních SSR odpovídačů v reálném prostředí**

Název tématu (anglicky): **Broadcasting Monitoring of SSR Transponders in Real Space**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Přehled a rozbor typů zpráv módu S vysílaných letadlem na 1090 MHz
- Návrh metody, která s využitím pozemních ADS-B přijímačů umožní co nejspolehlivější rekonstrukci vyslaných zpráv konkrétním letadlem v daném místě vzdušného prostoru
- Realizace metody s využitím ADS-B přijímačů vlastněných laboratoří ATM systémů na FD
- Hodnocení úspěšnosti metody, návrh korekčních algoritmů a koeficientů pro zpřesnění výstupů
- Prezentace výsledků pro konkrétní místo vzdušného prostoru, hodnocení výsledků v závislosti na hustotě provozu v daném prostoru a dalších parametrech



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO DOC 9684 AN/951: Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems
EUROCAE. ED-73E: Minimum Operational Performance Specification for Secondary Surveillance Radar Mode S Transponders
ICAO Annex 10

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2016**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2017**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy


.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Bc. Vít Vojtěch
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....30. června 2017

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Stanislavu Pleningerovi, PhD. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při tvorbě této práce. V neposlední řadě mé díky patří rodině a přátelům za to, že mi byli oporou po celou dobu studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30. listopadu 2017



.....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Monitorování vysílání palubních SSR odpovídačů v reálném prostředí

diplomová práce

listopad 2017

Bc. Vít Vojtěch

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce „Monitorování vysílání palubních SSR odpovídačů v reálném prostředí“ je návrh metody pro rekonstrukci zpráv vysílaných palubními odpovídači módu S. Princip rekonstrukce zpráv je založen na fúzi zpráv přijatých na low cost ADS-B přijímačích. Součástí práce je vyhodnocení úspěšnosti metody a prezentace výsledků rekonstruovaných zpráv v reálném prostředí.

ABSTRACT

The subject of the diploma thesis „Broadcasting Monitoring of SSR Transponders in Real Space“ is description of method created for reconstruction of Mode S transponders broadcasting. The method is based on fusion of messages received by low cost ADS-B receivers. Part of the thesis is an evaluation of the proposed method and the presentation of the results in a real space.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sekundární přehledový radar, SSR Mód S, SSR odpovídač, 1090ES, ADS-B, DF kód, Type kód, rekonstrukce zpráv

KEY WORDS

Secondary Surveillance Radar, SSR Mode S, SSR transponder, 1090ES, ADS-B, DF Code, Type Code, message reconstruction

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:

SSR – Secondary Surveillance Radar, Sekundární přehledový radar

TCAS - Traffic Collision Avoidance System, Palubní proti srážkový systém

GNSS – Global Navigation Satellite System, Globální družicové polohové systémy

DF- Downlink Format, DF kód (formát sestupného spoje)

ADS-B – Automatic Dependent Surveillance Broadcast, Automatické závislé sledování

ES – Extended Squitter, Rozšířené vysílání

ELS – Elementary Surveillance, Základní úroveň odpovídače módu S

EHS – Enhanced Surveillance, Rozšířená úroveň odpovídače módu S

NextGen – Next Generation Air Transportation System, Nová generace leteckého řídicího systému vyvíjená ve Spojených státech amerických

SESAR – Single European Sky ATM Research, Projekt za účelem vývoje nového systému řízení letecké dopravy v Evropě

ICAO – International Civil Aviation Organization, Mezinárodní organizace pro civilní letectví

IC – Interrogator Code, IC kód

EMZ – elektro magnetické záření

P1 – P3 – Pulz P1 – P3

Ft – Feet, Stopa (jednotka pro měření délky)

RA – Resolution Advisory, Stupeň výstrahy palubního proti srážkového systému

AIP– Aeronautical Information Publication, Letecká informační příručka

IFR – Instrument Flight Rules, Pravidla pro let podle přístrojů

VFR – Visual Flight Rules, Pravidla pro let za vidu

FIR – Flight Information Region, Letová informační oblast

FL – Flight Level, Letová hladina

MTOW – Maximum Take Off Weight, Maximální vzletová hmotnost

AMSL – Above Mean Seal Level, Výška nad střední hladinou moře

MSA – Mezinárodní standardní atmosféra

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod | 8 |
| 2. Přehled a rozbor typů zpráv módu S vysílaných letadlem na 1090 MHz | 10 |
| 2.1. Sekundární radiolokace | 10 |
| 2.1.1. Múd A/C | 10 |
| 2.1.2. Múd S | 11 |
| 2.1.3. Přehled a rozbor typů zpráv módu S vysílaných letadlem na 1090 MHz | 15 |
| 2.1.4. Legislativní požadavky na palubní SSR odpovídače | 18 |
| 2.2. ADS-B | 19 |
| 3. Návrh metody pro sledování zpráv vyslaných odpovídači letadel | 21 |
| 3.1. Popis metody pro rekonstrukci zpráv vyslaných SSR odpovídači | 21 |
| 3.1.1. Dekódování DF kódu a ICAO adresy odpovídače | 22 |
| 3.1.2. Výběr vhodného letadla pro sledování | 23 |
| 3.1.3. Dekódování času příjmu zprávy | 23 |
| 3.1.4. Dekódování polohy a výšky vybraného letadla | 24 |
| 3.1.5. Transformace souřadnic přijímačů a letadla | 26 |
| 3.1.6. Výpočet času vyslání zprávy odpovídačem | 27 |
| 3.1.7. Přiřazení času vyslání zprávy odpovídačem zprávám s absencí informace o poloze | 28 |
| 3.1.8. Identifikace odražených zpráv na přijímačích | 30 |
| 3.1.9. Identifikace duplicitních zpráv | 30 |
| 4. Realizace navržené metody s využitím ADS-B přijímačů Fakulty dopravní ČVUT | 32 |
| 4.1. Rozmístění ADS-B přijímačů | 32 |
| 4.1.1. Přijímač Strahov | 33 |
| 4.1.2. Přijímač Horská | 34 |
| 4.1.3. Přijímač Pankrác | 35 |
| 4.1.4. Přijímač Letňany | 36 |
| 4.2. Formát vstupních dat | 37 |
| 4.3. Výpočetní modul pro zpracování a analýzu dat | 38 |
| 4.3.1. Definice parametrů ve výpočetním modulu | 38 |
| 4.3.2. Popis pomocných funkcí ve výpočetním modulu | 39 |
| 4.3.3. Výstupní proměnné modulu | 40 |

| | | |
|------|--|----|
| 5. | Hodnocení úspěšnosti rekonstrukce zpráv vyslaných odpovídači | 42 |
| 5.1. | Úspěšnost rekonstrukce za nočního provozu..... | 43 |
| 5.2. | Úspěšnost rekonstrukce za denního provozu | 48 |
| 5.3. | Korekční algoritmy a koeficienty | 54 |
| 6. | Prezentace výsledků pro konkrétní místo vzdušného prostoru..... | 55 |
| 7. | Závěr | 60 |
| 8. | Použité zdroje | 64 |
| 9. | Seznam příloh | 66 |

1. Úvod

Téma diplomové práce Monitoring vysílání palubních SSR odpovídačů v reálném prostředí jsem si vybral z toho důvodu, že se již od útlého věku zajímám o letectví a leteckou zabezpečovací techniku. Možnost zabývat se návrhem a realizací vlastního nástroje pro rekonstrukci zpráv vysílaných odpovídači letadel, který jsem měl možnost testovat na datech z reálného provozu, pro mě bylo velkou motivací.

Hlavním cílem této práce je návrh metody pro rekonstrukci zpráv vysílaných palubními odpovídači letadel v reálném prostředí. Díky tomu, že data pro tuto práci jsou získávána ze systému fakultních ADS-B přijímačů, bude taktéž moci být vyhodnocena výkonost jednotlivých přijímačů v závislosti na hustotě provozu a dalších parametrech. Znalost schopnosti příjmu jednotlivých přijímačů může sloužit jako podklad pro další analýzy, které budou na tomto systému v budoucnu realizovány. Dále mohou být výstupy práce využity pro případnou optimalizaci přijímačové infrastruktury.

Úvodní kapitola je věnována vysvětlení základních principů funkce sekundárních přehledových radarů. Dále jsou popsány jednotlivé módy sekundárních radarů. Zvláštní pozornost je věnována struktuře dotazů a odpovědí módu S. Úvodní kapitola práce také obsahuje přehled a rozbor typů zpráv módu S vysílaných letadlem na kmitočtu 1090 MHz a souhrn legislativních požadavků na palubní odpovídače sekundárních radarů. V závěru kapitoly je vysvětlena souvislost mezi módem S sekundárních přehledových radarů a systémem ADS-B.

Třetí kapitola je věnována navržené metodě pro rekonstrukci zpráv vysílaných palubními odpovídači letadel. Postupně je na příkladu detailně popsán způsob dekódování zpráv. Dále je součástí kapitoly popis nezbytně nutných kroků pro co nejpřesnější výstupy, jakým je například transformace souřadnic a výběr vhodného letu pro rekonstrukci. Kapitola dále zahrnuje vysvětlení výpočtu času vyslání zpráv palubním odpovídačem letadla a vysvětlení zvoleného přístupu k identifikaci odražených a duplicitních zpráv.

Čtvrtá kapitola se zabývá realizací navržené metody s využitím ADS-B přijímačů Fakulty dopravní ČVUT a obsahuje popis pozemní infrastruktury pro příjem zpráv. Část kapitoly se věnuje formátu vstupních dat, se kterým pracuje výpočetní modul navržený v prostředí programu MATLAB.

Další částí kapitoly je popis navrženého modulu z uživatelského pohledu, jednotlivých parametrů a klíčových výstupních proměnných modulu, které jsou důležité pro tvorbu analýz. Součástí kapitoly je také seznam využitých pomocných funkcí a stručné vysvětlení jejich funkce.

Pátá kapitola obsahuje hodnocení úspěšnosti navržené metody pro rekonstrukci zpráv. V úvodu kapitoly je vysvětlen způsob, jakým je vyhodnocení realizováno. Úspěšnost rekonstrukce je vyhodnocována v závislosti na hustotě provozu a dalších parametrech, jakým je například vzdálenost letů od systému ADS-B přijímačů. Součástí kapitoly je také vyhodnocení úspěšnosti příjmu a umístění antén jednotlivých přijímačů. Obsahem kapitoly je popis a vysvětlení dopadů chybného nastavení korekčních koeficientů, které ovlivňují výstupy navrženého systému.

Závěrečnou kapitolou práce je prezentace výsledků pro konkrétní místo vzdušného prostoru. V kapitole je popsán postup při výběru sledovaných letů. Dále je odůvodněn výběr zvolené oblasti. Cílem kapitoly je analýza zatížení palubních odpovídačů dotazy sekundárních přehledových radarů ve zmíněné oblasti v závislosti na hustotě provozu.

2. Přehled a rozbor typů zpráv módu S vysílaných letadlem na 1090 MHz

Radary se dělí dle principu funkce do dvou základních skupin, a to na radary primární a radary sekundární. Popis funkce a využití primárních radarů není předmětem této práce. Práce se zabývá rekonstrukcí odpovědí na dotazy radarů sekundárních. Z tohoto důvodu, že se práce zabývá pouze zprávami Módu S je záměrně obecný úvod do radiolokace a popis principu funkce radarů primárních v práci vynechán.

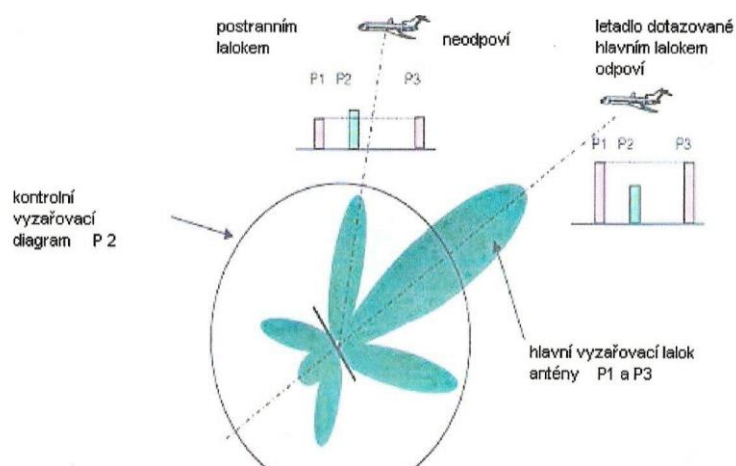
2.1. Sekundární radiolokace

Z důvodu zvyšujících se nároků na monitorování oblastí s vysokou hustotou provozu začaly primární radary nahrazovat sekundární přehledové radary (SSR – Secondary Surveillance Radar). Zavedením sekundárních radarů došlo k odstranění hlavních nedostatků radaru primárních, a to především možnost získání informace o výšce letadla. Hlavním rozdílem mezi primárním a sekundárním radarem je nutnost tzv. palubního odpovídače na letadle. Sekundární radar funguje na principu komunikace mezi tzv. dotazovačem (pozemním zařízením) a palubním odpovídačem letadla. Dotazovač SSR vysílá na kmitočtu 1030 MHz. Odpovídač SSR vysílá na kmitočtu 1090 MHz. [1]

2.1.1. Múd A/C

Dotazovač vysílá dotazy v podobě tří pulzů (P1, P2 a P3). Časová odlehlost směrových pulzů P1 a P3 je charakteristická pro podobu dotazu. V případě, že časová odlehlost mezi pulzy P1 a P3 je 8 μ s, jedná se o tzv. Múd A, což je dotaz na identitu letadla. Časovou odlehlostí 21 μ s mezi pulzy P1 a P3 se vyznačuje Múd C, což je dotaz na standardní tlakovou výšku letadla. [1]

Pulz P2 je tzv. kontrolní pulz a je vždy opožděn o 2 μ s za pulzem P1. Pulz P2 slouží k potlačení odpovědí na dotazy postranních laloků vysílací antény pozemního dotazovače. Pulz P2 je na rozdíl od pulzů P1 a P3 vysílán všesměrově tak, aby intenzita vysílání byla stejná nebo mírně větší než úroveň postranních laloků antény. Palubní odpovídač porovnává intenzitu pulzů P1 a P3 s intenzitou pulzu P2. Pokud je úroveň P2 stejná nebo větší než u obou ostatních pulzů, odpovídač nevyšle odpověď. Princip funkce kontrolního pulzu P2 je znázorněn na obrázku 1. [1]



Obrázek 1: Principiální schéma kontrolního pulzu P2 [1]

Hlavními výhodami sekundárního přehledového radaru jsou poskytované údaje o výšce a identifikaci letadla. Další výhodou může být potřeba nižšího vysílacího výkonu dotazovacího zařízení. Hlavní nevýhodou je potřeba palubního vybavení (odpovídačů) pro detekci cílů. [1]

2.1.2. Mód S

Dalším módem sekundárních radarů je mód S. Jedná se o tzv. selektivní mód s adresným dotazováním. Účelem zavedení tohoto módu bylo řešení problému, se kterým se setkávají módy A a C. Při rostoucí hustotě provozu jsou dotazovače zatěžovány z důvodu neadresnosti odpovědi vysokým počtem nežádoucích odpovědí. Stejně tak je tomu naopak, kdy odpovídače jsou přetíženy zbytečně vysokým počtem nežádoucích dotazů. [2]

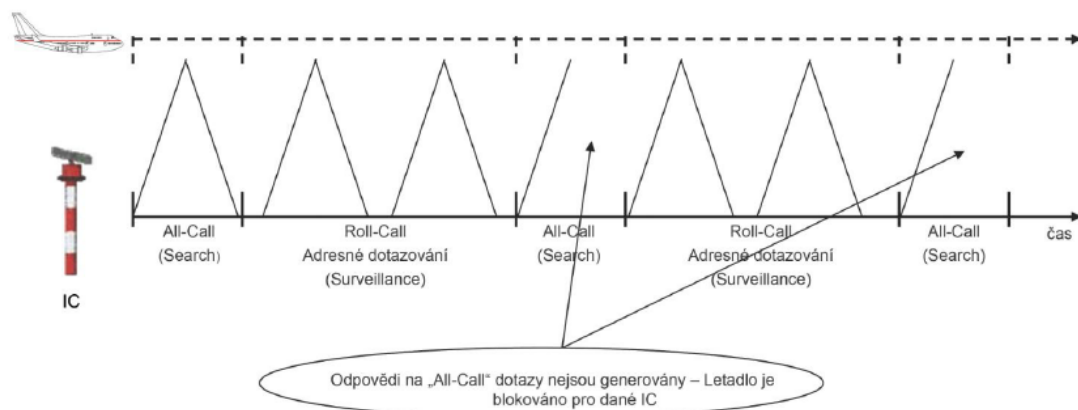
Z výše popsaného důvodu používá mód S dva druhy dotazů. Dotazy všeobecné vysílané v tzv. All Call periodě a dotazy selektivní vysílané v tzv. Roll Call periodě. Při vysílání All Call dotazu detekuje dotazovač odpovědi od všech odpovídačů bez rozdílu, zda se jedná o odpovídač vybavený módem A/C nebo módem S. Nežádoucí odpovědi odpovídače módu S však mohou být za určitých podmínek dotazovači ignorovány. [2]

Každý odpovídač (letadlo) a dotazovač má unikátní identifikaci. V případě odpovídače se jedná o ICAO adresu letadla o délce 24 bitů. Dotazovač identifikuje tzv. Interrogator Code (IC). IC je obsažen v každém dotazu. [2]

Dotazovač módu S s unikátním IC vysílá v All Call periodě všeobecné dotazy, které zachytí všechna letadla bez ohledu na to, jakým odpovídačem je dané letadlo vybaveno. Po přijetí všeobecného dotazu palubní odpovídač vyšle All Call odpověď, která je identifikována 24 bitovou adresou letadla. Pozemní dotazovač odpověď přijme, dekóduje ji a určí adresu cíle. Letadla vybavena odpovídačem módu S, které byly zachyceny v All Call periodě, nejsou již následně znovu dotazovány všeobecnými dotazy, ale selektivními dotazy v Roll Call periodě.

V selektivních dotazech je zakódována informace, díky které odpovídač dokáže vyhodnotit, zda odpovídat či neodpovídat na všeobecné dotazy od daného IC. Příkaz blokování se následně opakuje v každém adresném dotazu a tím dochází k potlačení odpovědí na všeobecné dotazy po celou dobu letu v oblasti pokrytí daného dotazovače. [2]

Průběh a posloupnost All Call a Roll Call period popisuje obrázek 2.

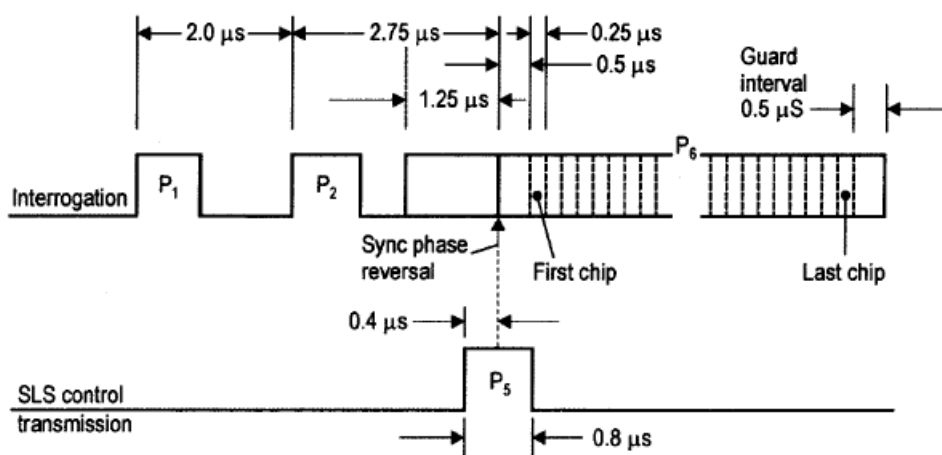


Obrázek 2: All Call a Roll Call Perioda [3]

2.1.2.1. Struktura dotazů a odpovědi módu S

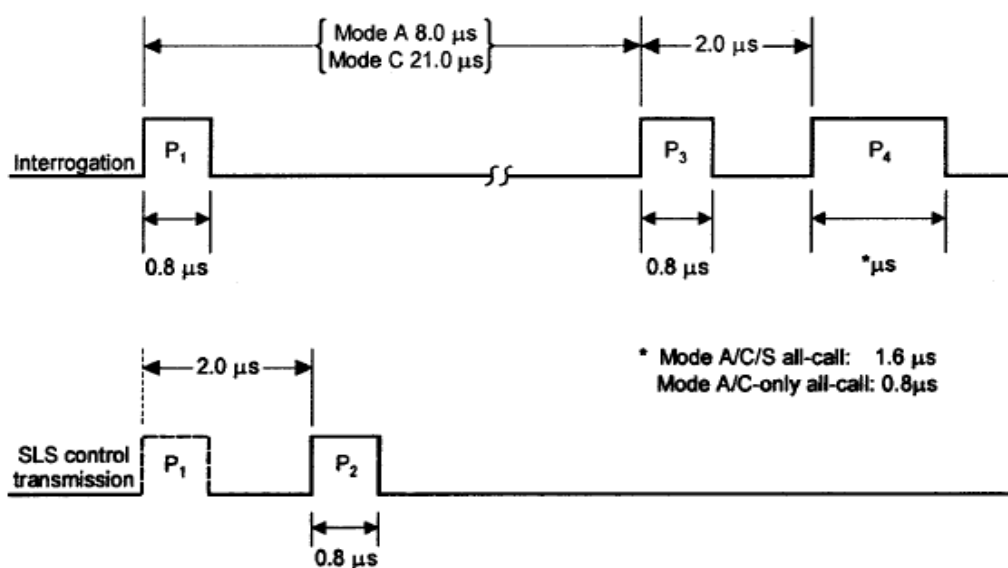
Selektivní dotaz módu S má charakter datové zprávy. Je vysílán na stejné frekvenci jako módy A a C. Struktura dotazu je navržena tak, aby jej odpovídače nepodporující mód S vyhodnotily jako neplatný dotaz a ignorovaly jej. [4]

Průběh dotazu módu S je znázorněn na obrázku 3. Dotaz se skládá z preamble a dlouhého impulsu, který obsahuje samotnou datovou zprávu. Preamble se skládá z dvojice impulsů o délce $0,8 \mu\text{s}$ a vzájemné odlehlosti $2 \mu\text{s}$. Oba tyto impulsy jsou přijaty odpovídačem se stejnou amplitudou. Časová odlehlost impulsů odpovídá odlehlosti prvního impulsu a kontrolního impulsu módu A a C (vysvětleno na obrázku 1), z čehož plyne, že odpovídače módů A a C vyhodnotí selektivní dotaz jako dotaz emitovaný postranními laloky a na dotaz neodpoví. Samotná data jsou umístěna v části impulsu o délce buď $16,25 \mu\text{s}$ nebo $30,25 \mu\text{s}$. Po synchronizaci odpovídače je ve vzdálenosti $1,25 \mu\text{s}$ od hrany impulsu P_6 referenční fázová změna. Po $0,5 \mu\text{s}$ následují jednotlivé datové bity. Odpovídač odpovídá pouze na dotazy, které jsou určeny jeho identifikaci. Potlačení odpovědí na dotazy emitované postranními laloky antény dotazovače je v selektivních dotazech módu S zajištěno impulsem P_5 , který je vyslán v době synchronizační reverzace fáze. Pokud je amplituda impulsu přijímaného odpovídačem z hlavního laloku větší než u impulsu kontrolního, odpovídač přijme dotaz a vyšle odpověď. Pokud je dotaz přijat postranním lalokem hlavní antény, je amplituda kontrolního impulsu větší a znemožní tak vyhodnocení synchronizační změny fáze. V tomto případě odpovídač na dotaz neodpoví. [3] [4]



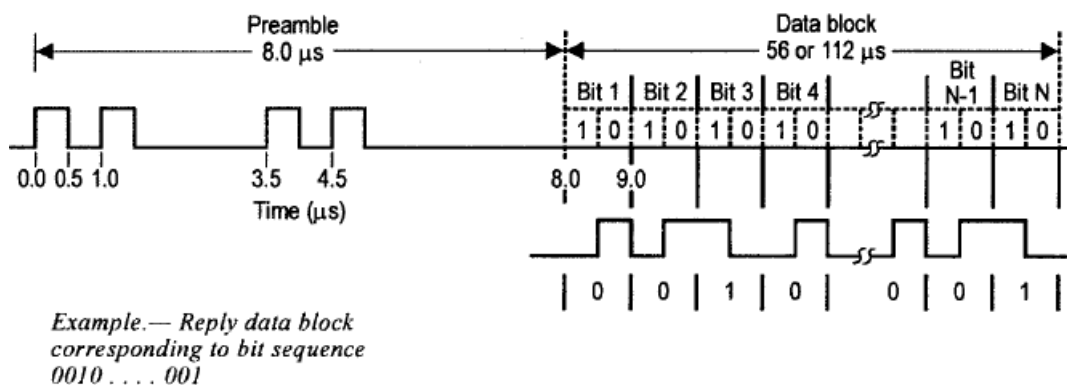
Obrázek 3: Struktura dotazu módu S [4]

Struktura všeobecného dotazu, který jak již bylo zmíněno, přijímají odpovídače všech módů, je následující. Pulz P1 a P3 o délce 0,8 μs s roztečí dle toho, zda se jedná o mód A (8 μs) nebo C (21 μs). Dále je součástí kontrolní pulz P2, jež je opožděn o 2 μs za pulzem P1. Všeobecný dotaz navíc obsahuje pulz P4, který má délku 0,8 nebo 1,6 μs v závislosti na tom, zda se jedná o tzv. All Call short nebo All Call long dotaz. Odpovídače módu S odpovídají pouze na All Call long dotazy, zatímco ostatní odpovídače odpovídají jak na All Call short, tak na All Call long dotazy. Struktura všeobecného dotazu je znázorněna na obrázku 4. [4]



Obrázek 4: Struktura všeobecného All Call dotazu [4]

Struktura odpovědi na dotaz módu S se skládá z preamble o délce 8 μs a z datového pole o délce 56 μs nebo 112 μs . Preamble se skládá ze 4 pulsů o délce 0,5 μs , mezi kterými je od prvního pulsu mezera 1, 3,5, 4,5 μs viz obrázek 5.

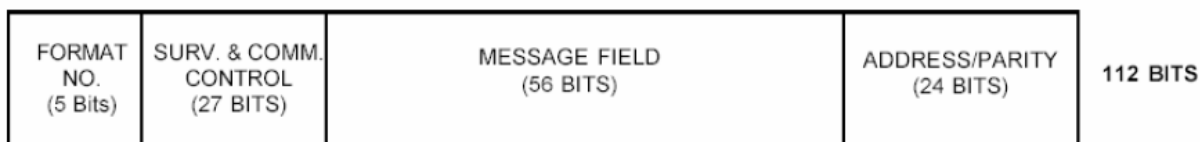


Example.— Reply data block corresponding to bit sequence 0010 . . . 001

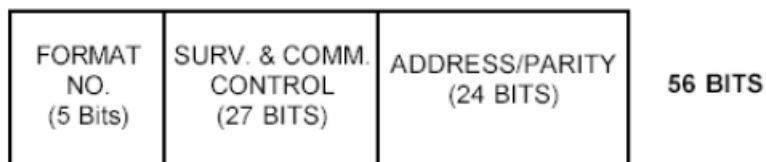
Obrázek 5: Struktura odpovědi odpovídače módu S [4]

2.1.3. Přehled a rozbor typů zpráv módu S vysílaných letadlem na 1090 MHz

Jak již bylo popsáno v předchozí části této kapitoly, délka samotné datové zprávy vyslané odpovídačem módu S může mít délku 56 μs (56 bitů), nebo délku 112 μs (112 bitů). Struktura datového pole odpovědi je znázorněna na obrázcích 6 a 7.



Obrázek 6: Struktura odpovědi odpovídače módu S o délce 112 bitů (112 μs)



Obrázek 7: Struktura odpovědi odpovídače módu S o délce 56 bitů (56 μs)

Prvních 5 bitů každé zprávy tvoří tzv. Downlink Format (dále DF kód nebo jen DF). Toto pole poskytuje informaci o typu zprávy a o kódování zprávy. DF kód může nabývat při převedení z binárního čísla do decimální soustavy celkem 25 hodnot (hodnoty 0-24) viz obrázek 8. Jak je vidět na obrázku 8, struktura a obsah dat v části zprávy následující po poli DF je závislá na tom, o jaký DF kód se jedná. Z tohoto důvodu není popsán každý DF kód zvlášť, ale v tabulce 1 jsou popsány zkratky segmentů, ze kterých se jednotlivé zprávy na obrázku 8 skládají.

Formáty odpovědí

| Format No. | DF | | | | | | | | |
|------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 00000 | VS:1 | 7 | Rt:4 | 2 | AC:13 | AP:24 | ... Short air-air surveillance (ACAS) | |
| 1 | 00001 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 2 | 00010 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 3 | 00011 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 4 | 00100 | FS:3 | DR:5 | UM:6 | AC:13 | AP:24 | ... Surveillance, altitude reply | | |
| 5 | 00101 | FS:3 | DR:5 | UM:6 | ID:13 | AP:24 | ... Surveillance, identify reply | | |
| 6 | 00110 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 7 | 00111 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 8 | 01000 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 9 | 01001 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 10 | 01010 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 11 | 01011 | CA:3 | AA:24 | | | PI:24 | ... All-call reply | | |
| 12 | 01100 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 13 | 01101 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 14 | 01110 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 15 | 01111 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 16 | 10000 | VS:1 | 7 | Rt:4 | 2 | AC:13 | MV:56 | AP:24 | ... Long air-air surveillance (ACAS) |
| 17 | 10001 | CA:3 | AA:24 | | | ME:56 | PI:24 | | |
| 18 | 10010 | CF:3 | AA:24 | ME:56 | | | PI:24 | ... Extended squitter/non transponder | |
| 19 | 10011 | AF:3 | 104 | | | | | ... Military extended squitter | |
| 20 | 10100 | FS:3 | DR:5 | UM:6 | AC:13 | MB:56 | AP:24 | ... Comm-B, altitude reply | |
| 21 | 10101 | FS:3 | DR:5 | UM:6 | ID:13 | MB:56 | AP:24 | ... Comm-B, identify reply | |
| 22 | 10110 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 23 | 10111 | 27 or 83 | | | | | P:24 | | |
| 24 | 11 | 1 | KE:1 | ND:4 | MD:80 | AP:24 | ... Comm-D (ELM) | | |

Obrázek 8: Formáty odpovědí odpovídáčů módu S dle DF kódu [3]

Tabulka 1: Seznam a popis jednotlivých segmentů zpráv odpovídače módu S [5]

| | |
|----|--|
| AA | Aircraft Address, ICAO adresa letounu, použití v DF11 a DF17. (24 bitů) |
| AC | Altitude code, výška (13 bitů) |
| AP | Adresně paritní pole (24 bitů) |
| CA | Capability – úroveň odpovídače (3 bity) |
| CC | Crosslink capability (1 bit) |
| DF | Downlink formát - první pole 5-ti bitů u všech zpráv (5 bitů) |
| DR | Downlink requests (5 bitů) |
| FS | Flight status A/C (3 bity) |
| ID | Identifikace nastavována pilotem – 4096 možností (13 bitů) |
| KE | Definuje obsah polí ND a MD Comm-D odpovědi (1 bit) |
| MB | Zpráva odeslána dotazovači, část Comm-B odpovědi (56 bitů) |
| MD | Comm-D pole (80 bitů) |
| ME | Extended squitter message – vlastní ADS-B zpráva DF 17 (56 bitů) |
| MV | Část dlouhé odpovědi při sledování „vzduch-vzduch“ (56 bitů) |
| ND | Informace pro číslo segmentu pro Comm-D (4 bity) |
| PI | Paritní pole (24 bitů) |
| RI | Informace pro TCAS – obsahuje informace o úrovni TCAS a o přibližné hodnotě rychlosti (4 bity) |
| SL | Level citlivosti TCAS (3 bity) |
| UM | Status odpovídače (dotazovače) (6 bitů) |
| VS | Indikace stavu letounu na zemi (1), ve vzduchu (0) (1bit) |

V civilním letectví jsou v současné době využívány DF kódy uvedené v tabulce 2.

Tabulka 2: Seznam DF kódů využívaných v civilním letectví a účel vlastních zpráv. [5]

| DF | Obsah zprávy |
|----|--|
| 0 | Krátké sledování, vzduch-vzduch (ACAS) |
| 4 | Odpověď s údaji o výšce letounu |
| 5 | Odpověď s identifikací letounu |
| 11 | Acquisition squitter, odpověď na všeobecný dotaz |
| 16 | Dlouhé odpovědi, vzduch–vzduch (ACAS) |
| 17 | Extended squitter, navrženo pro využívání systémem ADS-B |
| 20 | Comm-B, odpověď na dotaz o výšce |
| 21 | Comm-B, odpověď na dotaz na identifikaci |

DF 19 a 22 jsou využívány k vojenským účelům. DF 18 je formát sloužící k podpoře TIS-B zpráv, které jsou využívány například dopravními prostředky na letištní ploše.

2.1.4. Legislativní požadavky na palubní SSR odpovídače

V Evropě je mód S implementován ve dvou úrovních požadavků na palubní odpovídače. Prvním z nich je mód S „Elementary Surveillance” (ELS). Druhým je mód S „Enhanced Surveillance” (EHS).

2.1.4.1. Mód S Elementary Surveillance (ELS) a Enhanced Surveillance (EHS)

Požadavky ELS na funkčnost palubního odpovídače jsou stanoveny předpisem ICAO Annex 10 a jsou následující [7]:

- Schopnost vysílat 24 bitovou ICAO adresu odpovídače
- Schopnost odpovědi na dotazy od SSR
- Schopnost vysílat informaci o výšce v intervalech 25 ft
- Schopnost vysílat informaci o statusu letu (na zemi, ve vzduchu)
- Podpora přenosu identifikace letadla (BDS 20hex)
- Schopnost vysílat (Ground Initiated Comm B Protocol) (BDS 17hex)
- Vysílání informace o schopnosti vysílání Data Link (BDS 10hex)
- ACAS aktivní RA (Resolution Advisory)

Požadavky EHS jsou rozšířením požadavků ELS. Odpovídač s funkcí musí rovněž splňovat požadavky na funkčnost ELS. Odpovídač EHS musí být schopen vysílat následující data:

- Nastavenou výšku
- Úhel příčného sklonu
- Rychlost změny traťového úhlu
- Zeměpisný traťový úhel
- Traťovou rychlost
- Magnetický kurz
- Indikovanou vzdušnou rychlost a Machovo číslo
- Vertikální rychlost

2.1.4.2. Legislativní požadavky v České republice

Požadavky na odpovídače módu S jsou stanoveny v AIP GEN 1.5. a jsou definovány následovně [8]:

Vybavení a provozování odpovídačů v módu S s funkcí ELS je povinné pro:

- Lety IFR ve FIR Praha
- Vrtulníky bez ohledu na MTOW (Maximum Take Off Weight)
- Letouny s MTOW 5 700 kg a méně nebo s maximální cestovní pravou vzdušnou rychlostí 250 kt a méně
- Lety VFR ve FIR Praha nad FL 95
- Lety VFR v TMA Praha a CTR Ruzyně

Vybavení a provozování odpovídačů v módu S s funkcí EHS je povinné pro:

- Všechny lety IFR ve FIR Praha pro letadla s pevnými křídly s MTOW větší než 5 700 kg nebo s maximální pravou vzdušnou rychlostí větší než 250 kt

Vybavení odpovídačem SSR v módu A a C je povinné pro VFR lety letící mimo vzdušný prostor určený pro mód S pro:

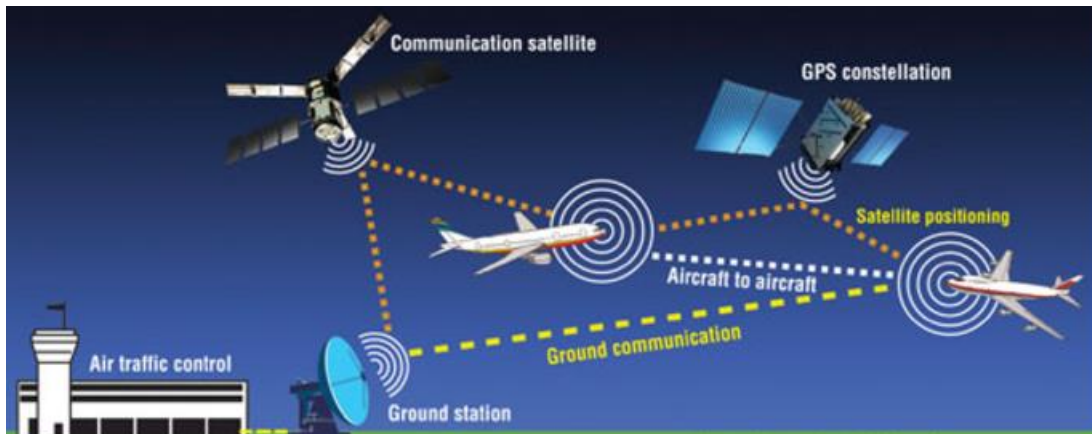
- Všechna motorová letadla a balóny provádějící lety VFR v /nad FL 60 nebo v / nad nadmořskou výškou 5 000 ft AMSL
- Všechna letadla provádějící traťový let VFR v noci

2.2. ADS-B

Automatic Dependent Surveillance Broadcast je systém automatického závislého sledování, který je považován za nástupce sekundární radiolokace. Zavádění tohoto systému je součástí programů NextGen (Next Generation Air Transport System) a SESAR (Single European Sky ATM Research). Oba tyto programy NextGen (USA) a SESAR (EU) mají za cíl zvýšit v první řadě bezpečnost letecké dopravy při rostoucím trendu rozvoje civilního letectví.

Princip funkce ADS-B spočívá v určování polohy letadla pomocí satelitní navigace (GNSS). Získanou polohu odpovídač letadla vysílá periodicky a všesměrově nezávisle na tom, zda je některý z přijímačů v dosahu systému přijímá. Zprávy tak mohou přijímat všechna zařízení vybavena ADS-B přijímačem (ostatní letadla, pozemní stanice).

ADS-B systémy jsou rozdělovány na systémy ADS-B OUT (schopnost vysílat naměřená data a data z palubních systémů) a ADS-B IN (schopnost pouze přijímat a zpracovávat data zachycená od ADS-B OUT systémů). Letadla mohou být vybavena pouze funkcí ADS-B OUT, aniž by podporovalo funkci ADS-B IN. Princip výměny informací mezi jednotlivými subjekty je znázorněn na obrázku 9. [9]



Obrázek 9: Výměna informací v rámci systému ADS-B. [10]

Jednou z technologií přenosu ADS-B zpráv je technologie 1090 ES (Extended Squitter), která vysílá odpovědi na stejné frekvenci (1090 MHz) jako palubní odpovídače sekundárních radarů. Z tohoto důvodu jsme schopni ADS-B přijímači přijímat odpovědi na dotazy sekundárních dotazovačů.

3. Návrh metody pro sledování zpráv vyslaných odpovídači letadel

Ve třetí kapitole této práce je popsána metoda, která byla navržena pro rekonstrukci zpráv vysílaných odpovídači letadel pomocí technologie 1090ES.

3.1. Popis metody pro rekonstrukci zpráv vyslaných SSR odpovídači

Cílem navržené metody je co nejpřesnější rekonstrukce vyslaných zpráv SSR odpovídači na základě dat přijatých pozemními low cost ADS-B přijímači. S využitím jednoho přijímače však není možné zachytit všechny zprávy, které jsou palubním odpovídačem letadla vysílány.

Za účelem co nejpřesnější rekonstrukce tak metoda využívá sjednocení (fúze) dat z více přijímačů.

Navržená metoda sestává z následujících kroků:

- Dekódování DF kódu a ICAO adresy odpovídače
- Výběr vhodného letadla pro sledování
- Dekódování času příjmu zprávy
- Dekódování polohy a výšky vybraného letadla
- Transformace souřadnic přijímačů a letadla
- Výpočet času vyslání zprávy odpovídačem u zpráv se známou polohou
- Přiřazení času vyslání zprávy odpovídačem zprávám s absencí informace o poloze
- Identifikace odražených zpráv v rámci přijímače
- Identifikace duplicitních zpráv

3.1.1. Dekódování DF kódu a ICAO adresy odpovídače

Prvním krokem navržené metody je dekodování DF kódu a ICAO adresy odpovídače letadla. Pro popis postupného dekodování zprávy byla vybrána zpráva na obrázku 10.

1480647600108;1;0A8C4436AB67;8D7806B458C3858151293D6CC0F4

Obrázek 10: Vzorová zpráva pro dekodování

Z důvodu, že ve výchozím datovém souboru, který je popsán ve čtvrté kapitole, se nachází zprávy přijaté od velkého počtu letadel, je vhodné snížit počet zpráv, se kterým bude metoda a následně vytvořený skript dále pracovat.

Za účelem filtrace zpráv přijatých od jednoho konkrétního letadla je nutné v první fázi získat informaci o DF kódu zprávy a ICAO adrese letadla.

Dekodování DF kódů zpráv je nutné realizovat v této fázi metody z toho důvodu, že adresa odpovídače letadla se pro všechny DF kódy nenachází ve zprávě na stejné pozici, ale její umístění je závislé právě na DF kódu. Je tedy potřebné v první řadě zjistit DF kód dané zprávy a až následně dekodovat ICAO adresu letadla.

Pro příklad způsobu dekodování jednotlivých částí zprávy byla vybrána zpráva z obrázku 10. Informace o DF kódu a ICAO adrese odpovídače jsou zakódovány v posledním 4. segmentu zprávy, který je označen červenou barvou. Nutností pro dekodování segmentu je převod znaků zprávy z hexadecimálního tvaru do tvaru binárního. Segment 4 vybrané zprávy obsahuje samotnou datovou zprávu o délce 112 bitů. Typy zpráv, které mohou být v datovém poli zakódovány, jsou popsány v kapitole 2.3.3.

1480647600108;1;0A8C4436AB67;8D7806B458C3858151293D6CC0F4

8D7806B458C3858151293D6CC0F4 (HEX)

10001 101 011110000000011010110100 01011 000 110000111000010110000001010100010010100100111101 011011001100000011110100

(BIN)

Na prvních pěti bitech označených zelenou barvou (bit 1-5) je umístěna informace o DF kódu zprávy. Při převedení bitů do decimální soustavy lze zjistit, že se jedná o zprávu typu DF 17. Zprávy tohoto datového formátu jsou rezervovány pro využití systémem ADS-B viz tabulka 2.

10001 (BIN)

17 (DEC)

Bits 9-32 označené fialovou barvou obsahují u zpráv DF 17 informaci o ICAO adrese odpovídače. V této práci je využíván zápis adresy v hexadecimální soustavě. Po převedení čísla z binární do hexadecimální soustavy lze zjistit ICAO adresu odpovídače letadla.

01111000000011010110100 (BIN)

ICAO adresa odpovídače letadla: 7806B4 (HEX)

Adresně paritní pole u zpráv typu DF 17 slouží ke kontrole správnosti přijaté zprávy. V případě, že je zpráva chybně přijatá je nutné zprávu do dalších analýz neuvažovat.

011011001100000011110100 (BIN)

3.1.2. Výběr vhodného letadla pro sledování

Po získání ICAO adresy odpovídače pro každou ze zpráv je vhodné pro efektivnější práci s daty vybrat jedno konkrétní letadlo (jednu ICAO adresu odpovídače) a se zprávami přijatých od vybrané adresy odpovídače provádět další operace.

Pro co nejuspěšnější rekonstrukci zpráv by výběr sledovaného letadla měl být učiněn tak, aby vybrané letadlo prolétalo oblastí pokrytí všech ADS-B přijímačů, které jsou využívány pro příjem zpráv. Po výběru vhodného letadla se již pracuje pouze se zprávami s ICAO adresou vybraného letadla.

3.1.3. Dekódování času příjmu zprávy

Čas příjmu zprávy přijímačem je zakódován ve třetím segmentu, který je označen ve vzorové zprávě červenou barvou. K dekodování a následnému zjištění času příjmu zprávy je zapotřebí převést znaky z hexadecimální soustavy do soustavy binární.

1480647600108;1;0A8C4436AB67;8D7806B458C3858151293D6CC0F4

Po převedení segmentu do binární soustavy získáme pole o délce 48 bitů. Na prvních 18 bitech (bit 1-18) je umístěna informace o sekundách. Bits 19–48 nesou informaci o nanosekundách. Po převedení čísla do desítkové soustavy lze zjistit UTC čas přijetí zprávy přijímačem s přesností na nanosekundy.

0A8C4436AB67 (HEX)

00001010100011000100000 001101101010101101100111 (BIN)

10801 sec a 706916870 nsec (DEC)

3.1.4. Dekódování polohy a výšky vybraného letadla

Pro kódování polohy v ADS-B zprávách je využívána metoda CPR (Compact Position Reporting), která se vyznačuje dvěma formáty kódování tzv. sudým a lichým. Způsoby určení polohy jsou dva. Prvním z nich je globální nezaměnitelné kódování. Pro určení polohy tímto způsobem je zapotřebí přijmout jak sudý, tak lichý formát Airborne position zprávy přibližně v intervalu deseti sekund. Druhým způsobem, který je využit pro dekodování polohy v této práci je lokální nezaměnitelné kódování. V případě lokálního dekodování polohy stačí pro určení polohy přijmout pouze jednu zprávu. [15]

Lokální dekodování je založeno na skutečnosti, že jednotlivé sektory, ve kterých se sledované letadlo může nacházet jsou od sebe odděleny minimální vzdálenosti 360 NM. Následně je pro dekodování nezaměnitelné polohy letadla zapotřebí definovat tzv. referenční polohu, okolo které se v okruhu 180 NM (v případě Airborne position zprávy) nachází sledované letadlo. [15]

Informace o poloze a výšce letadla je zakódována ve čtvrtém segmentu zprávy. K získání informace o poloze a výšce letadla je možné využít binární tvar zprávy, který je znám již z dekodování DF kódu a ICAO adresy letadla viz 3.1.1.

Při dekodování polohy je v první řadě nutné zjistit tzv. Type kód zprávy, který určuje obsah zpráv typu DF 17. Type kód je určen pěti bity (bity na pozici 33-37), které jsou níže označeny červenou barvou. Obsah zpráv dle jednotlivých Type kódů je popsán v tabulce 4 níže. Jak lze vyčíst z tabulky 4, zprávy obsahující informaci o poloze letadla jsou určeny Type kódy o hodnotách 9-18. Pole Sub Type kód (označeno fialovou barvou) může jednotlivé Type kódy dále členit a specifikovat. U některých Type kódů se Sub Type kódy neaplikují (jejich hodnota po dekodování je 0) jako je tomu například u zprávy, která byla vybrána jako vzorová.

Následně je možné dekodovat výšku letadla v době vyslání zprávy, která je zakódována v bitech 41-52 označených zelenou barvou. Stejně tak je možné dekodovat polohu, a to z bitů na pozicích 55-88 (níže označeny modrou barvou).

10001 101 01111000000011010110100 01011 000 11000011100010110000001010100010010100100111101 011011001100000011110100

(BIN)

Type kód: 01011 (BIN) => 11 (DEC)

Sub Type kód: 000 (BIN) => 0 (DEC)

Barometrická výška: 110000111000 (BIN) => 38 000 ft (DEC)

Poloha: 0110000001010100010010100100111101 (BIN)=>

51.1095156912076, 15.8054351806641 (DEC)

Barometrická výška neboli barometrická tlaková výška znamená výšku vztaženou k standardnímu tlaku dle MSA (mezinárodní standardní atmosféry), jehož hodnota je 1013,25 hPa.

Tabulka 4: Obsah zpráv DF17 dle Type kódů. [13]

| Type kód | Sub Type kód | Obsah ADS-B zprávy |
|----------|---------------|--|
| 0 | Neaplikuje se | „Airborne position“ nebo „Surface position“ zpráva bez údajů o poloze |
| 1-4 | Neaplikuje se | „Aircraft identification and category“ zpráva |
| 5-8 | Neaplikuje se | „Surface position“ zpráva |
| 9-18 | Neaplikuje se | „Airborne position“ zpráva |
| 19 | 0 | Rezervované |
| | 1-4 | „Airborne velocity“ zpráva |
| | 5-7 | Rezervované |
| 20-22 | Neaplikuje se | „Airborne position“ zpráva |
| 23 | 0 | Testovací zpráva |
| | 1-7 | Rezervované |
| 24 | 0 | Rezervované |
| | 1 | „Surface system status“ zpráva |
| | 2-7 | Rezervované |
| 25-26 | Neaplikuje se | Rezervované |
| 27 | Neaplikuje se | Rezervované pro zprávu „Trajectory change“ |
| 28 | 0 | Rezervované |
| | 1 | „Extended Squitter Aircraft Status“ zpráva |
| | 2 | „Extended Squitter Aircraft Status“ zpráva (1090ES TCAS Resolution Advisory Broadcast“ |
| | 3-7 | Rezervované |
| 29 | 0 | „Target State and Status“ zpráva verze 1 |
| | 1 | „Target State and Status“ zpráva verze 2 |
| | 2-3 | Rezervované |
| 30 | 0-7 | Rezervované |
| 31 | 0-1 | „Aircraft Operational Status“ zpráva |
| | 2-7 | Rezervované |

3.1.5. Transformace souřadnic přijímačů a letadla

Pro správnost výpočtu vzdálenosti dvou bodů v prostoru (letadla a přijímače) je nutné provést transformaci souřadnic z geodetického systému WGS84 do kartézského souřadného systému, kterým je například ECEF (Earth Centered, Earth Fixed). [14]

Pro převod z WGS84 do ECEF lze použít konstanty a vztahy 1-6 níže.

Délka hlavní poloosy Země

$$a = 6\,378\,137\text{ m}$$

Délka vedlejší poloosy Země

$$b = 6\,356\,752\text{ m}$$

Zploštění Země

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (1)$$

Excentricita

$$e = \sqrt{2f - f^2} \quad (2)$$

Poloměr zakřivení

$$N(\phi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (3)$$

kde ϕ je zeměpisná šířka. Následně je možné dopočítat souřadnice přijímačů X,Y,Z.

$$X = (N + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (4)$$

$$Y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (5)$$

$$Z = [N(1 - e^2) + h] \sin \phi \quad (6)$$

kde λ je zeměpisná délka a h je výška nad elipsoidem.

3.1.6. Výpočet času vyslání zprávy odpovídačem

Pro sjednocení (fúzi) zpráv přijatých více přijímači je nutné přepočítat čas příjmu zpráv na jednotlivých přijímačích k jednomu bodu. V navržené metodě jsou přepočítány časy příjmu k odpovídači letadla, od kterého jsou zprávy přijaty.

Předchozí kroky metody vedly k získání informace o poloze letadla. Poloha přijímačů je známá. Po transformaci souřadnic přijímačů a letadla lze vypočítat šikmou vzdálenost mezi dvěma body v prostoru ze vztahu 7:

$$D = \sqrt{(X_L - X_P)^2 + (Y_L - Y_P)^2 + (Z_L - Z_P)^2} \quad (7)$$

kde D značí šikmou vzdálenost dvou bodů v prostoru. X, Y, Z značí jednotlivé souřadnice bodů v tomto případě L (letadla) a P (přijímače).

Ze znalosti vzdálenosti letadlo-přijímač (D) a rychlosti šíření EMZ (C) je možné dopočítat pomocí vztahu 8 dobu šíření EMZ paprsku mezi dvěma řešenými body (letadlem a přijímačem):

$$T_{EMZ} = \frac{D}{C} \quad (8)$$

kde T_{EMZ} značí dobu šíření paprsku od letadla k přijímači. Písmenem C je označena konstanta pro rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu o hodnotě 299 792 458 m/s.

Po dopočítání proměnných D a T_{EMZ} je možné dopočítat čas vyslání zprávy odpovídačem podle vztahu 9:

$$T_L = T_P - T_{EMZ} \quad (9)$$

kde T_L značí čas vyslání zprávy odpovídačem letadla. Proměnná T_P značí čas přijetí zprávy přijímačem. Tato proměnná je známa po dekodování z kapitoly 3.1.3.

3.1.7. Přiřazení času vyslání zprávy odpovídáčem zprávám s absencí informace o poloze

V předchozím kroku metody je vysvětleno, jakým způsobem je dopočítáván čas vyslání zprávy u zpráv se známou polohou letadla. U zprávy, u které není známa poloha však není možné dopočítat vzdálenost letadla od přijímače v okamžik vyslání zprávy a následně čas jejího vyslání. Za účelem rekonstrukce zpráv vyslaných odpovídáči je nutné znát čas vyslání u každé ze zpráv.

Způsob přiřazení časů zprávám bez polohy je vysvětlen na konkrétním případě pomocí obrázků 11 a 12 níže.

Z důvodu zjednodušení dalších operací je datový soubor se zprávami od vybraného letadla rozčleněn dle přijímačů, na kterém byly jednotlivé zprávy přijaty. Na obrázku 11 jsou vidět zprávy přijaté na jednom z využívaných přijímačů. Ve sloupci 1 jsou indexy jednotlivých zpráv z původního souboru dat (před rozdělením zpráv dle přijímačů).

První zpráva od vybraného letadla na vybraném přijímači byla přijata jako 24. v pořadí. Ve sloupci 2 jsou dekódované časy přijetí zprávy na daném přijímači (viz kapitola 3.1.3.). Ve sloupci 3 jsou dopočítané časy vyslání zpráv. Zpráva s indexem 56 (sloupec 1) je zpráva s informací o poloze. Z tohoto důvodu je u této zprávy ve třetím sloupci již přiřazen čas vyslání zprávy z kroku 3.1.6.

| 1 | 2 | 3 |
|----|-----------------|-----------------|
| 24 | 10801,684123343 | NaN |
| 49 | 10801,934020984 | NaN |
| 56 | 10802,060830015 | 10802,060754739 |
| 65 | 10802,313325515 | NaN |

Obrázek 11: Přiřazení času vyslání zpráv (před přiřazením)

Pro výpočet času vyslání u zpráv s absencí informace o poloze je využit časový rozdíl příjmu jednotlivých zpráv (sloupec 2). Následně je čas vyslání zprávy s indexem 49 je dopočítán pomocí vztahů 10 a 11:

$$\Delta T_P = T_{P_{56}} - T_{P_{49}} \quad (10)$$

$$T_{L_{49}} = T_{L_{56}} - \Delta T_P \quad (11)$$

kde ΔT_P je rozdíl časů příjmu zpráv s indexem 56 a 49. $T_{L_{49}}$ je čas vyslání zprávy s indexem 49. $T_{L_{56}}$ je známý čas vyslání zprávy s indexem 56.

Stejným způsobem je dopočítán čas vyslání zprávy s indexem 24.

Čas vyslání zprávy s indexem 65 je dopočítán způsobem obdobným, a to sice:

$$\Delta T_P = T_{P_{65}} - T_{P_{56}} \quad (12)$$

$$T_{L_{65}} = T_{L_{56}} + \Delta T_P \quad (13)$$

kde ΔT_P je rozdíl časů příjmu zpráv s indexem 65 a 56. $T_{L_{65}}$ je čas vyslání zprávy s indexem 65. $T_{L_{56}}$ je známý čas vyslání zprávy s indexem 56.

Po vysvětleném výpočtu je znám čas vyslání všech zpráv na daném přijímači viz obrázek 12.

| 1 | 2 | 3 |
|----|-----------------|-----------------|
| 24 | 10801,684123343 | 10801,684048067 |
| 49 | 10801,934020984 | 10801,933945708 |
| 56 | 10802,060830015 | 10802,060754739 |
| 65 | 10802,313325515 | 10802,313250239 |

Obrázek 12: Přiřazení časů vyslání zpráv (po přiřazení)

Způsob přiřazování času vyslání všem zprávám je vysvětlen na příkladu, kde první zpráva přijatá vybraným přijímačem neobsahuje polohu. Při neznalosti polohy tedy neznáme čas vyslání zprávy. V případě, že nastane takový případ, je čas vyslání těchto zpráv vypočítáván pomocí času vyslání následující zprávy se známou polohou. V ostatních případech je čas dopočítáván pomocí času vyslání předchozí zprávy se známou polohou.

Znalost času vyslání každé zprávy je klíčová pro zjišťování odražených a duplicitních zpráv, které je vysvětleno v následujících kapitolách.

3.1.8. Identifikace odražených zpráv na přijímačích

V reálném prostředí může nastat situace, kdy zpráva například z důvodu odrazu elektromagnetického záření od překážky může být přijata jedním přijímačem vícekrát. Takové zprávy je však nutné identifikovat a do výsledné analýzy počtu zpráv vyslaných odpovídačem konkrétního letadla neuvažovat.

Právě znalost času vyslání zprávy, která byla získána v předchozích krocích, je pro určení odražených zpráv klíčová.

Základní úvahou identifikace odražených zpráv je předpoklad, že odpovídač nemůže vysílat dvě zprávy v jeden okamžik. Za odraženou zprávu lze tedy považovat zprávu, která má rozdíl času vyslání se zprávou předchozí menší, než je samotná délka zprávy.

V případě splnění kritéria určeným vztahem 14 můžeme považovat zprávu na pozici $(i + 1)$ za odraženou.

$$T_{L(i+1)} - T_{L(i)} < L \quad (14)$$

kde $T_{L(i+1)}$ je čas vyslání zprávy na pozici $(i + 1)$ a $T_{L(i)}$ je čas vyslání zprávy na pozici (i) ve vyhledávacím cyklu. Písmenem L je označena proměnná délka zprávy. Délka zprávy nabývá hodnot $56 \mu\text{s}$ nebo $112 \mu\text{s}$ viz kapitola 2.1.3.

3.1.9. Identifikace duplicitních zpráv

Po výpočtu času vyslání všech zpráv je zapotřebí identifikovat duplicitní zprávy. Analýza vysílaných zpráv odpovídačem vybraného letadla je realizována na základě dat (přijatých zpráv) z více ADS-B přijímačů. Duplicitní zprávou rozumíme jednu zprávu vyslanou odpovídačem letadla, která byla přijata na více přijímačích. K získání skutečného počtu zpráv, které jsou odpovídači vysílány, je zapotřebí tyto zprávy identifikovat a taktéž jako v případě zpráv odražených do analýzy neuvažovat.

Pro identifikaci duplicitních zpráv napříč všemi přijímači, které jsou pro získávání dat využívány, je použita stejná metoda jako pro identifikaci odražených zpráv na jednotlivých přijímačích.

Po sloučení dat ze všech přijímačů je vypočítáván časový rozdíl vyslání jednotlivých zpráv. Následně je časový rozdíl vyhodnocován dle kritéria 14 a to bez ohledu na přijímač, kterým byly zprávy přijaty. Při splnění kritéria lze považovat zprávu za duplicitní.

Pro identifikaci duplicitních zpráv je klíčová přesnost času příjmu zprávy na přijímači. Maximální únosná chyba hodin přijímačů je při požadavku na maximálně přesný výstup určena právě délkou zprávy 56 μ s nebo 112 μ s. V případě, že jeden z přijímačů přijme zprávu se zpožděním větším, než je samotná délka zprávy, dojde k nepřesnému výpočtu času vyslání zprávy odpovídačem. Následkem je nemožnost identifikovat zprávu jako duplicitní se zprávami z ostatních přijímačů, protože časový úsek mezi dopočítanými časy vyslání nebude splňovat kritérium určené vztahem 14. Výsledkem této chyby může být nižší počet identifikovaných duplicitních zpráv, z čehož plyne chybný (příliš vysoký) počet zpráv vyslaných odpovídačem.

4. Realizace navržené metody s využitím ADS-B přijímačů Fakulty dopravní ČVUT

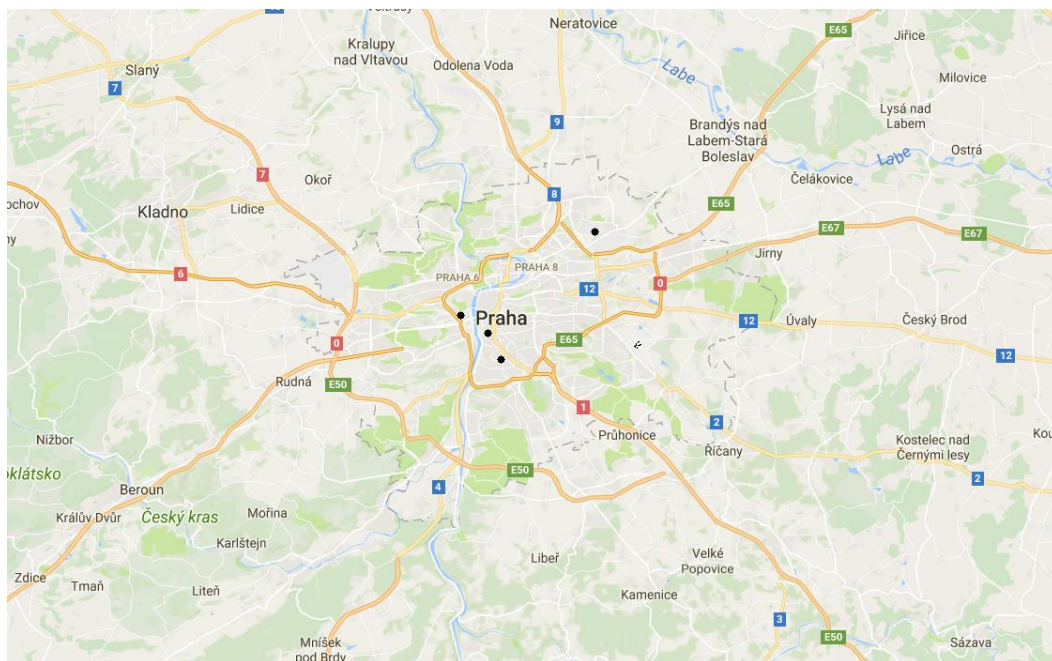
Metoda, která je popsána ve třetí kapitole, je navržena tak, aby ji bylo možno využít pro monitorování vysílání zpráv odpovídači na libovolném systému přijímačů. Za účelem analýz, které jsou součástí této práce, jsou využity ADS-B přijímače laboratoře ATM systému Fakulty dopravní ČVUT.

Ve čtvrté kapitole je popsána infrastruktura pro příjem zpráv a výpočetní modul pro realizaci navržené metody, který byl vytvořen v programu MATLAB.

4.1. Rozmístění ADS-B přijímačů

Pro rekonstrukci funkce odpovídačů letadel je v první řadě zapotřebí sběr dat (zpráv), které jsou vysílány palubními odpovídači.

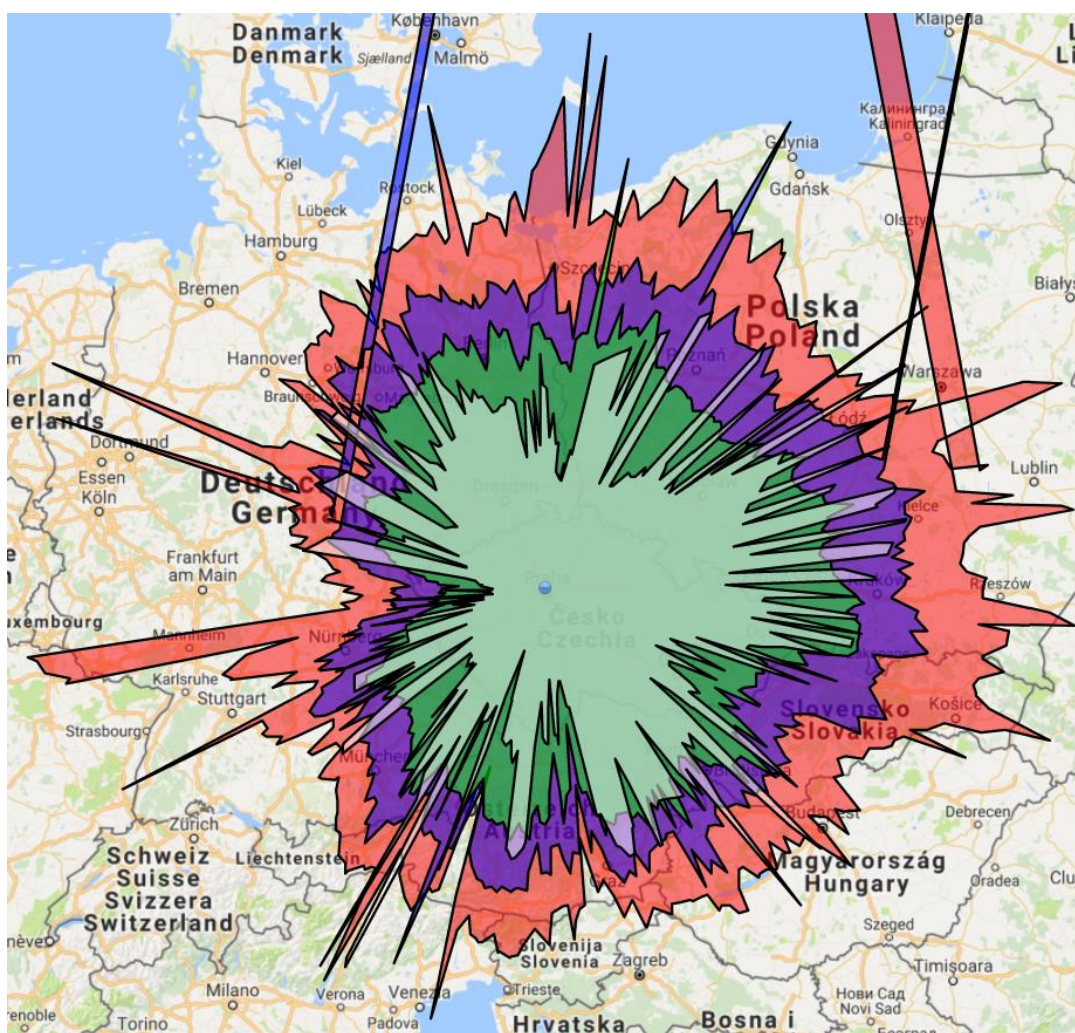
V současné době jsou Ústavem letecké dopravy Fakulty dopravní využívány k výzkumným účelům čtyři ADS-B přijímače, které jsou rozmístěny na území hlavního města Prahy. Rozmístění přijímačů je znázorněno černými body na obrázku 13.



Obrázek 13: Rozmístění ADS-B přijímačů.

4.1.1. Přijímač Strahov

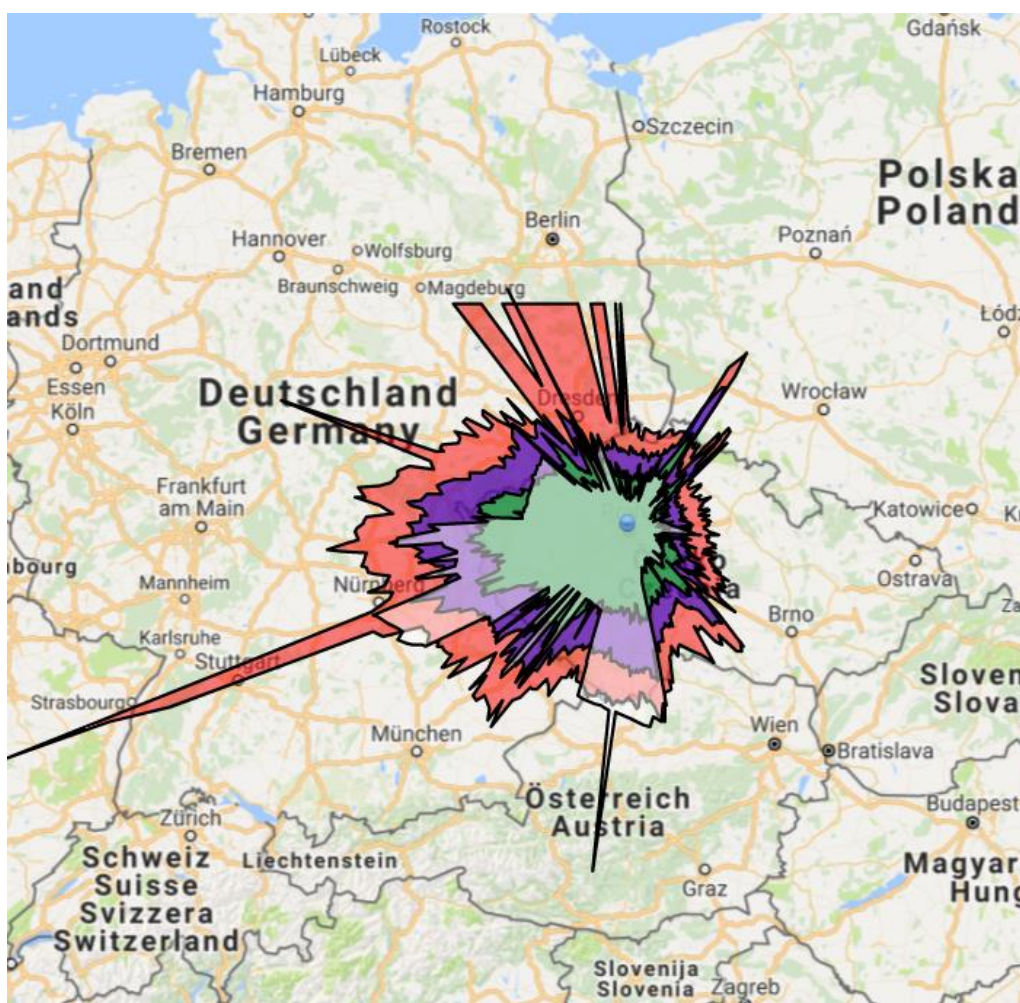
První z přijímačů je umístěn na střeše bloku 11 kolejí Strahov. Jak je vidět na obrázku 14 díky svému umístění na Petřínském vrchu je přijímač schopen příjmu zpráv z velkých vzdáleností. Barevně odlišeny jsou dosahy přijímače v jednotlivých výškových hladinách. Světle zelená barva znázorňuje dosah přijímače pro hladiny 0-9999 ft. Tmavě zelená barva zobrazuje dosah pro hladiny 10000-19999 ft. Fialová barva znázorňuje dosah pro hladiny 20000-29999 ft. Červená barva zobrazuje dosah pro hladiny nad 30 000 ft. Metoda vykreslení dosahu přijímače je závislá na příjmu polohových zpráv od odpovídáčů letadel. V případě příjmu zprávy s polohou, která je chybová (neodpovídá skutečné poloze letadla) vznikají úzké paprsky vedoucí do oblastí, do kterých přijímač ve skutečnosti nedosahuje. [6] [13]



Obrázek 14: Dosah přijímače Strahov v jednotlivých výškových hladinách. [12]

4.1.2. Přijímač Horská

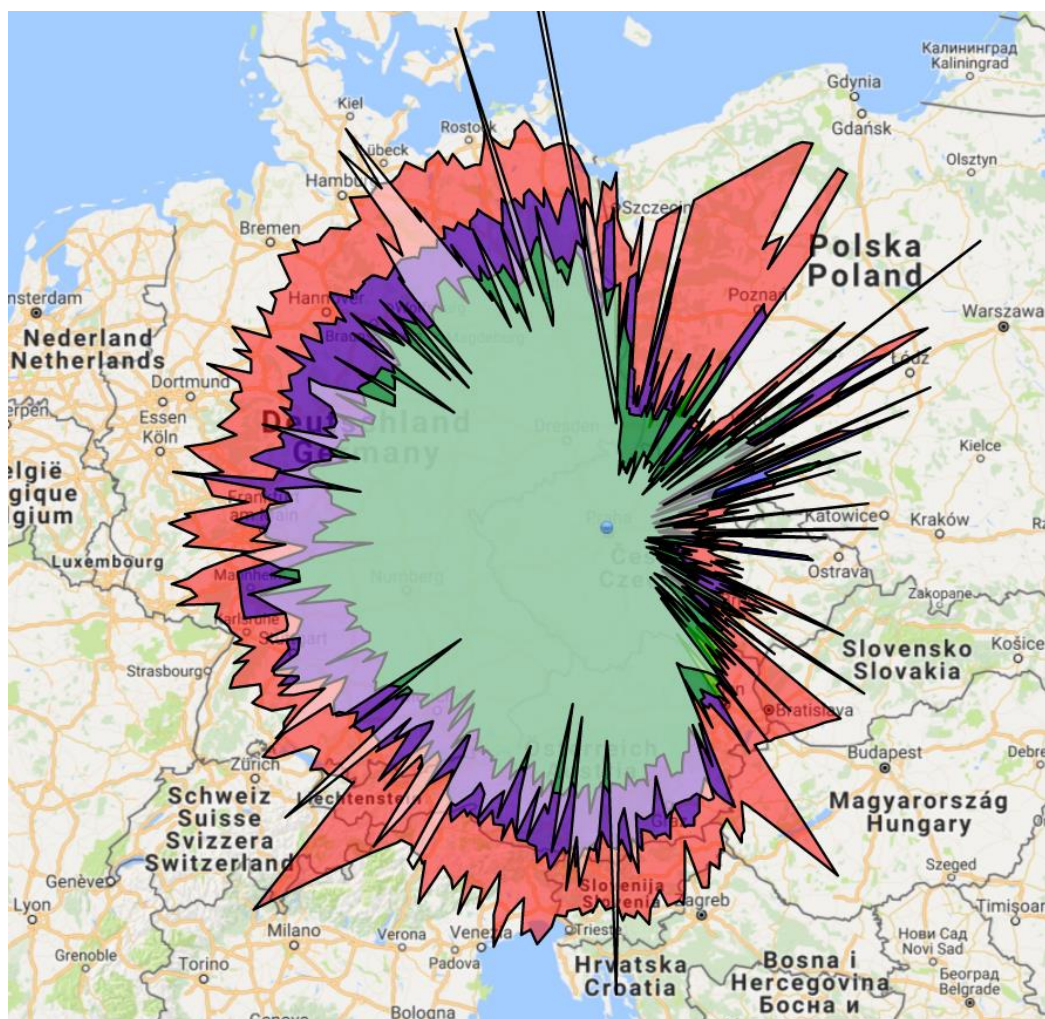
Přijímač je umístěn na fakultní budově přibližně o 130 metrů níže, než je umístěn přijímač Strahov. Přijímač je umístěn v hustě zastavěné oblasti a z jedné strany je jeho příjem stíněn vlastní budovou. Z popsaných důvodů je dosah přijímače menší, než je tomu u ostatních přijímačů v systému (viz obrázek 15). Z důvodu nevhodného umístění se uvažuje o přemístění přijímače v co nejkratší době. [5] [12]



Obrázek 15: Dosah přijímače Horská v jednotlivých výškových hladinách. [12]

4.1.3. Přijímač Pankrác

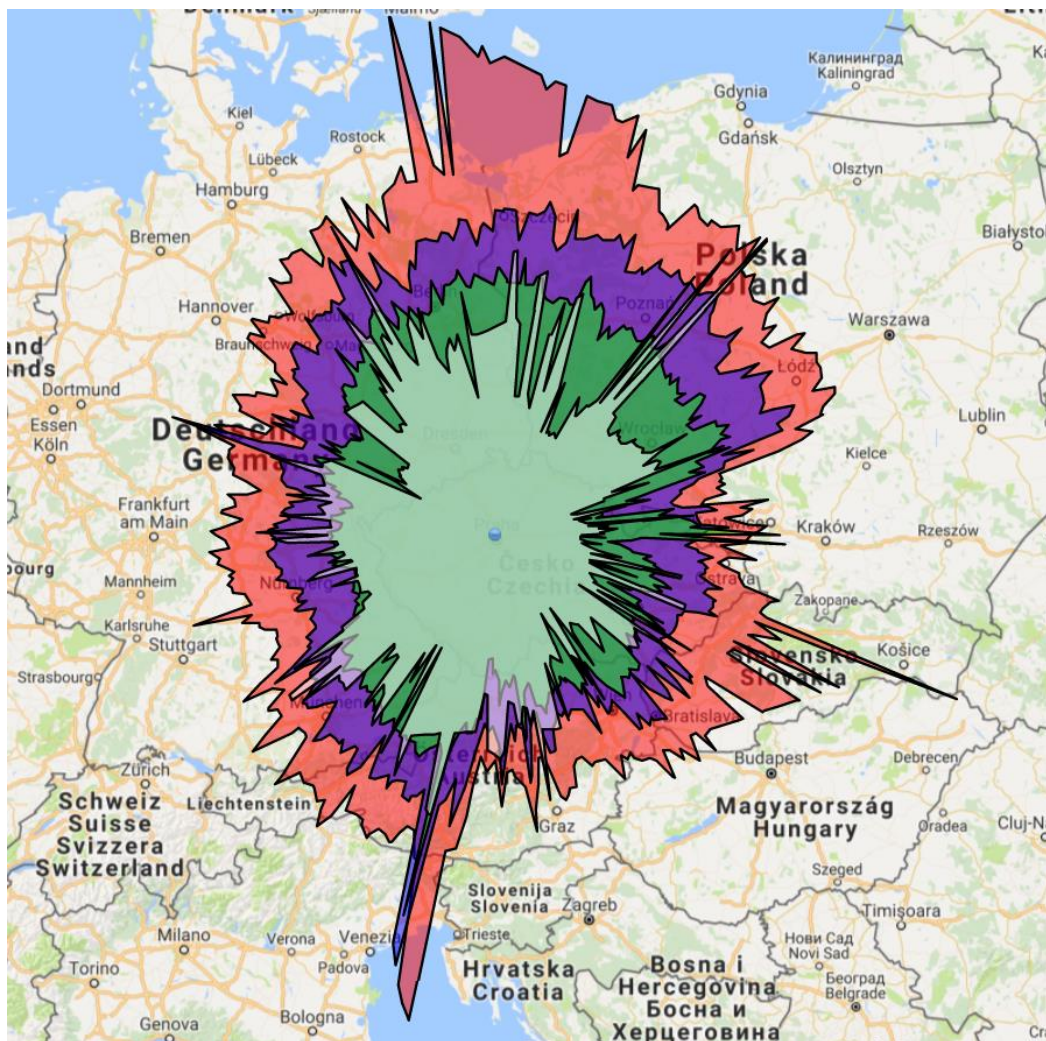
Přijímač je umístěn na jedné z výškových budov na pražském Pankráci. Umístění je vhodné pro příjem zpráv z velkých vzdáleností, avšak příjem zpráv z východního směru je omezen z důvodu stínění signálu samotnou budovou. Dosah příjmu přijímače Pankrác je znázorněn na obrázku 16. [5] [12]



Obrázek 16: Dosah přijímače Pankrác v jednotlivých výškových hladinách. [12]

4.1.4. Přijímač Letňany

Čtvrtý z ADS-B přijímačů je umístěn na letišti v Letňanech. V blízkosti přijímače se nenachází žádné překážky, které by zabraňovaly příjmu signálu. Umístění přijímače je tak vhodné pro příjem zpráv z velké vzdálenosti.



Obrázek 17: Dosah přijímače Letňany v jednotlivých výškových hladinách. [12]

4.2. Formát vstupních dat

Přijaté zprávy ze všech fakultních přijímačů jsou po příjmu sloučeny do datového souboru a uloženy na datový server. Formát vstupních dat po stažení datového souboru je vidět na obrázku 15.

```
1480647600108;1;0A8C4436AB67;8D7806B458C3858151293D6CC0F4
1480647600108;1;0A8C4447BF0C;5D89620AB32EDD
1480647600108;1;0A8C444B3036;5D39BD20FFB338
1480647600108;1;0A8C4453AD2F;203F31CD349703
1480647600108;1;0A8C445D80CF;2800081200C4BB
1480647600108;1;0A8C447FC5F1;A00015B8EE8A2B31FFE7FE0A89B5
```

Obrázek 15: Formát vstupních dat

Z obrázku 15 je patrné, že soubor vstupních dat obsahuje dva rozdílné typy zpráv dle délky zpráv ve 4. segmentu. Zprávy o délce 28 a zprávy o délce 14 znaků v hexadecimální soustavě. Jednotlivé zprávy jsou od sebe odděleny řádky.

Všechny zprávy, bez ohledu na to, zda se jedná o zprávu dlouhou či krátkou, se skládají ze 4 segmentů. Jednotlivé segmenty zprávy jsou od sebe odděleny znakem středníku.

Obsah jednotlivých segmentů zpráv je následující:

Segment 1: Unix Time (čas serveru v době přijetí zprávy)

Segment 2: Identifikace přijímače, na kterém byla zpráva přijata

Segment 3: Časová značka (UTC čas příjmu zprávy přijímačem)

Segment 4: Datová zpráva o délce 28 nebo 14 hexadecimálních znaků

4.3. Výpočetní modul pro zpracování a analýzu dat

Výpočetní modul pro zpracování a analyzování vstupních dat byl navržen v prostředí programu MATLAB.

Modul je pojmenován **Decoder_vX.m** a je přílohou této práce. Pro správnou funkci výpočetního modulu je zapotřebí, aby byl spouštěcí soubor výpočetního modulu umístěn ve stejném adresáři, ve kterém je umístěn adresář s daty, která jsou určena k analýze. Ve stejném adresáři jako výpočetní modul musí být taktéž umístěny pomocné funkce, které jsou v modulu využívány.

Naprogramovaný skript vychází z navržené metody pro rekonstrukci vyslaných zpráv odpovídačem vybraného letadla, která je popsána ve třetí kapitole této práce.

4.3.1. Definice parametrů ve výpočetním modulu

Pro požadovanou funkci modulu je nutné ve skriptu definovat několik parametrů, které ovlivňují konečné výstupy. Jednotlivé parametry a jejich funkce jsou popsány v následujícím textu.

Pomocí parametru **s** je nadefinován adresář, ze kterého modul čerpá zdrojová data určená k analýze. Pro správnou funkci musí být zdrojová data uložena ve složce Archiv ve formátu název zdrojového souboru.dat

Parametr **n** definuje počet zpráv ze zdrojových dat, které jsou zahrnuty do další analýzy. Při definování parametru **n** je důležité brát v úvahu, že počet přijatých zpráv ve zdrojovém souboru například pro dobu jedné minuty záznamu je závislý na počtu využívaných přijímačů a na denní době příjmu zpráv. Počet zpráv odpovídajících jedné minutě záznamu přijatých na čtyřech přijímačích ve 3:00 může být trojnásobně nižší, než počet zpráv za stejný časový úsek přijatých na stejném počtu přijímačů v provozní špičce.

Parametr **ReceiverStrahov** definuje souřadnice přijímače Strahov. Prvním parametrem je zeměpisná délka. Druhým parametrem je zeměpisná šířka a třetím nadmořská výška přijímače. Stejným způsobem je nutné nadefinovat souřadnice dalších přijímačů, které jsou v modulu využívány. V případě požadavku využití vytvořeného modulu na jiných přijímačích je nutné souřadnice používaných přijímačů upravit.

Parametr **ID** definuje ICAO adresu odpovídače vybraného letadla. Pro správnou funkci je zapotřebí, aby se uživatelem nadefinovaná adresa odpovídače nacházela ve zdrojových datech, se kterými modul pracuje.

Parametr **x** v cyklu pro vyhledávání odražených zpráv na přijímači je zaveden z důvodu optimalizace časové náročnosti výpočtu modulu. Hodnotou parametru **x** lze nadefinovat, kolik následujících hodnot je porovnáváno s porovnávanou hodnotou času vyslání zprávy. V případě nastavení parametru na hodnotu 10 je čas vyslání zprávy na pozici 1 porovnáván s hodnotami časů vyslání zpráv na pozicích 2 až 11.

Parametr **x** v cyklu pro vyhledávání duplicitních zpráv bez ohledu na přijímač příjmu zprávy je definován ze stejného důvodu jako stejně pojmenovaný parametr v cyklu pro vyhledávání odražených zpráv. Hodnota 500 byla zvolena po testování vyhledávání duplicitních zpráv. Při nastavení vyšší hodnoty cyklus nevyhledá více duplicitních zpráv. Navýšení parametru by tak zbytečně zatěžovalo výpočetní náročnost modulu. V případě záměru využívat skript pro rekonstrukci zpráv po sloučení dat z vyššího počtu přijímačů je však nutné parametr **x** nastavit na hodnotu vyšší, než je hodnota 500.

4.3.2. Popis pomocných funkcí ve výpočetním modulu

Součástí výpočetního modulu jsou funkce, které jsou nezbytně nutné pro jeho správnou funkci. Tyto funkce musí být umístěny ve stejném adresáři jako spouštěcí soubor `Decoder_vX.m`. Funkce a účel využití jednotlivých funkcí bude popsána v následujícím textu.

Funkce **hex2bin.m** je určena k převodu vybrané posloupnosti znaků z hexadecimální soustavy do soustavy binární. Tato funkce je v modulu využita například v cyklu pro dekódování DF kódu zprávy a ICAO adresy odpovídače. Dekódování zprávy v binárním tvaru je popsáno na příkladu v kapitole 3.1.1

Funkce **crc_division4.m** je určena k dekódování adresně paritního pole zpráv. Dekódování adresně paritního pole je zapotřebí při zjišťování kvality přijatých zpráv typu DF 17. Z adresně paritního pole taktéž zjišťována ICAO adresa odpovídače u vybraných DF kódů.

Funkce **bin2hex.m** je funkce pro převod znaků z binární soustavy do soustavy hexadecimální. Funkce `bin2hex` je využita například pro zpětné převedení binárních znaků, se kterými pracuje funkce `crc_division4` na znaky do soustavy hexadecimální.

Funkce **DF17_poloha.m** je funkce určena k dekódování polohy letadla u zpráv DF17. Funkce je využita v cyklu pro dekódování polohy a výšky letadla. Způsob dekódování polohy je popsán v kapitole 3.1.4.

Funkce **DF17_TC9_18_vyska.m** je určena k dekódování výšky letadla u zpráv DF17 s Type kódy 9-18. Funkce je využita v cyklu pro dekódování polohy a výšky letadla. Způsob dekódování výšky je popsán v kapitole 3.1.4.

Funkce **WGS2ECEF.m** je určena k transformaci souřadnic z geodetického souřadného systému WGS84 do kartézského souřadného systému ECEF. Postup pro transformaci souřadnic je popsán v kapitole 3.1.5.

4.3.3. Výstupní proměnné modulu

Výstupem modulem úspěšně realizovaného výpočtu je velké množství proměnných, které jsou zobrazeny v poli Workspace prostředí programu MATLAB. Velká část těchto proměnných jsou proměnné pomocné, které byly definovány v průběhu skriptu z důvodu požadavku na správnou funkci modulu. Pomocné proměnné není nutné popisovat. Z tohoto důvodu jsou popsány v následujícím textu pouze tzv. finální proměnné, které jsou základem pro tvorbu statistiky požadovaných parametrů.

Proměnná **Message_ID** obsahuje všechny zprávy přijaté na všech přijímačích od vybraného letadla. Ve sloupci číslo 2 je umístěna samotná zpráva v hexadecimálním tvaru. Ve třetím sloupci je DF kód zprávy. Ve 4 sloupci je umístěna identifikace přijímače, na kterém byla konkrétní zpráva přijata. V pátém sloupci je čas příjmu zprávy na přijímači.

Proměnné **Receiver1Time-Receiver4Time** obsahují zprávy od vybraného letadla rozdělené dle přijímače příjmu konkrétní zprávy. V prvním sloupci je index řádku zprávy z původního souboru dat z proměnné **Message_ID**. Ve druhém sloupci je čas příjmu zprávy a ve třetím sloupci je čas vyslání zprávy. Způsob výpočtu času vyslání zprávy je popsán v kapitole 3.1.6 a 3.1.7. Ve čtvrtém sloupci je umístěna informace o odražených zprávách. V případě, že se jedná o odraženou zprávu, je na příslušném řádku odpovídající odražené zprávě ve čtvrtém sloupci hodnota 1. Kritérium pro vyhodnocení odražené zprávy je popsáno v kapitole 3.1.8.

Proměnná **Receiver1-Receiver4** popisuje počty přijatých zpráv na jednotlivých přijímačích od vybraného odpovídáče po odečtení odražených zpráv.

Proměnná **Odraz1-Odraz4** obsahuje celkový počet odražených zpráv na jednotlivých přijímačích. Hodnota proměnné je získána součtem hodnot ve čtvrtém sloupci proměnné Receiver1Time-Receiver4Time.

Proměnná **ReceiversTime** je proměnná obsahující všechny zprávy po sloučení proměnných ReceiverXTime. Obsah jednotlivých sloupců je stejný jako u proměnných ReceiverXTime s tím rozdílem, že ve čtvrtém sloupci je hodnota 1 v polích, kde je vyhodnocena příslušná zpráva jako duplicitní viz kapitola 3.1.9.

Proměnná **DuplicityTotal** obsahuje hodnotu počtu celkově nalezených duplicit. Hodnota tedy zahrnuje jak odražené zprávy na jednotlivých přijímačích, tak duplicitní zprávy napříč všemi přijímači, které jsou využívány pro příjem zpráv. Hodnota proměnné je získána součtem čtvrtého sloupce proměnné ReceiversTime.

Proměnná **DFinTime** obsahuje finální počet zpráv od vybraného letadla po odstranění veškerých duplicit. Dle rozměrů proměnné lze zjistit skutečný počet vyslaných zpráv odpovídačem letadla za zvolený časový úsek. Zvolený časový interval, pro který je analyzována funkce odpovídačů, je definován pomocí parametru n viz kapitola 4.3.1. V prvním sloupci proměnné se nachází čas vyslání zprávy odpovídačem. Ve druhém sloupci je informace o identifikaci přijímače, na kterém byla konkrétní zpráva přijata. Ve sloupci třetím DF kód zprávy.

Proměnná **T** obsahuje hodnotu časového rozdílu mezi první a poslední zprávou vyslanou vybraným odpovídačem. Proměnná T je ovlivňována parametrem n. Právě pomocí parametru n je možné zpětně definovat délku časové periody rekonstrukce.

5. Hodnocení úspěšnosti rekonstrukce zpráv vyslaných odpovídáči

Úspěšnost navržené metody pro rekonstrukci zpráv vysílaných SSR odpovídáči letadel je vyhodnocena na základě porovnání úspěšně rekonstruovaných zpráv se známým počtem zpráv DF17, které jsou palubními odpovídáči vysílány pomocí technologie 1090ES. Počet zpráv DF17 vysílaných palubními odpovídáči dle jednotlivých Type kódů jsou uvedeny v dokumentu *Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter* (dále DO-260B) a je uveden v tabulce 5.

Tabulka 5: Frekvence vysílání zpráv typu DF17 odpovídáči dle dokumentu DO-260B [13]

| Type kód | Typ zprávy | Frekvence vysílání zprávy DF 17 příslušného Type kódu dle DO-260B |
|----------|---------------------------------|---|
| 1-4 | Aircraft Identification Message | 5 s |
| 9-18 | Aircraft Position Message | 0,5 s |
| 19 | Aircraft Velocity Message | 0,5 s |

Úspěšnost rekonstrukce zpráv pomocí pozemní infrastruktury je závislá v první řadě na schopnosti příjmu jednotlivých přijímačů využívaných pro příjem zpráv. Faktorů, které ovlivňují rekonstrukci co nejvyššího počtu odpovídáči vyslaných zpráv, je více.

Prvním z nich je dosah přijímačů. V případě příjmu zpráv od odpovídáče letadla, které je v dosahu pouze jednoho přijímače v systému přijímačů, není možné přijmout stejné množství zpráv jako od letadla, které prolétá oblastí dosahu všech přijímačů, které jsou pro rekonstrukci využívány.

S dosahem přijímače přímo souvisí fyzické umístění antény přijímače. Příkladem může být přijímač Horská, který není prakticky schopen přijímat zprávy od letadel prolétajících východní částí České republiky.

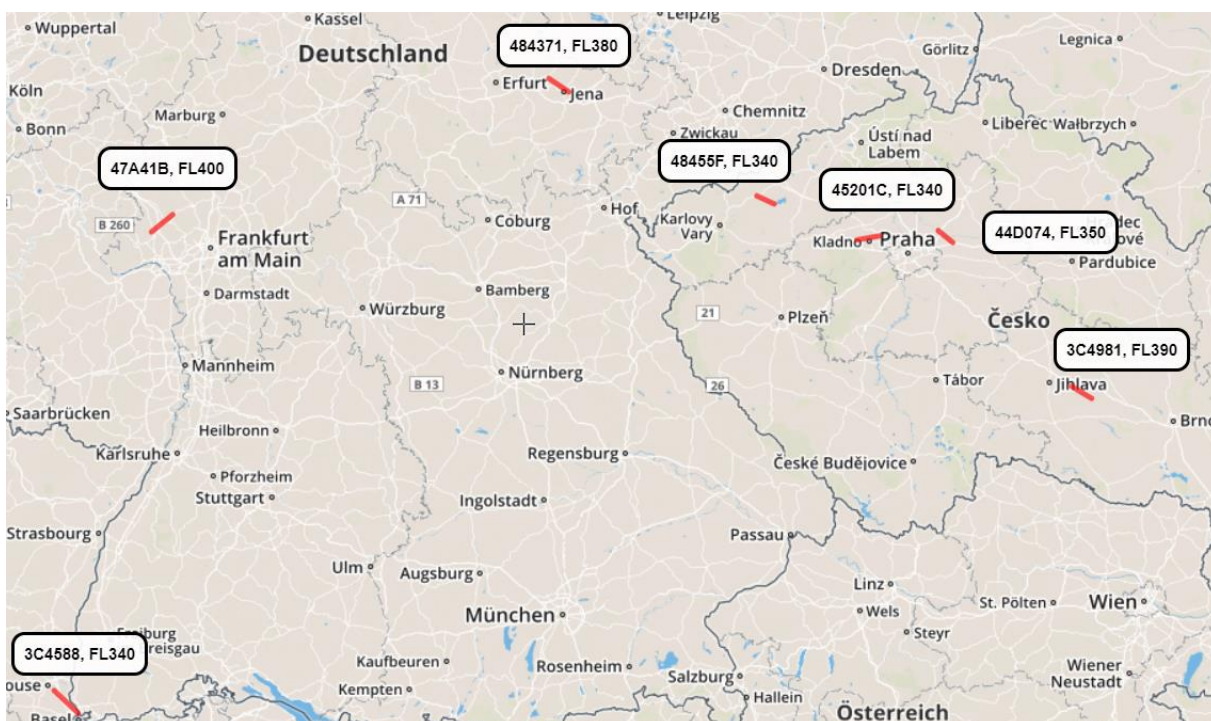
Dalším faktorem, který může ovlivňovat rekonstrukci zpráv, je hustota letového provozu. V případě příjmu velkého počtu zpráv na přijímači může dojít z důvodu jeho přetížení k znemožnění příjmu z důvodu vzájemného překrytí dvou a více zpráv.

V neposlední řadě je úspěšnost rekonstrukce závislá na vzájemném rozmístění jednotlivých přijímačů. V případě malé odlehlosti přijímačů lze předpokládat, že v případě neúspěšného příjmu z důvodu překrytí zpráv na přijímači 1 dojde ke stejnému jevu při příjmu na přijímači 2.

5.1. Úspěšnost rekonstrukce za nočního provozu

Trasy letů, které byly vybrány pro rekonstrukci zpráv za nočního provozu, jsou znázorněny na obrázku 19. Červená stopa znázorňuje trasu, kterou konkrétní let urazil za dobu 60 sekund, pro kterou je vyhodnocena úspěšnost rekonstrukce.

K vyhodnocení je využít zdrojový soubor dat s názvem 1706190300.dat. Z názvu souboru lze vyčíst, že se jedná o záznam z 19.6.2017 s časem zahájení ve 3:00 ráno.



Obrázek 19: Trasy letů vybraných pro hodnocení metody rekonstrukce zpráv za nočního provozu

Četnost úspěšně rekonstruovaných zpráv vybraných letů dle Type kódů zpráv DF 17 je uvedena v tabulce 6. Procentuální úspěšnost rekonstruovaných zpráv pro vybrané lety je uvedena v tabulce 7.

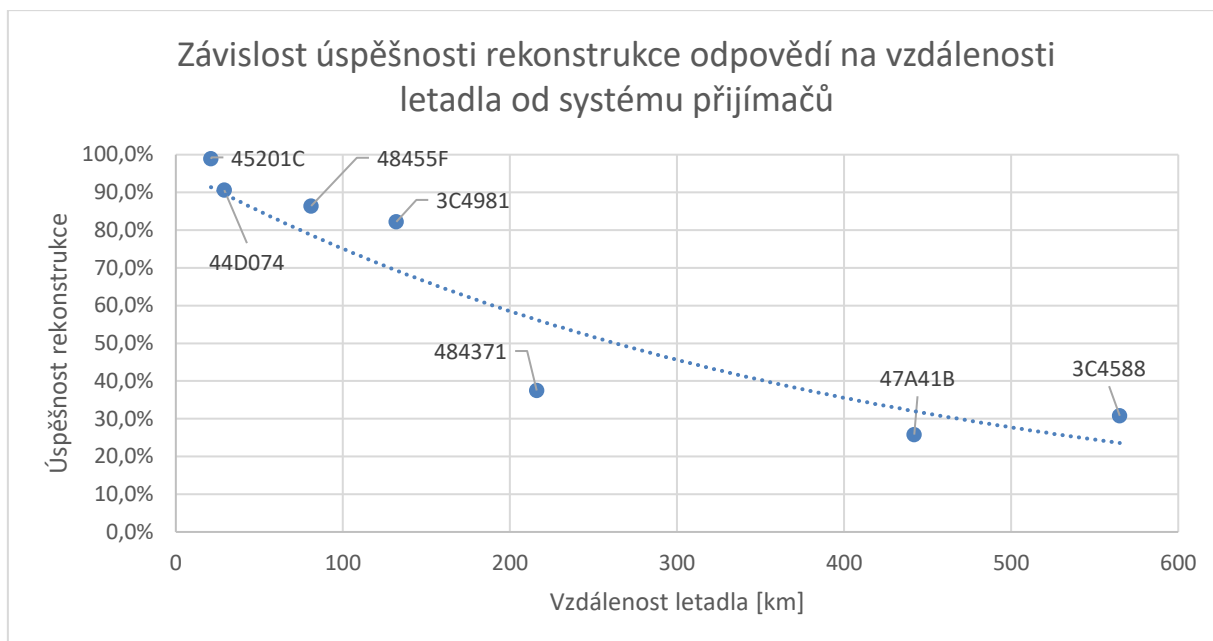
Tabulka 6: Počet úspěšně rekonstruovaných zpráv DF 17 za nočního provozu

| Type kód | Počet vysílaných zpráv dle DO-260B za 60 s | Počet úspěšně rekonstruovaných zpráv DF 17 dle Type kódů u vybraných letů za 60 s | | | | | | |
|----------|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 |
| 1-4 | 12 | 12 | 10 | 5 | 10 | 4 | 4 | 10 |
| 9-18 | 120 | 120 | 107 | 40 | 115 | 36 | 33 | 100 |
| 19 | 120 | 116 | 104 | 45 | 111 | 35 | 29 | 96 |

Tabulka 7: Úspěšnost rekonstrukce zpráv DF 17 vybraných Type kódů u vybraných letů za nočního provozu

| Type kód | Úspěšnost rekonstrukce zpráv DF 17 vybraných Type kódů u vybraných letů | | | | | | |
|----------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 |
| 1-4 | 100,0 % | 83,3 % | 41,7 % | 83,3 % | 33,3 % | 33,3 % | 83,3 % |
| 9-18 | 100,0 % | 89,2 % | 33,3 % | 95,8 % | 30,0 % | 27,5 % | 83,3 % |
| 19 | 96,7 % | 86,7 % | 37,5 % | 92,5 % | 29,2 % | 16,7 % | 80,0 % |
| Průměr | 98,9 % | 86,4 % | 37,5 % | 90,6 % | 30,8 % | 28,3 % | 82,2 % |

Z obrázku 20 a tabulky 7 lze odvodit, že úspěšnost rekonstrukce zpráv je závislá na vzdálenosti daného letu od přijímačů. Popsanou závislost znázorňuje spojnice trendu na obrázku 20. Na svislé ose je umístěna průměrná úspěšnost rekonstrukce vybraného letu. Na ose vodorovné je šikmá vzdálenost letadla v době příjmu první polohové zprávy na přijímači Strahov.



Obrázek 20: Závislost úspěšnosti rekonstrukce zpráv na vzdálenosti letadla od systému přijímačů v nočním provozu

Na obrázku 20 je vidět, že při požadavku na co nej přesnější rekonstrukci zpráv (úspěšnost rekonstrukce nad 80 %) lze zahrnovat do analýz lety ve vzdálenosti přibližně 150 kilometrů od systému přijímačů použitých pro rekonstrukci v této práci. Do vzdálenosti 100 kilometrů od systému přijímačů je možné zrekonstruovat v průměru 92 % zpráv.

V tabulce 8 je uveden počet přijatých zpráv (po odstranění zpráv odražených) na jednotlivých přijímačích od vybraných letů. V tabulce 9 je uvedena úspěšnost příjmu jednotlivých přijímačů z celkového počtu zpráv po sloučení ze všech přijímačů.

Tabulka 8: Počet přijatých zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích za nočního provozu

| | Počet přijatých zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích | | | | | | |
|-----------------|---|-------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| Přijímač | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 |
| Strahov | 988 | 684 | 205 | 911 | 811 | 708 | 1379 |
| Horská | 1321 | 720 | 0 | 379 | 0 | 0 | 0 |
| Pankrác | 924 | 958 | 14 | 972 | 5 | 0 | 0 |
| Letňany | 819 | 922 | 592 | 926 | 0 | 260 | 1450 |
| *Celkem: | 1369 | 1168 | 681 | 1258 | 812 | 929 | 1569 |

*celkový počet rekonstruovaných zpráv po sloučení přijatých zpráv ze všech přijímačů a po odečtení veškerých duplicitních zpráv

Tabulka 9: Úspěšnost příjmu zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích

| | Úspěšnost příjmu zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích | | | | | | |
|----------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Přijímač | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 |
| Strahov | 72,2 % | 58,6 % | 30,1 % | 72,4 % | 99,9 % | 76,2 % | 87,9 % |
| Horská | 96,5 % | 61,6 % | 0,0 % | 30,1 % | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % |
| Pankrác | 67,5 % | 82,0 % | 2,1 % | 77,3 % | 0,6 % | 0,0 % | 0,0 % |
| Letňany | 59,8 % | 78,9 % | 86,9 % | 73,6 % | 0,0 % | 28,0 % | 92,4 % |

Úspěšnost příjmu zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích v tabulce 9 je závislá na dosahu jednotlivých přijímačů, který je znázorněn na obrázcích v kapitole 4.1. Příkladem může být příjem zpráv na přijímači Horská od letu 484371, který se nachází mimo dosah příjmu přijímače, z čehož plyne nulový počet přijatých zpráv na tomto přijímači.

Z tabulky 9 lze také vyčíst průměrná úspěšnost příjmu zpráv od vybraných letů jednotlivých přijímačů. Nejhorší úspěšností se vyznačuje přijímač Horská s 26,9 % přijatých zpráv z celkově přijatých zpráv. Druhou nejnižší úspěšnost má přijímač Pankrác, a to sice 32,8 %. Přijímač Letňany přijal průměrně 59,9 % zpráv z celkového počtu přijatých zpráv. Přijímač Strahov 71,0 %.

V tabulce 10 je uveden počet odražených zpráv na jednotlivých přijímačích. V tabulce 11 je uveden procentuální výskyt odražených zpráv z celkově přijatých zpráv na konkrétním přijímači.

Tabulka 10: Počet odražených zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích za nočního provozu

| | Počet odražených zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích | | | | | | |
|----------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Přijímač | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 |
| Strahov | 26 | 6 | 34 | 14 | 20 | 42 | 40 |
| Horská | 8 | 0 | 0 | 34 | 0 | 0 | 0 |
| Pankrác | 17 | 4 | 1 | 17 | 0 | 0 | 0 |
| Letňany | 0 | 0 | 5 | 4 | 0 | 5 | 2 |

Tabulka 11: Výskyt odražených zpráv z celkového počtu přijatých zpráv na přijímačích za nočního provozu

| Přijímač | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 | Průměr |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Strahov | 2,6 % | 0,9 % | 16,6 % | 1,5 % | 2,5 % | 5,9 % | 2,9 % | 4,2 % |
| Horská | 0,6 % | 0,0 % | 0,0 % | 9,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 2,4 % |
| Pankrác | 1,8 % | 0,4 % | 7,1 % | 1,7 % | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 1,8 % |
| Letňany | 0,0 % | 0,0 % | 0,8 % | 0,4 % | 0,0 % | 1,9 % | 0,1 % | 0,7 % |

Z tabulky 11 lze vyhodnotit, zda jsou antény jednotlivých přijímačů v systému umístěny vhodně či nikoliv. Nejčastěji se vyskytují odražené zprávy na přijímači Strahov. Jedná se o průměrnou hodnotu 4,2 % odražených zpráv z celkově přijatého počtu zpráv na přijímači. Tento fakt je s velkou pravděpodobností zapříčiněn odrazem zpráv od jednotlivých bloků kolejí nebo od Strahovského stadionu.

Nejvhodněji s ohledem na výskyt odražených zpráv je umístěna anténa přijímače Letňany.

V tabulce 12 jsou uvedeny celkové počty úspěšně rekonstruovaných zpráv (bez ohledu na DF kód) po sloučení při postupném přidávání jednotlivých přijímačů do systému. Indexy 1-4 v první sloupci tabulky označují přijímače, které byly zahrnuty do výpočtu. Přijímač Strahov je označen číslem 1, Horská (2), Pankrác (3) a Letňany (4). V tabulce 13 jsou uvedeny úspěšnosti rekonstrukce zpráv při použití omezeného počtu přijímačů v systému v porovnání s počtem úspěšně rekonstruovaných zpráv pomocí všech přijímačů v systému.

Tabulka 12: Počet úspěšně rekonstruovaných zpráv při postupném přidávání přijímačů do systému za nočního provozu

| Aktivní přijímač | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 988 | 684 | 205 | 911 | 811 | 708 | 1379 |
| 1+2 | 1341 | 729 | 205 | 1004 | 811 | 708 | 1379 |
| 1+2+3 | 1354 | 962 | 219 | 1202 | 812 | 708 | 1379 |
| 1+2+3+4 | 1369 | 1168 | 681 | 1258 | 812 | 929 | 1569 |

Tabulka 13: Úspěšnost rekonstrukce zpráv při postupném přidávání přijímačů do systému za nočního provozu

| Aktivní přijímač | 45201C | 48455F | 484371 | 44D074 | 3C4588 | 47A41B | 3C4981 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 72,2 % | 58,6 % | 30,1 % | 72,4 % | 99,9 % | 76,2 % | 87,9 % |
| 1+2 | 98,0 % | 62,4 % | 30,1 % | 79,8 % | 99,9 % | 76,2 % | 87,9 % |
| 1+2+3 | 98,9 % | 82,4 % | 32,2 % | 95,5 % | 100,0 % | 76,2 % | 87,9 % |
| 1+2+3+4 | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % |

Z tabulky 12 a 13 lze vyčíst příspěvek zpráv přijatých na jednotlivých přijímačích pro rekonstrukci zpráv. Příkladem je let 44D074. Celkově bylo přijato za 60 sekund od odpovídače letadla 1258 zpráv (po sloučení zpráv ze všech přijímačů a odstranění veškerých duplicitních zpráv) viz tabulka 8. V případě, že by pro příjem byl využíván pouze přijímač Strahov bylo by z celkového počtu rekonstruovaných zpráv pomocí všech čtyř přijímačů rekonstruováno pouhých 72,4 %. Po aktivaci přijímače Horská je možné zrekonstruovat 79,8 %. Při využití přijímačů Strahov, Horská a Pankrác je možné rekonstruovat 95,5 % zpráv z celkového počtu, který se podařil rekonstruovat pomocí všech čtyř přijímačů v systému, čemuž odpovídá hodnota 100 % v posledním řádku tabulky 13.

U letu 3C4588 by pro 100 % z celkově přijatých zpráv stačilo využít přijímače Strahov a Pankrác. Na přijímači Horská nebyla přijata žádná zpráva, která by nebyla vyhodnocena jako duplicitní se zprávami přijatými na přijímači Strahov. Stejně tak je tomu u přijímače Letňany. Na přijímači Pankrác byla přijata jedna zpráva, která nebyla přijata na přijímači Strahov.

5.2. Úspěšnost rekonstrukce za denního provozu

Důvodem porovnání úspěšností rekonstrukce zpráv za denního a nočního provozu je zhodnocení, zda je navržená metoda závislá na hustotě provozu či nikoliv.

Trasy letů, které byly vybrány pro rekonstrukci zpráv za denního provozu, jsou znázorněny na obrázku 21. Červená stopa znázorňuje trasu, kterou daný let urazil za dobu 60 sekund, pro kterou je vyhodnocena úspěšnost rekonstrukce.

K vyhodnocení je využit zdrojový soubor dat s názvem 1709170640.dat. Z názvu souboru lze vyčíst, že se jedná o záznam ze 17.9.2017 s časem zahájení v 6:40.



Obrázek 21: Trasy letů vybraných pro hodnocení metody rekonstrukce zpráv za denního provozu

V tabulce 14 níže je zobrazena četnost úspěšně rekonstruovaných zpráv po sjednocení zpráv ze všech přijímačů v systému pro vybrané lety, jejichž trasy jsou znázorněny na obrázku 21. V tabulce 15 je uvedena procentuální úspěšnost rekonstrukce zpráv po porovnání se známým počtem zpráv dle DO-260B.

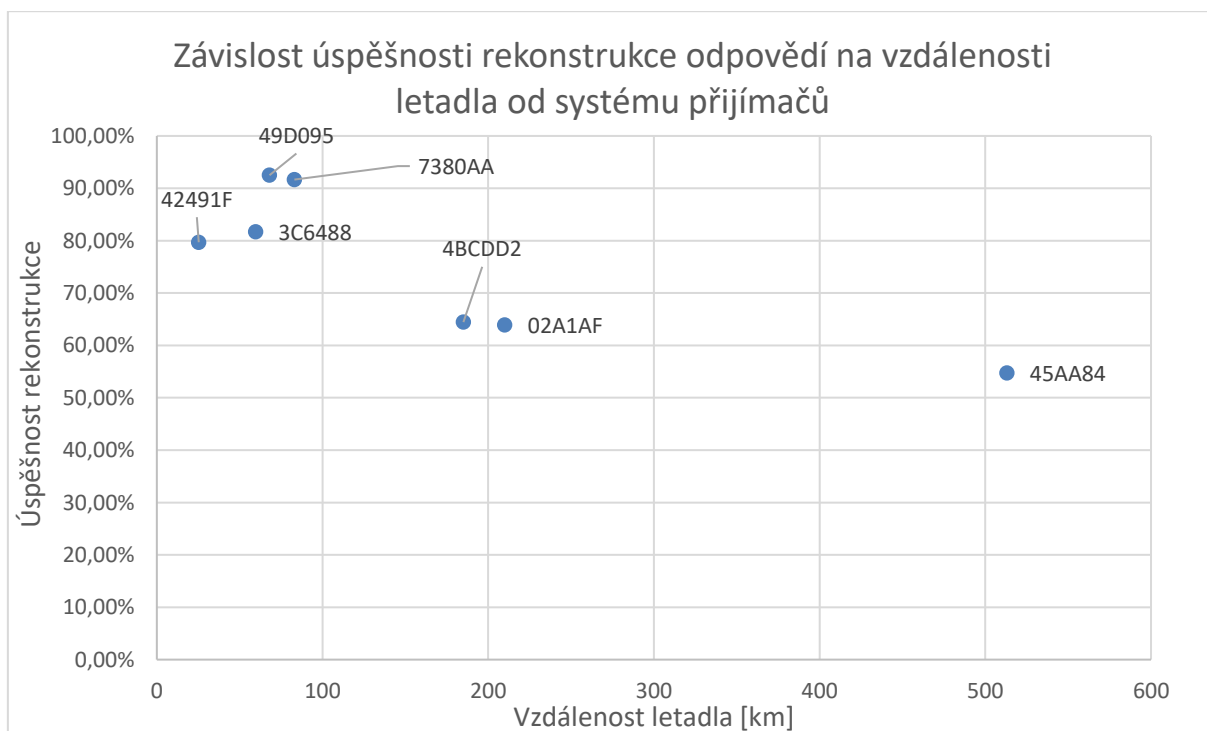
Tabulka 14: Počet úspěšně rekonstruovaných zpráv DF 17 za denního provozu

| Type kód | Počet vysílaných zpráv dle DO-260B za 60 s | Počet úspěšně rekonstruovaných zpráv DF 17 dle Type kódů u vybraných letů za 60 s | | | | | | |
|----------|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 |
| 1-4 | 12 | 7 | 6 | 11 | 10 | 9 | 11 | 10 |
| 9-18 | 120 | 88 | 66 | 112 | 94 | 74 | 108 | 97 |
| 19 | 120 | 72 | 71 | 111 | 93 | 68 | 112 | 97 |

Tabulka 15: Úspěšnost rekonstrukce zpráv DF 17 vybraných Type kódů u vybraných letů za denního provozu

| Type kód | Počet rekonstrukce zpráv DF 17 vybraných Type kódů u vybraných letů | | | | | | |
|----------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 |
| 1-4 | 58,3 % | 50,0 % | 91,7 % | 83,3 % | 75,0 % | 91,7 % | 83,3 % |
| 9-18 | 73,3 % | 55,0 % | 93,3 % | 78,3 % | 61,7 % | 90,0 % | 80,8 % |
| 19 | 60,0 % | 59,2 % | 92,5 % | 77,5 % | 56,7 % | 93,3 % | 80,8 % |
| Průměr | 63,9 % | 54,7 % | 92,5 % | 79,7 % | 64,4 % | 91,7 % | 81,7 % |

Z obrázku 22 a tabulky 15 lze odvodit, že úspěšnost rekonstrukce zpráv za denního provozu není jednoznačně závislá na vzdálenosti letadla od systému přijímačů jako tomu je při analýze rekonstrukce za nočního provozu. Za hustého provozu jsou přijímače zatěžovány vyšším počtem odpovědí vysílaných palubními odpovídači sekundárních radarů letadel. Z tohoto důvodu může docházet k zahlcení přijímačů vedoucím k neschopnosti přijímat zprávy. V případě požadavků na rekonstrukci zpráv za denního provozu s úspěšností nad 80 % lze uvažovat lety do vzdálenosti maximálně 100 kilometrů od systému přijímačů. Do vzdálenosti 100 km od systému přijímačů je možné v průměru zrekonstruovat 86,4 % zpráv což je o 5,6 % zpráv méně, než je možné zrekonstruovat za nočního provozu.



Obrázek 22: Závislost úspěšnosti rekonstrukce zpráv na vzdálenosti letadla od systému přijímačů v denním provozu

V tabulce 16 je uveden počet přijatých zpráv (po odstranění zpráv odražených) na jednotlivých příjemcích od vybraných letů. V tabulce 17 je uvedena úspěšnost příjmu jednotlivých příjemců z celkového počtu zpráv po sloučení ze všech příjemců.

Tabulka 16: Počet přijatých zpráv od vybraných letů na jednotlivých příjemcích za denního provozu

| | Počet přijatých zpráv od vybraných letů na jednotlivých příjemcích | | | | | | |
|-----------------|--|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Příjemce | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 |
| Strahov | 482 | 886 | 1348 | 528 | 994 | 901 | 1004 |
| Horská | 0 | 0 | 0 | 567 | 0 | 0 | 91 |
| Pankrác | 5 | 0 | 127 | 570 | 78 | 1235 | 1288 |
| Letňany | 749 | 45 | 1348 | 516 | 944 | 745 | 1032 |
| *Celkem: | 849 | 923 | 1588 | 1153 | 1328 | 1287 | 1411 |

*celkový počet rekonstruovaných zpráv po sloučení přijatých zpráv ze všech příjemců a po odečtení veškerých duplicitních zpráv

Tabulka 17: Úspěšnost příjmu zpráv od vybraných letů na jednotlivých příjemcích

| | Úspěšnost příjmu zpráv od vybraných letů na jednotlivých příjemcích | | | | | | |
|----------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Příjemce | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 |
| Strahov | 56,8 % | 96,0 % | 84,9 % | 45,8 % | 74,8 % | 70,0 % | 71,2 % |
| Horská | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 49,2 % | 0,0 % | 0,0 % | 6,4 % |
| Pankrác | 0,6 % | 0,0 % | 8,0 % | 49,4 % | 5,9 % | 96,0 % | 91,3 % |
| Letňany | 88,2 % | 4,9 % | 84,9 % | 44,8 % | 71,1 % | 57,9 % | 73,1 % |

Úspěšnost příjmu zpráv od vybraných letů na jednotlivých příjemcích v tabulce 17 je závislá na dosahu jednotlivých příjemců, který je znázorněn na obrázcích v kapitole 4.1. Z tabulky 17 vyplývá, že nejméně úspěšným z příjemců co do počtu úspěšně přijatých zpráv je znovu příjemce Horská.

Zajímavostí je, že přijímač Horská nebyl schopen přijmout ani jednu zprávu od odpovídače letu 7380AA, ačkoliv letadlo prolétalo v teoretickém dosahu přijímače.

V tabulce 18 je uveden počet odražených zpráv na jednotlivých přijímačích. V tabulce 19 je uveden výskyt odražených zpráv z celkově přijatých zpráv na konkrétním přijímači.

Tabulka 18: Počet odražených zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích za denního provozu

| Přijímač | Počet odražených zpráv od vybraných letů na jednotlivých přijímačích | | | | | | |
|----------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 |
| Strahov | 34 | 30 | 8 | 2 | 27 | 13 | 18 |
| Horská | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| Pankrác | 0 | 0 | 18 | 4 | 9 | 1 | 12 |
| Letňany | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Tabulka 19: Výskyt odražených zpráv z celkového počtu přijatých zpráv na přijímačích za denního provozu

| Přijímač | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 | Průměr |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Strahov | 7,1 % | 3,4 % | 0,6 % | 0,4 % | 2,7 % | 1,4 % | 1,8 % | 4,7 % |
| Horská | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 0,0 % | 7,7 % | 3,8 % |
| Pankrác | 0,0 % | 0,0 % | 14,2 % | 0,7 % | 11,5 % | 0,1 % | 0,9 % | 3,6 % |
| Letňany | 0,4 % | 0,0 % | 0,1 % | 0,0 % | 0,1 % | 0,0 % | 0,1 % | 0,4 % |

Výsledky v tabulkách 18 a 19 potvrzují výsledky z tabulek 10 a 11 pro odražené zprávy na jednotlivých přijímačích pro noční provoz. Nejvhodněji s ohledem na odražené zprávy je umístěna anténa přijímače Letňany. Naopak nejvíce odražených zpráv je zaznamenáno na přijímači Strahov.

V tabulce 20 jsou uvedeny celkové počty úspěšně rekonstruovaných zpráv (bez ohledu na DF kód) po sloučení při postupném přidávání jednotlivých přijímačů do systému. Indexy 1-4 v první sloupci tabulky označují přijímače, které byly zahrnuty do výpočtu. Přijímač Strahov je označen číslem 1, Horská (2), Pankrác (3) a Letňany (4). V tabulce 21 jsou uvedeny úspěšnosti rekonstrukce zpráv při použití omezeného počtu přijímačů v systému v porovnání s počtem úspěšně rekonstruovaných zpráv pomocí všech přijímačů v systému.

Tabulka 10: Počet úspěšně rekonstruovaných zpráv při postupném přidávání přijímačů do systému za denního provozu

| Aktivní přijímač | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 482 | 886 | 1348 | 528 | 994 | 901 | 1004 |
| 1+2 | 482 | 886 | 1348 | 571 | 994 | 901 | 1009 |
| 1+2+3 | 487 | 886 | 1475 | 1141 | 1072 | 1269 | 1350 |
| 1+2+3+4 | 849 | 923 | 1588 | 1153 | 1328 | 1287 | 1411 |

Tabulka 21: Úspěšnost rekonstrukce zpráv při postupném přidávání přijímačů do systému za denního provozu

| Aktivní přijímač | 02A1AF | 45AA84 | 49D095 | 42491F | 4BCDD2 | 7380AA | 3C6488 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 56,8 % | 96,0 % | 84,9 % | 45,8 % | 74,8 % | 70,0 % | 71,2 % |
| 1+2 | 56,8 % | 96,0 % | 84,9 % | 49,5 % | 74,8 % | 70,0 % | 71,5 % |
| 1+2+3 | 57,4 % | 96,0 % | 92,9 % | 99,0 % | 80,7 % | 98,6 % | 95,7 % |
| 1+2+3+4 | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % | 100,0 % |

Z tabulky 20 a 21 lze vyčíst příspěvek zpráv přijatých na jednotlivých přijímačích pro rekonstrukci zpráv. Příkladem je příjem zpráv od odpovídače letadla 42491F. Při využití zpráv přijatých pouze na přijímači Strahov je možné rekonstruovat pouhých 45,8 % zpráv z celkového počtu rekonstruovaných zpráv po sloučení dat ze 4 přijímačů. Přijímač Horská přijal pouhých 43 zpráv, které nebyly vyhodnoceny jako duplicitní se zprávami z přijímače Strahov, z čehož plyne úspěšnost rekonstrukce při sloučení zpráv z přijímače Strahov a Horská 49,5 %.

Při zahrnutí zpráv přijatých příjemcem Pankrác je hodnota rekonstruovaných zpráv 99,0 %. Příjemce Letňany doplnil počet přijatých zpráv na příjemcích Strahov, Horská a Letňany o 12 zpráv, které nebyly přijaty ani na jednom ze tří dalších příjemců.

5.3. Korekční algoritmy a koeficienty

Koeficienty, které ovlivňují přesnost výstupu, jsou parametry x , které jsou popsány v kapitole 4.3.1.

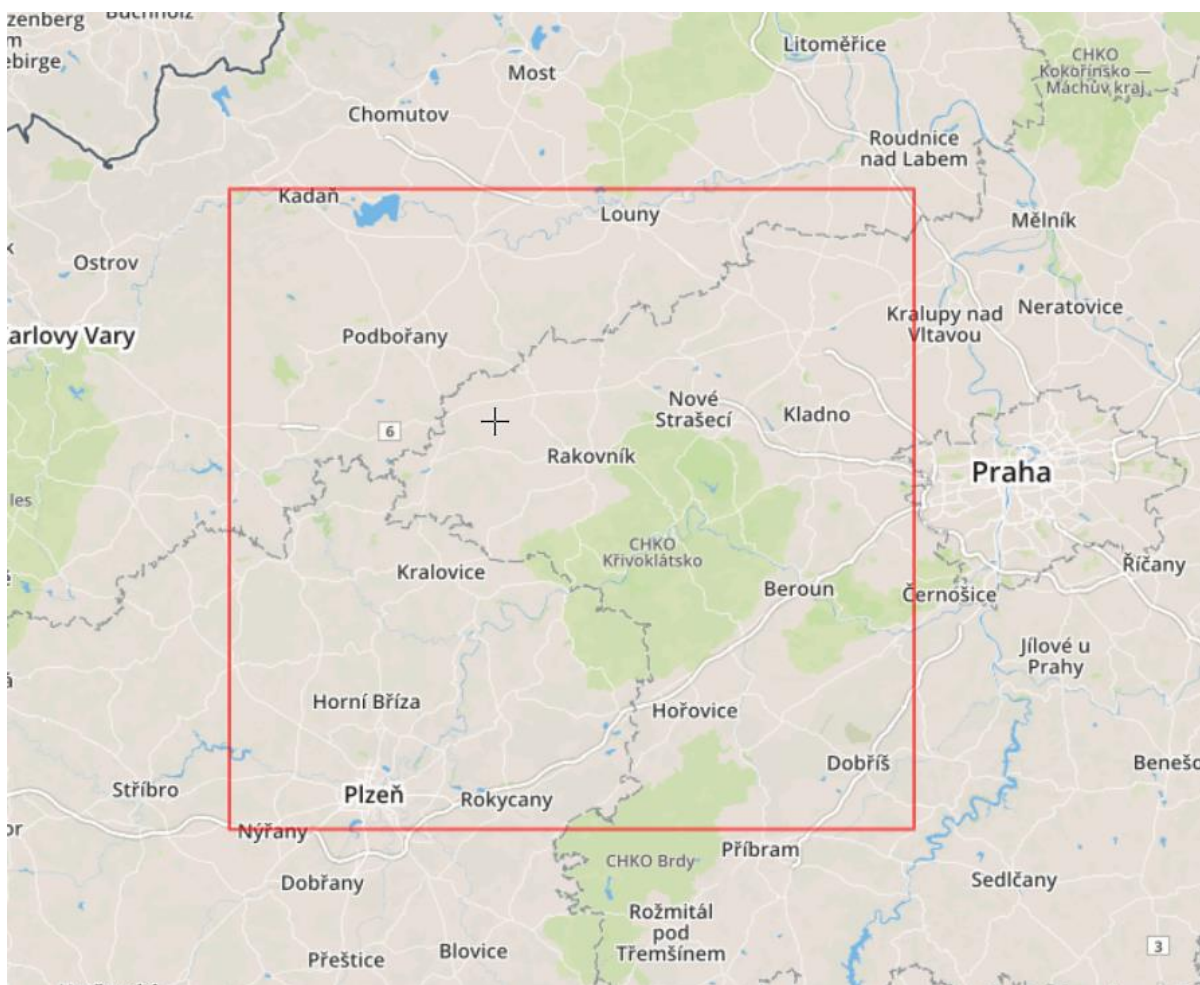
V případě nastavení příliš nízké hodnoty parametru x v cyklu pro vyhledávání odražených zpráv nebude nalezen skutečný počet odražených zpráv, což se promítne do finálních výstupů.

Stejně tak je tomu u parametru x při definování cyklu pro zjišťování zpráv duplicitních napříč všemi příjemci v systému. V případě příjmu zpráv v době, kdy je vysoká hustota provozu a v případě využití vyššího počtu příjemců je zapotřebí parametr x nastavit na vyšší hodnotu než při příjmu zpráv například na dvou příjemcích v době s nízkou hustotou provozu. V případě chybně nastaveného parametru x nebude zjištěn skutečný počet duplicitních zpráv a výstupem bude vyšší počet rekonstruovaných zpráv, než který vybraný odpovídač ve skutečnosti vyslal. V popisované situaci bude výstupem příliš vysoký počet rekonstruovaných zpráv od daného odpovídače.

6. Prezentace výsledků pro konkrétní místo vzdušného prostoru

Poslední kapitolou práce je prezentace výsledků rekonstruovaných zpráv po sloučení ze všech ADS-B přijímačů, které byly využity pro příjem zpráv dle DF kódu pro konkrétní místo vzdušného prostoru za účelem analýz zatížení odpovídačů letadel dotazy sekundárních radarů ve vybrané oblasti.

Pro prezentaci výsledků byla vybrána oblast, která je vyznačena na obrázku 23. Jedná se o plochu o rozměrech 75x75 km západně od Prahy. Vyznačená oblast je zvolena z toho důvodu, že se jedná o prostor, který je v teoretickém dosahu všech fakulních ADS-B přijímačů a jedná se tak o vzdušný prostor, ve kterém je možné s využitou infrastrukturou nejvěrohodněji rekonstruovat množství odpovědí emitovaných SSR odpovídači.



Obrázek 23: Oblast pro sledování aktivity SSR odpovídačů

Prvním krokem pro analýzu počtu zpráv vysílaných odpovídáči letadel pomocí technologie 1090 ES ve vybrané oblasti je filtrace ICAO adres letů, které prolétaly vybranou oblastí. Za tímto účelem byl vytvořen skript s názvem **Area_ID**, který je přílohou této práce. Vytvořený skript nedekóduje polohu pouze u vybraného letu jako tomu je u programu Decoder_vX, ale dekóduje polohu všech polohových zpráv od všech letů. Klíčovou výstupní proměnnou programu Area_ID je proměnná ID_area. V případě, že dekódovaná poloha spadá do nadefinované oblasti do proměnné ID_area program vypíše do prvního sloupce ICAO adresu daného letu. Do druhého sloupce program, vypíše index zprávy z původního datového souboru viz obrázek 24. Právě index polohové zprávy od vybraného letu je klíčový pro další postup.

Příkladem je analýza letu v definované zóně s ICAO adresou odpovídáče 3C6488. První polohová zpráva splňující podmínku výskytu v oblasti je zpráva s indexem 3633519 viz obrázek 24.

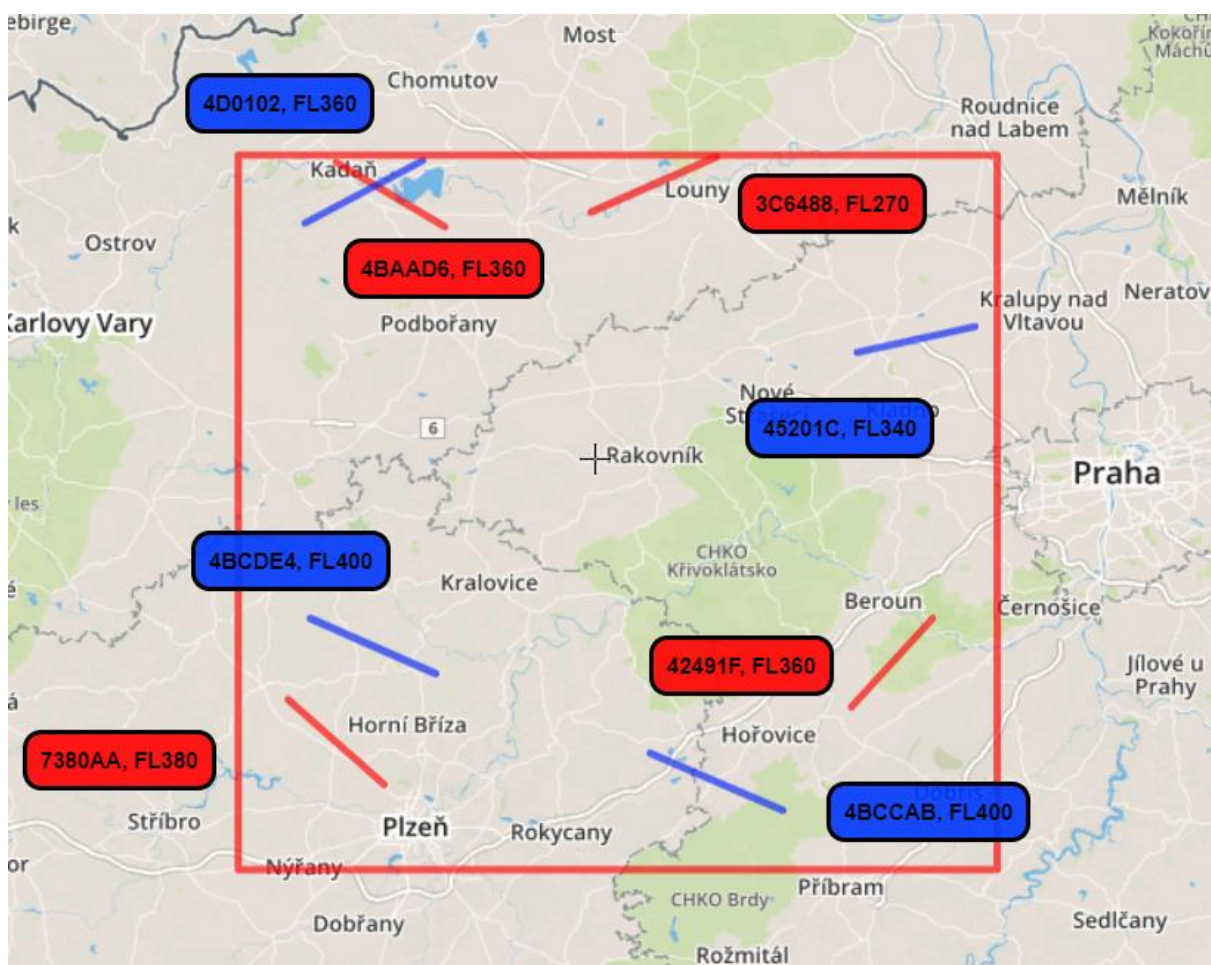
| | | |
|------|--------|---------|
| 5753 | 60084D | 3631235 |
| 5754 | 60084D | 3631396 |
| 5755 | 8005F3 | 3632218 |
| 5756 | 3C6488 | 3633519 |
| 5757 | 3C6488 | 3633571 |
| 5758 | 60084D | 3634020 |
| 5759 | 60084D | 3634134 |
| 5760 | 60084D | 3634386 |

Obrázek 24: Zjišťování indexu zprávy v definované oblasti od vybraného letu

Zjištěný index je následně využit při detailním rozboru letu pomocí programu Decoder_vX. Číslo indexu musí být doplněno do skriptu při definování proměnné i v cyklu pro dekódování polohy, výšky a dopočítání času vyslání zprávy odpovídáčem u zpráv se známou polohou. Cyklus probíhá od zjištěné hodnoty indexu do hodnoty parametru n. Parametr n musí být přenastaven na hodnotu $3633519 + 302000$. Hodnota 302000 odpovídá počtu zpráv z výchozího datového souboru pro analyzování letu 3C6488 po dobu 60 sekund. Po popsáních úpravách parametrů ve skriptu Decoder_vX lze analyzovat vybraný let po dobu 60 sekund v nadefinované oblasti.

Pro analýzu zatížení odpovídáčů letadel bylo vybráno celkově 8 letů prolétajících zvolenou oblastí. Pro porovnání výsledků v závislosti na hustotě provozu byly vybrány 4 lety z nočního provozu a 4 lety z provozu denního. Lety byly vybrány ze stejných datových souborů jako lety pro vyhodnocování úspěšnosti metody rekonstrukce zpráv v kapitole 5.

Trasy jednotlivých letů ve zvolené oblasti jsou vyznačeny na obrázku 25. Sledované lety ze záznamu z noční doby jsou vyznačeny modrou barvou. Denní lety jsou vyznačeny barvou červenou.



Obrázek 25: Trasy vybraných letů v definované oblasti vzdušného prostoru

V tabulce 22 níže jsou uvedeny hodnoty zpráv vyslaných odpovídající vybraných letů za časový úsek 60 sekund, který odpovídá trasám letů znázorněných na obrázku 25. Číslo letů v noční době jsou vyznačena modrým písmem. Číslo odpovídající letům v denní době jsou vyznačena písmem červeným. Jedná se o počty zpráv jednotlivých DF kódů, které byly rekonstruovány po sloučení dat ze všech čtyř přijímačů, které jsou k analýzám v této práci využity. V tabulce 23 jsou uvedeny pro porovnání četnosti vyslaných zpráv průměrné hodnoty vyslaných zpráv dle DF kódu zpráv pro denní a noční záznam.

Tabulka 22: Počet zpráv dle DF kódů u vybraných letů ve zvolené oblasti

| | Počet zpráv za 60 sekund po sloučení dat ze čtyř ADS-B přijímačů | | | | | | | |
|----------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| DF | 45201C | 3C6488 | 4BCCAB | 42491F | 4D0102 | 4BAAD6 | 4BCDE4 | 7380AA |
| 0 | 39 | 180 | 26 | 91 | 3 | 180 | 82 | 230 |
| 4 | 135 | 151 | 117 | 117 | 129 | 175 | 148 | 169 |
| 5 | 72 | 57 | 48 | 57 | 33 | 24 | 50 | 34 |
| 11 | 574 | 448 | 454 | 349 | 585 | 354 | 400 | 277 |
| 16 | 12 | 45 | 2 | 19 | 7 | 7 | 0 | 35 |
| 17 | 248 | 204 | 256 | 197 | 318 | 177 | 340 | 231 |
| 20 | 202 | 175 | 230 | 165 | 230 | 218 | 223 | 206 |
| 21 | 138 | 151 | 142 | 158 | 121 | 107 | 135 | 105 |
| Celkem: | 1420 | 1411 | 1275 | 1153 | 1426 | 1242 | 1378 | 1287 |

Tabulka 23: Porovnání průměrného počtu zpráv dle DF kódů vyslaných odpovídači letů v noční a denní době

| | Průměrný počet odpovědí vyslaných palubními odpovídači za 60 sekund | |
|----------------|---|-------------|
| DF | Noční lety | Denní lety |
| 0 | 38 | 170 |
| 4 | 132 | 153 |
| 5 | 51 | 43 |
| 11 | 503 | 357 |
| 16 | 5 | 27 |
| 17 | 291 | 202 |
| 20 | 221 | 191 |
| 21 | 134 | 130 |
| Celkem: | 1375 | 1273 |

Lety byly záměrně vybrány ve zvolené oblasti tak, aby bylo možné spárovat lety v noci a ve dne do dvojic ve stejných částech zvolené oblasti. Po spárování letů do čtyř dvojic dle pořadí v tabulce 22 lze z tabulky 23 zjistit, že v nočním provozu po sloučení dat ze všech přijímačů odpovídače letadel vyslaly v průměru o 7,9 % více odpovědí na dotazy radarů než odpovídače v denní době.

Analýza je však závislá na schopnosti příjmu jednotlivých přijímačů. Celkový nižší počet zpráv vyslaných odpovídači v denní době tak může být zkreslen neschopností příjmu přijímačů, která je způsobena vyšší hustotou provozu v denní době.

Výrazný rozdíl v počtu vysílaných zpráv pro denní a noční provoz je vidět u zpráv typu DF 0 a DF 16, které jsou určeny k Air-Air komunikaci proti srážkových systémů ACAS. Tento jev je pravděpodobně zapříčiněn nižší hustotou provozu v noční době, což je důvodem nižšího počtu zpráv typů DF 0 a DF 16 u letů v noční době.

Zajímavostí je nízký počet odpovědí přijatých od odpovídačů letů 4BCCAB a 42491F, který je v součtu o 14,2 % nižší, než počet odpovědí přijatých od odpovídačů letů 45201C a 3C6488 i přesto, že jsou všechny lety v teoretickém dosahu všech přijímačů a v přibližně stejné vzdálenosti do 100 km od systému přijímačů. Tato skutečnost může vypovídat o schopnostech přijímačů přijímat zprávy z jednotlivých částí vybrané oblasti.

7. Závěr

V úvodní kapitole této práce, která se věnuje sekundárním přehledovým radarům, byl popsán princip funkce a jednotlivé módy sekundárních radarů. Do detailu byla popsána struktura dotazů a odpovědí módu S vysílaných na kmitočtu 1090 MHz. Dále byl vypracován přehled a rozbor typů zpráv módu S vysílaných palubními odpovídači letadel. V jedné z částí úvodní kapitoly byly shrnuty legislativní požadavky na palubní odpovídače a v závěru kapitoly byl stručně vysvětlen princip funkce ADS-B systémů a jeho provázanost s palubními odpovídači sekundárních radarů.

Ve třetí kapitole práce je podrobně popsána metoda navržená za účelem rekonstrukce zpráv vysílaných odpovídači letadel v reálném prostředí na libovolném systému přijímačů schopných přijímat zprávy o frekvenci 1090 MHz. Postupně je v kapitole vysvětleno, jakým způsobem a za jakým účelem je zapotřebí dekodovat jednotlivé části zpráv. Část třetí kapitoly se věnuje způsobu výběru letadla při požadavku na co nejvyšší úspěšnost rekonstrukce zpráv. Dále je popsáno dekodování polohy letadla, výšky letadla a času příjmu zprávy přijímačem. Část kapitoly je věnována transformaci souřadnic přijímačů a polohy letadla do kartézského souřadného systému, která je nezbytně nutná pro požadovanou přesnost v dalších krocích metody.

V další části kapitoly je vysvětlen způsob přepočtu časů příjmu jednotlivých zpráv na přijímačích k jednomu konkrétnímu bodu, kterým byl zvolen palubní odpovídač letadla. Přepočet časů je pro rekonstrukci zpráv klíčový k určení tzv. duplicitních zpráv. Jedna konkrétní zpráva vyslaná odpovídačem je v reálném prostředí běžně zachycena na více přijímačích. Při rekonstrukci funkce odpovídačů pomocí zpráv přijatých větším počtem přijímačů je však nutné jednu vyslanou zprávu zachycenou na více přijímačích uvažovat pouze jednou a ostatní (duplicitní) zprávy do souboru rekonstruovaných zpráv nezahrnovat. Přepočet časů příjmu zpráv na čas vyslání palubním odpovídačem u polohových zpráv vychází ze znalosti rychlosti šíření elektromagnetického záření a dopočítávané šikmé vzdálenosti mezi přijímačem příjmu konkrétní zprávy a letadlem v čase vyslání totožné zprávy. Počet polohových zpráv je však omezený, což vedlo k vytvoření algoritmu pro dopočet času vyslání zpráv bez polohy. Navržený algoritmus využívá znalost časů příjmu jednotlivých zpráv a nejbližší známý dopočítaný čas vyslání předchozí přijaté zprávy.

Další zprávy, které je nutné do rekonstrukce nezahrnovat, jsou zprávy, které z důvodu odrazu od překážky byly přijaty jedním příjemcem vícekrát. Pomocí odražených zpráv je možné také vyhodnotit, zda jsou antény využívaných přijímačů umístěny v prostoru vhodně či nikoliv s ohledem na odraz zpráv od okolních překážek. Způsob identifikace odražených zpráv je popsán v závěru třetí kapitoly práce.

Čtvrtá kapitola práce se zabývá realizací navržené metody s využitím ADS-B přijímačů Fakulty dopravní ČVUT. K příjmu zpráv využitých pro rekonstrukci byly použity čtyři přijímače, jejichž parametry jsou popsány v úvodu kapitoly. Dále je popsáno vzájemné rozmístění jednotlivých přijímačů a formát vstupních dat, se kterým pracuje vytvořený výpočetní modul. Výpočetní modul pro zpracování a analýzu dat s názvem Decoder_Vx byl vytvořen v prostředí programu MATLAB. Naprogramovaný skript vychází z navržené metody pro rekonstrukci zpráv. Výstupem modulu jsou proměnné, ze kterých jsou dále vytvářeny statistiky. Ve čtvrté kapitole je podrobně popsán obsah výstupních proměnných, který slouží pro orientaci uživatele při zjišťování požadovaných parametrů.

Součástí naprogramovaného skriptu jsou pomocné funkce, které jsou nezbytně nutné pro správnou funkci skriptu. Součástí skriptu výpočetního modulu jsou taktéž definovatelné parametry, které ovlivňují finální výstupy. Parametry je při využití skriptu dalšími uživateli zapotřebí definovat dle potřeb a účelu využití programu.

Pátá kapitola se zabývá hodnocením úspěšnosti navržené metody. Úspěšnost je vyhodnocena na základě porovnání známého počtu odpovídači vysílaných zpráv DF 17 a vybraných Type kódů s počtem rekonstruovaných zpráv stejného typu. Rekonstrukce zpráv je závislá na přijímači přijatých zprávách. Z tohoto důvodu je část kapitoly taktéž věnována analýze parametrů charakterizujících výkonost jednotlivých přijímačů.

Za účelem zjištění závislosti úspěšnosti rekonstrukce na hustotě provozu je vyhodnocení realizováno na datových záznamech z noční a denní doby. První datový záznam byl vybrán z noční doby se zahájením ve 3:00. Postupně bylo analyzováno sedm letů a byla popsána závislost mezi vzdáleností jednotlivých letů a procentem úspěšně rekonstruovaných zpráv. Při analýze datového záznamu z noční doby byla úspěšnost rekonstrukce u letů do vzdálenosti 150 km od systémů přijímačů nad 80 %. Při požadavku na rekonstrukci nad hranicí 90 % musí být uvažovány lety do vzdálenosti maximálně 100 km od systému přijímačů.

Nejnižší úspěšnost v příjmu zpráv od vybraných letů byla zaznamenána na přijímači Horská a to 26,9 %. Je zapotřebí dodat, že úspěšnost příjmu zpráv je závislá na dosahu jednotlivých přijímačů a dosah přijímače Horská není dostatečný pro příjem zpráv od letů ve větší vzdálenosti, které byly součástí analýzy. Nízký dosah přijímače však může mít i pozitivní vliv na příjem zpráv. V případě příjmu zpráv od letů v blízkosti daného přijímače může přijímač s nízkým dosahem přijmout vyšší počet zpráv než přijímače s větším dosahem. Důvodem je zatížení takových přijímačů vyšším počtem zpráv od letů z širokého okolí. Příkladem může být let 45201C, od kterého přijímač Horská přijal 96,5 % zpráv, což je výrazně více než byly schopné přijmout ostatní přijímače. Díky tak vysokému počtu zpráv bylo možné u zmíněného letu celkově rekonstruovat 98,9 % zpráv. Nejvyšší průměrnou úspěšností příjmu se vyznačuje přijímač Strahov, který byl schopen přijmout v průměru 71,03 % zpráv z celkového počtu zpráv přijatých všemi přijímači.

Dalším parametrem, který je výstupem této práce, je vyhodnocení vhodnosti umístění antén jednotlivých přijímačů s ohledem na odrazy zpráv od okolních překážek. Nejnižší počet odražených zpráv byl zaznamenán na přijímači Letňany a to 0,7 % odražených zpráv z celkově přijatých zpráv. Naopak nejvyšší počet odražených zpráv (4,2 %) byl zaznamenán na přijímači Strahov, což může být zapříčiněno odrazem zpráv od vysokých budov v okolí antény přijímače. Stejný výsledek byl potvrzen při analýze stejných parametrů ze záznamu dat z denní doby (vyšší hustoty provozu). Posledním hodnoceným parametrem je úspěšnost rekonstrukce zpráv při postupném přidávání přijímačů do systému. Pomocí této analýzy je možné zjistit kolik přijímačů je potřeba pro rekonstrukci požadovaného počtu zpráv u vybraných letů.

Úspěšnost rekonstrukce zpráv při analýze datového záznamu z denního provozu je nižší, než je tomu u rekonstrukce při nižší hustotě provozu. U letů ve vzdálenosti do 100 km od systému přijímačů je úspěšnost rekonstrukce 86,4 % což je o 5,6 % nižší úspěšnost než při rekonstrukci dat za nízkého provozu. Důvodem pro nižší úspěšnost příjmu zpráv za hustého provozu může být několik.

Při příjmu zpráv od vysokého počtu odpovídačů může docházet k překrývání jednotlivých zpráv, což může následně vést k neúspěšnému přijetí zprávy. Dalším faktorem může být nedostatečná odlehlost přijímačů. V případě, že přijímače jsou umístěny ve vzájemné blízkosti, stejný jev se dá předpokládat i na dalších přijímačích systému.

Nejnižší úspěšnost příjmu zpráv byla zaznamenána na přijímači Horská, který byl schopen od sedmi vybraných letů za hustého provozu přijmout v průměru pouhých 4,6 % zpráv z celkově přijatých zpráv, a to navzdory tomu, že tři z vybraných letů byly v dosahu přijímače. Od letu 7380AA nepřijal přijímač Horská žádnou zprávu. Nejúspěšnějším přijímačem byl znovu přijímač Strahov s 56 % přijatých zpráv, což je ale o 15 % méně než při příjmu zpráv v nočních hodinách.

Poslední kapitolou práce je prezentace rekonstrukce zpráv dle DF kódů po sloučení dat ze všech přijímačů pro konkrétní oblast vzdušného prostoru. Cílem této kapitoly bylo analyzovat zatížení palubních odpovídačů dotazy sekundárních přehledových radarů v reálném prostoru. Oblast západně od Prahy byla zvolena z důvodu dobrého pokrytí přijímačů využívaných pro příjem zpráv, který je hlavním předpokladem pro co nejúspěšnější rekonstrukci.

Pro výběr letů, které prolétaly zvolenou oblastí, musel být vytvořen skript s názvem Area_ID, jehož výstupem jsou ICAO adresy odpovídačů letů prolétajících nadefinovanou oblastí. Následně byly vybrány 4 lety z nočního záznamu a 4 lety z denního záznamu, které byly podrobněji analyzovány pomocí sestavené metody.

Z porovnání letů v noční a denní době vyplývá, že odpovídače letů v denní době vyslaly v průměru o 7,9 % méně zpráv než odpovídače letů v noční době. Výsledek však může být znovu ovlivněn schopností příjmu zpráv přijímači v hustém provozu. Nejvyšší rozdíl četnosti zpráv při porovnání letů nočních a denních byl zaznamenán u zpráv typu DF0 a DF16. Zprávy těchto DF kódů jsou využívány k Air-Air komunikaci proti srážkovým systémům ACAS. Důvodem nižšího počtu těchto zpráv je tak pravděpodobně menší počet letadel v dané oblasti, se kterou souvisí méně intenzivní komunikace mezi odpovídači letadel.

Hlavním cílem této diplomové práce byl návrh metody a následné vytvoření nástroje pro rekonstrukci zpráv vysílaných sekundárními odpovídači letadel. Navržená metoda byla vyhodnocena na základě poskytnutých dat přijatých na ADS-B přijímačích Fakulty dopravní ČVUT. Při podrobných analýzách bylo zjištěno, do jaké míry je úspěšnost rekonstrukce zpráv závislá na hustotě provozu a dalších parametrech. Dále byla zjištěna úspěšnost příjmu jednotlivých přijímačů a četnost odražených zpráv, které mohou posloužit při optimalizaci sítě fakultních ADS-B přijímačů.

8. Použité zdroje

- [1] BURGR, Richard. Radiolokace: Základní poznatky z radiolokace, PSR, SSR, mód S [online]. s. 39 [cit. 2017-10-27].
- [2] EUROPEAN ORGANISATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION. Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes[online]. 2003, 35 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>
- [3] PLENINGER, Stanislav. SSR_v2.0_153. 2011. Studijní materiál pro studenty předmětu CNS systémy. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Dopravní.
- [4] ICAO. Secondary Surveillance Radar Mode S Advisory Circular: Circular 174-AN/110 [online]. 1983 [cit.2017-10-27]. Dostupné z: mid.gov.kz/images/storien/contents/174_en.pdf
- [5] UMLAUF, Lukáš. Aplikace MLAT metody nad sítí low-cost ADS-B přijímačů. Praha, 2015. Diplomová Práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Stanislav Pleninger.
- [6] Mode S Operational Overview. EUROCONTROL [online]. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <http://www.eurocontrol.int/articles/mode-s-operational-overview>
- [7] EUROCONTROL. Mode S Elementary Surveillance (ELS) Operations Manual [online]. In: . 2011 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/article/content/documents/nm/surveillance/surveillance-mode-s-els-ops-manual-ed-1.0-20110102.pdf>
- [8] ŘLP ČR, s.p., Letecká informační služba. PALUBNÍ PŘÍSTROJE, VYBAVENÍ A LETOVÁ DOKUMENTACE [online]. In: . 2013, s. 4 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: https://lis.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/g1-5.pdf
- [9] PLENINGER, Stanislav. Ads_v1.8.935: Automatic Dependent Surveillance. 2011. Učební materiál pro studenty předmětu CNS systémy. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Dopravní.
- [10] ADS-B, Check. In: Aviation Safety Magazine[online]. 2015 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <http://safemagazine.org/article/ads-b-check/>
- [11] ADS-B Decoding Guide. In: ADS-B Mode-S Decoding Guide [online]. 2015 [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://adsb-decode-guide.readthedocs.io/en/latest/>
- [12] Letecký přehledový systém Ústavu letecké dopravy, Fakulty dopravní ČVUT [online]. In: . [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <http://atm-lab.fd.cvut.cz/>

- [13] RTCA, Inc. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services - Broadcast (TIS-B). Washington, DC, 2009.
- [14] The Math Forum: PEOPLE LEARNING MATH TOGETHER [online]. 2001 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://mathforum.org/library/drmath/view/51832.html>
- [15] TĚSI, Simon. Nástroj na dekódování zpráv 1090ES. Praha, 2014. Bakalářská Práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Stanislav Pleninger.

9. Seznam příloh

Všechny přílohy jsou umístěny na přiloženém CD

Skript Decoder_vX.m

Skript Area_ID.m

Skript bin2hex.m

Skript crc_division4.m

Skript DF17_poloha.m

Skript DF17_TC9_18_vyska.m

Skript hex2bin.m

Skript WGS2ECEF.m