



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Jakub Šíma

Mapování přehledové infrastruktury analýzou příjmu  
SSR odpovědí od letadla

**Bakalářská práce**

**2016**



**K621..... Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Jakub Šíma**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – LED – Letecká doprava**

Název tématu (česky): **Mapování přehledové infrastruktury analýzou  
příjmu SSR odpovědí od letadel**

Název tématu (anglicky): Mapping of Surveillance Infrastructure by Analysis of SSR  
Replies from Aircraft

### **Zásady pro vypracování**

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

- Nalezení a specifikování možných metod, která umožní odhadnout co možná nejvíce parametrů pozemní přehledové infrastruktury ze záznamu odpovědí vyslaných palubním odpovídačem SSR v daném vzdušném prostoru.
- Naměření a příprava vstupních dat potřebných pro analýzu.
- Vytvoření softwarového řešení v prostředí Matlab.
- Zhodnocení a prezentování dosažených výsledků.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO Annex 10 Volume IV Surveillance and Collision Avoidance Systems  
EUROCAE ED-73E MOPS for SSR Mode S Transponder  
ICAO Doc 9871 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter

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

Datum zadání bakalářské práce: **25. října 2015**  
(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 bakalářské práce: **30. listopadu 2016**  
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

doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Jakub Síma  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 25. září 2016

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D., který mi poskytl bezpočet cenných informací, a pomohl mi dosáhnout dokončení této práce. Dále děkuji Tomášovi Liptákovi za mnoho užitečných rad a konzultací. V neposlední řadě děkuji své rodině, přítelkyni a přátelům za morální podporu, pomoc a trpělivost po celou dobu mého 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. 11. 2016

.....

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MAPOVÁNÍ PŘEHLEDOVÉ INFRASTRUKTURY ANALÝZOU PŘÍJMU  
SSR ODPOVĚDÍ OD LETADLA

bakalářská práce

srpen 2016

Jakub Šíma

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo navržení výpočetního algoritmu, jehož výsledky budou informovat o parametrech přehledové infrastruktury ve specifikované oblasti během časového intervalu. Hlavní část tvoří program, který mapuje přehledovou infrastrukturu na základě záznamu odpovědí vyslaným Mode S palubním odpovídačem. Tento program je vytvořen v prostředí MATLAB a poskytuje informace o počtu radarů komunikujících s letadlem a o periodách otáčení radarů.

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis was to develop a computer software that its results will inform about parameters of surveillance infrastructure band over a specified period. The main part is a program, that map surveillance infrastructure based on record of replies responded Mode S transponder. The program is based on Matlab platform and estimates information about number of radars that comunicate with aircraft and about size of radars rotation period.

## KLÍČOVÁ SLOVA

sekundární radar, mód S, SSR odpovídač, šířka svazku, radarové krytí, perioda otáčení radaru

## KEY WORDS

secondary radar, mode S, SSR transponder, lobe width, radar coverage, period of radar rotation

## OBSAH

Úvod .....	8
1 Vstupní data a informace .....	10
1.1 Sekundární radar – mód S.....	10
1.2 Obecný popis vstupních dat.....	11
1.3 Konkrétní popis vstupních dat.....	13
2 Metody zkoumání přehledové infrastruktury.....	16
2.1 Metoda využívající BDS registry .....	16
2.1.1 BDS kódy a BDS registry.....	16
2.1.2 Rozpoznání BDS registru v odpovědi .....	16
2.1.3 Princip mapování přehledové infrastruktury .....	18
2.2 Metoda pracující s časy příjmu zpráv .....	18
3 Naměření a příprava vstupních dat potřebných pro analýzu .....	20
3.1 Naměření a příprava vstupních dat více přijímači .....	21
3.1.1 Fúzování dat z přijímačů.....	22
3.2 Naměření vstupních dat jedním přijímačem .....	23
3.3 Příprava vstupních dat po jejich naměření .....	25
3.4 Úspěšnost naměření zpráv .....	25
4 Vytvoření softwarového řešení.....	27
4.1 Vývoj tvorby softwarového řešení .....	27
4.1.1 První verze programu .....	27
4.1.2 Programem zohledněné vlastnosti SSR komunikace módu S.....	28
4.2 Hlavní program softwarového řešení .....	29
4.2.1 Vstupní data hlavního programu .....	29
4.2.2 Matice všech vzdáleností.....	29
4.2.3 Uživatelské nastavení programu.....	30
4.2.3.1 Nastavení intervalu pro referenční prvek.....	30
4.2.3.2 Nastavení hodnoty periody hledaného řetězce.....	31
4.2.3.3 Nastavení velikosti okolí, ve kterém se hledá nový prvek řetězce .....	31

4.2.3.4	Nastavení šířky svazku .....	32
4.2.3.5	Nastavení minimální délky řetězců pro jejich vypsání.....	33
4.2.3.6	Nastavení maximálního počtu prvků chybějících v řadě .....	33
4.2.4	Princip hledání kostry řetězce .....	34
4.2.5	Analyzování nalezeného řetězce a jeho schvalování .....	35
4.2.6	Střední hodnota periody .....	36
4.2.7	Eliminace paralelních řetězců .....	36
4.2.8	Výstupy hlavního programu .....	36
4.2.8.1	Primární výstup – matice RMCF.....	37
4.2.8.2	Sekundární výstup – matice CCM a HM.....	38
4.3	Matice FIDiNDM .....	38
4.4	Sekundární části softwarového řešení .....	40
4.4.1	Grafické znázornění odchylek zpráv .....	40
4.4.2	Rozšíření koster řetězců .....	41
5	Zhodnocení a prezentování dosažených výsledků.....	42
5.1	Prezentace výstupních dat hlavního programu .....	42
5.1.1	Nastavení programu .....	42
5.1.2	Porovnání výsledků .....	43
5.1.3	Celistvost řetězců .....	46
5.1.4	Počet přiřazených zpráv ze vstupního vektoru k určitým radarům.....	46
5.1.5	Porovnání dosažených výsledků s jinými dostupnými studii.....	48
5.1.6	Sekundární analýza výstupních dat hlavního programu.....	49
5.2	Analýza dat matic FIDiNDM.....	50
6	Závěr .....	52
	Seznam tabulek .....	53
	Seznam obrázků.....	54
	Zdroje a Literatura .....	55



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:

ACAS	Airborne Collision Avoidance Systém / Palubní protisrážkový systém
ADS	Automatic Dependent Surveillance/ Automatické závislé sledování
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance - Broadcast / Automatické závislé sledování - vysílání
BDS	B-Comm Data Selector
Comm-A	Vzestupný 112bitový dotaz
Comm-B	Sestupná 112bitová opověď
DF	Downlink Format / Sestupný formát
ŘLP ČR	Řízení letového provozu
SPI	Special position identification pulse / Speciální poziční identifikační impuls
SSR	Secondary Surveillance Radar / Sekundární přehledový radar
TCAS	Traffic Collision Avoidance Systém / Protisrážkový systém

# Úvod

Letecká doprava je nejbezpečnějším druhem dopravy a o toto prvenství se zaslouhuje mnoho faktorů. Jedním z nich je i využívání kooperativních přehledových systémů pro řízení letového provozu. Tyto technologie dnes generují plno informací, které jsou poskytovány jak řídicím letového provozu za účelem bezpečného koordinování letů, tak i posádce letadel pro lepší přehled o okolním provozu.

Problém nastává při nadměrném rozšiřování kooperativních systémů v oblastech s hustým provozem, za kterou lze označit i evropský kontinent. Toto rozšiřování je způsobené snahou získávat více informací o hustém provozu. To ale klade na přístroje zvýšené nároky při přenášení stále většího množství informací. Přístroje mají omezenou kapacitu přijímání a vysílání dat, a její překročení je příčinou zatížení rádiových pásem a palubních odpovídačů. Toto zatížení znamená hrozbu snížení bezpečnosti letecké dopravy, proto je důležité, aby toto téma bylo předmětem výzkumů. Z této problematiky vychází i zadání mé bakalářské práce. Zabývá se komunikací jednoho z kooperujících systémů. Jedná se o palubní odpovídač Mode S, jehož vysílané odpovědi na dotazy SSR tvoří vstupní data celé práce.

Cílem této bakalářské práce bylo navržení počítačového softwaru, jehož výsledky budou odhadovat parametry přehledové infrastruktury, jíž tvoří sekundární radary. Hlavní část řešení tvoří program, který se snaží z časů příjmu odpovědí vyslaných palubním odpovídačem zjistit, v kolikanásobném krytí radarů se letadlo během letu nacházelo. Dále jeho výstupem jsou hodnoty period otáčení antén radarů, jež s letadlem komunikovaly. Výstupem druhotné části řešení jsou informace o systému dotazování radarů.

První kapitola práce je zaměřena na rozbor přijatých zpráv z palubního odpovídače, jež tvoří vstupní data. Je zde popis zpráv jak v obecné rovině, jako např. struktura a složení signálu zpráv, tak jsou zde popsány informace o konkrétních naměřených záznamech dat, jako je jejich délka, počet zpráv které obsahují apod. Určí se tu také ty zprávy, které jsou pro další práci podstatné.

Ve druhé kapitole jsou rozebrány metody, které jsme se snažili aplikovat při analýze a zkoumání přehledové infrastruktury, za účelem nalézt co nejvíce jejich parametrů. Metody jsou celkem dvě a jsou založeny na různých úvahách řešení úkolu. Jedna zkoumá složení signálu zpráv a druhá využívá zaznamenané časy příjmu zpráv. Druhá zmíněná metoda je aplikována v praktické části práce.

Třetí kapitola je věnována způsobům, jakými jsou vstupní data naměřena a připravena pro analýzu. K dispozici jsou dvě metody, jak vstupní data získat. Jsou zde vysvětleny jejich kladné

i záporné stránky. Pro naměření dat analyzovaných v této práci byla využita jen jedna z těchto metod.

Ve čtvrté kapitole je popsáno softwarové řešení zadaného úkolu. Celé řešení je vytvořeno v prostředí MATLAB. Je zde zmíněn vývoj, díky jemuž jsem se dopracoval až k finální podobě. Věnuji se tu hlavnímu programu, který má možnosti nastavení jak z pohledu potřeby uživatele, tak i z pohledu parametrů infrastruktury. Zmiňuji se i o samotném principu, jakým hlavní program hledá řešení.

V páté kapitole hodnotím dosažené výsledky generované jak hlavním programem, tak sekundárními programy, které pomáhají při mapování přehledové infrastruktury, ať už dalším rozborem výstupních dat z hlavního programu, nebo také analýzou vstupních dat, která využívá hlavní program.

# 1 Vstupní data a informace

V této kapitole bude popsána samotná podstata vstupních dat a jejich podoba, ve které jsou vkládány do hlavního programu a také do některých vedlejších programů. O naměření a přípravě vstupních dat potřebných pro analýzu pojednává kapitola 3.

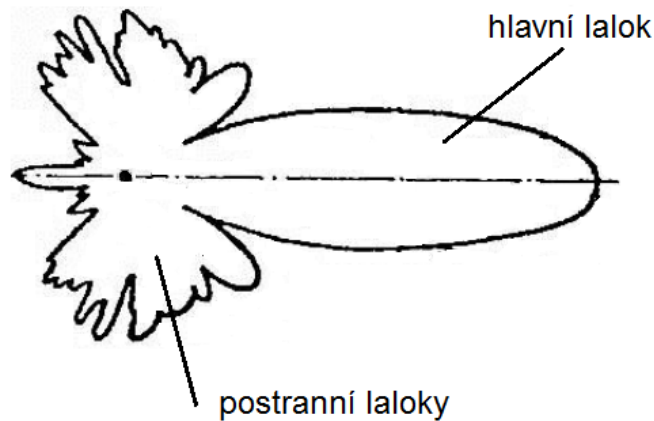
## 1.1 Sekundární radar – mód S

Předmětem zkoumání této práce je přehledová infrastruktura sestávající ze sekundárních radarů. Jedná se tedy o aktivní systém tvořený pozemní jednotkou (radar) a kooperujícím cílem (letadlo). Dotazy pozemní jednotky jsou vysílány na frekvenci 1030 MHz. Cíl zpracovává dotaz pomocí palubního SSR odpovídače (transpondér), který po vyhodnocení vysílá odpověď na frekvenci 1090 MHz. Všechny parametry komunikace, tj. kódování, frekvence, formát odpovědi aj., zajišťuje norma ICAO Annex 10 Volume IV. Existuje více dotazovacích formátů a módů SSR, které jsou v této normě definovány. Dnes se v civilním letectví využívá mód A, C a S. [9]

Pro další práci budou klíčové pouze zprávy módu S, které se od zbylých dvou zmíněných módů odlišují tím, že dotazy jsou určeny a cíleny pouze jednomu letadlu, na jehož palubě transpondér vygeneruje odpověď a vyšle ji zpět. U ostatních letounů v okolním vzdušném prostoru se vyslání odpovědi zamezuje.

Cílené dotazování módu S je zajištěno tím, že anténní vyzařovací diagram má kromě hlavního laloku i tzv. postranní laloky. Schéma je na obrázku 1.1. Pokud se letadlo nachází v postranních lalocích, je zamezeno generování odpovědi z letadla. Pokud se však letadlo nalézá v hlavním laloku, pak je v jeho palubním odpovídači vybuzena všesměrová odpověď. Jedním z podstatných údajů o radaru je pro tuto práci právě šířka hlavního laloku antény. Dalším je pak perioda otáčení této antény. Pomocí těchto dvou údajů lze totiž odvodit a vypočítat dobu ozáření letadla hlavním lalokem, při jeho přechodu během otáčení antény. Vztah je znázorněn v rovnici [1.1]. Je to důležitý údaj, který je součástí nejen nastavení hlavního programu této práce.

$$\text{doba ozáření lalokem [s]} = \frac{\text{šířka laloku [}^\circ\text{]}}{\frac{360 [^\circ]}{\text{perioda [s]}}} \quad [1.1]$$



Obrázek 1.1 Schéma laloků antény SSR.

## 1.2 Obecný popis vstupních dat

Nyní lze obecně popsat vstupní data jako zprávy vyslané palubním odpovídačem SSR v módu S z letadla na cílené dotazy od radarů. Tyto dotazy nemáme při analýze k dispozici. Přesný počet radarů komunikujících s letounem také není znám, stejně tak jako jejich konkrétní specifikace a parametry (např. perioda otáčení radarové antény).

Z pohledu délky zpráv rozeznáváme dva typy a to krátký tvořený 56 bity a dlouhý tvořený 112 bity. U každé ze zpráv známe všechny její bity. Další údaj, který máme o zprávách k dispozici, je čas jejich zachycení na přijímači, a je pro další práci stěžejní. Tyto informace o čase příjmu jednotlivých zpráv jsou podrobeny přepočítávání a zpracování, a proto je zde možnost jisté chyby. Ovšem velikost by neměla výrazně zatěžovat a ovlivňovat výsledky práce. Dále lze identifikovat jeden z 25 formátů sestupného spoje (DF), kterých zpráva může nabývat. Každý z formátů má svůj zvláštní účel. Pro mou práci mám k dispozici jen některé používané v současnosti v civilním letectví. Jsou jimi:

- DF00: odpovědi krátkého dosahu na dotazy systémů ACAS nebo TCAS mezi letouny, komunikace vzduch-vzduch.
- DF04: odpovědi nesoucí přehledové (surveillance) informace o výšce letounu, krátký typ zprávy (56 bitů).
- DF05: odpovědi nesoucí přehledové (surveillance) informace o identitě letounu, krátký typ zprávy (56 bitů).
- DF11: odpovědi na všeobecný dotaz, anebo jde o zprávu označovanou jako Acquisition squitter.
- DF16: odpovědi dlouhého dosahu na dotazy systému ACAS nebo TCAS mezi letouny, komunikace vzduch-vzduch.
- DF17: Extended squitter, rozšířená odpověď na všeobecný dotaz.

- DF20: dlouhá komunikační zpráva Comm-B (112 bitů), nese kromě identických informací jako zpráva DF4 navíc i datové pole, do kterého je kódován příslušný BDS registr.
- DF21: dlouhá komunikační zpráva Comm-B (112 bitů), nese kromě identických informací jako zpráva DF5 navíc i datové pole, do kterého je kódován příslušný BDS registr.

Cílem práce je odhalení parametrů SSR infrastruktury, proto z těchto všech dostupných formátů zpráv je pro další analýzu možno použít pouze DF04, DF05, DF20 a DF21, neboť jen tyto druhy jsou využívány SSR pro komunikaci s letadly. Ostatní typy zpráv program nevyužívá jako vstupní data. Pro další potřeby práce bych se proto více zaměřil a hlouběji popsal strukturu formátů DF04, DF05, DF20 a DF21. Struktury jsou znázorněny v následujících tabulkách 1.1-1.4, kde jsou formáty rozděleny na jednotlivá menší pole.

Tabulka 1.1 Struktura zprávy formátu DF04.

DF04	typ pole	DF	FS	DR	UM	AC	AP	Celkem
	velikost [bit]	5	3	5	6	13	24	56

Tabulka 1.2 Struktura zprávy formátu DF05.

DF05	typ pole	DF	FS	DR	UM	ID	AP	Celkem
	velikost [bit]	5	3	5	6	13	24	56

Tabulka 1.3 Struktura zprávy formátu DF20.

DF20	typ pole	DF	FS	DR	UM	AC	MB	AP	Celkem
	velikost [bit]	5	3	5	6	13	56	24	112

Tabulka 1.4 Struktura zprávy formátu DF21.

DF21	typ pole	DF	FS	DR	UM	ID	MB	AP	Celkem
	velikost [bit]	5	3	5	6	13	56	24	112

AC – Altitude code / Kód nadmořské výšky: Toto 13bitové (20-32) pole musí obsahovat kód nadmořské výšky, dle určitých pravidel uvedených v [1].

AP – Address/parity / Adresně paritní pole: Toto 24bitové (33-56 nebo 89-112) pole musí být uvedeno ve všech vzestupných a sestupných formátech zpráv s výjimkou only-all-call odpovědí módu S (formát DF11). [1]

DF – Downlink format / Formát sestupného spoje: Toto pole sestupného spoje (o 5 bitech s výjimkou formátu 24, kde má jen 2 bity) slouží k popisu formátu sestupného spoje ve všech mód S odpovědích a jeho kódování je uvedeno v [1].

DR – Downlink request / Požadavek sestupného spoje: Toto 5bitové (9-13) pole sestupného spoje musí obsahovat požadavky na informace sestupného spoje, jako jsou: signalizace žádného požadavku na sestupný spoj; žádost o vyslání zprávy Comm-B aj. [1]

FS – Flight status / Stav letu: Toto 3bitové (6-8) pole sestupného spoje musí obsahovat informace o stavu letu: zda je vysílán nouzový signál, nebo SPI impuls; vysílání informací, zda je letoun na zemi či ve vzduchu. [1]

ID – Identity / Identita (kód módu A): Toto 13bitové (20-32) pole musí obsahovat identifikační kód letounu v souladu se vzorem pro mód A odpovědi popsáném v [1]. Počínaje 20. bitem je přesně určena jejich sekvence popsána v [1].

MB – Message, Comm-B / Zpráva, Comm-B: Toto 56bitové (33-88) pole sestupného spoje musí být použito pro přenos zprávy datového spoje.

UM – Utility message: Toto 6bitové (14-19) pole sestupného spoje musí obsahovat informace o stavu komunikačních transpondérů, jak je specifikováno v [1]. Je rozděleno na dvě podpole IIS a IDS:

IIS: Je 4bitové (14-17) identifikační podpole dotazovače hlásící identifikátor dotazovače, pro nějž je vyhrazena vícemístná komunikace.

IDS: Je 2bitové (18, 19) identifikační podpole hlásící typ rezervace vytvořené dotazovačem identifikovaným v IIS podpoli. [1]

### 1.3 Konkrétní popis vstupních dat

Pokud se již konkrétně zaměříme na data, která poskytujeme přímo hlavnímu programu, jedná se o vektor, jehož složky jsou časy příjmu jednotlivých zpráv formátu DF4, DF5, DF20 a DF21. Máme k dispozici data ze čtyř různých letů, jejichž trajektorie jsou znázorněny na obrázku 1.2. Z něho je patrné, že snaha získat data z jedné oblasti byla úspěšná.

Označení letu, délka záznamu, počet zpráv zkoumaných formátů a průměrná hodnota zachycených zpráv za jednu sekundu všech letů se nacházejí v tabulce 1.5. Můžeme zde vidět, že záznamy jsou různě dlouhé, ale dost dlouhé aby splnily jednu podmínku, být delší než tři minuty.

Tabulka 1.5 Rozbor počtu zpráv před úpravou délky záznamu.

Označení letu	Délka záznamu [s]	Počet zpráv v záznamu	Počet zpráv za sekundu
89616C	196,00	1603	8,18
4B8435	202,00	1500	7,43
4BAAD3	282,00	2367	8,39
738052	300,00	2487	8,29

Pro analýzu dat využíváme záznamy, které jsou dlouhé přibližně 180 sekund. Důvod stanovení této hranice je blíže popsán v kapitole 3. Proto je nutné záznamy zkrátit na požadovanou délku. U vše čtyřech záznamů je toho docíleno tak, že se odebrala požadovaná délka dat z obou stran záznamu. Hodnoty nově vzniklých záznamů jsou v tabulce 1.6. Pro jednoduchou kontrolu můžeme porovnat průměrné hodnoty zachycených zpráv za sekundu celých a upravených dat z tabulek 1.5 a 1.6. Je vidět, že zde nedochází v žádným výrazným výkyvům hodnot.

Tabulka 1.6 Rozbor počtu zpráv po úpravě délky záznamu.

Označení letu	Délka záznamu [s]	Počet zpráv v záznamu	Počet zpráv za sekundu
89616C	181	1463	8,08
4B8435	180	1334	7,41
4BAAD3	181	1507	8,33
738052	181	1513	8,35

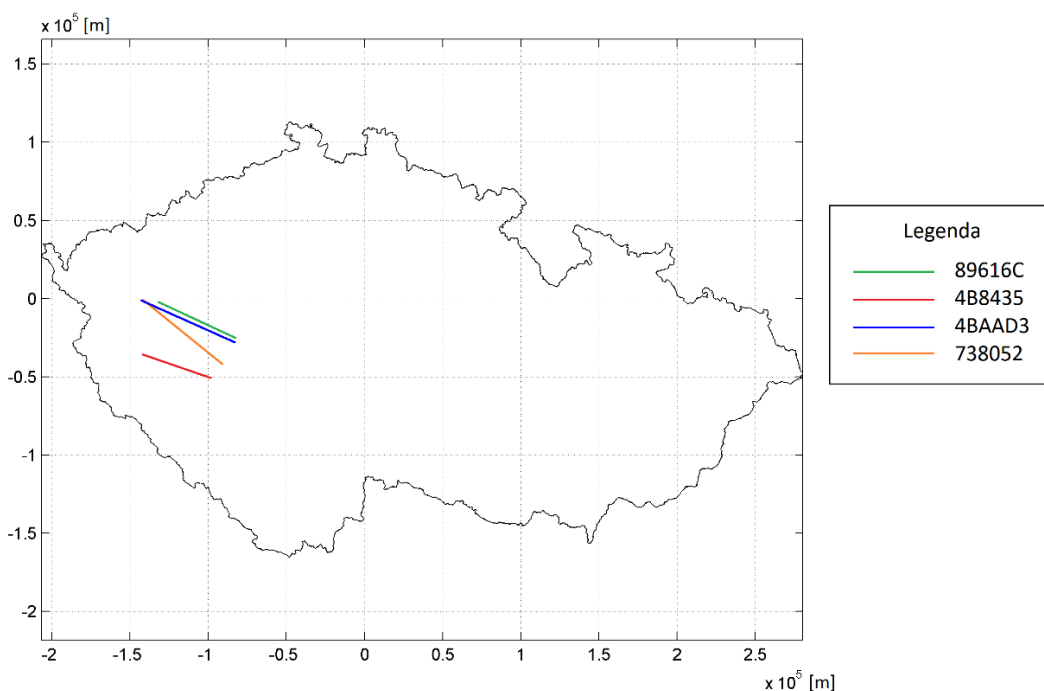
Pro další práci a možnost porovnání jsou v tabulce 1.7 uvedeny počty zpráv jednotlivých formátů všech čtyř letů.

Tabulka 1.7 Rozbor počtu zpráv dle formátu sestupného spoje.

Formát / Let	89616C	4B8435	4BAAD3	738052
DF04	496	430	521	529
DF05	147	112	135	140
DF20	491	489	506	520
DF21	329	303	345	324
Celkem	1463	1334	1507	1513



Stanovili jsme si předpoklad – lety ze stejné oblasti by měly být dotazovány stejným počtem radarů se stejnými parametry; dle něho jsme se snažili získat vstupní data. Předpokládaný výsledek – abychom z obou sad vstupních dat dostali stejné výsledky; je v tomto případě ohrožen z několika důvodů. Jedním z nich je, že trajektorie nejsou zcela totožné. Dále výsledky závisí na tom, že se aktivita radarů během jednotlivých letů může lišit. Jestliže sběr dat jednotlivých letů probíhá v jiný okamžik, tak zřejmě i za rozdílné hustoty okolního provozu. Pokud je hustota provozu vyšší, pak radary mohou být více vytíženy a tím hrozí ztráta data vlivem překrytí více zpráv najednou. Radary jsou nuceny opakovat dotazy, a tím zas letadlo musí vybudit více zpráv. Všechny sady vstupních dat, které máme k dispozici pro tuto práci, byly naměřeny v noci za minimálního okolního provozu. Pomocí dat z tabulek 1.6 a 1.7 lze usoudit, že jak celkový počet zpráv, tak rozložení zpráv v jednotlivých formátech u všech letů nikterak výrazně nekolísá. Proto lze o všech sadách vstupních dat obecně prohlásit, že jsou nezkršené a relevantní. Další rozbor vstupních dat je v kapitole 3.



Obrázek 1.2 Zobrazení trajektorií letů, jejichž data jsou podrobena analýze.

## 2 Metody zkoumání přehledové infrastruktury

V této kapitole se zaměřuji na popis dvou metod, které jsem se snažil aplikovat při hledání úspěšného řešení zadaného úkolu. Jejich pohledy na problematiku úkolu jsou rozdílné a zakládají se na zcela jiných základech.

### 2.1 Metoda využívající BDS registry

Tato metoda nevznikla hned na počátku a nevychází z první úvahy, jak celou problematiku řešit. Vznikla až na základě neúspěchu první aplikované metody, z níž vycházely neuspokojivé výsledky. Tento neúspěch se stal impulzem pro změnu pohledu na celou věc a začít hledat jiný způsob, kterým by se mohlo dojít k lepším výsledkům. Pokusil jsem se hledat řešení ve zprávách jako takových. Metoda se opírá o heuristický model, jehož základem je znalost struktury odpovědí a kódování (způsob zapisování) informacích vložených do odpovědí.

#### 2.1.1 BDS kódy a BDS registry

V předchozí kapitole je znázorněná a popsána struktura zpráv palubního odpovídače SSR, které jsou k dispozici jako vstupní data pro analýzu přehledové infrastruktury. Pro potřeby této metody se stačí zaměřit na dlouhé 112bitové Comm-B odpovědi formátů DF20 a DF21. Je to z důvodu, že obsahují pole MB. Toto pole má ve vyslané odpovědi k dispozici bity 33-88, celkem tedy 56 bitů nesoucí zprávy datového spoje, tzn. informace o letounu vyžádané pozemním zařízením. Zde je třeba rozlišit dva pojmy:

- BDS registry – jsou konkrétní informace obsažené v MB poli odpovědi vyslané palubním odpovídačem.
- BDS kódy – jsou 8bitové kódy v přehledovém či Comm-A radarovém dotazování určující BDS registr, který má být přenesen v MB poli vyvolané Comm-B odpovědi.

Kód BDS je vyjádřený ve dvou skupinách, kde každá z nich má po 4 bitech. Jejich přesné umístění v dotazu vyslaném radarem je pro tuto práci nepodstatná informace, jelikož tyto dotazy nejsou k dispozici. Podstatnou informací pro tento model ovšem je, zda se objeví kód BDS registru i někde v odpovědi.

#### 2.1.2 Rozpoznání BDS registru v odpovědi

Uvažovali jsme dvě možnosti, jak získat informaci o tom, jaký z BDS registrů je uložen v konkrétní odpovědi.

První možnost se zakládá na úvaze, že by měl být BDS kód obsažen v každé odpovědi a to z důvodu, aby radar dokázal jednoduše identifikovat a dekodovat informace v této přijaté

odpovědi. V [2] je popsána struktura jednotlivých BDS registrů obsažených v MB poli bit po bitu, tak jak je to na obrázku 2.1. Je na něm zobrazeno prvních 14 bitů MB pole, které nese BDS registr 10<sub>16</sub>. Lze vidět, že na pozici prvních osmi bitů se objevuje BDS kód. Z toho vyplývá, že pro zjištění, který z BDS registrů se nachází ve zkoumané odpovědi, stačí přepočítat prvních osm bitů jejího MB pole z binární do hexadecimální soustavy.

**Table A-2-16. BDS code 1,0 — Data link capability report  
MB FIELD**

1	MSB	BDS Code 1,0
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9	LSB	
9	Continuation flag (see 9)	
10	RESERVED	
11		
12		
13		
14		

Obrázek 2.1 Struktura MB pole. [2]

Bohužel pravidlem, že v prvních osmi bitech MB pole najdeme do binární soustavy převedený hexadecimální kód daného registru, se řídí pouze BDS registry s označením 10<sub>16</sub>, 20<sub>16</sub> a 30<sub>16</sub>. U ostatních registrů toto pravidlo neplatí a v [2] není popsáno ani to, že by se označení skrývalo v jiné části MB poli odpovědi. Možnost rozpoznat pouze tři registry bylo pro metodu nedostačující, proto bylo třeba najít další postup, jak eventuálně BDS registry rozpoznat.

Druhá možnost, jak zjistit, který BDS registr je v MB poli odpovědi, se zakládá na analyzování a rozpoznávání samotných dat uložených v BDS registru.

Obecně lze algoritmus rozpoznávání popsat tak, že by se zkoumaly přímo hodnoty v MB poli a srovnávaly by se s hodnotami, které by se tam předpokládaly na základě znalostí struktury registru z [2].

Pro lepší představu je zde uveden konkrétní příklad. Existuje typ BDS registru, který má v sobě zaznamenané informace o meteorologických podmínkách, v nichž se dotazovaný letoun nachází. Je možné zjistit, v jakých bitech MB pole se má nacházet například teplota okolních vzduchu. Ta by se měla pohybovat v určitém intervalu, např. 50°C až -50°C. Pokud by při analýze přijaté odpovědi byla na místě, kde má být informace o venkovní teplotě, hodnota např. 800, pak by se určitě nejednalo o BDS registr nesoucí informace o meteorologických

podmínkách. Takto by se kontrolovalo a porovnávalo co nejvíce údajů v každé zprávě, aby se s co největší pravděpodobností rozpoznalo co nejvíce BDS registrů.

### **2.1.3 Princip mapování přehledové infrastruktury**

Ačkoli se v rámci práce na tomto projektu nepodařilo vytvořit postup pro jednoznačné rozlišování a určování BDS registrů obsažených v MB poli odpovědi, není vyloučeno, že se to v budoucnu podaří. Proto je zde zmíněna i úvaha o konečné fázi této metody.

Za předpokladu, že by bylo možné rozpoznávat BDS registr odpověď v MB polích odpovědí, snažili bychom se vždy v záznamu zpráv, resp. v registrech, hledat určitý periodický vzor, který by se měl v záznamu objevit. Předpoklad by byl takový, že radar by se měl letounu dotazovat na některé BDS registry stále, při každé otáčce, a na některé zas jen občas. Pokud by se takto podařilo najít ve zprávách jisté vzorce, dala by se poté zjistit perioda jednotlivých radarů komunikujících s letounem. Dále bychom se snažili zkoumat systém dotazování radarů z transformace nalezených vzorců v závislosti na čase.

Heuristiky popsané v úvodu kapitoly, které jsou potřebné pro algoritmus, nebylo možné zcela s jistotou určit, proto jsme byli nuceni tuto metodu opustit. Neznamená to, že by byla zcela nesprávná, je třeba lépe využít informace o struktuře BDS registrů a kódování informací uložených v nich.

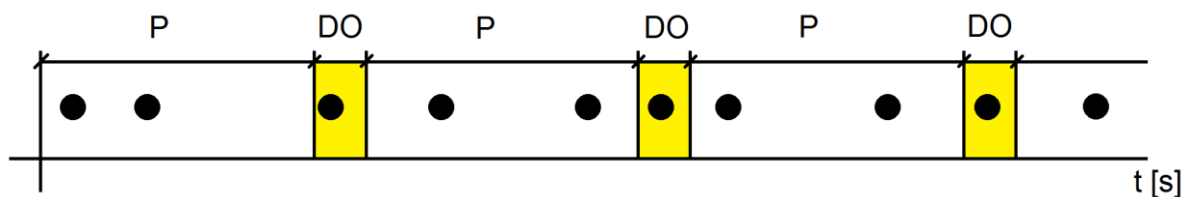
## **2.2 Metoda pracující s časy příjmu zpráv**

Na rozdíl od předchozí, se tato metoda vůbec nezabývá složením a strukturou odpovědí, se kterou, jak se ukázalo, je složité vytvořit úspěšně fungující algoritmus. Jediné co metoda využívá jako vstupní data, jsou údaje o čase příjmu odpovědí z palubního odpovídače letounu. Její základní myšlenkou je porovnávání těchto jednotlivých časů mezi sebou a hledání v nich od sebe stejně vzdálených zpráv. Tutu metodu jsme zvolili pro řešení zadaného úkolu této práce.

Tato metoda staví na znalosti principu cíleného dotazování SSR v módu S. Když je letoun radarem dotázán, pak zpracování dotazu, generování a vyslání odpovědi trvá palubnímu odpovídači 128  $\mu\text{s}$ . [9] To je velice malé zpoždění, lze to demonstrovat na velikosti celkové doby ozáření letounu anténním lalokem. Ta při pěti sekundové periodě otáčení nabývá hodnot  $3,3 \cdot 10^{-2}$  s. Tzn. více jak 250krát větší hodnoty než zpoždění vyslané odpovědi. Pokud tedy komunikace radaru a letounu probíhá pouze při ozáření letounu hlavním lalokem radarové antény, pak se tato komunikace bude opakovat pouze jednou za dobu, která bude anténě trvat

otočit se zpět do směru letounu, aby ho opět ozářila, tj. jednou za periodu otáčení antény radaru.

Jsou-li vstupní data sekvencí časů příjmu zpráv, pak by se v ní měly nacházet takové posloupnosti zpráv, které jsou od sebe vzdáleny vždy o stejný časový úsek určující právě periodu otáčení radarové antény. Je to znázorněno na obrázku 2.2, kde černé body označují čas příjmu zprávy, písmeno P označuje úsek periody otáčení antény, kdy neozářuje letoun (není možná komunikace) a písmena DO naopak označují dobu, kdy se letoun nachází v hlavním laloku antény (komunikace je možná). Pak by množina bodů ležících ve žlutých oblastí naznačovala možnou komunikaci letounu s radarem.



Obrázek 2.2 Znázornění posloupnosti stejně od sebe vzdálených zpráv.

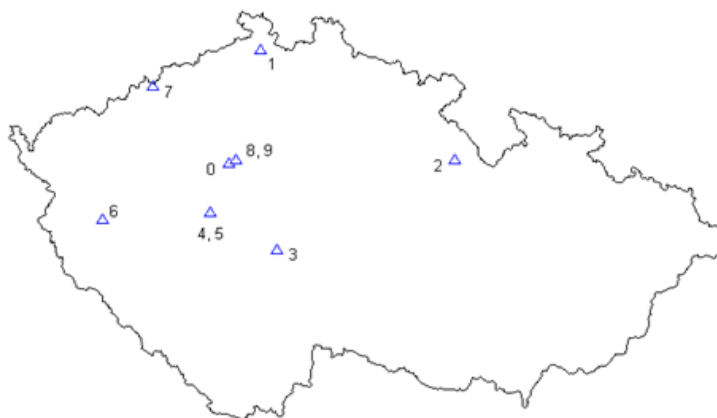
Předností této metody je bazální jednoduchá myšlenka a jednoduchost vstupních dat. Nevýhodou je potřeba správně nastavit počáteční podmínky programu. Více tuto problematiku popisuje kapitola 4.

### 3 Naměření a příprava vstupních dat potřebných pro analýzu

Vstupní data, která poskytujeme nejen hlavnímu programu je nutné nejdříve určitým způsobem naměřit a poté i zpracovat do podoby, která je vhodná pro samotný program. V této kapitole je popsán jak způsob naměření, tak i příprava vstupních dat pro analýzu.

V technologii SSR módu S se využívá cíleného dotazování letadla. To pomocí palubního transpondéru nevysílá cílenou, ale všesměrovou odpověď. Tím že jsou odpovědi vysílány všesměrově, máme možnost jejich odposlouchávání a zaznamenávání. Pro naměření dat využívaných v této práci je možné využít více metod. Ačkoli jsou všechny čtyři sady vstupních dat naměřeny pouze jednou metodou, je pro nás možné získat data i jinou cestou. Obě metody jsou v této kapitole popsány. Jejich podstatným rozdílem je počet přijímačů, na které zprávy zaznamenávají, to se pak odráží i na rozdílném zpracování a přípravě zachycených zpráv.

Pro obě metody je společné přiřazování zpráv k jednotlivým letadlům. Při sběru dat, se zaznamenávají zprávy vyslané všemi letouny v dané oblasti, je tedy nutné přidělit zprávy k letadlům, které je vyslalo. Toto přiřazování zpráv ke konkrétním letadlům je zajištěno díky AP poli obsaženým v každé zprávě (více o struktuře zpráv v kapitole 1). Každé AP pole nese unikátní 24bitovou adresu letadla. Po jeho dekodování a získání adresy je možné zprávu přiřadit danému letadlu.



Obrázek 3.1 Umístění stanic multilateračního systému ŘLP na území ČR.

### 3.1 Naměření a příprava vstupních dat více přijímači

Sady vstupních dat využívané v této práci nejsou získávány ani připravovány touto metodou. V této metodě se měření provádí přijímači, které nejsou majetkem univerzity ČVUT. Využívané přístroje jsou majetkem společnosti ŘLP ČR, s. p. a jedná se o profesionální zařízení od pardubické firmy Era a. s. Jde o multilaterační systém čítající deset stanic, které jsou pro ŘLP oblastním zdrojem sekundárních informací o cílech v daném vzdušném prostoru. Informace se získávají technikou multilaterace. Systém na takovéto technické úrovni není limitován hustotou provozu, proto je možné získávat relevantní data jak v noci, tak i přes den. Seznam jednotlivých stanic a jejich souřadnice jsou uvedeny v tabulce 3.1, jejich poloha na území ČR je znázorněna na obrázku 3.1.

Tabulka 3.1 Popis a souřadnice stanic multilateračního systému ŘPL.

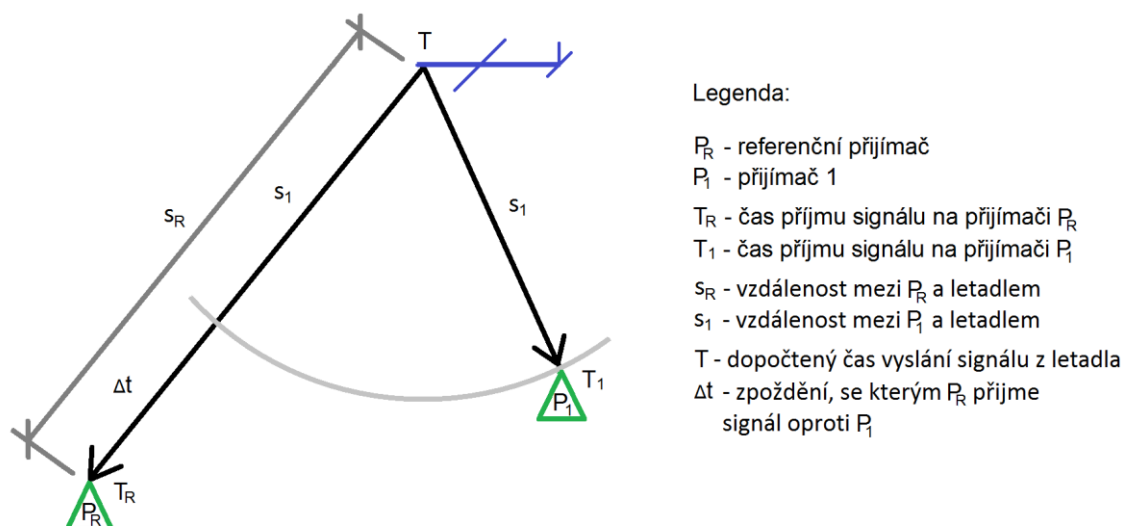
Označení	Popis	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Výška
Post-0	Jeneč	50.08637	14.19982	446.964
Post-1	Česká Lípa	50.77734	14.50058	723.679
Post-2	Litický Chlum	50.10103	16.35028	682.108
Post-3	Šibeník	49.5611	14.66565	746.44
Post-4	Písek S	49.78493	14.03455	762.478
Post-5	Písek J	49.7848	14.03453	762.583
Post-6	Jirna	49.72843	13.02329	636.53
Post-7	Jedlák	50.54865	13.46206	914.368
Post-8	TB RXS-12	50.1062	14.26717	447.742
Post-9	TB RXS-14	50.10621	14.26688	447.764

Důvodem využití více přijímacích stanic je snížení rizika ztráty informací. Jak už bylo řečeno, pro tento výkonný systém není problém získávat data i za hustého provozu, kdy se ve vzdušném prostoru sledované oblasti nachází mnoho letadel, jejichž zprávy musí přijímače zpracovávat. V takovém případě může dojít k situaci, kdy se zprávy vyslané z dvou různých letadel setkají ve stejný okamžik u jednoho přijímače a dojde v něm k neúspěšnému zapsání zpráv. Další příčinou nepřijetí zprávy může být zastínění přijímače. Je tedy možnost, že dochází ke ztrátě informací a data se stávají neúplnými. Využitím více stanic pro příjem zpráv se zvyšuje pravděpodobnost, že se zpráva zaznamená alespoň na jednom z deseti přijímačů. Na jednu stranu je tak sběr na více stanic výhodou, na stranu druhou to znamená, že je třeba dělat fúzi dat z jednotlivých přijímačů.

### 3.1.1 Fúzování dat z přijímačů

Fúzi je nutné provést z toho důvodu, že jednotlivé přijímací stanice jsou od letounu různě vzdálené, proto také ke každé z nich dorazí signál s různým zpožděním. Lze obecně říci, že jedna zpráva bude mít na každém z přijímačů jiný zaznamenaný čas příjmu. Aby se zprávy ze všech přijímačů mohly sjednotit a doplnit, je třeba je přepočítat a synchronizovat na jeden referenční čas.

Jako referenční čas pro synchronizaci je brán čas příchodu signálu zpráv na jeden z přijímačů. K němu přepočítávají časy zapsané na ostatních přijímačích. Z přijatých ADS-B zpráv známe trajektorii letu. Polohy stanic máme k dispozici ze souřadnic z tabulky 3.1 a rychlost šíření signálu jakožto elektromagnetického záření je rovna rychlosti světla ve vakuu. Můžeme předpokládat konstantní rychlost šíření signálu zprávy v atmosféře. Princip přepočítávání, jehož schéma je na obrázku 3.2, je demonstrován níže na příkladu.



Obrázek 3.2 Schéma fúzování dat přijímačů.

Vzdálenosti mezi letadlem a jednotlivými stanicemi vypočítáme z trajektorie letounu a souřadnic stanic ( $s_R$ ,  $s_1$ ). Jeden z přijímačů zvolíme jako referenční ( $P_R$ ). Jiný než referenční přijímač označíme jako  $P_1$ . Pokud máme zachycené zprávy na přijímači  $P_1$ , pak cílem je zjistit, v jaký čas ( $T_R$ ) by byly zprávy přijaty na referenčním přijímači  $P_R$ . A poté porovnáme tyto vypočítané časy ( $T_R$ ) s časy ( $T_R$ ) zaznamenanými na přijímači  $P_R$ . Rychlost šíření signálu atmosférou je  $c$ .

Ze vztahu [3.1] získáme čas  $t_1$  letu signálu z palubního transpondéru k přijímači  $P_1$  vydělením vzdálenosti  $s_1$  rychlostí  $c$ .

$$t_1 = \frac{s_1}{c} \quad [3.1]$$



Čas vyslání signálu palubním transpondérem  $T$  vypočteme pomocí vztahu [3.2]. Odečteme vypočtený čas doby letu signálu  $t_1$  od času  $T_1$ .

$$T = T_1 - t_1 \quad [3.2]$$

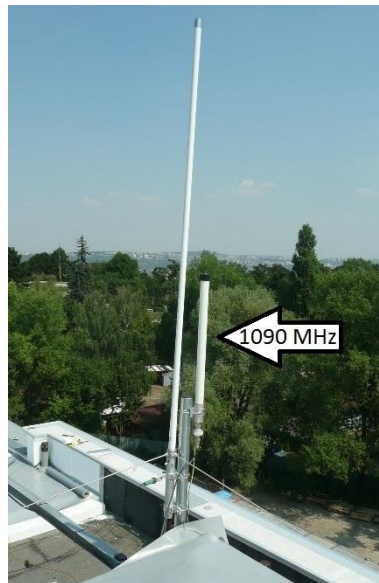
Čas  $t_R$  letu signálu z paluby letadla k přijímači  $P_R$  vypočteme analogicky jako čas  $t_1$ , jak naznačuje vztah [3.3].

$$t_R = \frac{S_R}{c} \quad [3.3]$$

Čas  $T_R'$  příjmu signálu na přijímači  $P_R$ , jenž je odvozený výpočtem, získáme pomocí vztahu [3.4], tak že k času  $T$  přičteme čas  $t_R$ .

$$T_R' = T + t_r \quad [3.4]$$

Nyní je třeba porovnat časy  $T_R'$  všech zpráv z přijímače  $P_1$  s těmi, které zaznamenal referenční přijímač  $P_R$  a vyhodnotit, zda jsou to identické zprávy, nebo chybějící zprávy doplnit. Poté se musí tento postup aplikovat na všechny zbývající přijímače.



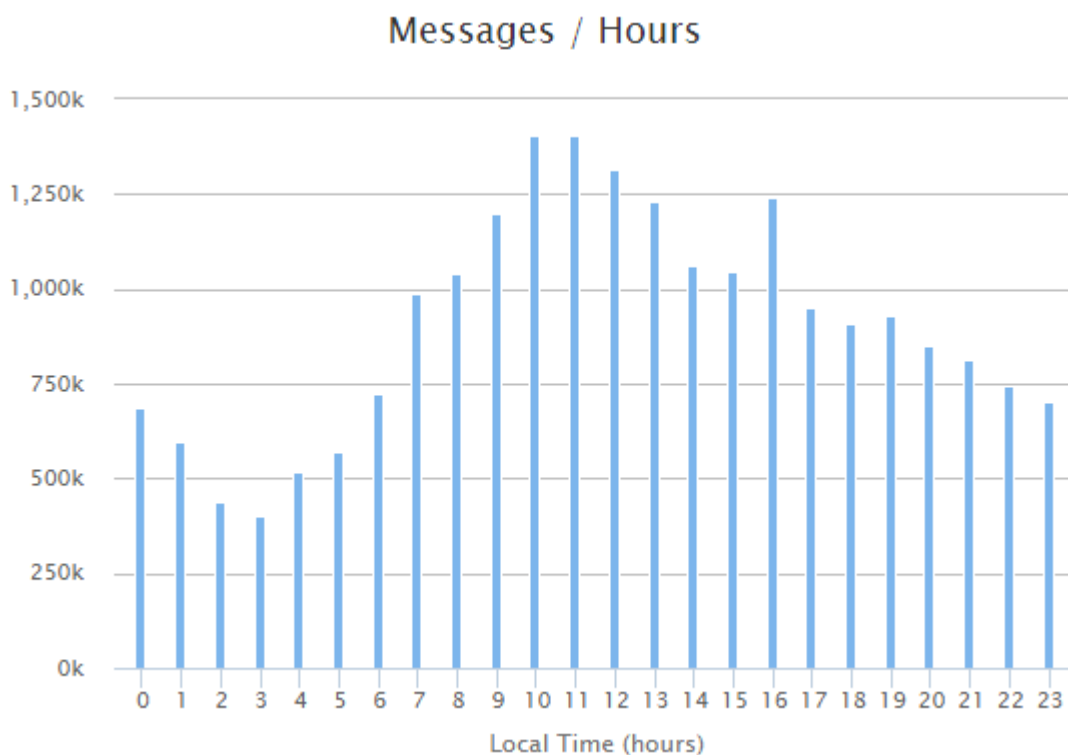
Obrázek 3.3 Anténa stanice pro příjem vstupních dat. [6]

### 3.2 Naměření vstupních dat jedním přijímačem

Tato metoda měření a přípravy byla aplikována při sběru všech čtyř sad dat, které jsou pro práci k dispozici. Při měření se využívá pouze jeden přijímač, jenž je majetkem Fakulty dopravní ČVUT. Na rozdíl od přístrojů z první metody se nejedná o profesionální zařízení. Příjem dat je zajištěn stabilní stanicí umístěnou na strahovských kolejích v Praze. O její

vytvoření se zasloužil absolvent Fakulty dopravní ČVUT Ing. Martin Zach, který se mj. zabýval návrhem nízkonákladového MLAT systému. Bližší specifikace o této stanici lze nalézt v jeho Diplomové práci [6] a dále v Diplomové práci studenta FD ČVUT Ing. Lukáše Umlaufa. Přijímací anténa strahovské stanice pro frekvenci 1090 MHz je znázorněna na obrázku 3.3.

V tomto případě je možné využít pouze jeden přijímač z toho důvodu, že se měření provádí v noci, za minimální hustoty provozu. Ve vzdušném prostoru sledované oblasti se v době měření nacházelo velice málo letadel, a proto nehrozilo takové riziko ztráty dat zapříčiněné příchodem zpráv dvou letadel ve stejný okamžik k tomuto přijímači. Pro představu je na obrázku 3.4 histogram, který udává počet přijatých zpráv v námi zkoumaném vzdušném prostoru během 24 hodin. Je z něho patrné, že denní hodnota příjmu zpráv se pohybuje okolo 1,5 milionů zpráv za hodinu, kdežto kolem třetí hodiny ranní hodnota klesne pod 400 tisíc zpráv za hodinu. Při nočním provozu je tedy přijímač zatížen přibližně třikrát méně než při denních maximech.



Obrázek 3.4 Histogram znázorňující počet přijatých zpráv během 24 hodin, [Zdroj: atm-lab.fd.cvut.cz].

Tato metoda je výhodnější, jelikož se při ní využívá jen jeden přijímač, není tedy nutné zachycené zprávy nikterak fúzovat a přepočítávat. Přijímač sice není profesionálním zařízením, ale za daných podmínek je jeho spolehlivost vysoká a navíc je majetkem FD ČVUT.

### 3.3 Příprava vstupních dat po jejich naměření

Ať už zprávy z letadel zachytíme a zpracujeme jakýmkoli metodou, výsledkem vždy bude sekvence mnoha zpráv různých formátů sestupného spoje od všech letadel v dosahu přijímače. Přiřazování zpráv k jednotlivým letadlům je popsáno v úvodu této kapitoly. Algoritmem, který je schopný rozpoznávat adresy letadel ve zprávách, si můžeme vyfiltrovat pouze zprávy daného vyhovujícího letu. Tím vznikne sada zpráv od jednoho letadla, ale stále jsou to zprávy mnoha různých formátů sestupného spoje. Tyto formáty je možné identifikovat díky poli DF obsaženým v každé zprávě (více o struktuře zprávy v kapitole 1). Dalším algoritmem je možné si vyfiltrovat pouze formáty zpráv související s komunikací SSR módu S, tj. DF04, DF05, DF20, DF21. Posledním krokem je sloučení časů příjmu všech čtyřech formátů do jednoho vektoru. Zprávy se ve vektoru řadí dle času bez ohledu na jejich formát.

Při vytváření hlavního programu jsme došli k závěru, že vstupní data by měly tvořit zprávy z tříminutového úseku letu letadla. Tato podmínka je učena samotnou podstatou algoritmu programu. Pokud by vstupní data pocházela z příliš krátkého úseku letu např. minutového úseku, pak je velká pravděpodobnost nálezu nerelevantních sekvencí zpráv. Je to z toho důvodu, že do 60 sekund (délka záznamu) se při periodě 15 s vejdu maximálně čtyři prvky, obvykle jen tři. Najít tři až čtyři zprávy, které tvoří periodické sekvence, není, v tak husté množině prvků jako jsou naše vstupní data, velký problém. Proto se ve výsledcích hromadily sekvence zpráv s vysokými periodami. Druhý extrém, mít vstupní data z příliš dlouhého úseku letu (pět a více minut), by nevyhovovalo z toho důvodu, že program hledá pouze sekvence zpráv, které trvají po celý úsek záznamu letu, tzn., že letadlo musí být v pokrytí daného radaru po celou dobu úseku letu. Radarů, které splní takovou to podmínku, by bylo při dlouhém úseku letu minimum.

### 3.4 Úspěšnost naměření zpráv

ADS je systém automatického závislého sledování. Dává možnost letadlům, letištním provozním prostředkům a jiným objektům automaticky vysílat anebo přijímat data z palubních systémů (např. poloha, identifikace aj.) prostřednictvím datového spoje. Jednou z částí ADS je ADS-B OUT, u níž jsou informace o prostředku vysílány periodicky a plošně všem uživatelům v dosahu. Jako jeden z datových spojů ADS-B je využíván 1090 MHz Extended Squitter pro nevyžádané vysílání ve formě náhodně generovaných signálů. Existují tři typy 1090ES ADS-B zpráv lišící se informacemi, které jsou v nich obsažené. Jedná se o informace o poloze, rychlosti a identifikaci letounu. Tyto tři druhy zpráv jsou zobrazeny v tabulce 3.2 a s tím i intervaly, ve kterých jsou neustále z letounu vysílány.

Tabulka 3.2 Typy a časové intervaly vysílání zpráv ADS-B z letícího letadla.

Typ zprávy	Letadlo při letu	Ø vyslaných zpráv za minutu
Poloha letounu ve vzduchu	náhodně v intervalu 0,4 s – 0,6 s	120
Identifikace letounu	náhodně v intervalu 4,8 s – 5,2 s	12
Rychlost letounu	náhodně v intervalu 0,4 s – 0,6 s	120
	Celkem	252

Zprávy 1090ES ADS-B uvedené v tabulce 3.2 jsou vysílány ve formátu DF17 a je možné je od ostatních zpráv vysílaných v tomto formátu odlišit. To je pro nás důležité, protože údaje o četnosti těchto zpráv můžeme použít jako kontrolu celistvosti vstupních dat. Principem kontroly je porovnání počtu zachycených zpráv s počtem zpráv, které by letadlo mělo za ideálního stavu vyslat, tedy 252 zpráv/minutu.

Statistiky z porovnání našich vstupní dat jsou provedeny na celých záznamech dat a výsledky jsou k dispozici v tabulce 3.3. Z úvahy v kapitole 1, je vidět, že se po zkrácení záznamu dat, výrazně neliší průměrné hodnoty vyslaných zpráv za minutu, proto lze také tvrdit, že výsledky úvahy v této kapitole můžeme předpokládat i u zkrácených třiminutových záznamů.

Tabulka 3.3 Procentuální zastoupení v záznamu dat vybraných zpráv formátu DF17.

Číslo letu	Počet zpráv [-]	Délka záznamu [s]	Průměr [zpráv/min]	[%]
89616C	819	196	250,71	99,49
4B8435	784	202	232,87	92,41
4BAAD3	1093	282	232,55	92,28
738052	1190	300	238,00	94,44

Aby data byla relevantní, stanovili jsme kritérium pro výsledky v intervalu <90,100> %, v němž se smí výsledné hodnoty pohybovat. Tyto hodnoty jednotlivých sad zpráv ze čtyř letů můžeme vidět v posledním sloupci tabulky 3.3. Všechny hodnoty se pohybují v zadaném intervalu a splňují tak kritérium relevance. Tuto vysokou úspěšnost zachycení zpráv můžeme pravděpodobně očekávat i u formátů zpráv DF04, DF05, DF20, DF21.

## 4 Vytvoření softwarového řešení

Pro tvorbu softwarového řešení jsem zvolil prostředí programu MATLAB. Metoda zvolená pro řešení zadaného úkolu je podrobněji popsána v kapitole 2.2. Řešení se skládá z více částí. Primární část sestává z hlavního programu, jehož výsledky jsou stěžejní pro tuto práci. Sekundární část tvoří několik menších softwarových programů. Některé analyzují stejná vstupní data jako hlavní program, jiné zpracovávají výstupy z hlavního programu, nicméně rozšiřují možnosti analýzy zkoumané přehledové infrastruktury. Jednou z výhod softwarového řešení je, že jsme ho koncipovali tak, aby se mohla použít data z jakéhokoli měření, ve velice jednoduché formě vstupních dat.

### 4.1 Vývoj tvorby softwarového řešení

První verze programu nepodávaly uspokojivé výsledky. Bylo to tím, že jsme začali program vyvíjet na základě jen několika poznatků o SSR mód S interakci mezi letadlem a radarem (dále jen SSR komunikace), které dostatečně nezohledňovaly komplexní obtížnost podstaty fungování SSR komunikace. Proto jsme byli nuceni upravovat program a vytvářet jeho nové části, které více reflektují obtížnost řešené problematiky.

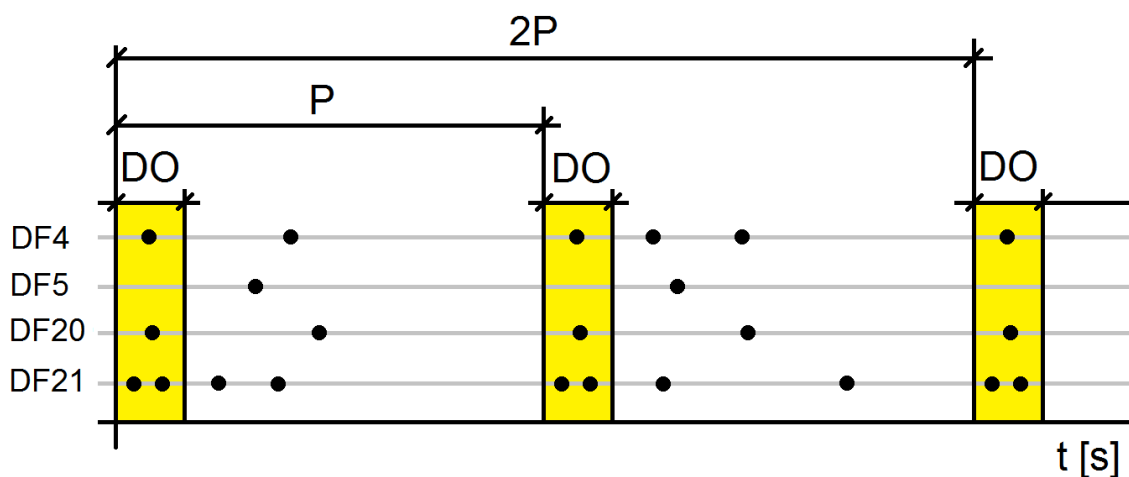
#### 4.1.1 První verze programu

V této části práce uvedeme několik stěžejních úvah, ze kterých vychází softwarové řešení hlavního programu.

Prvotní úvaha, jak se dopracovat k řešení, byla hledat sekvence zpráv indikující komunikaci odděleně v každém ze čtyř formátů sestupného spoje. Program měl ihned hledat celé množiny zpráv, které během jedné doby ozáření letadlo vyše zpět na dotazy radaru. Algoritmus byl nastaven tak, že se snažil hledat pouze sekvenci zpráv s celočíselnou periodou opakování a to bez žádných odchylek v periodě během celé komunikace. Schéma této úvahy řešení je na obrázku 4.1.

Program nezohledňoval to, že radar má možnost komunikovat s letadlem po celou dobu ozáření letadla hlavním anténním lalokem tzn., že se perioda může při každé otáčce antény mírně měnit. Dále nastával problém v tom, že se z různých důvodů radar nemusí v každé době ozáření ptát letadla na tu samou množinu informací, proto nemusí být stále stejná množina odeslaných zpráv. Těmi důvody jsou např., že samotný radar nemusí při každém ozáření letadla generovat stejnou množinu dotazů, nebo letadlo nemusí zachytit signál radaru a tak na něj ani nemůže reagovat a odpověď nevyše, nebo se mohou některá data ztratit při příjmu odpovědí atd. Další podstatnou nevýhodou programu bylo, že hledal nové prvky komunikace

stále jen od prvního nalezeného prvku. Jelikož se letadlo pohybuje poměrně velkou rychlostí, mění tak svou polohu vůči radaru. To má za důsledek, že při větších násobcích periody se již projeví změna polohy letadla vůči radaru a perioda přestává být konstantním parametrem. Pokud hledáme nové prvky komunikace vždy od posledního nalezeného prvku, pak se vždy bude jednat o malý časový úsek, při kterém se změna polohy letadla vůči radaru neprojeví. Poslední důležitou změnou je hledání sekvencí zpráv s neceločíselnou periodou, jelikož sice můžeme najít některé rady s celočíselnou periodou otáčení antény, ale obecně to není pravidlem.



Obrázek 4.1 Schéma první úvahy softwarového řešení.

#### 4.1.2 Programem zohledněné vlastnosti SSR komunikace módu S

Pro větší přehled zde shrneme nejdůležitější vlastnosti SSR komunikace, které byly zohledněny při tvorbě programu a mají velký vliv na dosažení relevantních výsledků.

- Množina dotazů se obecně v každé době ozáření neshoduje – program hledá vždy jen jednu zprávu z celé množiny.
- Perioda otáčení radarové antény je obecně neceločíselná – program hledá sekvence zpráv s neceločíselnou periodou.
- Nekonstantní perioda z důvodu pohybu letadla. Letadlo obecně v čase mění svou polohu vůči radaru, to má za následek, že se perioda stává nekonstantní parametrem – program hledá nové prvky komunikace vždy od posledního nalezeného prvku, aby byla změna periody zanedbatelná.
- Nekonstantní perioda zapříčiněná nenulovou dobou ozáření. Radar má možnost se dotazovat během celé doby ozáření letadla hlavním anténním svazkem, důsledkem toho se může perioda mezi jednotlivými prvky komunikace měnit – program nehledá jen v ideálním bodě (vzdáleném přesně o periodu od předchozího prvku), ale má možnost hledat v jeho určitém okolí.

## 4.2 Hlavní program softwarového řešení

Tato část práce pojednává o primární části softwarového řešení, jímž je hlavní program. Je zde popsána struktura programu, jeho základní části a dále funkce těchto jednotlivých částí. Jak už bylo řečeno v úvodu kapitoly, nespornou výhodou programu je jeho koncepce založená na jednoduchých vstupních datech, které program vyžaduje. Program jsme vytvořili na základě poznatků zapsaných v předchozí podkapitole 4.1.2, tak aby odstranily nedostatky první verze programu.

Důležitou věcí pro další pochopení popisu programu je definovat pojmy řetězec a kostra řetězce, které se vážou k výstupům hlavního programu. Hlavní program se snaží najít v množině vyslaných zpráv periodickou sekvenci zpráv, která značí komunikaci letadla s určitým radarem.

- Řetězec – je označení pro periodickou sekvenci zpráv, která obsahuje pokud možno všechny odpovědi, na které se daný radar dotákal. Během jedné doby ozáření se radar může dotázat vícekrát. Snaha při tvorbě řetězce tedy je, aby obsahoval všechny odpovědi každé doby ozáření v rámci celé komunikace s daným radarem.
- Kostra řetězce – je podmnožina řetězce. Na rozdíl od řetězce, musí kostra obsahovat vždy jen jednu zprávu v rámci jedné doby ozáření.

Program je nastaven a tvořen s myšlenkou hledat kostry řetězců indikující komunikaci s radary, které trvají po celý záznam dat z letu.

Tzn., že program se snaží primárně mapovat pouze ty radary, v jejichž pokrytí se letadlo nacházelo po celou dobu letu, z jehož části máme data k dispozici.

### 4.2.1 Vstupní data hlavního programu

Forma vstupní data, kterou program využívá je již zmíněný vektor, jehož hodnoty jsou tvořeny údaji o čase příjmu zpráv formátů DF4, DF5, DF20 a DF21 z palubního transpondéru. Hodnoty jsou ve vektoru seřazeny vzestupně bez ohledu na formát zprávy. Pro tuto práci jsem nazval vektor vstupních dat DataTDM.

### 4.2.2 Matice všech vzdáleností

První co program ze vstupních dat vytvoří je matice *TDM*, která se nadále stává základním a nejdůležitějším zdrojem, ze kterého program čerpá informace. Tato matice tak stanovuje základní pracovní prostor, ve kterém se program pohybuje.

V této matici, kterou jsem nazval *TDM*, se nachází informace o vzdálenostech (rozestupech) mezi jednotlivými prvky z vektoru *DataTDM*. Matice *TDM* má obecně rozměr  $n \times n$ , kde  $n$  se rovná počtu prvků vektoru *DataTDM*. Generování této matice je naprogramováno tak, aby se záporné hodnoty vzdáleností vypisovaly jako nuly, proto se ve výsledku jedná o horní trojúhelníkovou matici, s tím rozdílem, že i prvky hlavní diagonály jsou nuly. Obecně lze o matici napsat:

Prvek  $a_{ij}$  z matice *TDM* udává hodnotu rozestupu mezi prvky  $i$  a  $j$ , kde  $i \geq j \wedge i, j \leq n$ . V této matici tedy můžeme nalézt časový rozestup mezi dvěma libovolnými zprávami ze vstupního vektoru.

V matici *TDM* se vztahují všechny vzdálenosti k první přijaté zprávě, tzn., že tato první zpráva má čas 0. Proto hodnoty uložené v matici jsou relativní časy vztažené k první zprávě záznamu. A jelikož je tato matice opravdu základem pro softwarové řešení, bude se nadále počítat s těmito relativními časy a ne s časy příjmu zpráv.

Pro důkaz jak moc je matice *TDM* důležitá pro přehlednost, a tím praktická při další práci, zde zmíníme počet vzdáleností, které v sobě uchovává. Tříminutové záznamy, které v této práci využíváme, mají okolo 1500 zpráv (viz tabulka 1.6). Pro 1500 zpráv v jednom záznamu to dělá 1 124 250 nenulových vzdáleností. A matice *TDM* zajistí velice jednoduché hledání a orientování v takto obrovské databázi hodnot.

### **4.2.3 Uživatelské nastavení programu**

Další výhodou vytvořeného programu je možnost nastavit nezávisle na sobě osm hlavních parametrů, čímž je zajištěna jeho flexibilita. Parametry umožňují upravit nastavení programu ryze pro potřeby uživatele (hledání určitého intervalu periody koster řetězců), tak i ze strany přehledové infrastruktury (šířka laloku radaru), jejíž parametry mohou být rozdílné, z důvodu rozdílné lokality sběru dat nebo rozdílné technologii využívané techniky.

#### **4.2.3.1 Nastavení intervalu pro referenční prvek**

Nejdříve je nutné si definovat, co znamená pojem referenční prvek. Je to první prvek kostry řetězce hledaných zpráv, od kterého se začíná hledat daná kostra řetězce. Nyní je možné popsat první parametr, jenž jde v programu nastavit. Jde o interval hodnot, kterých může nabývat referenční prvek. Možnost volit si hodnoty tohoto parametru je důležitá z několik důvodů.

Prvním je ten, že pokud hledáme kostry řetězců znázorňující komunikaci trvající po celý záznam dat, je zbytečné, aby referenční prvek dosahoval všech hodnot záznamu. Hledáme-li periody v intervalu  $\langle 3, 15 \rangle$  s, pak za určitou dobu po hodnotě 15 s by program nacházel zase



ty samé kostry řetězce jen s tím rozdílem, že by jim chyběly počáteční prvky. Navíc by řetězce postupem času začaly být už moc krátké na to, aby byly považovány za kostry řetězců indikující komunikaci trvající po celou dobu záznamu.

Druhým důvodem je to, že se může volit, ve které části záznamu bude program hledat řetězce. Pokud bychom chtěli hledat pouze řetězce v druhé polovině záznamu, je to možné nastavit tímto parametrem (současně by bylo také nutné nastavit odpovídající délku kostry řetězců).

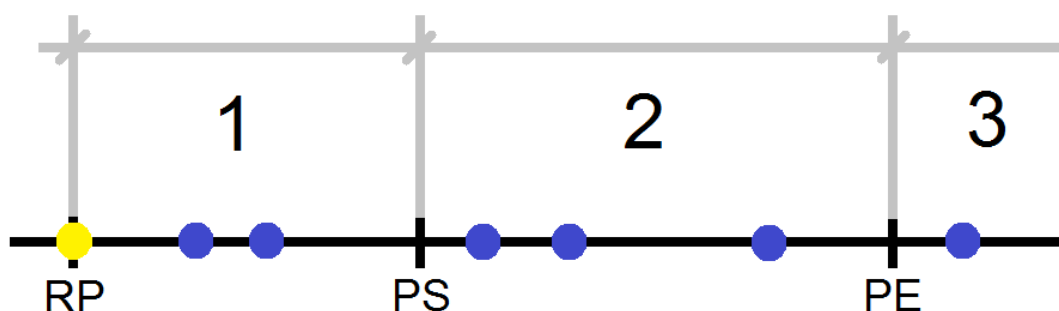
Tento parametr je možno volit v kódu programu pod označením *I*.

#### 4.2.3.2 Nastavení hodnoty periody hledaného řetězce

Toto je velice významný parametr programu, jímž si může uživatel zvolit, jakých hodnot mají dosahovat periody koster řetězců, jenž má program vyhledávat. Je možné si zvolit jen jednu přenou hodnotu, tak i celý interval hodnot.

Tento parametr je možno volit v kódu programu pod označením *PS* pro počáteční hodnotu intervalu a *PE* pro koncovou hodnotu intervalu. Pokud chce uživatel pouze jednu hodnotu, zadá danou hodnotu do obou nastavení parametrů.

Jak je tento parametr zakomponován a jak funguje v samotném programu, je zobrazeno na obrázku 4.2. Program se dotazuje na vzdálenosti od referenčního prvku *RP* k následujícím prvkům (modré body na ose). Pokud je mezi *RP* a následujícím prvkem vzdálenost menší, než je hodnota *PS* (prvky leží v oblasti 1), pokračuje program k dalšímu prvku, než nedojde do části záznamu dat, kde vzdálenosti mezi *RP* prvky jsou z intervalu  $\langle PS, PE \rangle$  (oblast 2). Poté co program přejde k prvnímu prvku, který je vzdálen od *RP* dále než je zvolený interval (k prvku z oblasti 3), pak přejde na nový referenční prvek.

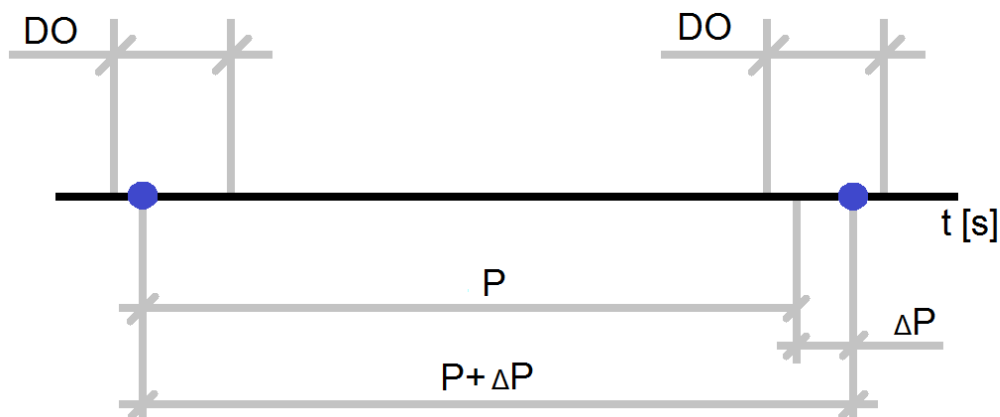


Obrázek 4.2 Schéma využití parametru *PS* a *PE* v algoritmu hlavního programu.

#### 4.2.3.3 Nastavení velikosti okolí, ve kterém se hledá nový prvek řetězce

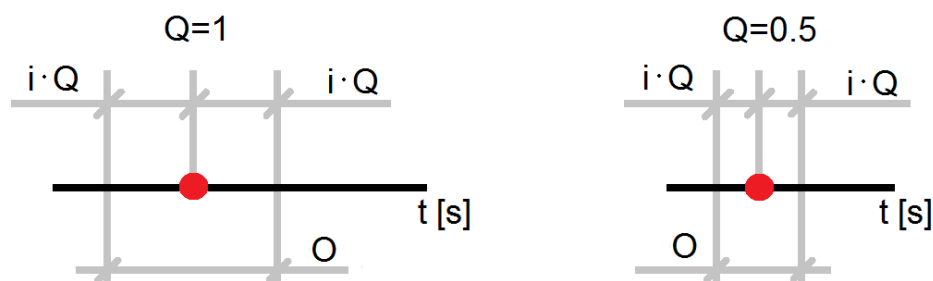
Toto nastavení vzniklo z nutnosti zavést změnu, aby se již nehledali nové prvky kostry řetězce po přesných vzdálenostech, ale v určitém okolí bodu. Při nastavování velikosti tohoto okolí se používají dva parametry. Jedním z nich je doba ozáření letadla (*DO*) anténním lalokem a hraje

zde hlavní roli. Tato doba určuje velikost odchylky, která se může projevit při hledání jednotlivých prvků kostry řetězce. Jak je to znázorněno na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 Schéma problematiky nekonstantnosti periody.

Pokud by okolí, v němž program může hledat nové prvky, bylo určeno pouze dobou ozáření, pak by to znamenalo, že by celková velikost okolí byla rovna dvojnásobku doby ozáření. Ale je nepravděpodobné, že při jedné komunikaci se radar zeptá na úplném počátku doby ozáření a při další až na úplném konci doby ozáření, aby bylo nutné mít rozsah okolí, jak vlevo, tak vpravo, o velikosti doby ozáření. Proto jsem zavedl parametr, který koriguje velikost doby ozáření na obou stranách zároveň. Je to znázorněno na obrázku 4.4.



- - ideální pozice prvku vzdáleného přesně o periodu od předchozího
- O - okolí, ve kterém se může nacházet prvek kostry řetězce
- i - vypočtená doba ozáření letadla hlavním antenním lalokem
- Q - parametr upravující velikost okolí

Obrázek 4.4 Princip korekce okolí, ve kterém program hledá prvky kostry řetězce.

Parametr korigující velikost doby ozáření a tím i okolí, ve kterém program hledá nový prvek kostry řetězce, je možné v kódu programu nastavit proměnnou označenou Q.

#### 4.2.3.4 Nastavení šířky svazku

Toto nastavení umožňuje reagovat na změny parametru samotné přehledové infrastruktury. Jedná se o změny parametru šířky hlavního laloku radarové antény, na kterém závisí výpočet

doby ozáření dle rovnice 1.1. A doba ozáření je velmi podstatným parametrem programu a ovlivňuje další nastavení popsané v kapitole 4.2.3.3, proto má i tento parametr v programu velkou váhu.

Tento parametr zohledňující šířku laloku radarové antény se v programu nastavuje pomocí proměnné *WR*.

#### 4.2.3.5 Nastavení minimální délky řetězců pro jejich vypsání

Aby program nevypisoval všechny nalezené řetězce, je v programu možnost nastavit podmínku, která nechá vypsát pouze ty řetězce, jejichž délka je stejná nebo větší, než jakou uživatel zadá. Výpočet je závislý na celkové délce záznamu dat, periodě řetězce, který se podrobuje podmínce a v poslední řadě na parametru *E*, kterým je uživatel schopen ovlivňovat minimální délku řetězců, jenž chce po programu, aby vypsál. Vztah pro zmíněný výpočet je v rovnici 4.1.

Rovnice 4.1 Vztah pro výpočet minimální délky řetězce pro jeho vypsání

$$\frac{T [s]}{P [s]} - \frac{T [s]}{P [s]} \cdot E [-] = ML [-], \quad [4.1]$$

kde *T* je celková délka záznamu, *P* je perioda daného řetězce, *E* je parametr volený uživatelem a *ML* je výsledná minimální délka, kterou řetězec musí mít, aby byl vypsán.

Nastavení minimální délky řetězců pro jejich vypsání se v programu provádí přes proměnnou *E*, která může dosahovat hodnot v intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ , kde 0 znamená, že může chybět 0 % prvků a 1, že může chybět 100 % prvků v kostře řetězce.

#### 4.2.3.6 Nastavení maximálního počtu prvků chybějících v řadě

Je mnoho příčin, proč by komunikace letounu s radarem měla být v naměřených datech neúplná. Ať už je to přetížení palubního odpovídače, přetížení přijímače, kterým se provádí sběr dat, nebo chyba při zpracování dat. Druh příčiny nemění to nic na tom, že se s touto skutečností musí počítat. V samotném programu se to projevilo tak, že jsem umožnil hledat i ty řetězce, kterým chybí některé prvky, což je zohledněno již parametrem popsaným v kapitole 4.2.3.5. V tomto případě se ale jedná o parametr, kterým jde nastavit maximální počet prvků chybějících v řadě.

Nastavení maximálního počtu prvků chybějících v řadě v kostře řetězce se v programu nastavuje pomocí parametru *ME*, kde zadaná hodnota přímo odpovídá počtu možných chybějících prvků za sebou.

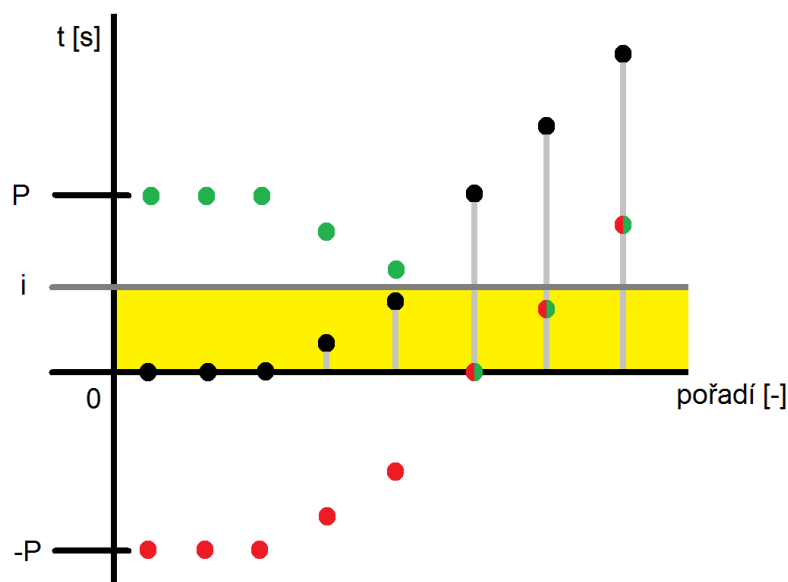
#### 4.2.4 Princip hledání kostry řetězce

Zde vysvětlím základní princip fungování programu při vyhledávání kostry řetězců. Pomůže nám k tomu i obrázek 4.5. Po určení hodnot parametrů v nastavení je možné program spustit. Program začíná svůj algoritmus u prvního prvku vektoru vstupních hodnot. Tento první prvek program určí jako referenční. Maximální velikost referenčního prvku udává parametr  $I$  popsany v kapitole 4.2.3.1.

Dalším krokem je vyhledání prvku, který je vzdálen od referenčního prvku v intervalu hodnot  $\langle PS, PE \rangle$ , což splňuje nároky uživatele na velikost periody (více v kapitole 4.2.3.2). Budeme uvažovat, že se takový prvek našel, tím pádem vzájemná vzdálenost toho a referenčního prvku udává velikost periody  $P$  kostry řetězce. Pokud by se prvek v intervalu  $\langle PS, PE \rangle$  nenašel, program by jako referenční prvek zvolil další (v tomto případě druhý) prvek z vektoru vstupního hodnot.

<sup>1</sup>Postup hledání třetího a každého dalšího prvku řetězce je už stejný až do posledního prvku řetězce. Program vezme řádek matice  $TDM$ , který patří poslednímu nalezenému prvku, označme ho  $k$ . V  $k$ -tém řádku jsou zapsány vzdálenosti od prvku  $k$  ke všem ostatním prvkům záznamu. Od tohoto  $k$ -tého řádku matice  $TDM$  program odečte hodnotu periody  $P$ .

Černé body v grafu na obrázku 4.5 určují původní hodnoty časů v řádku  $k$  před odečtením hodnoty periody  $P$  od celého řádku  $k$ . Červené body znázorňují hodnoty prvků po odečtení periody  $P$  od řádku  $k$ .



Obrázek 4.5 Schéma principu hledání prvků kostry řetězce.

Poté program z nových hodnot (červeně vyznačených) udělá absolutní hodnoty, které jsou v grafu vyznačeny zeleně. V těchto absolutních hodnotám hledá to nejmenší. Když hodnota

tohoto minima je ve zvoleném intervalu (označený jako  $i$ ), pak prvek zařadí jako další článek kostry řetězce. Tento prvek se stává prvkem  $k$  a postup hledání se vrací zpět na počátek<sup>1</sup>.

Pokud by minimum neleželo v oblasti  $i$ , pak by program hledal prvky ve stejné řádce, ale s vícenásobnou periodou, tedy jen za podmínky, že si to uživatel zvolil v nastavení programu. Jestliže by  $i$  tak nenašel žádný návazný prvek kostry řetězce, pak by hledání ukončil a začal hledat novou kostru řetězce.

#### 4.2.5 Analyzování nalezeného řetězce a jeho schvalování

Podstata programu je taková, že hledá všechny sekvence prvků, které jsou od sebe vzdáleny vždy o stejnou vzdálenost. Těchto sekvencí je v celém záznamu dat v řádech tisíců<sup>1</sup>. Z této velké množiny řetězců, je pak třeba ideálně vyfiltrovat všechny ty, které neodpovídají žádné komunikaci letadla a radaru a ty, které nevyhovují zadání uživatele. Hlavní dva filtry, které se o to v programu pokoušení, jsou zde popsány.

První filtr nevyhovujících řetězců je tím jednodušším a je již zmíněn v souvislosti s parametrem  $E$  v kapitole 4.2.3.5. Je to základní podmínka kontrolující délku kostry řetězce. Pokud délka vyhovuje, je kostra řetězce vpuštěna do druhého filtru, pokud ne, je přepsána.

Druhý filtr je složitější a je k němu zapotřebí pomocná matice  $CCM$ , v níž každé zprávě ze záznamu dat patří právě jeden určitý řádek. Do těchto řádků se zapisují hodnoty period koster řetězců, jichž jsou dané zprávy součástí. Pokud je tedy některá z koster řetězců již schválená a vypíše se do výsledné matice, pak se do pomocné matice  $CCM$  zapisuje hodnota periody schválené kostry řetězce. Zapisuje se pouze do řádků, jimž odpovídají zprávy, které byly součástí schválené kostry řetězce.

Jestliže se objeví nová kostra řetězce, která projde až do tohoto filtru, tak ji program otestuje. Zjišťuje, zda některá ze zpráv testované kostry řetězce, už nemá ve svém řádku pomocné matice  $CCM$  zapsanou hodnotu shodnou s periodou testované kostry řetězce. Pokud se tato podmínka potvrdí alespoň u jedné ze zpráv, pak program testovanou kostru řetězce nevypíše.

Pokud vezmeme v úvahu, že na počátku máme přes deset tisíc potencionálních koster řetězců a máme z nich vybrat přibližně 20, které indikují komunikaci letadla s radarem, je nutné s tím počítat při nastavování těchto filtrů. Není tak obtížné odfiltrovat velkou část nechtěných koster řetězců. Problém nastává, když se blížíme k hranici, kdy nastavení filtrů je příliš specifické a podmínkou neprojdou ani kostry řetězců, které hledáme. Naopak pokud je nastavení příliš obecné, projdou filtrem i potencionální kostry řetězců, které nejsou relevantní.

---

<sup>1</sup> Pokud bychom nepoužili žádný filtr omezující hledání periodických sekvencí, program vyhledá přes 10 000 koster řetězců.

#### 4.2.6 Střední hodnota periody

Jednou z dalších částí hlavního programu je i vytvoření střední hodnoty period nalezených koster řetězců. Jak je popsáno v předchozích kapitolách, radar má možnost dotazovat se letadla v rámci intervalu doby ozáření letadla svým hlavním anténním lalokem. Proto se rozestupy mezi jednotlivými prvky kostry řetězce může měnit. S periodou, se kterou program počítá, je rozestup mezi prvním a druhým prvkem kostry řetězce. Ostatní prvky již mají určitou možnost odchýlení. Tato změna periody ovšem není nikterak výrazná, jelikož odchýlení, které program dovoluje od ideálního stavu je vůči velikosti samotné periody velice malý. Tato funkce programu zpřesňuje hodnotu periody koster řetězců a je využita zejména při porovnávání dat mezi různými záznamy letů.

#### 4.2.7 Eliminace paralelních řetězců

Pokud je letadlo dotazováno radarem v každé době ozáření více než jednou a palubní transpondér vygeneruje na tyto dotazy odpověď, pak nastává situace, kdy náš program vypíše do výsledné matice více koster řetězců patřící právě jednomu řetězci (radaru). Těmto kostrám patřící jednomu radaru říkáme paralelní kostry řetězců. Jejich vypisováním dochází ke zkreslení výsledků, které program vypisuje. Proto jsme vytvořili další část programu, která se snaží zamezit vypisování těchto paralelních koster řetězců.

V této části algoritmu je již sestavená výsledná matice. Ovšem je možnost, že má v sobě zapsané paralelní kostry řetězce indikující komunikaci jednoho radaru. Program tedy vezme výslednou matici a podrobí jí analýze.

Filtr postupně testuje všechny řetězce výsledné matice, zda nemají stejnou periodu nebo jedna není celočíselným násobkem druhé. Pokud této podmínce dvě kostry řetězců vyhoví, filtr je dále testuje. Zjišťuje, jestli prvky z obou koster nemají téměř identický čas. Odchylnka jejich časů může být v rámci doby ozáření, tj. v řádech setin sekundy. Výsledkem tohoto filtrování je odstranění paralelních koster řetězců související s jedním radarem z výsledné matice a tím zpřesnění výstupních dat o počtu radarů, v jejichž pokrytí se letadlo po celou dobu letu pohybovalo.

#### 4.2.8 Výstupy hlavního programu

Hlavní program během procházení algoritmu vytváří více výstupů, všechny jsou ve formě matic. Primárním výstupem je výsledná matice *RMCF*, ve které jsou uloženy výsledky o parametrech přehledové infrastruktury. Sekundární výstupy tvoří dvě matice, které pomáhají s další analýzou dat z výsledné matice *RMCF*.

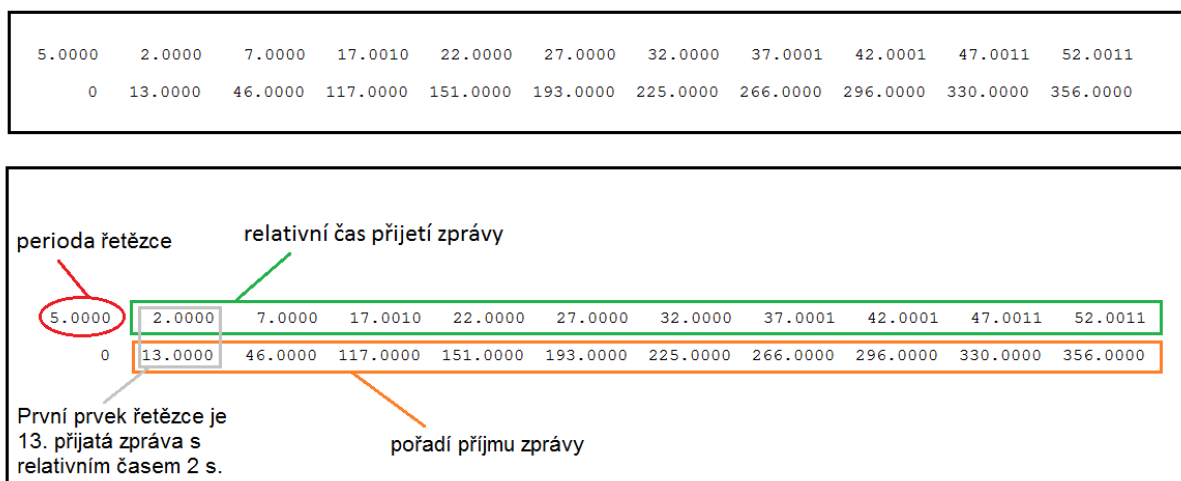
#### 4.2.8.1 Primární výstup – matice RMCF

Výsledná matice *RMCF* je primárním výstupem hlavního programu. Jsou v ní zaznamenány nalezené kostry řetězců, které prošli všemi filtry, jejichž kritéria si zvolil uživatel v nastavení programu.

Každá kostra řetězce indikuje potencionální komunikaci letadla s radarem. Celkový počet koster řetězců v matici *RMCF* je tedy roven počtu radarů, v jejichž krytí se letadlo po celý záznam dat nacházelo. Dále můžeme z této matice vyčíst periody jednotlivých koster řetězců. Další dostupné informace, které nám *RMCF* přináší, jsou o skladbě koster řetězců, tj. z jakých prvků vstupního vektoru jsou složeny i s jejich relativním časem (čas z matice *TDM*). Pro lepší pochopení systému zapsaných informací do matice *RMCF* a tedy lepší orientaci v matici, zde popíšeme její strukturu.

Každé dva řádky matice odpovídají jedné kostře řetězce indikující komunikaci letadla a radaru. Pokud pořadové číslo posledního prvku kostry řetězce označím „*k*“, pak v daných dvou řádcích patří jedné kostře řetězce platí, že pozice:

- Prvku (1,1) udává periodu řetězce.
- Prvků (1, [2: *k*]) jsou relativní čas zprávy z matice *TDM*.
- Prvku (2,1) nic neindikuje a jeho hodnota je pokaždé rovna nula.
- Prvků (2, [2: *k*]) udává pořadí zprávy ve vstupním vektoru, jejíž čas je vypsán o řádek výše.



Obrázek 4.6 Grafický rozbor výstupu hlavního programu – matice RMCF.

Pro lepší představu je zápis matice vysvětlen na obrázku 4.6, kde je v horním černém rámečku je příklad neupravené kostry řetězce, tak jak nám ji program vypisuje. Ve spodním černém rámečku je pak grafický rozbor stejné kostry řetězce.

#### 4.2.8.2 Sekundární výstup – matice CCM a HM

Jedním ze sekundárních výstupů hlavního programu je pomocná matice *CCM*, jejíž tvorba při zpracování dat je popsána v kapitole 4.2.5. Počet řádků matice *CCM* je rovný počtu prvků ve vstupním vektoru dat pro hlavní program. Každé zprávě patří právě jeden řádek matice a je v něm možné najít informace, v kolika kostrách řetězců se daná zpráva objevila a jaké mají tyto kostry řetězců periodu. Tyto informace nám umožňují zjistit, zda některé kostry řetězců spolu nekolidují, tzn., zda množina prvků obou koster řetězců nečítá některé shodné zprávy.

Druhým sekundárním výstupem hlavního programu je matice *HM*. V ní jsou uloženy paralelní kostry řetězců, které byly vyřazeny filtrem na jejich eliminaci (více o filtru v kapitole 4.2.7). Informace z této matice nám pomohou, při následném doplňování koster řetězců, tím se přiblížit většímu počtu přidělených zpráv k jednotlivým radarům.

### 4.3 Matice FIDiNDM

Matice *FIDiNDM* nám zprostředkovává informace o tom, jak moc se opakují vzdálenosti mezi sousedícími zprávami ve vstupním vektoru dat. Matici zde uvádíme nejen z toho důvodu, že při vývoji hlavního programu sehrály její výsledky důležitou roli, ale i proto, že nám odhaluje zajímavé vlastnosti vstupních dat. V této kapitole uvedeme důležité části algoritmu, díky kterému můžeme matici sestavit. Dále popíšeme strukturu matice *FIDiNDM* pro větší přehlednost při následné analýze dat, které nám poskytuje.

Vstupní data, která jsou pro vytvoření matice potřeba, jsou identická jako pro hlavní program a to z důvodu zjednodušení softwarového řešení jako celku. Jedná se tedy o stejný vektor časů příjmu zpráv zaznamenaných pozemním přijímačem.

První část algoritmu tvoří matice všech vzdáleností. Stejně tak jako v případě hlavního programu i zde se z vektoru vstupních dat prvně vytvoří matice *TDM*. V tomto algoritmu sice nevyužijeme její potenciál jako hlavní program, ale i tak v sobě uchovává podstatné informace, které budeme dále potřebovat.

Druhá část algoritmu vytváří vektor, který jsme pojmenovali *NDM*. Jeho prvky jsou tvořeny hodnotami, které se nacházejí v matici *TDM* na pozici  $a_{ij}$ , kde  $j = i + 1$ .

Obecně lze o vektoru *NDM* napsat:

Prvek  $a_i$  vektoru *NDM* udává hodnotu rozestupu mezi prvky  $i$  a  $i + 1$  vektoru *DataTDM*, a platí, že  $i < n$ , kde  $n$  je délka vektoru *DataTDM*.

Ve třetí části algoritmu se již začíná tvořit výsledná matice. Zjišťuje a zapisuje se zde četnost jednotlivých hodnot vzdáleností mezi sousedícími prvky vstupního vektoru dat. Každé této



hodnotě vzdálenosti patří právě jeden sloupec matice  $FIDiNDM$ . V těchto sloupcích jsou zaznamenané prvky, mezi kterými se dané vzdálenosti objevují.

Ve čtvrté části algoritmu se již jen upravuje výsledná podoba matice  $FIDiNDM$ . Hodnoty matice jako takové se v tomto kroku nemění. Pro větší přehlednost se zde řadí vytvořené sloupce vzestupně dle hodnoty vzdálenosti, kterou reprezentují.

Po sestrojení matice  $FIDiNDM$  z ní lze vyčíst několik důležitých informací:

- Jaké hodnoty vzdáleností se objevují mezi sousedícími prvky vstupního vektoru.
- Kolikrát se daná vzdálenost mezi prvky vstupního vektoru  $DataTDM$  opakuje.
- Mezi jakými prvky vektoru  $DataTDM$  se vzdálenost vyskytuje.

Pro lepší orientaci v zápisu matice je zde blíže popsána její struktura.

Rozměry matice  $FIDiNDM$  se odvíjejí od toho, jak moc se v  $NDM$  opakují hodnoty prvků. Čím více prvků v  $NDM$  by bylo mělo stejnou hodnotu, tím méně by matice měla sloupců a naopak tím více by měla řádků. Počet sloupců  $FIDiNDM$  udává, kolik je unikátních hodnot v  $NDM$ . Pokud se rozměr  $FIDiNDM$  obecně zapíše jako  $(r \times s)$ , pak platí:

- Prvky prvního řádku ( $a_{ij}$ , kde  $i = 1 \wedge j \leq s$ ) udávají jednotlivé unikátní hodnoty prvků matice  $NDM$ , tzn. unikátní vzdálenosti mezi sousedními prvky vstupního vektoru. Tyto jsou seřazeny vzestupně.
- Prvky druhého řádku ( $a_{ij}$ , kde  $i = 2 \wedge j \leq s$ ) nám říkají, kolikrát se v celém záznamu opakuje vzdálenost mezi zprávami o velikosti hodnoty prvku z prvního řádku daného sloupce.
- Prvky zbylých řádků ( $a_{ij}$ , kde  $i \in (3, r) \wedge j \leq s \wedge a_{ij} \neq 0$ ) udávají sloupcový index prvního prvku z dvojice, která má mezi sebou vzdálenost o velikosti hodnoty prvku z prvního řádku daného sloupce.

System zápisu matice  $FIDiNDM$  je demonstrován na příkladu:

Na obrázku 4.7 je jeden ze sloupců matice  $FIDiNDM$ . Červeně vyznačená hodnota v prvním řádku je jednou z  $r$  unikátních hodnot vektoru  $NDM$ . To znamená, že existuje minimálně jedna dvojice za sebou jdoucích zpráv, které jsou od sebe vzdáleny právě o červeně vyznačenou hodnotu. Kolik takovýchto dvojic zpráv je, informuje zeleně vyznačená hodnota ve druhém řádku. Poté následují modře zbarvené hodnoty, prozrazují sloupcový index prvku z vektoru  $DataTDM$ , který je prvním z dvojice zpráv vzdálených od sebe červeně vyznačenou hodnotu. Černě zbarvené nuly pak indikují, že další dvojice neexistují.

0.0083  
12.0000  
15.0000  
42.0000  
43.0000  
70.0000  
80.0000  
108.0000  
241.0000  
251.0000  
319.0000  
323.0000  
324.0000  
394.0000  
0  
0  
0  
0  
0

Obrázek 4.7 Sloupec matice *FIDiNDM*.

## 4.4 Sekundární části softwarového řešení

Hlavní program je zatím ve fázi vývoje, kdy provádí základní analýzu pozemní přehledové infrastruktury z dat vyslaných palubním odpovídačem. Je to velice složitá problematika, proto je třeba nechat generované výstupní data hlavního programu podrobit dalšímu rozboru, pro jejich upřesnění. Z tohoto důvodu jsme sestrojili další softwarové části řešení, které se dále snaží upravovat a doplňovat výstupní data hlavního programu. Tato část již není hlavním cílem této bakalářské práce, proto se jedná jen o nastínění toho, jak by se dalo s výstupními daty dále pracovat. Řeč bude o dvou kooperujících programech, které se snaží jednak o grafické znázornění výstupní data hlavního programu a dále o potencionální rozšíření koster řetězců.

### 4.4.1 Grafické znázornění odchylek zpráv

V případě, že by radar vysílal své dotazy s konstantní periodou. A letadlo by generovalo odpovědi se stále stejným zpožděním, pak by nedocházelo k žádným výchytkám a jednotlivé zprávy v komunikaci by měly vždy naprosto stejně rozestupy. Realita je ovšem odlišná, a z mnoha důvodů může docházet k výchytkám v rozestupech mezi zprávami jednoho vlákna komunikace. Hlavní program proto při hledání dává zprávám určitou možnost se odchýlit od ideálního bodu. Tento program nám poskytuje grafické znázornění odchylek jednotlivých zpráv, které hlavní program přiřadil do koster řetězců.

Pro to, abychom mohli odchylku zprávy graficky znázornit, je nejprve potřeba ji vypočítat. Ještě než se dostaneme k samotnému výpočtu je třeba si definovat argument, které ve výpočtu figurují:

- Výsledná odchylka:  $\Delta$ .
- Čas zprávy, jejíž odchylku počítáme:  $t$ .
- Zbytek, z první neúplné periody – čas první zprávy kostry řetězce:  $t_r$ .
- Násobek periody, jímž je zkoumaná zpráva:  $N$ .
- Perioda kostry řetězce:  $P$ .

Ve vztahu [4.2] můžeme vidět, jak výpočet odchylky vypadá.

$$\Delta = \frac{t - t_r}{N} - P \quad [4.2]$$

#### 4.4.2 Rozšíření koster řetězců

Výsledky hlavního programu jsou v tuto chvíli ve formě koster řetězců. Je snaha o jejich rozšíření, abychom zvýšili počet přiřazených zpráv k jednotlivým radarům. V ideálním případě se dostali až k rekonstrukci kompletní komunikaci letadla a radaru. K tomu nám má pomoci program hledající zprávy, které se nacházejí v určitém okolí již přiřazených zpráv do koster řetězců.

Grafická stránka a kooperace obou programů jsou znázorněny a vysvětleny v kapitole 5.

## 5 Zhodnocení a prezentování dosažených výsledků

Primárním předmětem této kapitoly bude předvést a zhodnotit výsledky, které poskytuje hlavní program. Jak už bylo řečeno, tyto výsledky nemají za cíl zmapovat přehledovou infrastrukturu dopodrobna. V tuto chvíli je jejich účel zajistit určité základní informace o přehledové infrastruktuře pomocí velmi omezených vstupních dat. Tyto informace z výstupu hlavního programu se dají dále analyzovat a tím z nich můžeme těžit další a podrobnější údaje o zkoumané přehledové infrastruktuře. I tato analýza výstupních dat hlavního programu bude předmětem této kapitoly.

Výsledky, které tu budou prezentovány, jsou vytvořeny na základě hypotézy, která má otestovat spolehlivost výsledků hlavního programu. Hypotéza je založena na úvaze, že máme dvě sady vstupních dat z letů, jejichž trajektorie jsou shodné a pochází ze stejné oblasti. Po vložení obou sad vstupních dat do hlavního programu by měly v obou případech vycházet z velké části shodné výsledky, z toho důvodu, že ve stejné oblasti by měly být letadla v pokrytí stejných radarů.

Pro tuto práci máme k dispozici čtyři sady vstupních dat (více informací v kapitolách 1 a 3). Pro testování spolehlivosti hlavního programu využijeme pouze dvě sady. V tomto případě nevyužijeme všechny čtyři sady z důvodu náročnosti hodnocení výstupních dat. Čtyři sady jsou určeny pro sekundární analýzu, která odhaluje zajímavé informace o vzdálenostech sousedících prvků vstupních dat.

### 5.1 Prezentace výstupních dat hlavního programu

Výsledky, které jsou zde prezentovány, se zaměřují pouze na interakce letadel s radary, které trvají po celý záznam dat. Vstupní data tvoří třiminutové záznamy zpráv dvou ze čtyř dostupných letů, jsou to lety s označením *89616C* a *4BAAD3*. Data z těchto letů jsme vybrali mimo jiné z důvodu, že mají ze všech čtyřech letů nejvíce shodnou trajektorii (viz obrázek 1.2).

#### 5.1.1 Nastavení programu

Důležitým faktorem relevantních výsledků je správné zadání parametrů v nastavení programu. Zde si uvedeme přesné hodnoty nastavení, se kterým dále program analyzoval vstupní data. Jelikož jsou sady pořízeny ze stejné oblasti, jejich délka je také totožná, zvolili jsme pro testování spolehlivosti programu shodné nastavení pro obě sady vstupních dat. Hodnoty nastavení parametrů jsou v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Zadané hodnoty parametrů v nastavení hlavního programu.

Popis parametru	Označení	Hodnota
Max. hodnota referenční prvku	<i>I</i>	30
Min. hodnota periody	<i>PS</i>	2,5
Max. hodnota periody	<i>PE</i>	17
Regulace velikosti okolí	<i>Q</i>	0,6
Šířka hlavního laloku radarové antény	<i>WR</i>	2,4
Max. chybějících prvků v kostře celkem	<i>E</i>	0,25
Max. chybějících prvků v kostře za sebou	<i>ME</i>	3
Velikost okolí	<i>i</i>	0,02

### 5.1.2 Porovnání výsledků

V této části práce se budeme zabývat porovnáním počtu nalezených koster řetězců a jejich period. Nebudou tu k dispozici celé matice *RMCF*, jelikož jsou velice obsáhlé. K dispozici tu budou znázorněné pouze důležité informace pro prezentaci a hodnocení výsledků vyjmuté z matic *RMCF*.

V tabulce 5.2 a) jsou vzestupně vypsány periody všech koster řetězců, které hlavní program vygeneroval z dat zkoumaných letů. Dále je z tabulky patrné, že program při analýze vstupních dat letu *89616C* našel 20 koster řetězců a v případě dat z letu *4BAAD3* je to 21 koster řetězců.

Jak už bylo v předchozích kapitolách práce řečeno, je velmi obtížné najít správnou hranici rozlišení pro zadání hodnot parametrů v nastavení programu. V tomto případě jsou hodnoty nastaveny přísně. Z toho důvodu, je třeba výsledky programu projít a zkontrolovat. Kontrola se týká hlavně toho, zda program nevypsal kostry řetězce s větším násobkem periody než je nutné. Příčinou je právě přísné nastavení hodnot parametrů, kdy program je nucen vypsat do výsledků větší násobek periody kostry řetězce, jelikož musel vzít v potaz jen každý druhý či třetí prvek kostry řetězce, aby všem přísným podmínkám vyhověla. Z matice TDM se dají lehce dohledat programem vynechané prvky. Dále se kontrola výsledků týká, nedokonalého filtrování paralelních koster řetězců, kdy je třeba vzájemně porovnat výsledné kostry řetězců a zkontrolovat, zda některé z nich nejsou vůči jiným paralelní. Po této kontrole následuje analýza period nalezených koster řetězců. V tomto kroku vezmeme periody jedné sady výsledků a pro všechny se postupně snažíme najít periodu se stejnou hodnotou z druhé sady výsledků a vytvářet tak dvojice koster řetězců se stejnou periodou. Rezultáty zmíněné kontroly výsledků a jejich následná analýza period jsou uvedeny v tabulce b).

Tabulka 5.2 a) Seznam period nalezených koster řetězců z dat letů 89616C a 4BAAD3.

b) Seřazené periody koster řetězců z letů 89616C a 4BAAD3 dle jejich hodnoty.

a)			b)		
	Perioda [s] (let 89616C)	Perioda [s] (let 4BAAD3)	Perioda [s] (let 89616C)	Perioda [s] (let 4BAAD3)	Rozdíl period [s]
1.	3,9893	3,9881	3,9893	3,9881	0,0012
2.	4,7628	4,7648	4,7628	4,7648	0,0020
3.	4,8474	4,8499	4,8474	4,8513	0,0039
4.	4,8486	4,8513	4,8486	4,8499	0,0013
5.	4,9331	4,9358	4,9331	4,9358	0,0027
6.	4,9426	4,9419	4,9426	4,9419	0,0007
7.	4,9999	5,1055	4,9999	15,0001	0,0002
8.	5,1030	6,0059	5,1030	5,1055	0,0026
9.	6,0041	9,8049	6,0041	12,0039	0,0021
10.	6,0074	9,8437	6,0074	6,0059	0,0016
11.	9,3650	10,1533	16,0015		
12.	9,8011	10,1538	9,3650		
13.	10,1420	10,1617	9,8011	9,8049	0,0038
14.	11,9457	11,9476		9,8437	
15.	11,9672	11,9680	10,1420	10,1533	0,0113
16.	11,9757	11,9718		10,1538	
17.	11,9758	11,9735		10,1617	
18.	13,9991	11,9770	11,9457	11,9476	0,0018
19.	14,5491	12,0039	11,9672	11,9680	0,0008
20.	16,0015	14,5556		11,9718	
21.	-----	15,0001	11,9757	11,9735	0,0022
			11,9758	11,9770	0,0012
			13,9991		
			14,5491	14,5556	0,0065

Prezentace výsledků z tabulky 5.2 b):

V případě modře podbarvených period se jedná o paralelní řetězce. V každé sadě výsledků se objevil právě jeden případ, proto se v obou případech sníží celkový počet nalezených radarů a jedna, tzn. na 19 resp. 20. Je zajímavostí, že v obou případech nalezených paralelních řetězců se jedná o velmi podobné hodnoty period.

V případě žlutě podbarvených hodnot se jedná o vícenásobnou periodu. U hodnot 12,0039 a 16,0015 jde o dvojnásobek, proto se ve skutečnosti jedná o periodu ~6 s, resp. ~8 s. U hodnoty 15,0001 se jedná o trojnásobek, tzn., že se jedná o periodu ~5 s.

Dále je tabulka 5.2 b) rozšířena o informaci, jak velký je rozdíl mezi námi přiřazenými periodami. Přiřadili jsme k sobě 16 period (jednu dvojici period paralelních koster řetězců

nepočítáme). Z třetího sloupce lze vypočítat, že střední hodnota uvedených diferencí je 0,0025 s. Vezmeme-li v potaz to, že doba ozáření (která může mít vliv na změnu velikosti periody) se pro interval period <3, 15> s pohybuje v rozmezí <0,02, 0,1> s, pak zmíněná střední hodnota diferencí je přibližně 8mi až 30násobně menší.

Pokud jsme přiřadili 16 period, znamená to, že zbyly nepřirazené 3 (let 89616C), resp. 4 (let 4BAAD3) kostry řetězců. Což znamená, že se nám podařilo přiřadit minimálně 80% resp. 84% koster řetězců, u kterých střední hodnota rozdílu period dosahuje 0,0025 s. Tento fakt nasvědčuje, že spolehlivost výsledků programu by mohla být na vysoké úrovni.

Tabulka 5.3 a) Procentuální vyjádření celistvosti nalezených koster řetězců letu 89616C.  
b) Procentuální vyjádření celistvosti nalezených koster řetězců letu 4BAAD3.

a)		b)	
Let 89616C		Let 4BAAD3	
Perioda [s]	%	Perioda [s]	%
3,9893	86,96	3,9881	97,83
4,7628	97,37	4,7648	97,37
4,8474	84,21	4,8499	84,21
4,8486	92,11	4,8513	86,84
4,9331	100,00	4,9358	97,30
4,9426	86,49	4,9419	91,89
4,9999	78,38	5,1055	100,00
5,1030	97,22	6,0059	100,00
6,0041	93,33	9,8049	78,95
6,0074	100,00	9,8437	89,47
9,3650	85,00	10,1533	83,33
9,8011	78,95	10,1538	83,33
10,1420	100,00	10,1617	88,89
11,9457	81,25	11,9476	87,50
11,9672	93,75	11,9680	93,75
11,9757	93,75	11,9718	93,75
11,9758	93,75	11,9735	93,75
13,9991	92,31	11,9770	93,75
14,5491	84,62	12,0039	80,00
16,0015	75,00	14,5556	76,92
Střední hod.	89,72	15,0001	83,33
		Střední hod.	89,63

### 5.1.3 Celistvost řetězců

Jedním z předpokladů, se kterým v této práci pracujeme, je, že by se radar měl dotázat letadla při každé otáčce jeho antény. V tom případě bychom měli nacházet nepřerušené sekvence zpráv, jimž nechybí žádný prvek. V reálném provozu ovšem dochází k mnoha nepřesnostem, ať už přímo při komunikaci, nebo při sběru dat pro tuto analýzu. Proto nelze očekávat, že nalezené kostry řetězců budou nepřerušené a nebude jim tak chybět ani jeden prvek. Výsledné procentuální vyhodnocení celistvosti nalezených koster řetězců obou analyzovaných záznamů je v tabulce 5.3.

Dosažení vysokých procentuálních hodnot celistvosti koster řetězců je podpořeno nastavením programu, kdy jsme parametru E zadali hodnotu 0,25, tzn., že výsledným kostrám řetězců může chybět maximálně 25% prvků. Střední hodnota celistvosti jednotlivých koster řetězců z letu č. 89616C je 89,72% a z letu č. 4BAAD3 je to 89,63%. Tyto vysoké údaje vypovídají o tom, že je velmi pravděpodobné, že nalezené kostry řetězců indikují skutečné komunikace letadla s radary.

### 5.1.4 Počet přiřazených zpráv ze vstupního vektoru k určitým radarům

Další hodnotu, kterou se snažíme při analýze tohoto projektu zajistit, je počet přiřazených zpráv k radarům, za předpokladu, že kostry řetězců ve výsledné matici *RMCF* reprezentují skutečné interakce letadel s radary.

Je zde třeba znovu zmínit, že kostry řetězců představují ten nejmenší možný vzorek komunikace letadla s radarem. Proto, když jako výstupní data v matici *RMCF* vystupují pouze kostry řetězců a to navíc jen těch radarů, které komunikovali s letadlem po celý záznam dat, je nutné předpokládat, že procento přiřazených zpráv k radarům v rámci matice *RMCF* bude nízké. V tabulce 5.4 je možné vidět, že se u obou zkoumaných letů pohybujeme okolo 30% přiřazených zpráv z celkového množství, které se v záznamu dat nachází.

Tabulka 5.4 Počty přiřazených zpráv k radarům.

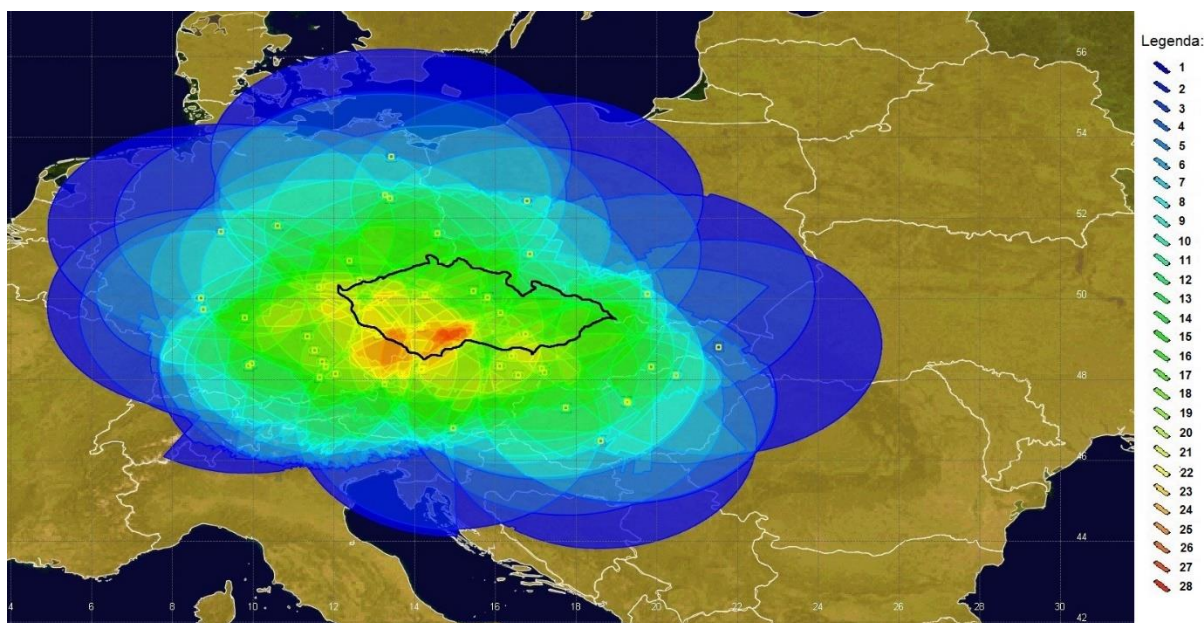
	Zpráv celkem	Zprávy v RMCF	%	Zprávy po rozšíření	%
Let 89616C	1463	465	31,78	510	34,86
Let 4BAAD3	1507	460	30,52	640	42,47

V tuto chvíli nám může pomoci matice *CCM*, která nás informuje mimo jiné o tom, které zprávy jsou součástí alespoň jedné kostry řetězce. Důležité je říci, že jsou zde uloženy také informace o paralelních kostrách řetězců, které nejsou součástí matice *RMCF*. Tyto vyřazené paralelní kostry řetězců můžeme považovat za rozšíření původních koster řetězců z matice *RMCF*.



Po zahrnutí zpráv paralelních řetězců se hodnoty celkem přidělených zpráv se zvýšily o přibližně o 3%, resp. 12%. Takovýto rozdíl přírůstku zpráv mezi dvěma lety závisí na vlastnostech vstupních dat. Pokud se v nich objevují spíše částečně paralelní kostry řetězců, pak je program vyřadí již v prvním filtru a tak se jejich prvky do matice CCM nedostanou. Z toho vyplývá, že menší přírůstek po přiřazení zpráv z paralelních řetězců obecně neindukuje, že by komunikace letadla s radarem nebyla tak intenzivní. Nicméně se i v tom lepším případě prozatím pohybujeme okolo hodnoty 40% přiřazených zpráv.

Možných důvodů proč dosahujeme výsledků okolo 40% i po rozšíření původních výsledků z matice *RMCF* je více. Závisí zejména na tom, že stále nemáme k dispozici, celé rekonstrukce řetězců reprezentující komunikace letadel s radary, pracujeme pouze s rozšířenými kostrami řetězců. Další příčinou nepřičtení zpráv k jednotlivým radarům může být, že v oblasti byly v provozu testovací zařízení, které vybudily generování zpráv palubního odpovídače. Dále výsledek závisí na tom, že hledáme jen interakce radarů s letadly, jejichž celá trajektorie letu ležela v nominálním krytí daných radarů. V této souvislosti nám pomůže bakalářská práce [10] Bc. Filipa Konečného studenta Fakulty Dopravní ČVUT. Jejím cílem je zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů v regionu Střední Evropy, za účelem zjistit násobnost krytí České republiky sekundárními radary. Jedním z výstupů práce je model, který simuluje násobnost krytí na území ČR. Tato simulace se vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 Simulace násobnosti krytí území ČR sekundárními radary. Zdroj: [10]

Násobnost pokrytí zobrazeném v simulaci je v letové hladině FL300. To přibližně odpovídá letovým hladinám, ve kterých se pohybovala letadla při sběru dat pro tuto práci. Z obrázku 5.1 je patrné, že na území ČR končí nominální krytí mnoha radarů. Je tedy velmi pravděpodobné, že i trajektorie třiminutového letu bude procházet mnoha hranicemi nominálního krytí radarů.

Tím pádem se komunikace letadla a radaru ukončí/naváže a nesplní podmínku, kterou program po komunikaci vyžaduje – aby trvala po celou trajektorii letu.

### 5.1.5 Porovnání dosažených výsledků s jinými dostupnými studii

Pro další zkoumání úspěšnosti výstupních dat hlavního programu by nám mohla pomoci bakalářská práce [10], která je uvedena v předchozí podkapitole. Pro náš projekt nemá přínos jen z důvodu modelu, jehož výstupem je simulace násobnosti pokrytí území ČR sekundárními radary. Autor ve své práci [10] také uvádí seznam zmapovaných kooperativních přehledových systému společně s jejich technickými parametry. Seznam není zcela úplný, ale i tak je to pro naši práci velice cenným zdrojem informací. Jedním z uvedených parametrů v seznamu je RPM – počet otáček radarové antény za minutu. Je to pro naši práci velice důležitá hodnota, kterou po přepočtu na periodu otáčení radarové antény můžeme porovnat s našimi výstupními daty.

Porovnání dat z [10] a našich výstupních data hlavního programu jsou v tabulkách 5.5 a) a 5.5 b). Pro přehlednost jsme do tabulek zahrnuli pouze ty hodnoty z obou zdrojů, které jsou si navzájem blízké.

Tabulka 5.5 a) Porovnání nalezených period záznamu letu 89616C s daty z [10].

b) Porovnání nalezených period záznamu letu 4BAAD3 s daty z [10].

Data z [Filip]		89616C		Rozdíl period [s]	Data z [Filip]		4BAAD3		Rozdíl period [s]
RPM	Perioda [s]	Perioda [s]	Perioda [s]		RPM	Perioda [s]	Perioda [s]	Perioda [s]	
15	4	3,9893	0,0107	15	4	3,9881	0,0119		
12,5	4,8	4,7628	0,0372	12,5	4,8	4,7648	0,0352		
12	5	4,9999	0,0001	12	5	5,0000	0,0000		
10	6	6,0041	0,0041	10	6	6,0019	0,0019		
10	6	6,0074	0,0074	10	6	6,0059	0,0059		
7,5	8	8,0008	0,0008	5	12	11,9770	0,0230		
5	12	11,9758	0,0242	5	12	11,9735	0,0265		
5	12	11,9757	0,0243	5	12	11,9718	0,0282		
5	12	11,9672	0,0328	5	12	11,9680	0,0320		
5	12	11,9457	0,0543	5	12	11,9476	0,0524		

V obou případech analyzovaných dat se podařilo k přiřadit celkem deset period. Některé hodnoty period se opakují, ale i tak se podařilo přiřadit periody, jejichž hodnoty jsou z celého intervalu, v němž jsme kostry řetězců hledali. Ačkoli je pravda, že výsledky tvoří téměř z poloviny perioda s hodnotou 12 s. V tabulkách jsou žlutě zvýrazněny hodnoty, které jsou

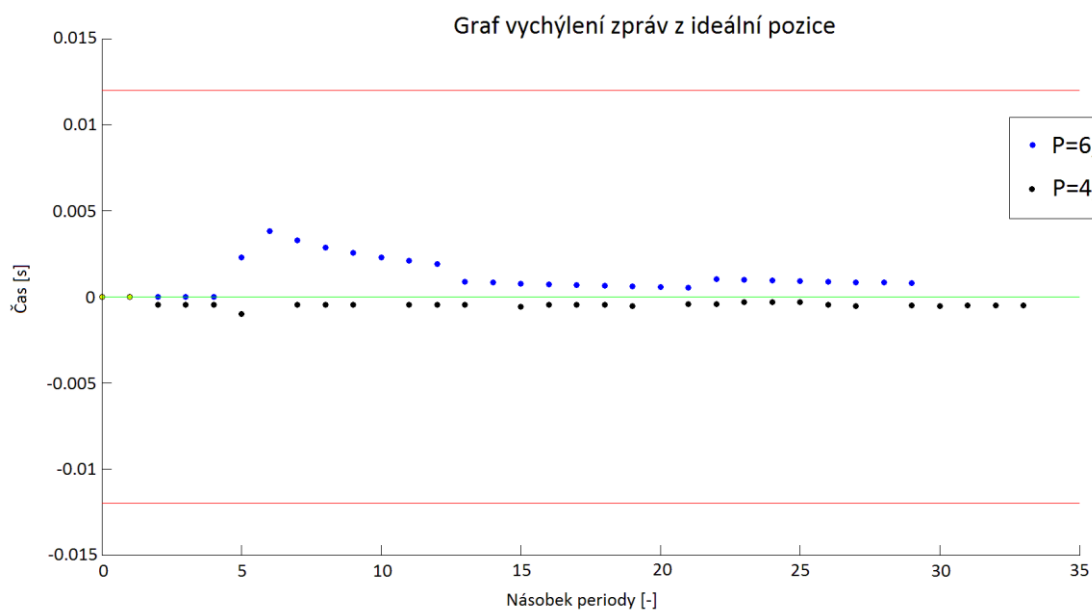
s těmi z [] téměř totožné. Ostatní přiřazené dvojice mají sice větší rozdíl hodnot, ale stále se dá mluvit o velmi blízké shodě.

Pokud se nám podařilo přiřadit z obou sad výsledků deset period, pak je úspěšnost při porovnání s daty z [] přibližně 50%.

### 5.1.6 Sekundární analýza výstupních dat hlavního programu

Sekundární analýza je zde uvedena jako příklad, jak se dají dále dosažené výstupní data hlavního programu analyzovat. Není to primární cíl této práce, ale pro další vývoj tohoto projektu je to nezbytná a velmi obsáhlá část. Proto se zde jen zmíníme o několika možnostech, jak dále s dosaženými výsledky pracovat.

Bude řeč o dvou programech (kapitola 4.4) a jejich vzájemné kooperaci za účelem snahy rozšířit kostry řetězců z matice  $RMCF$ , abychom zvýšili počet přiřazených zpráv k jednotlivým radarům. V ideálním případě se dostali až k rekonstrukci kompletní komunikaci letadla a radaru.



Obrázek 5.2 Graf vychýlení zpráv z ideální pozice.

Pomocí první programu jsme schopni graficky zobrazit odchylky zpráv, které jsou součástí koster řetězců matice  $RMCF$ , od ideální pozice. Příklad tohoto zobrazení je v grafu na obrázku 5.2. Jsou zde vykreslené zprávy dvou koster řetězců z výsledků pro let 89616C. Černé body reprezentují zprávy kostry řetězce s periodou 4,9999 s, modré potom tu s periodou 6,0074 s. Na ose x grafu se nachází bezrozměrná veličina násobek periody. Ta udává, jaké pořadí má pozice dané zprávy v kostře řetězce. Na ose y se nachází čas v sekundách, kterým je interpretována odchylka dané zprávy od ideální pozice. Zeleně zbarvená čára udává právě ideální hodnotu, kterou by měly prvky kostry řetězce mít, pokud by byla hodnota její periody

neměnná. Červené čáry definují maximální hranici možného odchýlení prvku od ideálního bodu, která je nastavena při analýze dat.

Do grafu jsme schválně použili tyto dvě kostry řetězce, abychom mohli demonstrovat povahu výsledků. Černě zbarvené prvky reprezentují část výsledků, o nichž můžeme konstatovat, že vychýlení, ke kterému u nich dochází, je zanedbatelně malé. Naopak druhou skupinu výsledků představuje kostra řetězce znázorněná v grafu modrými body. Zde se u některých zpráv objevuje větší výchylka, než u ostatních.

Druhý program k analýze výsledků hlavního programu přispěje tím, že hledá zprávy, které se nacházejí v určitém okolí již přiřazených zpráv do koster řetězců z matice *RMCF*. To má pomoci při rekonstrukci celých komunikačních toků mezi letadlem a radarem. Pokud vložíme data získaná z tohoto programu do grafu, jenž vytváří předchozí program, můžeme sledovat, jestli se poté neobjevují opakující se vzorce, indikující komunikaci letadla s radarem.

Díky kooperaci těchto programů můžeme sledovat, jak se komunikace letadla s radarem vyvíjí v průběhu času. To nám umožní analýzu za účelem získání většího objemu dat a parametrů, jak o interakci letadla s přehledovou infrastrukturou, tak o ní samotné.

## 5.2 Analýza dat matic FIDiNDM

V této kapitole se budeme věnovat analýze dat, které nám poskytuje matice FIDiNDM. Nese v sobě informace o vzdálenostech mezi sousedícími zprávami ze záznamu daného letu. Její podrobný popis je v kapitole 4.3. Jak už bylo uvedeno, odhaluje nám velice zajímavé informace o naměřených datech, využitých pro analýzu. Jedna z výhod, kterou nám matice FIDiNDM přináší, je, že můžu určit, kolik procent zpráv ze záznamu má ve svém určitém okolí, alespoň jednu další zprávu. Tyto informace se využívají, při rozšiřování nalezených koster řetězců, abychom dostali co možná největší počet zpráv, které se komunikace týkají.

Hodnoty vzdáleností mezi sousedícími prvky jsou zaokrouhlovány na čtyři desetinná místa. Po zaokrouhlení jsme k sobě přiřadili vzdálenosti, které mají shodou velikost. Tím vznik seznam, který nám nás informuje o četnosti vzdáleností daných hodnot mezi zprávami.

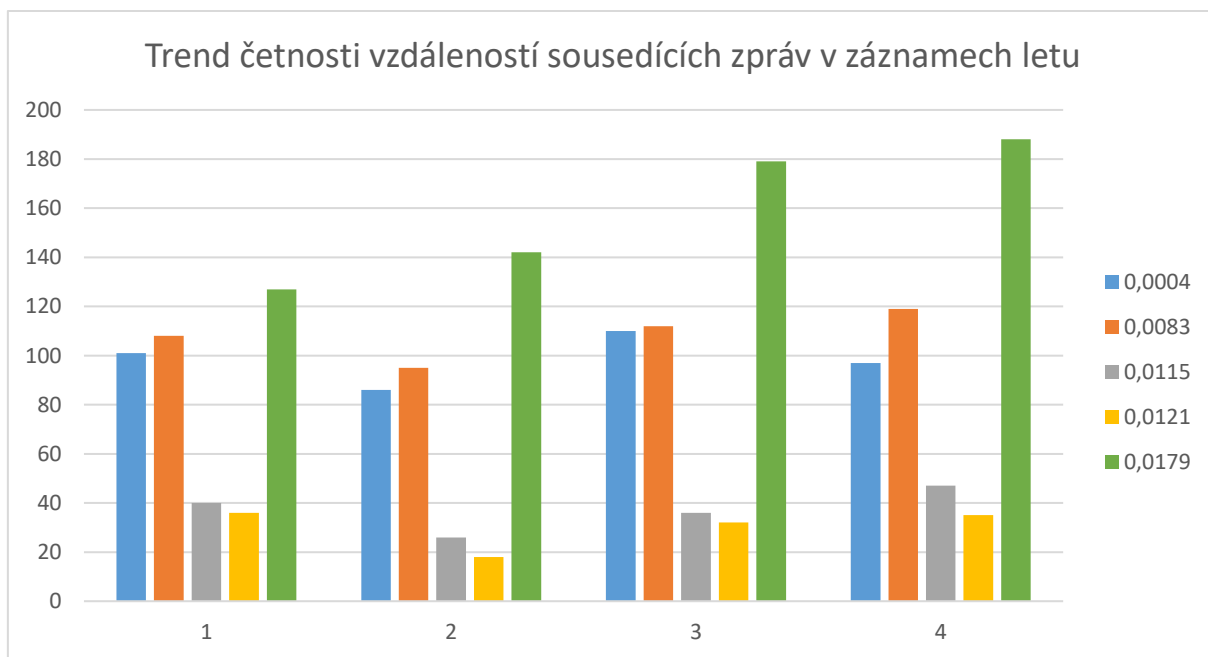
Pro představu jsou v tabulce 5.6 uvedeny počty unikátních hodnot vzdáleností, které se už jen nadále v záznamu opakují. Graf, který popisuje přes 600 hodnot, je obtížné zobrazit. Nicméně, z tabulky 5.6 je dále vidět, že více než 90% hodnot vzdáleností není v záznamu zastoupena více než třikrát. Zbývající hodnoty vzdáleností pak jsou zastoupeny velmi hojně a vytváření tak píky dosahující velikosti od 20 do 200. Je velmi zajímavé, že hodnoty vzdáleností, u kterých se píky tvoří, jsou u všech čtyř záznamů letů identické.

Tabulka 5.6 Četnost unikátních hodnot vzdáleností mezi zprávami v záznamu letu.

	Unikátní hod. vzd.	< 3	%
89616C	699	661	94,56
4B8435	618	579	93,69
4BAAD3	685	651	95,04
738052	665	628	94,44

V grafu na obrázku 5.3 je zobrazeno hlavních 5 hodnot vzdáleností, jež jsou v záznamu dat nejvíce zastoupeny. Konkrétní hodnoty těchto pěti vzdáleností jsou uvedeny v legendě. Z grafu je možné sledovat trend četnosti daných pěti vzdáleností, který se objevuje u všech čtyřech záznamů. Důvod, tak velice přesných výsledků, může mít dotazovací algoritmus radarů. Pokud se radary dotazují vícekrát za dobu ozáření letadla, pak mají nastavenou určitou hodnotu, po které dotazy za sebou vysílají. To pak má za následek, že se s takovou to přesností dané hodnoty v záznamech opakují.

Tento jev poukazuje to na to, že se radary opravdu často ptají vícekrát za dobu ozáření letadla a tak je třeba dále pracovat na tom, abychom rozšířili nalezené kostry řetězců.



Obrázek 5.3 Graf trendu četnosti vzdáleností sousedících zpráv v záznamu letu.

## 6 Závěr

Softwarové řešení se skládá z více částí. Primární složkou je hlavní program, jehož výsledky jsou stěžejní pro tuto práci. Dále jsou zde uvedeny programy, které pomáhají s další analýzou výsledku hlavního programu, či také sami analyzují vstupní data určená hlavnímu programu.

Na počátku jsme vyřkli předpoklad, dle kterého jsme chtěli otestovat spolehlivost hlavního programu. Jejím základem je myšlenka, že pokud dvě letadla letí po stejné dráze ve vzdušném prostoru, pak by měla obě letadla být v pokrytí stejného počtu radarů.

Proto jsme naměřili několik záznamů dat z letů, jejichž trajektorie byly co nejvíce shodné. To se nám podařilo a dále jsme tyto záznamy zpracovávali, abychom z nich dostali vstupní data v potřebném formátu. Nakonec jsme vybrali dvě sady dat, které pochází z dvou různých letů. Tyto data jsme pak poskytli hlavnímu programu.

Výsledky z obou sad vstupních dat, které hlavní program vygeneroval, jsme navzájem porovnali, abychom zjistili, zda se potvrdí předpoklad, který byl stanoven na počátku. Program vyhodnotil, že se letadla nacházela v krytí 19 radarů resp. 20 v případě druhého letu. Výsledky se z pohledu srovnání hodnot period velmi blíží, 16 period se shoduje s průměrnou odchylkou 0,0025 s. A tento výsledek se dá považovat za úspěšný. Dále se hodnotila celistvost komunikace, jelikož by se radar měl ptát při každé otáčce své antény, mělo by i letadlo odpovídat při každé periodě. U všech odhalených komunikací chybí maximálně 25% zpráv, v průměru je to méně než 11%. Celkem se podařilo přiřadit 40% zpráv obsažených v záznamu.

Problematika, kterou se tento projekt zabývá, je velice komplikovaná a snaží se z velmi málo vstupních dat získat obsáhlé informace. Takovýto výzkum je proto velmi náročný. Proto hlavní program prozatím nemá ambice, aby prováděl podrobné mapování přehledové infrastruktury. Stanovuje ale velmi dobrý základ pro další výzkum, který je v práci také okrajově zmíněn. Výsledky práce jsou možné využít v dalších výzkumech, např. simulaci přetížení komunikační frekvence 1090 MHz.

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1	Struktura zprávy formátu DF04.	12
Tabulka 1.2	Struktura zprávy formátu DF05.	12
Tabulka 1.3	Struktura zprávy formátu DF20.	12
Tabulka 1.4	Struktura zprávy formátu DF21.	12
Tabulka 1.5	Rozbor počtu zpráv před úpravou délky záznamu.	14
Tabulka 1.6	Rozbor počtu zpráv po úpravě délky záznamu.	14
Tabulka 1.7	Rozbor počtu zpráv dle formátu sestupného spoje.	14
Tabulka 3.1	Popis a souřadnice stanic multilateračního systému ŘPL.	21
Tabulka 3.2	Typy a časové intervaly vysílání zpráv ADS-B z letícího letadla.	26
Tabulka 3.3	Procentuální zastoupení v záznamu dat vybraných zpráv formátu DF17.	26
Tabulka 5.1	Zadané hodnoty parametrů v nastavení hlavního programu.	43
Tabulka 5.2	a) Seznam period nalezených koster řetězců z dat letů 89616Ca4BAAD3.	44
	b) Seřazené periody koster řetězců z letů 89616Ca4BAAD3 dle jejich hodnoty.	44
Tabulka 5.3	a) Procentuální vyjádření celistvosti nalezených koster řetězců letu 89616C.	45
	b) Procentuální vyjádření celistvosti nalezených koster řetězců letu 4BAAD3.	45
Tabulka 5.4	Počty přiřazených zpráv k radarům.	46
Tabulka 5.5	a) Porovnání nalezených period záznamu letu 89616C s daty z [10].	48
	b) Porovnání nalezených period záznamu letu 4BAAD3 s daty z [10].	48
Tabulka 5.6	Četnost unikáních hodnot vzdáleností mezi zprávami v záznamu letu.	51

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Schéma laloků antény SSR.	11
Obrázek 1.2 Zobrazení trajektorií letů, jejichž data jsou podrobena analýze.	15
Obrázek 2.1 Struktura MB pole. []	17
Obrázek 2.2 Znázornění posloupnosti stejně od sebe vzdálených zpráv.	19
Obrázek 3.1 Umístění stanic multilateračního systému ŘLP na území ČR.	20
Obrázek 3.2 Schéma fúzování dat přijímačů.	22
Obrázek 3.3 Anténa stanice pro příjem vstupních dat. []	23
Obrázek 3.4 Histogram znázorňující počet přijatých zpráv během 24 hodin. []	24
Obrázek 4.1 Schéma první úvahy softwarového řešení.	28
Obrázek 4.2 Schéma využití parametru PS a PE v algoritmu hlavního programu.	31
Obrázek 4.3 Schéma problematiky nekonstantnosti periody.	32
Obrázek 4.4 Princip korekce okolí, ve kterém program hledá nové prvky kostry řetězce.	32
Obrázek 4.5 Schéma principu hledání prvků kostry řetězce.	34
Obrázek 4.6 Grafický rozbor výstupu hlavního programu – matice RMCF.	37
Obrázek 4.7 Sloupec matice <i>FIDiNDM</i> .	40
Obrázek 5.1 Simulace násobnosti krytí území ČR sekundárními radary. []	47
Obrázek 5.2 Graf vychýlení zpráv z ideální pozice.	49
Obrázek 5.3 Graf trendu četnosti vzdáleností sousedících zpráv v záznamu letu.	51



## Zdroje a Literatura

- [1] ICAO. Annex 10 Volume IV Surveillance and Collision Avoidance System 2007
- [2] ICAO. Doc 9871 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter 2011
- [3] ICAO. Doc 9684 Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems 2004
- [4] EUROCAE ED-73E MOPS for SSR Mode S Transponder 2011
- [5] LIPTÁK, T.: Model zatížení RF pásma 1090 MHz. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha, 2015.
- [6] ZACH, M.: Návrh nízkonákladového MLAT systému. Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha, 2015.
- [7] Radartutorial.eu: [online]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>
- [8] ŠEDIVÝ, P.: Sekundární přehledový radar SSR. [PDF], 2002, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: <http://radio.feld.cvut.cz/courses/D37LBR/materialy.php?akce=dlf&zdroj=vpm&fkey=0&xtgt=2f686f6d652f53657276696365732f7777772f68746d6c2f6564755f6465706f742f2f3337524452>
- [9] Bezoušek, P., Šedivý, P. *Radarová technika*. 1. vydání. Praha: ČVUT v Praze
- [10] KONEČNÝ, F.: Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha 2016