



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

*Bc. Jakub Šíma*

**POKROČILÉ MAPOVÁNÍ PŘEHLEDOVÉ**

**INFRASTRUKTURY ANALÝZOU SSR**

**ODPOVĚDÍ OD LETADEL**

Diplomová práce

**2021**



**K621** .....**Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jakub Šíma**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **Pokročilé mapování přehledové infrastruktury  
analýzou SSR odpovědí od letadel**

Název tématu (anglicky): **Advanced Mapping of Surveillance Infrastructure by SSR  
Aircraft Reply Analysis**

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout metodu, jak ze zachycených odpovědí emitovaných letadlovými SSR odpovídači zjistit informace o pozemní SSR přehledové infrastruktuře.
- Naměření a příprava vstupních dat potřebných pro analýzu
- Nalezení a specifikování metod pro identifikaci periodických řetězců ze záznamu odpovědí vyslaných palubním odpovídačem SSR
- Vytvoření a testování programů hledajících periodické řetězce
- Návrh mapování přehledové infrastruktury prostřednictvím analýzy odpovědí emitovaných palubním SSR odpovídačem
- Zhodnocení a prezentování úspěšnosti navrhované metody



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO Annex 10: Aeronautical Telecommunication Volume IV, Surveillance and Collision Avoidance System, Ed. 4, 2007  
ED-73E MOPS for SSR Mode S Transponder, 2011  
ICAO: Doc 9871 Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter, Ed. 2, 2011

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

Datum zadání diplomové práce: **22. dubna 2020**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **17. května 2021**  
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. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Bc. Jakub Šíma  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 22. dubna 2020

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucím mé diplomové práce Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Liptákovi, kteří mi poskytli bezpočet cenných informací, a pomohli mi dosáhnout dokončení této práce. Dále mé poděkování patří společnosti Era a.s. za poskytnutí dat pro účely této práce a jejím zaměstnancům za mnoho užitečných rad a konzultací. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za morální podporu, pomoc a trpělivost po celou dobu mého studia.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze, Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při 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 17. 5. 2021

.....

Podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

## POKROČILÉ MAPOVÁNÍ PŘEHLEDOVÉ INFRASTRUKTURY ANALÝZOU SSR ODPOVĚDÍ OD LETADEL

diplomová práce

květen 2021

Jakub Šíma

### ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je navržení metody, která ze zachycených odpovědí emitovaných palubními SSR odpovídači získává informace o pozemní SSR přehledové infrastruktuře. Záměrem je využít naměřená vstupní data zachycená na přijímací stanici s nízkými náklady a nízkými nároky na architekturu systému. Detekce dotazovačů je založena na asociaci přijatých odpovědí letadel dotazovači, jež je vybudil a následné lokalizaci dotazovačů. Mezi získané informace o přehledové infrastruktuře patří počet detekovaných dotazovačů, odhad jejich polohy a perioda otáčení jejich antény.

### ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to design a method using replies emitted by aircraft SSR transponders to get parameters of ground SSR surveillance infrastructure. Our intention is to use an input data measured by low-cost receiving station and simple system architecture. Detection of interrogators is based on association received replies to interrogator which excited them, and then on localization. Method provided parameters are number of detected interrogators, estimation of their position and antenna rotation period.

## KLÍČOVÁ SLOVA

sekundární radar, mód S, SSR odpovídač, šířka svazku, radarové krytí, perioda otáčení radarové antény, lokalizace dotazovače

## KEY WORDS

secondary radar, mode S, SSR transponder, beam width, radar coverage, radar antenna rotation period, interrogator localization

## OBSAH

Seznam zkratk .....	7
1. Úvod .....	8
2. Detekovatelnost dotazovače .....	9
2.1. Typy dotazovačů .....	9
2.2. Možnosti detekování dotazovače .....	9
2.3. Detekování SSR .....	10
2.3.1. Identifikátor dotazovače .....	10
2.3.2. Dotazovací perioda .....	12
2.3.3. Periodické posloupnosti odpovědí .....	13
2.4. Definice mapovaného dotazovače .....	14
2.5. Detekce dotazovače profesionálním systémem .....	14
2.5.1. Pozemní stanice .....	15
2.5.2. Funkce systému .....	15
2.5.3. Metody lokalizace dotazovače .....	16
3. Vstupní data .....	18
3.1. Primární měření dat .....	18
3.1.1. Formáty zpráv sestupného spoje .....	18
3.1.2. Požadavky na měřená data .....	20
3.2. Data z reálného provozu .....	21
3.2.1. Zpracování dat .....	21
3.2.2. Naměřená data a ověření jejich spolehlivosti .....	22
3.3. Data ze simulace vzdušného prostoru .....	24
3.3.1. Vygenerovaná data .....	25
4. Metoda mapování přehledové infrastruktury .....	28
4.1. Detekce dotazovače .....	28
4.1.1. Komunikace letadlo-dotazovač .....	29
4.1.2. Identifikace periodických řetězců v časových řadách .....	30

4.1.3.	Postup detekování dotazovače .....	32
4.1.4.	Vytvoření množiny společných dotazovačů.....	33
4.2.	Lokalizace dotazovače.....	34
4.2.1.	Prostor sledování.....	34
4.2.2.	Prostor měření.....	34
4.2.3.	Zobrazení prostoru sledování do prostoru měření.....	37
4.3.	Výsledný odhad polohy dotazovače .....	44
5.	Vyhodnocení úspěšnosti navrhované metody .....	46
5.1.	Aspekty metody při využití třech letadel .....	46
5.2.	Měření přesnosti odhadu polohy dotazovače .....	47
5.3.	Simulovaný vzdušný prostor .....	48
5.3.1.	Výsledky detekce dotazovačů .....	49
5.3.2.	Výsledky lokalizace.....	55
5.4.	Reálný vzdušný prostor .....	60
5.4.1.	Výsledky detekce dotazovačů.....	61
5.4.2.	Výsledky lokalizace dotazovačů.....	62
6.	Závěr .....	65
	Seznam tabulek .....	67
	Seznam obrázků .....	68
	Zdroje a Literatura.....	69
	Přílohy .....	71



## Seznam zkratek

ADS-B	Automatické závislé sledování – vysílání / Automatic Dependent Surveillance – Broadcast /
ES	Extended Squitter
DF	Sestupný formát / Downlink Format
ŘLP ČR	Řízení letového provozu České republiky
SSR	Sekundární přehledový radar / Secondary Surveillance Radar
TCAS	Protisrážkový systém / Traffic Collision Avoidance System
TOA	Čas příchodu (zprávy) / Time of Arrival
PRF	Pulzní opakovací frekvence / Pulse Repetition Frequency
WGS84	Světový geodetický systém 1984 / World Geodetic System 1984
ECEF	Earth Centered, Earth Fixed coordinate system
ENU	East, North, Up coordinates
LAT	Zeměpisná šířka / Latitude
LON	Zeměpisná délka / Longitude
ALT	Výška / Altitude

# 1. Úvod

Letecká doprava je nejbezpečnějším druhem dopravy, kdy se o toto prvenství zaslouhuje mnoho faktorů. Jedním z nich je i využívání kooperativních přehledových systémů pro řízení letového provozu. Tyto technologie dnes generují mnoho informací, které jsou poskytovány jak řídícím letového provozu za účelem bezpečného koordinování letů, tak i posádce letadel pro jejich 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 překročení této kapacity je příčinou zatížení rádiových pásem a palubních odpovídačů. Proto je důležité mít přehled a monitorovat činnost přehledové infrastruktury z důvodu její nezastupitelné úlohy v oblasti letectví. Obzvláště v evropském regionu, kde je vzdušný prostor velmi fragmentovaný a je zde velká hustota provozu, dochází k velkému vytížení komunikačního kanálu 1030/1090 MHz. V případě nekoordinovaného využití tohoto RF pásma může dojít k omezení činnosti a výkonu přehledových systémů, čímž se sníží bezpečnost letového provozu. Pokud je možné mapovat a monitorovat činnost dotazovačů operujících v pásmu 1030/1090 MHz, je pak možné minimalizovat riziko a dopady spojené s přetížením tohoto pásma a udržet tak podmínky splňující vysoký standard bezpečnosti letového provozu.

Práce se zabývá návrhem metody určení počtu přítomných SSR dotazovačů ve sledované oblasti, jejich parametrů a možností detekované dotazovače lokalizovat. SSR dotazovače pracují v pásmu 1030/1090 MHz a naším cílem je vytvořit metodu pracující pouze s informacemi získatelných z pásma 1090 MHz, protože přijímáme pouze odpovědi vysílané palubními odpovídači v pásmu 1090 MHz na jednu přijímací stanici. Tato stanice měří čas příchodu a bitový obsah zpráv Mód-A, C, S vysílaných palubními odpovídači.

## 2. Detekovatelnost dotazovače

V rámci této práce pod pojmem přehledová infrastruktura rozumíme obecně množinu kooperativních dotazovačů, které signálem v RF pásmu 1030 MHz u letadel vybavenými SSR odpovídačem vybudí odpovědi vysílané v RF pásmu 1090 MHz. Nejprve se zaměříme na rozdělení dotazovačů, které mohou přehledovou infrastrukturu tvořit. Dotazovače rozdělíme dle jejich charakteristik a chování, abychom pak byli schopni určit možné způsoby jejich detekce. Pro vybranou skupinu dotazovačů, která bude nadále předmětem mapování, blíže definujeme možnosti detekovatelnosti i zvolený způsob detekce.

### 2.1. Typy dotazovačů

Rozdělení dotazovačů, které obecně mohou tvořit přehledovou infrastrukturu, je provedeno na základě více aspektů. [1], [15]

Dělení dle typu antény:

- klasické SSR radary s rotující anténou,
- dotazovače s pevnou anténou
  - všesměrovou nebo
  - jedno či více sektorovou.

Dělení dle typu dotazování:

- sektorové (směrové) All-Call dotazy,
- všesměrové adresné,
- kombinované.

Dělení dle charakteru dotazování v závislosti na čase:

- konstantní opakovací perioda dotazování,
- náhodné dotazování.

Podstatné je rovněž rozdělení dotazovačů podle toho, zda odpovědi letadel obsahují identifikaci dotazovače, který odpovědi vybudil.

### 2.2. Možnosti detekování dotazovače

Primární vstupní data určená k mapování přehledové infrastruktury jsou v našem případě v podobě sekvence přijatých odpovědí vyslaných palubním odpovídačem. Dotazy, které vybudily přijaté odpovědi, nejsou součástí souboru primárních dat.

Na začátek poznamenejme, že dotazovač, který se dotazuje pouze adresně s náhodnými prodlévami a navíc v odpovědích na dotazy nevyžaduje uvádět svou identifikaci, je z informací pouze z pásma 1090 MHz principiálně neodhalitelný.

Jeden ze způsobů odhalení přítomnosti dotazovače může být pomocí identifikačního znaku odpovídače, který je obsažený v odpovědi letadla. Tento případ se týká minimálně SSR odpovědi Mód-S formátu DF11, jakožto reakce na dotaz All-Call Mód-S UF11.

Další potenciální způsob odhalení dotazovače je prostřednictvím konstantní dotazovací periody v rámci ozáření letadla dotazovacím svazkem. Perioda se projeví v přijatých odpovědích letadel jako periodická sekvence v čase blízkých odpovědích.

Dotazovače využívající silně sektorové, periodické a adresné dotazování letadel lze odhalit na základě periodického charakteru odpovídání letadla. V přijatých odpovědích letadla bude komunikace s takovým dotazovačem ve formě periodické posloupnosti odpovědí kopírující periodické dotazování letadla.

## **2.3. Detekování SSR**

Předpokládáme, že většina dotazovačů bude v námi sledované oblasti založena na principu SSR s rotující anténou, proto pro účely této práce vybereme způsob detekce dotazovače, který bude tento princip zohledňovat. Nicméně zvolený algoritmus detekce je schopný odhalit obecně všechny dotazovače, které dotazují letadla periodicky. Nadstavbou detekce dotazovače bude asociace odpovědí letadla k detekovanému dotazovači, který je u letadla vybudil. Obecně popsané způsoby detekce dotazovače v kapitole 2.2 jsou v případě detekování SSR využitelné jen z části, proto si zde jejich možnosti postupně popíšeme.

### **2.3.1. Identifikátor dotazovače**

Detekce pomocí identifikačního znaku v odpovědích letadla je sice použitelná, nicméně s velkým omezením. Jedná se o jediný zde definovaný způsob detekce, kterým lze přímo určit dotazovače komunikující se zájmovým letadlem a který zároveň zajišťuje exaktní asociaci odpovědí k dotazovači, který je vybudil.

Omezení využitelnosti identifikátoru spočívá v tom, že je uveden pouze v odpovědích, které SSR vybudí pomocí All-Call dotazů při přiletu letadla do oblasti přehledového krytí daného SSR. Letadlo tyto odpovědi vysílá jen do chvíle, než dojde na tak zvaný lockout (uzamčení letadla). Po uzamčení letadla nedochází k vysílání odpovědí na All-Call dotazy po dobu 18 sekund od posledního přijatého All-Call dotazu. [2] Komunikaci při přeletu letadla přes oblast

krytí SSR dotazovače zachycuje schéma na obrázku 1. Poloha radaru je ve středu vyznačených soustředných kruhů. Poloha černě označeného letadla není v dosahu dostatečné síly radarového signálu, z tohoto důvodu na palubě letadla nedochází k detekci All-Call dotazu. Letadlo označené modře je mimo přehledové krytí radaru, ale detekuje All-Call dotazy a generuje odpověď, kterou však radar nerozpozná. V zelené části krytí již radar přijímá odpovědi na All-Call dotazy a dochází tím na již zmíněný lockout. Pokud je letadlo uzamčené, pak už letadlo vysílá odpovědi na Roll-Call dotazy. Tyto odpovědi už ale neobsahují identifikátor dotazovače. V červené oblasti je letadlo uzamčené a nedochází k vysílání odpovědí na All-Call dotazy.

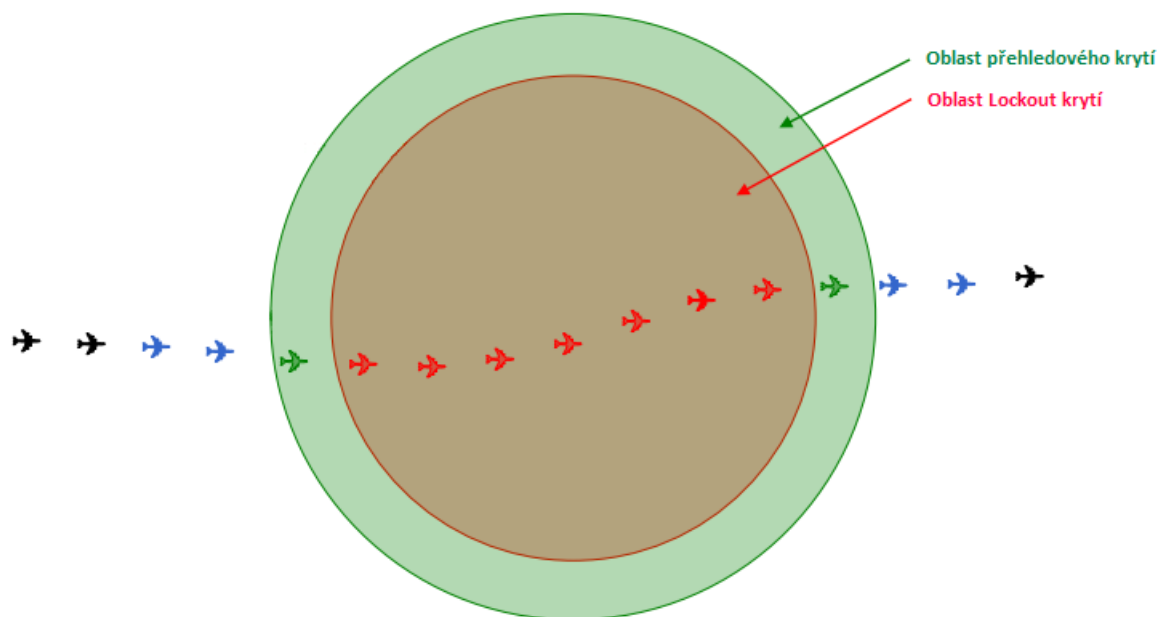
Délka komunikace obsahující v odpovědích letadla identifikátor dotazovače je obecně závislá na směru letu letadla vůči poloze dotazovače. Lze očekávat, že u většiny letadel bude taková komunikace trvat pouze několik otáček radarové antény (v řádu nízkých jednotek), než dojde na lockout letadla. Proto nemáme k dispozici velký datový soubor, jehož pomocí bychom byli schopni provádět mapování daného dotazovače, resp. disponujeme krátkým intervalem komunikace, který zajistí pouze krátký interval mapování.

Další nevýhodou tohoto způsobu detekce je nutná délka záznamu primárního měření. My jsme pro metodu mapování zvolili záznam primárních dat dlouhý cca 180 s. Vezmeme-li v úvahu běžnou cestovní rychlost dopravního letadla 250 m/s, tak během zmíněné doby uletí cca 45 km. Přitom běžný poloměr přehledové oblasti SSR je 200 NM, tj. 370 km. Z tohoto můžeme vyvodit, že při délce záznamu letu 180 s dojde pouze k malému množství přiletu do nových přehledových oblastí dotazovačů a tento počet není dostatečný pro zachycení odpovědí obsahujících jejich identifikátor. Naopak pokud se letadlo nachází v oblasti lockout krytí dotazovače během celého záznamu dat, sice s daným dotazovačem komunikuje, avšak nejsme schopni dotazovač detekovat.

Za předpokladu, že se při záznamu primárního měření dat zaměřujeme na letadla v blízkosti našeho přijímače, je další negativní vlastností tohoto způsobu detekce to, že jsme schopni identifikovat dotazovače vzdálené nejméně o velikost poloměru krytí, tj. například ve vzdálenosti již zmíněných 370 km.

Je také třeba zmínit poslední nevýhodu, kterou je skutečnost, že okraje oblasti přehledového krytí mohou být náchylnější na kvalitu signálu dotazovače, a to může negativně ovlivnit komunikaci směrem od letadla, která tvoří náš datový soubor.

Ačkoli tento způsob detekce v rámci zvolené metody mapování přehledové infrastruktury nevyužijeme, má přes své nedostatky velký potenciál být zdrojem cenných informací.



Obrázek 1 Schéma přeletu letadla přes oblast krytí SSR [3]

### 2.3.2. Dotazovací perioda

Z předchozí kapitoly je patrné, že velká část komunikace letadla se SSR bude sestávat z odpovědí na selektivní dotazování letadla, které neobsahují identifikační značku dotazovače. Využití těchto odpovědí k detekci dotazovače je možné v případě, že dotazovač vykazuje určitý vzorec při samotném dotazování letadla. Jedna z možností je odhalení vzorce dotazování, které proběhne při ozáření letadla hlavním anténním svazkem.

V případě SSR se k dotazování letadel využívá úzký anténní svazek. Tak zvaný MIP (mode interlace pattern) dotazovače udává sekvenci dotazovacích period, během kterých může vyslat různé typy dotazů. Dotazování je rozdělené na All-Call a Roll-Call intervaly.

Dotazovací frekvence (IRF) v rámci jednotlivých intervalů určuje počet vyslaných dotazů specifického typu za jednu sekundu. Požadavky, které má ICAO v dokumentu Annex 10 [4] na IRF, se týkají pouze maximálních hodnot frekvence dotazování. Příslušným dokumentem není u dotazovačů určeno, že dotazovací frekvence musí být konstantní, je proto možné, že se bude v čase měnit v závislosti na naprogramování daného radaru.

Aby bylo v naší situaci výhodné využít dotazovací periodu dotazovače odvozenou z IRF jako parametr detekce, bylo by nutné zajistit, aby se ve sledované oblasti nacházely dotazovače s unikátní hodnotou konstantní dotazovací periody. Konstantnost by se využila především k detekci dotazovače v rámci dat jednoho letadla a k asociaci odpovědí k tomuto dotazovači.

Unikátnost hodnot dotazovacích period by zaručila asociaci odpovědí více letadel k jednotlivým dotazovačům.

Předpoklad o konstantní a zároveň unikátní hodnotě dotazovací periody u jednotlivých dotazovačů ve sledované oblasti však nelze s jistotou považovat za splněný, proto tento způsob detekce ve zvolené metodě mapování přehledové infrastruktury nevyužijeme.

### **2.3.3. Periodické posloupnosti odpovědí**

I u tohoto způsobu je k detekci dotazovače využit předpokládaný specifický vzorec dotazování SSR, který se projeví v přijaté sekvenci odpovědí. Proto je taktéž výhodou, že se dají využít odpovědi na selektivní dotazy. Nevýhodou zůstává nejednoznačnost detekce. Obecně je sledovaný vzorec dotazování způsoben konstantní úhlovou rychlostí otáčení radarové antény.

V tomto případě detekce se nezaměřujeme na dotazování letadla během jedné doby ozáření hlavním anténním svazkem, nýbrž se přesouváme na úroveň intervalů dotazování letadla mezi jednotlivými dobami ozáření letadla.

Pro zjednodušení budeme uvažovat, že každá doba ozáření letadla hlavním anténním svazkem bude reprezentována jednou vybuzenou odpovědí. To znamená, že z každé otáčky radarové antény budeme disponovat jednou odpovědí. Pokud je úhlová rychlost otáčení antény konstantní, pak i sekvence odpovědí ze záznamu trvajícím několik period otáčení antény bude mít charakter periodické posloupnosti.

Nejednoznačnost detekce je spjata s tím, že se ve sledované oblasti může nacházet více dotazovačů se stejnou periodou otáčení antény a negativně se projeví především při asociaci odpovědí více letadel k jednotlivým dotazovačům.

Návrhu algoritmu detekce bude zajištěn pro případ, kdy nebude zajištěna unikátnost hodnot periody otáčení jednotlivých dotazovačů. Naopak budeme pracovat s tím, že komunikace během záznamu má charakter konstantní posloupnosti. Do návrhu algoritmu také zahrneme skutečnost, že konstantnost dotazování je ovlivněna několika faktory, kvůli kterým bude docházet k jistému uchylování periody dotazování mezi jednotlivými otáčkami radarové antény.

Naším cílem nejdříve bude odhalit přítomnost dotazovače nezávisle u jednotlivých zájmových letadel, v rámci toho dojde i k asociaci odpovědí k detekovaným dotazovačům. Až následně budeme propojovat detekované dotazovače mezi jednotlivými letadly. Protože však využijeme metodu detekování dotazovače, pomocí které nedostaneme exaktní výsledky detekce, resp. výsledky asociace, budeme dotazovače propojené mezi více letadly považovat jen za množinu

potenciálních dotazovačů. Až při jejich následné lokalizaci rozhodneme, jaký z nich je relevantní.

## 2.4. Definice mapovaného dotazovače

V kapitole 2.3 jsme si zvolili způsob detekce, kterým budeme identifikovat dotazovače v přijatých odpovědích letadel. Tímto způsobem však budeme schopni detekovat jen dotazovače s určitými vlastnostmi. Obecně se jedná o klasický SSR, nicméně zde uvedeme předpokládané parametry dotazovače:

- statický dotazovač s neměnnou pozicí během pořizování záznamu primárních dat,
- anténa rotující okolo svislé osy,
- směrové dotazování úzkým dotazovacím svazkem s azimutální šířkou cca 3° a elevační šířkou cca 60°,
- anténa se otáčí s konstantní úhlovou rychlostí, při níž je perioda otáčení antény v intervalu  $\langle 3,5-12,5 \rangle$  s,

Jak už bylo zmíněno výše, tyto požadavky a předpoklady splňuje běžný SSR radar s rotující anténou operující v Mód-S, u něhož můžeme sledovat následující parametry:

- poloha dotazovače,
- úhlová rychlost dotazovacího svazku, resp. perioda otáčení,
- určení jednotlivých typů dotazů.
- okamžiky vysílání dotazů,
- dotazovací perioda,
- průběh natočení (azimutu) osy dotazovacího svazku v čase,
- šířka dotazovacího svazku, v kombinaci s úhlovou rychlostí antény pak lze určit dobu ozáření letadla,

V námi navrhované metodě mapování přehledové infrastruktury se zaměříme na první čtyři body. Nicméně i zbývající parametry by se daly při začlenění dalších dvou zmíněných způsobů detekce u dotazovačů mapovat.

## 2.5. Detekce dotazovače profesionálním systémem

Pro porovnání námi navrhované metody mapování přehledové infrastruktury s minimálními náklady na celý systém v této kapitole uvedeme profesionální systém, který byl určený k monitorování komunikační činnosti v pásmu 1030/1090 MHz za účelem zvýšení bezpečnosti řízení letového provozu.



Jde o systém SIMON od společnosti T-CZ., která vývoji systému spolupracovala s ÚCL ČR a s ŘLP ČR, které připravilo počáteční požadavky na specifikaci monitorovacího systému [5]:

- získávání dat a statistické vyhodnocení – dlouhodobé získávání dat, nastavení standardních modelů chování (léto / zima, den / noc atd.),
- detekce jakékoli abnormální situace v reálném čase – průběžné porovnání skutečných hodnot s referenčními údaji, generování výstražného signálu,
- vyhodnocení zjištěné abnormální situace – identifikace rušivého emitoru, analýza jeho parametrů,
- lokalizace rušivého emitoru.

### 2.5.1. Pozemní stanice

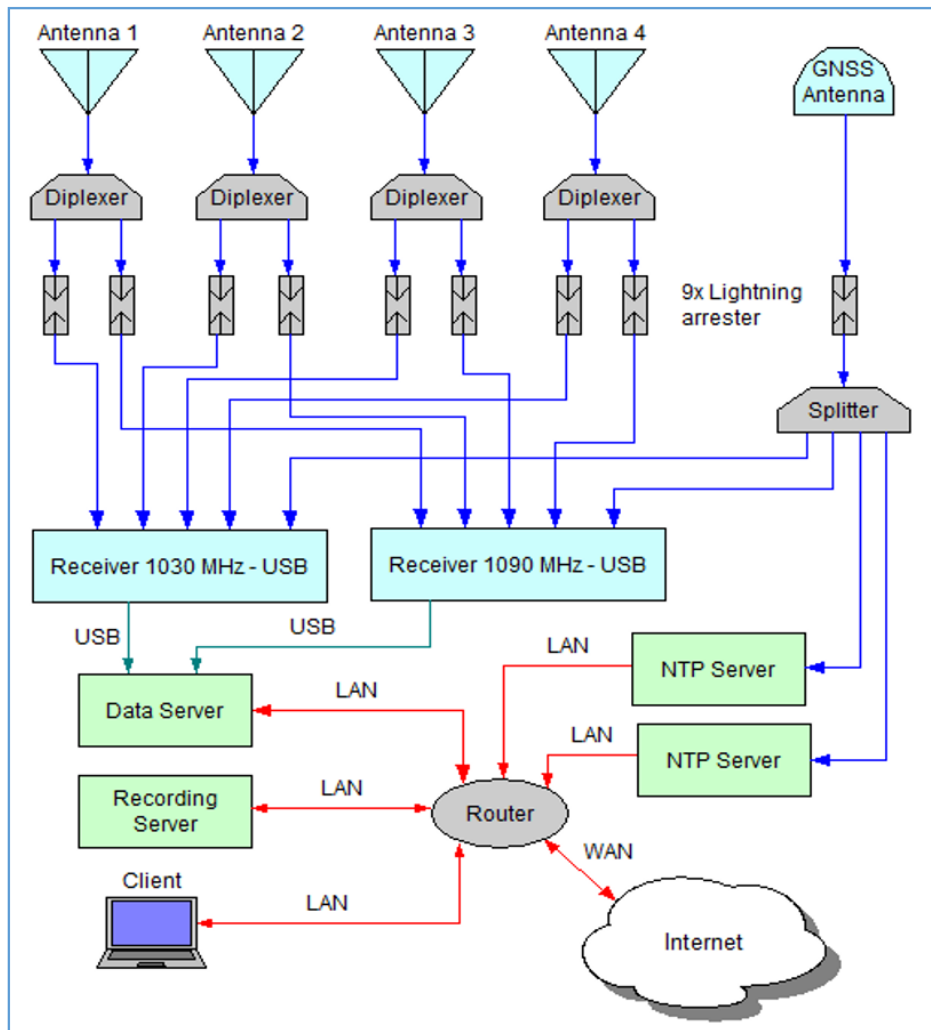
V případě našeho systému uvažujeme jeden ADS-B přijímač a výpočetní jednotku (PC), na které metodu mapování přehledové infrastruktury spustíme. Nyní zde pro porovnání uvedeme systémovou architekturu pozemní stanice systému SIMON, jejíž schéma uvádí Obrázek 2. Jednotlivé části architektury jsou:

- Anténní subsystém: 4x přijímací anténa 1030/1090, GNSS anténa
- Rozdělovače signálu: 4x diplexor 1030/1090 MHz, Rozdělovač signálu GNSS
- Dva přijímače: 1030 MHz přijímač, 1090 MHz přijímač
- Subsystém zpracování a záznamu dat: Počítače COTS s proprietárním softwarem
- Komunikační subsystém

Architektura je pochopitelně mnohem složitější z důvodu všech požadavků kladených na funkcionality a výkon systému SIMON. [5]

### 2.5.2. Funkce systému

Složitější architektura umožňuje systému vykonávat funkcionality, mezi něž patří monitorování a vyhodnocování zatížení RF pásma 1030/1090 MHz a určit zdroje přetěžující toto pásmo. Systém dokáže lokalizovat pozemní dotazovače a určit jejich hlavní parametry (PRF měření pro SSR a mód-S, určení identifikačního SI kódu dotazovače, výpočet šířky dotazovacího laloku). Z přijatých odpovědí transpondérů analyzuje jejich zatížení. Systém je schopen na základě předdefinovaných limitů generovat výstrahy v reálném čase. Ukládá naměřená data pro možnosti jejich budoucího přehrávání a analýzu. [5]



Obrázek 2 Architektura pozemní stanice systému SIMON. [5]

### 2.5.3. Metody lokalizace dotazovače

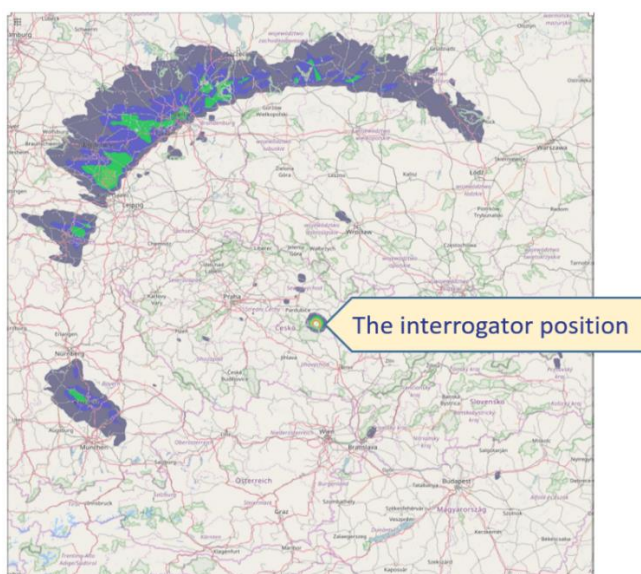
Možnosti lokalizace dotazovače mohou být omezeny, pokud je monitorovací systém SIMON instalován na úrovni země, protože dotazovače nejsou systémem přímo viditelné. Lokalizování dotazovačů však může být prováděno nepřímo analýzou odpovědí letadel. Využívá se při ní předpoklad, že pokud letadlo reaguje na dotazovač, je ozařován hlavním svazkem dotyčného dotazovače. Následně časová korelace dat získaných z několika transpondérů může indikovat směr dotazování a případně poskytnout odhady polohy dotazovače.

Systém využívá dvě metody lokalizace dotazovače. První z nich je založena na porovnávání času příchodu odpovědí letadel (TOA). Předpokladem je určení polohy letadel například z ADS-B zpráv. Dále je nutné přijmout alespoň dvě odpovědi na All-Call dotaz hledaného dotazovače, pomocí kterých zkonstruuje hyperbolu udávající potenciální polohy dotazovače.

Tento proces se opakuje k dosažení průsečíku hyperbol označující výsledný odhad polohy dotazovače. S vyšším počtem měření se zlepšuje přesnost určení pozice dotazovače.

Druhá metoda lokalizace dotazovače je založena na obsahu identifikačního znaku dotazovače v All-Call odpovědích (DF11) letadel. Je nutné přijmout odpovědi od mnoha letadel, které se pohybují na okraji nominálního krytí hledaného dotazovače. Při vyfiltrování odpovědí DF11 s identifikátorem hledaného dotazovače a vykreslení polohy letadel při jejich vyslání pak vznikne obrazec viz Obrázek 3, na kterém je uveden příklad lokalizace SSR radaru BUKOP systémem SIMON. Pozice dotazovače je pak ve středu kruhového obrazce. Navíc se nad pozicí dotazovače objevuje malé ohnisko vyslaných zpráv způsobené mrtvým kuželem dotazovače. Výhodou systému je možnost využití obou metod lokalizace současně, protože pracují na stejných datech. [5]

Využití obou zmíněných přístupů nelze v naší metodě aplikovat, z důvodu nutnosti využití odpovědí od velkého počtu letadel.



Obrázek 3 Příklad lokalizace SSR radaru BUKOP systémem SIMON. [5]

## 3. Vstupní data

### 3.1. Primární měření dat

Data primárního měření jsou generována palubními SSR transpondéry letadel ve formě všesměrového signálu vyslaného v RF pásmu 1090 MHz. Některé signály jsou vysílány automaticky, jiné jsou generovány na podnět dotazu přijatého v RF pásmu 1030 MHz. Tyto dotazy nejsou součástí naměřeného souboru primárních dat.

Vyslané odpovědi letadla jakožto signály palubního odpovídače v podobě impulsních vláček zaznamenáváme během měření na přijímací stanici (přijímač). Výstupem měření jsou dvě základní informace o zpracovaném signálu:

- čas přijetí signálu,
- bitový zápis impulsních vláček signálu.

Přijímací stanici obecně uvažujeme jako jednoduchý ADS-B přijímač schopný přijímat signály z RF pásma 1090 MHz.

Struktura odpovědí je dána předpisem ICAO Annex 10 Volume IV [4], díky kterému můžeme dešifrovat obsah zpráv a dále je filtrovat a zpracovávat.

#### 3.1.1. Formáty zpráv sestupného spoje

Nyní se zaměříme na popis struktury zpráv formátů sestupného spoje (DF), které jsou předmětem primárního měření. Díky znalosti struktury a významu jednotlivých bitů tvořící zprávy primárního měření, můžeme naměřený soubor dat filtrovat a následně z něho vytěžit potřebná data pro navrhovanou metodu mapování přehledové infrastruktury. Jsme pak také schopni odhadnout úspěšnost přijetí odpovědí vyjádřením poměru počtu přijatých odpovědí ku předpokládanému počtu vyslaných odpovědí daného letadla během intervalu měření primárních dat.

V civilním letectví je struktura zpráv sestupného spoje definována v dokumentu ICAO Annex 10 Volume IV [4]. Existuje 25 různých formátů zpráv a každý má svůj zvláštní účel. Pro účely zvolené metody budou předmětem našeho zájmu následující formáty zpráv.

Odpovědi na adresné dotazování letadel, které existují ve dvou základních typech, krátké a dlouhé zprávy:

- DF 4 – formát odpovědi obsahující přehledové informace o výšce letounu, krátký typ zprávy (56 bitů),
- DF 5 – formát odpovědi obsahující přehledové informace o identitě letounu, krátký typ zprávy (56 bitů),
- DF 20 – viz formát DF 4 obsahující navíc komunikační pole, dlouhý typ zprávy (112 bitů)
- DF 21 – viz formát DF 5 obsahující navíc komunikační pole, dlouhý typ zprávy (112 bitů)

Zprávy vysílané SSR Mode S odpovídačem automaticky bez vnějšího podnětu:

- DF 17 – Extended squitter, vysílaný pomocí technologie automatického závislého přehledu (ADS).

Důležitým aspektem pro filtrování dat primárního měření je, že každý formát zprávy obsahuje na počátku pětibitové pole označené DF, které udává formát sestupného spoje dané zprávy. Je to jediné pole, které je pro všechny formáty zpráv stejné.

Obecně je struktura formátů odpovědí na adresné dotazy velmi podobná. Společná, pro naši práci důležitá, část zprávy všech čtyř formátů DF 4, DF 5, DF 20 a DF 21 je pole AP, ve kterém se nachází unikátní 24bitová ICAO adresa letadla. Tyto formáty zpráv filtrujeme a přiřazujeme k jednotlivým letadlům pomocí tohoto 24bitového pole.

Formáty krátkého typu DF 4 a DF 5 se liší v pátém poli (bity 19-31) viz Tabulka 1, kdy zpráva DF 4 obsahuje pole označené AC uvádějící informace o výšce, ve které se letadlo nachází. Namísto toho zpráva DF 5 obsahuje pole ID, které uvádí informace o identitě letadla.

*Tabulka 1 Struktura odpovědi na adresné dotazy formátu krátkého typu DF 4 a DF 5.*

Typ pole	DF	FS	DR	UM	AC/ID	AP
Velikost (bit)	5	3	5	6	13	24

Formát dlouhého typu DF 20 je stejně strukturovaný jako formát krátkého typu DF 4, analogicky je to u formátů DF 21 a DF 5. Rozdíl délek formátů je v obou případech zapříčiněn 56bitovým polem MB (bity 32-87) určeným k přenosu zpráv datového spoje. Struktura zpráv DF 20 a DF21 je uvedena v Tabulka 2.

Tabulka 2 Struktura odpovědí na adresné dotazy formátu dlouhého typu DF 20 a DF 21.

Typ pole	DF	FS	DR	UM	AC/ID	MB	AP
Velikost (bit)	5	3	5	6	13	56	24

U automaticky vysílaného formátu zpráv DF 17 nenalezneme unikátní 24bitovou ICAO adresu letadla na konci zprávy, tak jako tomu bylo v předešlých formátech, ale je obsažena v poli AA (bity 9-32). Do pole ME se vkládá obsah samotné ADS-B zprávy (Extended Squitter) a v případě typu Airborne Position Message zde nalezneme pro naši metodu potřebné polohové informace o letadle. Struktura zprávy DF 17 je uvedena v Tabulka 3.

Tabulka 3 Struktura zpráv formátu DF 17.

Typ pole	DF	CA	AA	ME	PI
Velikost (bit)	5	3	24	56	24

### 3.1.2. Požadavky na měřená data

Prvním požadavkem na soubor primárních dat je dostatečná délka intervalu jejich měření, za kterou budeme považovat 180 s. Tato délka zajistí u dotazovače s periodou otáčení antény cca 5 sekund provedení alespoň 30 otáček. Nadále v práci budeme uvažovat záznam primárního měření, který splňuje tento požadavek na délku intervalu měření. Abychom mohli data primárního měření využít v metodě mapování přehledové infrastruktury, musí být dále splněny následující předpoklady:

- naměřená data obsahují odpovědi alespoň třech letadel, která jsou během celého záznamu ve vyhovující vzájemné pozici,
- výše zmíněná letadla mají nulovou nebo minimální vertikální rychlost a
- mají rovnoměrný přímočarý pohyb v horizontální rovině.

Letadla splňující zmíněné předpoklady nazveme zájmovými letadly. V ideálním případě během měření dotazovač vybudí alespoň jednu odpověď u každého zájmového letadla při každém jejich ozáření hlavním anténním svazkem. Zároveň tuto zprávu zachytí a zpracuje naše přijímací stanice. V reálném prostředí ovšem letadlo neodpoví na dotaz vždy, přičemž zpravidla nevyšle odpověď z některého z následujících důvodů:

- palubní odpovídač je v okamžiku, kdy by měl vyslat odpověď na dotaz, blokován jiným dotazovačem,
- od vyslání předchozího signálu uplynula příliš krátká doba,

- letadlo dotaz nedetekovalo, neboť se složilo více požadavků na odpověď z různých dotazovačů,
- amplituda dotazu nepřekročila minimální reakční úroveň palubního odpovídače,
- jiné důvody.

Musíme počítat se ztrátami i na straně příjmu odpovědí letadel na naší přijímací stanici. Tyto skutečnosti zvažíme při návrhu metody mapování přehledové infrastruktury tak, aby se metoda vyrovnala s absencí očekávaných přijatých odpovědí letadel.

Finální soubor dat primárního měření o délce 180 sekund splňující výše uvedené předpoklady sestává z následujících komponent:

- čas příjmu odpovědí přijímací stanicí,
- bitový obsah přijatých zpráv,
- poloha přijímací stanice.

## 3.2. Data z reálného provozu

Je třeba počítat s tím, že primární data z reálného provozu nám neposkytují kompletní informaci o stavu přehledové infrastruktury, abychom byli schopni určit úspěšnost a spolehlivost výsledků námi navrhované metody mapování přehledové infrastruktury. Nekompletní informace je způsobena například tím, že existuje nenulová pravděpodobnost nepřijetí všech odpovědí letadel, dále nepřesnost v časech příjmu a zápisu obsahu signálu při měření, k asociaci odpovědí ke konkrétnímu dotazovači dochází s neurčitou mírou pravděpodobnosti, neznalost skutečného stavu přehledové infrastruktury aj. Proto definujeme hodnoty časů přijetí odpovědí  $toa_i \in \mathbb{R}$  jako střední hodnoty nezávislých náhodných veličin s normálním rozdělením a směrodatnou odchylkou  $\sigma_{toa} \in \mathbb{R}$ .

### 3.2.1. Zpracování dat

Ze znalosti struktury jednotlivých formátů zpráv sestupného spoje jsme schopni z bitového obsahu přijatých odpovědí dešifrovat informace, které nám pomůžou odpovědi filtrovat. V každé odpovědi je obsažen unikátní ID kód letadla (ICAO adresa letadla), na jehož základě provedeme první filtraci. Výsledkem filtrace jsou vzájemně disjunktní množiny zpráv patřící vždy jednomu konkrétnímu letadlu. Uvažujme nyní, že z přehledu záznamu letů známe ID kódy zájmových letadel. V opačném případě bychom museli přehled letů jednotlivých letadel provést analýzou dat nad všemi vzniklými množinami zpráv a až následně vybrat zájmová letadla. Množiny obsahující  $toa_i$  a bitový obsah odpovědí zájmových letadel označíme  $\mathbf{M}_A$ .

U každé přijaté odpovědi jsme schopni dešifrovat formát sestupného spoje. V množinách  $M_A$  proto provedeme filtraci, na jejímž konci v množinách zbydou pouze zprávy zájmových formátů sestupného spoje uvedených v kapitole 3.1.1.

V každé množině  $M_A$  musíme k času příjmu zpráv  $toa_i$  dopočítat polohu letadla v tomto čase. Nejprve z bitového obsahu přijatých zpráv DF17 (polohového Extended Squitteru) dekódujeme informaci o poloze letadla při vyslání dané zprávy DF17.

Poloha ve zprávách DF17 je udávána pomocí souřadnic geodetického systému WGS84. Avšak při lokalizaci dotazovače využíváme lokální 2D kartézskou souřadnou soustavu umístěnou ve sledované oblasti s osou  $x$  směřující na východ a osou  $y$  na sever. Proto je nutné transformovat souřadnice získané z odpovědí do kartézského systému ECEF. Následně provedeme převod do lokálních souřadnic ENU.

Interpolací dopočítáme polohu letadla v čase  $toa_i$  všech ostatních zpráv v množině  $M_A$ . Nyní máme ke každému času  $toa_i$  přiřazenou pozici letadla  $C_i \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  v 2D prostoru.

Při znalosti času  $toa_i$  a polohy letadla  $C_i$  jsme schopni vyjádřit čas vyslání odpovědi  $tod_i \in \mathbb{R}$  pomocí vztahu (1.1):

$$tod_i = toa_i - \frac{\|C_i - S\|}{c}, \quad (1.1)$$

kde  $c \in \mathbb{R}$  značí rychlost šíření signálu v atmosféře,  $S \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  značí polohu přijímací stanice a  $\|C_i - S\|$  značí Euklidovu vzdálenost mezi body  $C_i$  a  $S$ . Pro zjednodušení budeme považovat rychlost šíření signálu v atmosféře za konstantu. Pro potřeby této práce budeme dále uvažovat ideální palubní odpovídač s nulovým zpožděním mezi příjmem dotazu a vysláním odpovědi, který je ekvivalentem odrazu signálu od letadla, při němž se dotaz z pásma 1030 MHz změní na odpověď v pásmu 1090 MHz. Čas mezi vysláním dotazu a jeho příjmem palubním odpovídačem zanedbáme, a proto čas  $tod_i$  budeme považovat za čas natočení osy dotazovacího svazku na letadlo. Nyní můžeme množinu měření  $M_A$  jednoho letadla popsat jako vektor  $M_A = [toa_i \ tod_i \ C_i] \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ , kdy ke každé přijaté zprávě máme přiřazený čas jejího příjmu  $toa_i$ , čas jejího vyslání  $tod_i$  a pozici letadla  $C_i$  v čase  $tod_i$ .

### 3.2.2. Naměřená data a ověření jejich spolehlivosti

V této kapitole uvedeme konkrétní soubor primárních dat, který pro potřeby této práce poskytla společnost ERA a.s. Záznam obsahuje data letového provozu nad územím České republiky a jeho blízkého okolí.



Nebudeme se zabývat filtrací primárních dat, nýbrž se zaměříme na množiny  $M_A$ , definované výše, které obsahují odpovědi tří vybraných letadel označených AC1, AC2, AC3. V množinách  $M_A$  jsou zahrnuty formáty zpráv sestupného spoje DF4, DF5, DF20 a DF21. Prezentovaná data pochází z měření, které probíhalo po dobu 180 s.

Tabulka 4 uvádí přehled přijatých odpovědí všech tří zájmových letadel. Vedle celkového počtu jsou v přehledu i počty zpráv jednotlivých formátů. Letadlo AC1 sice svým celkovým počtem zpráv převyšuje zbylá dvě o cca 20 %, nicméně celkový počet zpráv u všech tří letadel je považován za dostatečný. Poměr zastoupení jednotlivých formátů zpráv není mezi letadly jednotný, ale to může být způsobeno rozdílnou polohou letadel během měření dat.

*Tabulka 4 Přehled přijatých odpovědí zájmových letadel*

Letadlo	DF04	DF05	DF20	DF21	Celkem
AC1	464	161	736	491	1852
AC2	503	110	588	414	1615
AC3	390	69	681	400	1540

Dalšími požadavky na vstupní data jsou horizontální přímočarý pohyb zájmových letadel a jejich vyhovující vzájemná poloha během celého záznamu dat. To lze zkontrolovat na obrázku 16, kde jsou vykresleny trajektorie letů vše tří letadel. Pro porovnání jsou vykresleny i státní hranice České republiky.

K ověření spolehlivosti vstupních dat využijeme zprávy technologie ADS-B vysílané palubním transpondérem ve formátu DF17. Přemětem našeho zájmu budou tři typy zpráv Extended Squitteru (ES) obsahující informace o poloze, rychlosti a identifikaci letadla. Zprávy jsou vysílané periodicky v rozmezí proměnlivého intervalu v závislosti na jejich typu a aktuálním operačním režimu (let nebo pojíždění). V našem případě se jedná o letadla v režimu letu, proto uvažujeme hodnoty intervalů period vysílání zpráv z Tabulka 5 Hodnoty intervalů period vysílání zpráv DF17 Extended Squitteru. Tabulka 5. [6]

*Tabulka 5 Hodnoty intervalů period vysílání zpráv DF17 Extended Squitteru. [6]*

Typ zprávy ES	Perioda opakování vysílání zprávy (s)	Průměrný počet zpráv za minutu
Poloha letounu	0,4 - 0,6	120
Identifikace letounu	4,8 - 5,2	12
Rychlost letounu	0,4 - 0,6	120

Samotný princip ověření spolehlivosti dat je pak založen na hypotéze, která tvrdí, že pokud jsme schopni v naměřených datech určit úspěšnost příjmu vybraných zpráv ES, pak můžeme tuto úspěšnost očekávat i u zbylých formátů zpráv.

Dle Tabulka 5 je průměrný počet vybraných zpráv ES vyslaných za minutu 252. Jelikož disponujeme záznamem dat o délce 180 s, bude naší referenční hodnotou 756 zpráv, které bychom v ideálním případě měli v záznamu nalézt. Celkové počty zpráv ES pro jednotlivá letadla jsou uvedena v Tabulka 6. Procentuální podíl zpráv oproti ideální hodnotě se u všech tří letadel pohybuje nad 95 %. Tuto hodnotu stanovíme za dostatečnou a naměřená data můžeme prohlásit za spolehlivá.

Tabulka 6 Počet přijatých zpráv DF17 Extended Squitter zájmových letadel.

Letadlo	Celkový počet zpráv DF17 ES	Průměr (zpráv/min)	Podíl (%)
AC1	726	242	96,03
AC2	736	245	97,35
AC3	724	241	95,77

### 3.3. Data ze simulace vzdušného prostoru

Pod Ústavem letecké dopravy FD ČVUT v Praze vznikl studentský projekt s názvem Nástroj pro analýzu zatížení RF pásem 1030/1090 MHz [7]. „Hlavním cílem projektu je návrh softwarového modelu pro odhad zátěže RF pásma využívaného kooperativními přehledovými systémy pro současné i budoucí scénáře nejen z pohledu hustoty provozu, ale i z pohledu použitých technologií. Model bude možné použít jako nástroj pro odhad výkonosti kooperativních přehledových systému v daném prostředí a může tak předcházet rizikům plynoucích z přetížení RF pásem. Dále na úrovni výzkumu lze s pomocí modelu hledat optimální parametry a řešení přehledové infrastruktury jak z pohledu uživatelsky volitelných parametrů, tak z pohledu implementace nových technologií a strategií.“ [8] Softwarový model z tohoto projektu poslouží pro potřeby této diplomové práce jako simulace vzdušného prostoru, jejíž data můžeme využít při testování úspěšnosti metody mapování přehledové infrastruktury. Významným rozdílem dat ze simulace oproti datům z reálného provozu je znalost úplné informace o provozu, komunikaci a přehledové infrastruktuře během celého intervalu měření dat. Díky tomu je možné v rámci metody ověřovat úspěšnost detekce dotazovačů, která závisí na úspěšnosti asociace odpovědí k detekovaným dotazovačům. Úspěšnost asociace odpovědí lze určit, protože u

každé přijaté odpovědi letadla jsme schopni ověřit dotazovač, který odpověď vybudil. Dále je z dat proběhlé simulace známa skutečná poloha jak všech dotazovačů, tak letadel. Nicméně data ze simulace mají i jednu podstatnou nevýhodu – letadla v simulovaném vzdušném prostoru jsou statická, a tak v čase nemění svou polohu.

Obecně máme z proběhlé simulace vzdušného prostoru k dispozici tyto informace týkající se:

- letadel
  - poloha ve 3D (lat, lon, alt) ve formátu souřadnic geodetického systému WGS84,
- dotazovačů
  - poloha (lat, lon, alt) ve formátu souřadnic geodetického systému WGS84,
  - perioda otáčení antény,
  - dosah krytí dotazovače,
  - šířka dotazovacího svazku,
- přijímací stanice
  - poloha ve 3D (lat, lon, alt) ve formátu souřadnic geodetického systému WGS84,
- odpovědí letadel
  - čas přijetí odpovědi přijímací stanicí,
  - formát sestupného spoje (DF) přijaté odpovědi,
  - identifikační kód letadla, které přijatou odpověď vyslalo,
  - identifikační kód radaru, který přijatou zprávu u letadla vybudil.

U zpracování dat ze simulace vzdušného prostoru, oproti zpracování dat z reálného prostoru, odpadá nutnost dešifrovat bitový obsah zpráv za účelem jejich filtrace a získání polohy letadel. Datovým výstupem simulace jsou soubory formátu `.x/sx`, ve kterých jsou zmíněné informace explicitně vyjádřené v tabulkách. Filtrace zájmových dat je provedena pomocí těchto tabulek. Polohová data jsou však uvedeny pomocí souřadnic geodetického systému WGS84. Je proto nutná jejich transformace do lokálních souřadnic ENU stejně jako u dat z reálného provozu.

### 3.3.1. Vygenerovaná data

Pomocí softwarového modelu [7] jsme pro účely této práce vygenerovali data simulovaného vzdušného prostoru. Zvolili jsme konfiguraci tří letadel a deseti dotazovačů. Jak už jsme uvedli výše, letadla jsou v simulaci statická a všechna tři letadla jsou v krytí všech deseti radarů. Při generování simulovaných dat tak zanedbáváme vliv okolního letového provozu a vliv radarů, v jejichž dosahu krytí se nenachází všechna tři letadla. Počet radarů v simulaci je vybrán jako odhad počtu dotazovačů společných pro všechna tři letadla v reálném provozu.

Přehled zvolených parametrů jednotlivých dotazovačů je uveden v Tabulka 7. Polohy dotazovačů jsme zvolili v oblasti České republiky. Nebylo cílem kopírovat pozice radarů skutečné přehledové infrastruktury v tomto regionu. Naopak parametry dosah nominálního krytí, perioda otáčení antény a šířka dotazovacího svazku jsou inspirovány běžnými hodnotami skutečné přehledové infrastruktury dle [9].

*Tabulka 7 Přehled parametrů dotazovačů využitých v simulaci vzdušného prostoru*

Označení dotazovače	Zeměpisná šířka (°)	Zeměpisná délka (°)	Dosah (NM)	Perioda (s)	Šířka dotaz. svazku (°)
2	49,600	13,400	200	5	3,00
3	49,470	14,850	200	6	3,00
4	50,295	14,870	200	5	3,00
5	49,580	16,530	200	6	3,00
6	49,850	18,360	200	7	3,00
7	51,630	17,220	200	8	3,00
8	51,140	14,920	200	9	3,00
9	50,280	13,190	200	5	3,00
10	48,780	12,980	200	8	3,00
11	48,510	14,850	200	6	3,00

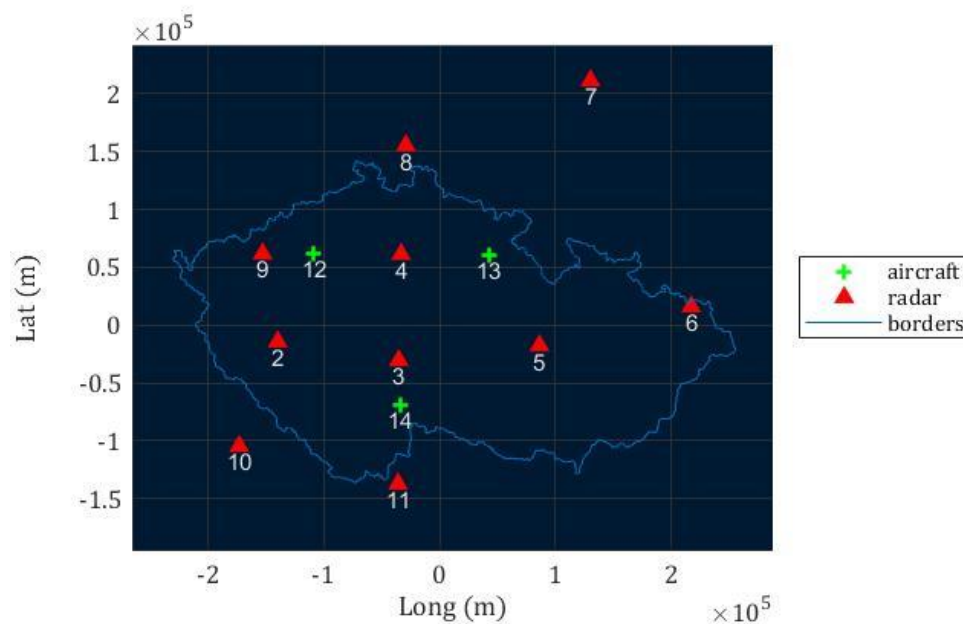
Jak už jsme zmínili výše, v době zpracování diplomové práce jsou v simulaci letadla implementována jen jako statické cíle, proto netvoří během záznamu měření trajektorii, ale jsou reprezentována pouze jedním bodem. Vzájemná poloha letadel byla zvolena tak, aby byly splněny vyhovující podmínky geometrie konfigurace zájmových letadel.

Počet přijatých odpovědí jednotlivých letadel je uveden v Tabulka 8. Počet odpovědí je velice blízký hodnotám naměřeným z reálného provozu. Při správném odhadu společných dotazovačů bychom v simulaci z důvodu zanedbávání okolní přehledové infrastruktury předpokládali spíše nižší počet přijatých odpovědí. Nicméně na to má vliv i hodnota dotazovací periody radarů v simulaci oproti hodnotám z reálného prostředí.

*Tabulka 8 Přehled parametrů letadel využitých v simulaci vzdušného prostoru*

Označení letadla	Zeměpisná šířka (°)	Zeměpisná délka (°)	Počet zpráv
12	50,290	13,810	1670
13	50,290	15,930	1670

Na Obrázek 4 je grafické zobrazení konfigurace z proběhlé simulace vzdušného prostoru. Je nutné podotknout, že na obrázku jsou uvedené už transformované souřadnice systému ENU oproti souřadnicím v Tabulka 7 a Tabulka 8, které jsou v jednotkách původního geodetického systému WGS84.



Obrázek 4 Grafické zobrazení konfigurace simulovaného vzdušného prostoru

## 4. Metoda mapování přehledové infrastruktury

V této kapitole podrobně popíšeme strukturu navržené metody mapování přehledové infrastruktury a zaměříme se na principy a algoritmy, které jsou v metodě využity. V předchozí kapitole 5 jsme uvedli charakter vstupních dat, která budou metodě poskytnuta a v kapitole 2, jsme určili způsob detekce dotazovače, který při mapování využijeme. Zároveň jsme také definovali parametry dotazovače, který bude předmětem mapování. Nadále budeme pod pojmem dotazovač rozumět námi definovaný typ.

Cílem metody je ve sledované oblasti mapovat dotazovače pracujících v pásmu 1030 MHz pouze z informací vysílaných letadly v pásmu 1090 MHz. Samotné mapování v našem případě definujeme jako odhad počtu dotazovačů komunikujících se zájmovými letadly a zároveň u detekovaných dotazovačů budeme sledovat tyto parametry:

- perioda otáčení antény, resp. úhlová rychlost antény,
- poloha dotazovače.

Dále jsme schopni určit typ dotazů a z veličin získaných při lokalizaci dotazovače i dobu vyslání dotazu. Nicméně tyto dva údaje pro nás ve výsledku nemají velkou váhu, proto se především zaměříme na prezentaci prvních dvou zmíněných parametrů.

Metoda mapování je strukturována do dvou hlavních částí. První je zaměřena na detekci dotazovače pomocí identifikace komunikace letadla s dotazovačem. Díky identifikaci komunikace získáme první mapovaný parametr dotazovače, kterým je perioda otáčení antény. S identifikací komunikace zároveň dochází k asociaci přijatých odpovědí k danému detekovanému dotazovači. Detekce probíhá nejdříve u jednotlivých letadel, až následně jsou určeny detekce dotazovačů, které dotazují všechna zájmová letadla. Druhá hlavní část metody mapování je zaměřena na lokalizaci dotazovačů detekovaných z první části metody.

### 4.1. Detekce dotazovače

Z důvodů popsaných v kapitole 2 můžeme zvolený způsob detekce zjednodušeně popsat jako rekonstrukci komunikace od letadla k dotazovači v přijatých odpovědích letadla. Proto se nejprve zaměříme na charakteru komunikace mezi letadlem a dotazovačem a definujeme podobu komunikace, která bude předmětem rekonstrukce. Pokud identifikujeme nějakou komunikaci, jsme zároveň schopni asociovat takové odpovědi k danému dotazovači. Samotná detekce dotazovače nejdříve probíhá u každého letadla zvlášť, až poté se definují dotazovače komunikující se všemi zájmovými letadly.

Nevýhoda zvoleného způsobu detekce je, že její výsledky nejsou exaktní. Detekovaný dotazovač je identifikován periodou otáčení své antény, kdy není zajištěno, že se ve sledované oblasti nebudou nacházet dva dotazovače se totožnou úhlovou rychlostí otáčení své antény. Tato neurčitost detekce se přesune i do asociace odpovědí k detekovanému dotazovači, protože je založena na stejném parametru jako samotná detekce a zároveň to bude mít negativní vliv na definování společných dotazovačů všech zájmových letadel.

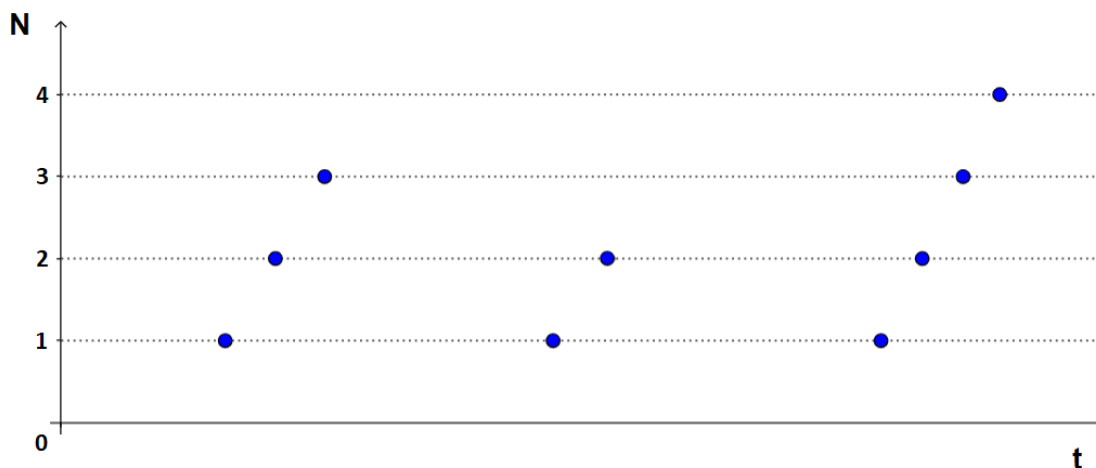
Při definování společného dotazovače dochází k vytvoření množin odpovědí všech letadel, které považujeme za vybuzené jedním potenciálním dotazovačem. Ale jak jsme uvedli, neurčitost asociace odpovědí u jednotlivých letadel způsobí, že za jistých okolností mohou vnikat falešné detekce společných dotazovačů.

#### **4.1.1. Komunikace letadlo-dotazovač**

Námi detekované dotazovače patří mezi kooperující systémy a počítáme s komunikací mezi dotazovačem a letadlem, která probíhá během doby ozáření letadla hlavním anténním svazkem dotazovače. Tato doba je především závislá na rychlosti otáčení antény a šířce hlavního svazku. Obecně se doba ozáření letadla pohybuje v řádu desítek mikrosekund.

V závislosti na MIP a naprogramování dotazovače, dochází u palubního transpondéru během jedné doby ozáření k vybuzení určitého počtu odpovědí, obecně to bývá více než jedna odpověď. [10] Na obrázku 5 je uvedeno schéma komunikace v podobě sekvence časů TOA odpovědí vyslaných letadlem jako reakce na dotazy dotazovače. Na ose x je vynesena doba a osa y udává pořadí odpovědi v jednotlivých dobách ozáření letadla hlavním anténním svazkem. Ve schématu jsou pro příklad zobrazeny tři takové doby ozáření, kdy v první byly vybuzeny tři odpovědi, při druhém ozáření dvě odpovědi a v posledním případě byly vybuzeny čtyři odpovědi. Při měření primárních dat předpokládáme zachycení alespoň jedné odpovědi z každé doby ozáření.

Pro účely námi navrhované metody mapování jsme zvolili zjednodušenou podobu reálné komunikace letadla k odpovídači. Zjednodušení spočívá v tom, že z každé doby ozáření identifikujeme jednu z vyslaných odpovědí. Výsledná rekonstruovaná komunikace bude mít podobu posloupnosti odpovědí letadla, kdy jedna odpověď reprezentuje právě jednu dobu ozáření letadla hlavním anténním svazkem dotazovače.



Obrázek 5 Schéma komunikace letadlo-dotazovač v podobě sekvence časů TOA přijatých odpovědí

#### 4.1.2. Identifikace periodických řetězců v časových řadách

K detekci dotazovače využíváme vstupní data ve formě vektoru časů TOA, tzn. že na vstupu disponujeme časovou řadou. Proto můžeme hledání komunikace v záznamu odpovědí letadla definovat jako identifikaci periodických řetězců v časových řadách.

Periodický řetězec, který je předmětem hledání reprezentuje komunikaci letadla s dotazovačem takovým způsobem, že jeden prvek řetězce je právě jedna odpověď letadla z jednoho intervalu ozáření letadla dotazovacím svazkem antény dotazovače.

Algoritmus identifikace periodických řetězců, který využíváme v naší práci, navazuje na algoritmus z bakalářské práce [11] z roku 2016. Stejný přístup identifikace periodických vzorců v časových řadách byl později uveden v článku z roku 2017 [12].

V reálném prostředí dochází k ovlivnění periodicity komunikace, které je nutné při návrhu algoritmu zohlednit. Jako příčinu vzniku odchylek v periodicitě komunikace můžeme uvažovat následující aspekty:

- nenulová doba ozáření letadla dotazovacím svazkem,
- stabilita prodlev mezi příchodem dotazu a vysláním odpovědi letadlem,
- pohyb letadla vůči dotazovači,
- přesnost konstantní úhlové rychlosti otáčení antény dotazovače.

Doba ozáření letadla dotazovacím svazkem je závislá na rychlosti otáčení antény a šířce svazku. Rychlost a směr letadla v tomto případě zanedbáme. Pak můžeme výpočet doby ozáření  $t_{ir}$  v sekundách popsat vztahem:



$$t_{ir} = bw \cdot T \cdot \frac{1}{2\pi} \quad (4.1)$$

kde  $bw$  značí šířku dotazovacího svazku v radiánech a  $T$  značí periodu otáčení antény dotazovače v sekundách. Ze vztahu (4.1) vyplývá, že velikost doby ozáření letadla dotazovacím svazkem je přímo úměrná šířce svazku a periodě otáčení antény. Zvyšující hodnotou těchto dvou parametrů dotazovače se tedy prodlužuje doba ozáření letadla, při které je dotazovač schopen vybudit odpovědi v palubním odpovídači. Tím se zároveň zvětšuje prostor pro změnu rozdíl periody dotázání.

Zpracování dotazu a generování odpovědi palubním transpondérem podléhá předepsanému postupu, který je uveden v dokumentu EUROCAE [2]. Do postupu zpracování dotazu je například začleněna i doba zpoždění, která je pro Mód-S stanovena na  $128 \pm 25 \mu\text{s}$ . [2]

Směr a rychlost pohybu letadla vůči dotazovači ovlivňuje periodicitu komunikace také v závislosti na úhlové rychlosti otáčení antény příslušného dotazovače. Odchylka periodicity narůstá:

- se zvětšujícím úhlem mezi směrem letu a spojnicí letadla s dotazovačem, s maximální odchylkou při úhlu  $90^\circ$ ,
- se zvyšující rychlostí letadla,
- se snižující vzdáleností letadla od dotazovače,
- se snižující úhlovou rychlostí otáčení antény dotazovače.

Konstantní úhlová rychlost otáčení antény dotazovače může být ovlivněna například povětrnostními podmínkami působící na anténu dotazovače.

Identifikace periodických řetězců v časových řadách je založena na postupném hledání jednotlivých prvků řetězce. Nejprve je nutné definovat počáteční podmínky hledání. Zde uvedeme tu nejpodstatnější podmínku, kterou je hodnota či interval hodnot, kterých může perioda hledaných řetězců nabývat. Označme takový interval hodnot jako  $T$ . Na počátku hledání řetězce ve vektoru TOA přijatých odpovědí letadla musíme zvolit apriorní odhad periody  $T_a$ , který musí být z definovaného intervalu  $T$ . Apriorní odhady určujeme pomocí rozdílů hodnot TOA dvou odpovědí ve vstupním vektoru dat  $D$ . Nalezený vyhovující apriorní odhad periody následně považujeme za aktuální periodu potenciálního řetězce. V této fázi algoritmu hledání disponujeme dvěma prvky řetězce, jejichž vzdálenost udává periodu řetězce. Každý další prvek řetězce určíme dle vztahu:

$$toa_{i+1} = \min(\text{abs}(D - toa_i + T_a)) \leq \varepsilon \quad (4.2)$$

tzn., že hledáme minimum z absolutních hodnot, které vzniknou odečtením hodnoty posledního nalezeného prvku  $toa_i$  od vstupního vektoru dat  $D$  a přičtením periody aktuálního řetězce  $T_a$ . Minimum zároveň musí být menší než hodnota  $\varepsilon$ , která zohledňuje výše zmíněné aspekty ovlivňující periodicitu komunikace. Hodnotou  $\varepsilon$  vytváříme v okolí přesné periody interval, kterým se snažíme kompenzovat potenciální difference mezi dvěma následujícími prvky komunikace letadla s dotazovačem.

Další důležitou součástí algoritmu je určení a filtrování řetězců s násobnými periodami. Cílem je vyloučení řetězců s periodou, která je celočíselným násobkem periody již nalezeného řetězce, tzn. řetězců, které tvoří pouze podmnožinou již nalezeného řetězce. Pro snížení výpočetní náročnosti provádíme testování na počátku sestavení nového řetězce. Tzn. při zvolení apriorního odhadu periody nového řetězce  $T_a$  rovnou přecházíme k testu, zda se nejedná o násobnou periodu již nalezeného řetězce dle vztahu:

$$\text{mod}(T_a, T_i) < \varepsilon \wedge \text{mod}(toa_a, toa_i) < \varepsilon \quad (4.3)$$

kde  $\text{mod}$  značí operaci modulo, tj. zbytek po celočíselném dělení. Pokud je tedy perioda aktuálního řetězce  $T_a$  celočíselným násobkem periody  $T_i$  již nalezeného řetězce s maximální odchylkou  $\varepsilon$  a zároveň je hodnota TOA prvku aktuálního řetězce celočíselným násobkem hodnoty TOA prvku již nalezeného řetězce taktéž s maximální odchylkou  $\varepsilon$ , pak je aktuální řetězec prohlášen za násobný a je vyřazen z algoritmu identifikace ještě, než dojde na část algoritmu hledající další prvky řetězce.

#### 4.1.3. Postup detekování dotazovače

V přechodí kapitole 4.1.2 jsme popsali samotnou metodu identifikace periodického řetězce v časové řadě, zde ho aplikujeme v algoritmu rekonstrukce komunikace zájmového letadla s dotazovači. Výstupem detekce je pak kromě určení počtu potenciálně komunikujících dotazovačů s daným letadlem i asociace odpovědí letadla k detekovaným dotazovačům.

Na počátku celého algoritmu detekování dotazovače využijeme algoritmus z předchozí kapitoly 4.1.2. Tím nalezneme ve vektoru hodnot TOA přijatých odpovědí určeného letadla všechny periodické řetězce vyhovující zadaným vstupním parametrům. Dalším krokem je ohodnocení nalezených řetězců na základě těchto parametrů:

- celková délka řetězce,
- počet vynechaných zpráv v řetězci.

V této fázi není pravidlem, že každý nalezený řetězců udává komunikaci samostatného dotazovače. To je zapříčiněno definicí podoby rekonstruované komunikace z kapitoly 4.1.1, kdy bereme v potaz právě jednu zprávu z každé doby ozáření letadla. Pokud vstupní data obsahují u rekonstruované komunikace více odpovědí z jedné doby ozáření, pak nalezneme více periodických řetězců, které reprezentují komunikaci s jedním dotazovačem. Takové řetězce označíme jako paralelní.

V následujícím kroku identifikujeme paralelní periodické řetězce reprezentující komunikaci s jedním dotazovačem a zařadíme je do samostatné množiny. V posledním kroku algoritmu vybereme z každé vytvořené množiny paralelních periodických řetězců ten nejlépe ohodnocený. Takto vybraný periodický řetězec je námi považován za detekci potenciálního dotazovače komunikující s daným letadlem. Výsledný počet detekovaných dotazovačů proto neudává prvotní počet nalezených řetězců, ale až počet řetězců vybraných z množin paralelních řetězců.

Asociace přijatých odpovědí k potenciálním dotazovačům je provedena na základě nalezených periodických řetězců. Odpovědi, jejichž TOA je obsažena v periodickém řetězci, je přiřazena k dotazovači, jemuž řetězec náleží. Důležité je připomenout, že se jedná pouze o detekci potenciálních dotazovačů, protože použité odpovědi neobsahují identifikátor dotazovače. Proto lze tyto odpovědi přiřadit dotazovači jen s určitou mírou pravděpodobnosti. Z tohoto důvodu nebude obecně platit, že vzniklé množiny přiřazených odpovědí k dotazovačům jsou disjunktní.

U jednotlivých potenciálních dotazovačů určíme periodu otáčení jejich antény, jejíž hodnotu odvodíme z aritmetického průměru z rozestupů hodnot TOA v řetězci přiřazeného k danému dotazovači.

#### **4.1.4. Vytvoření množiny společných dotazovačů**

Díky algoritmu z předchozí kapitoly disponujeme u každého zájmového letadla množinou detekovaných potenciálních dotazovačů, včetně hodnoty periody otáčení jejich antény. Tento parametr nyní využijeme k určení potenciálních dotazovačů společných pro všechna zájmová letadla.

Mějme hodnotu periody otáčení dotazovače označenou  $P$ . K určení společného potenciálního dotazovače dojde za podmínky, že v množině potenciálních dotazovačů každého zájmového letadla nalezneme alespoň jeden dotazovač, jehož hodnota periody je rovna  $P \pm \Delta P$ , kde  $\Delta P$  je určená povolená odchylka.

Množinu odpovědí jejichž hodnoty TOA se nachází v periodických řetězcích přiřazených ke společnému potenciálnímu dotazovači učíme jako výslednou asociaci přijatých odpovědí, které dotazovač vybudil u všech zájmových letadel. Tyto množiny zpráv využijeme jako vstupní data v další části metody, zabývající se lokalizací detekovaných společných dotazovačů.

## 4.2. Lokalizace dotazovače

Před uvedením samotné metody lokalizace dotazovače si nejprve definujeme základní prostor měření jakožto nejmenší část primárního měření, která obsahuje množinu dat, pomocí které je možné určit polohu dotazovače. Dalším krokem bude odvození takové veličiny  $\varphi$  z dat základního prostoru měření, která má geometrický význam pro určení polohy dotazovače. Následně definujeme vztah mezi veličinou  $\varphi$  a polohou hledaného dotazovače. Určení polohy dotazovače pak stanovíme jako minimalizační úlohu, kdy minimum funkce bude hledáno iteračně Newtonovou metodou. Apriorní odhady polohy dotazovače určíme pomocí veličiny  $\varphi$  a známých poloh letadel.

### 4.2.1. Prostor sledování

V případě námi navržené úlohy lokalizace dotazovače, je prostor sledování tvořen jednou veličinou. Tato určovaná zájmová veličina je poloha dotazovače  $\mathbf{D}(x_D, y_D) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ . Polohu budeme určovat v lokální 2D kartézské souřadné soustavě v lokalitě výskytu dotazovače, s osou  $x$  směřující na východ a osou  $y$  na sever.

### 4.2.2. Prostor měření

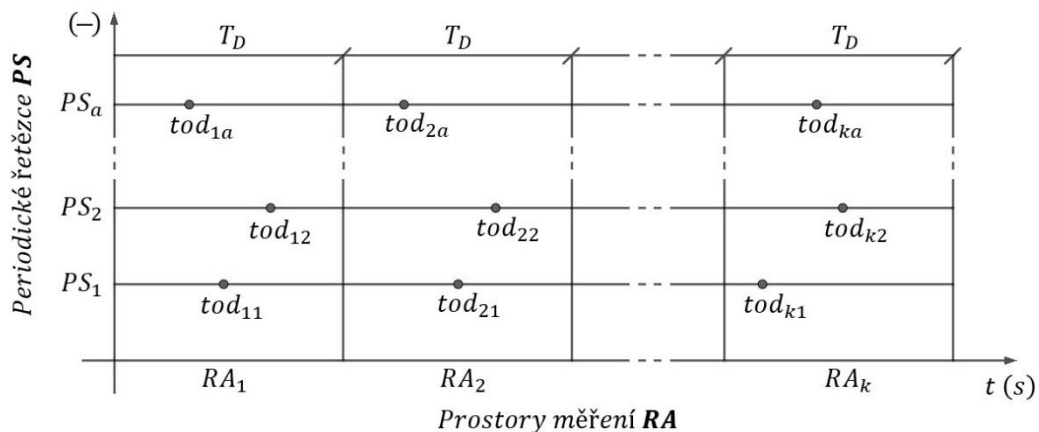
Pro metodu lokalizace dotazovače budeme předpokládat vstupní data ve formě zpracovaných primárních dat z kapitoly 3 tak, že každá přijatá odpověď  $i$ -tého letadla je definována třemi veličinami tvořící vektor  $r_{ij} = [toa_{ij} \quad tod_{ij} \quad C_{ij}] \in \mathbb{R}^4$ , kde  $toa_{ij} \in \mathbb{R}$  značí čas přijetí  $j$ -té odpovědi,  $tod_{ij} \in \mathbb{R}$  značí čas natočení osy hlavního svazku dotazovače na dané letadlo při  $j$ -té otáčce antény a  $C_{ij} \in \mathbb{R}^2$  definuje pozici  $i$ -tého letadla v čase  $tod_{ij}$ . Dále předpokládáme dle kapitoly 4.1 seskupení odpovědí do množin  $M_C$  reprezentující odpovědi asociované k jednomu konkrétnímu dotazovači. Množina  $M_C$  obecně obsahuje odpovědi  $n$  zájmových letadel a odpovědi každého letadla tvoří periodické řetězce označené  $PS$  reprezentující detekovanou komunikaci s dotazovači. K množině  $M_C$  je taktéž přiřazena hodnota  $T_D$  definující periodu otáčení antény jednotlivých detekovaných dotazovačů.

K výpočtu odhadu polohy bude disponovat každý dotazovač vlastním prostorem měření. Pro definici základního prostoru měření, si vyneseme hodnoty časů  $tod$  množiny  $M_C$  určeného

dotazovače na časovou osu. Graficky to znázorňuje Obrázek 6. Na ose y jsou časy  $tod$  rozděleny na periodické řetězce jednotlivých zájmových letadel a na ose x je vynesena čas. Právě osu x si rozdělíme na intervaly o velikosti  $T_D$ , tedy o velikosti periody otáčení antény daného dotazovače. Jak znázorňuje Obrázek 6, každý interval  $T_D$  obsahuje právě jednu zprávu z každého periodického řetězce  $PS$ . To znamená, že každý interval  $T_D$  disponujeme právě jednou odpovědí každého letadla, kterou v dané otáčce dotazovač u letadla vybudil. Interval  $T_D$  označíme jako základní prostor měření obecně definovaný jako prostor  $RA_{cj} = [tod_{ij} \ C_{ij} \ T_D] \in \mathbb{R}^{4 \times N}$ , kde index  $c$  označuje dotazovač spjatý s vybranou množinou  $M_C$  a index  $j$  značí pořadí odpovědi, resp. pořadí otáčky antény dotazovače.

Zapsaná notace základního prostoru  $RA_{cj}$  je uvedena z pohledu celého prostoru měření primárních dat. S ohledem na to, že se při dalším popisu metody zaměříme pouze na základní prostor měření, upravíme notaci základního prostoru  $RA_{cj}$  na tento tvar  $RA = [tod_k \ C_k \ T_D]$ , kde index  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$  označuje periodický řetězec, resp. zájmové letadlo, jemuž daná veličina patří.

Avšak množina dat základního prostoru  $RA$  nemá pro geometrické vyjádření pozice dotazovače  $D$  žádný význam. Je proto nutné z těchto hodnot odvodit veličinu s geometrickým významem. Předmětem měření se proto stane úhel  $\varphi$ , který definujeme jako úhel otočení antény dotazovače mezi vybuděním odpovědi u dvou letadel. Čas vybuděním zprávy  $tod$  je součástí množiny dat prostoru  $RA$  a v našem případě ho považujeme taktéž za čas, ve kterém je osa antény dotazovacího svazku natočena na dotazované letadlo.



Obrázek 6 Rozdělení komunikace letadel s dotazovačem na základní prostory měření  $RA$

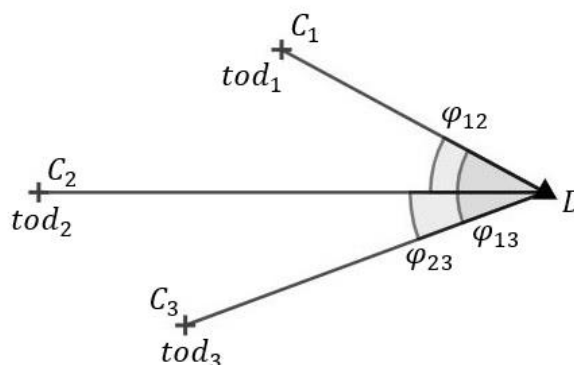
Uvažujme nyní, že máme pro lokalizaci dotazovače k dispozici  $N$  letadel. Prostor  $RA$  pak obsahuje  $N$  jednotlivých zpráv. Dalším krokem je vypočet možných kombinací dvojic zpráv, resp. letadel, bez opakování, dle vzorce (4.4):

$$N_C = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad k = 2 \wedge n = N \wedge k \leq n, \quad (4.4)$$

kde  $N_C \in \mathbb{N}^+$  je celkový počet dvojic a  $n$  je počet zpráv v prostoru  $RA$ . Nyní máme množinu  $W$  dvojic zpráv z prostoru  $RA$ . Pro každou dvojici zpráv množiny  $W$  určíme hodnotu  $\Delta t_{ij} \in \mathbb{R}$  jako rozdíl mezi časy *tod* zpráv dané dvojice dle vztahu (4.5):

$$\Delta t_{ij} = |tod_i - tod_j|, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \wedge i \neq j \quad (4.5)$$

Nyní máme pro prostor  $RA$  definováno  $N_C$  časových rozdílů  $\Delta t_{ij}$ . Ze zavedené definice času *tod* je možné čas  $\Delta t_{ij}$  považovat za dobu, za kterou se osa dotazovacího svazku pootočí ze směru letadla  $i$  do směru letadla  $j$ . Tuto situaci znázorňuje Obrázek 7 pro případ konfigurace jednoho dotazovače  $D$  a třech letadel  $C_1$ ,  $C_2$ , a  $C_3$ , kde spojnice těchto bodů s bodem  $D$  ilustruje směr osy dotazovacího svazku antény v jednotlivých časech *tod*.



Obrázek 7 Schéma natočení osy antény dotazovače při dotazování letadel

Pokud máme definovanou hodnotu periody otáčení antény dotazovače  $T_D$ , která je součástí množiny dat prostoru  $RA$ , pak můžeme pro každou dvojici zpráv z množiny  $W$  v prostoru  $RA$  vyjádřit úhel  $\varphi_{ij}$  v radiánech vztahem (4.6):

$$\varphi_{ij} = 2\pi \frac{\Delta t_{ij}}{T_D}, \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\} \wedge i \neq j \quad (4.6)$$

kde  $\varphi_{ij}$  odpovídá úhlu, o který se musí anténa dotazovače otočit mezi vybuzením daných dvou odpovědí. Grafické znázornění úhlů  $\varphi_{ij}$  tvořící celkovou množinu  $\varphi$  pro trojici letadel  $C_1$ ,  $C_2$ , a  $C_3$ , je vidět ve schématu viz Obrázek 7.

V této fázi jsme se dostali k předmětné veličině měření, tj. úhlu  $\varphi$ . O tento úhel rozšíříme náš základní prostor  $RA$  jako vektor:

$$RA = [tod_k \ C_k \ \varphi_{ij} \ T_D] \in \mathbb{R}^{5 \times N} \quad (4.7)$$

Nyní máme definovaný prostor měření  $RA$ , který sdružuje potřebné veličiny s geometrickým významem pro určení polohy dotazovače  $D$  a proto přejdeme k druhé části algoritmu, která se zabývá určováním apriorních odhadů polohy dotazovače.

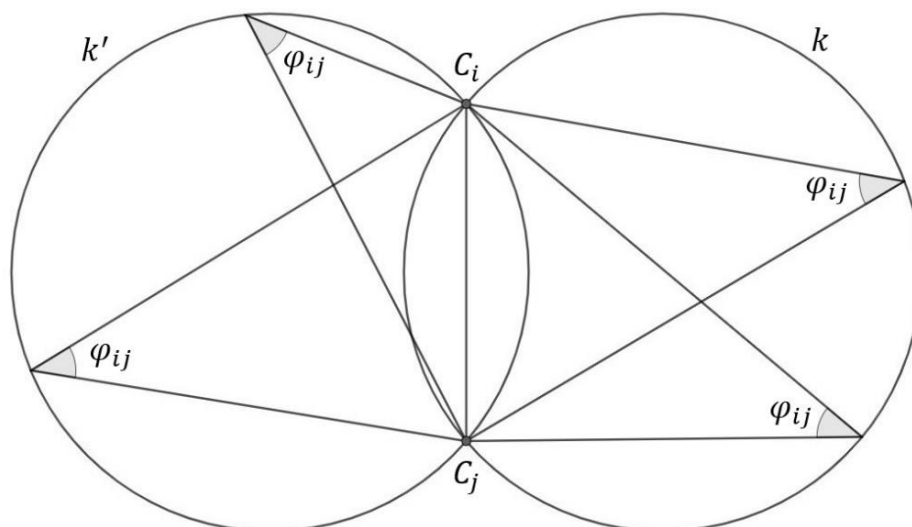
#### 4.2.3. Zobrazení prostoru sledování do prostoru měření

Zaměříme se na vyjádření polohy dotazovače jako veličinu prostoru sledování pomocí veličin prostoru měření. Vypočet polohy dotazovače proběhne v každém základní prostoru měření  $RA$  patřící jednomu dotazovači.

Odhad polohy dotazovače bude proveden za předpokladu znalosti přibližné lokality výskytu dotazovače v jeho 2D souřadné soustavě dané horizontální rovinou, jejíž normála je shodná s lokální vertikálou. Všechny polohy promítneme do horizontální roviny dotazovače, kde definujeme souřadný systém s osou  $x$  směřující na východ a osou  $y$  směřující na sever.

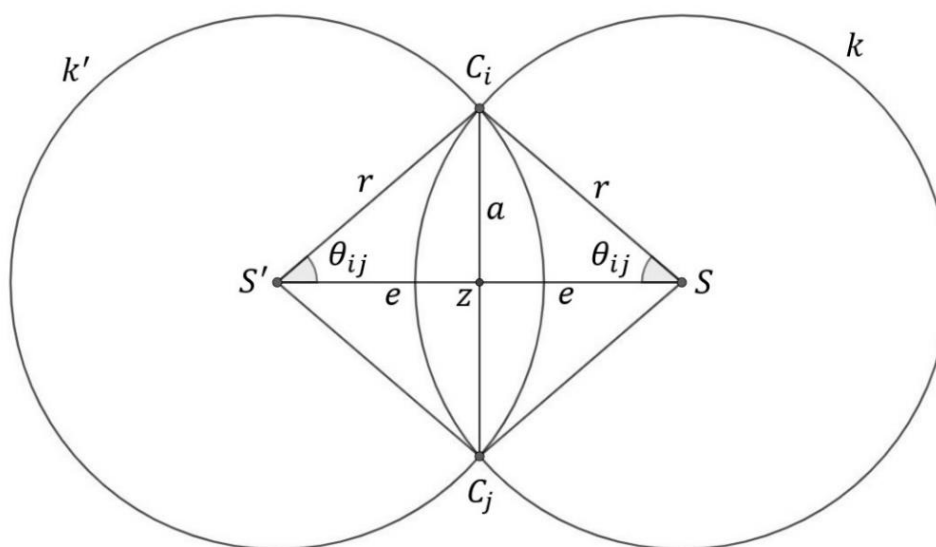
Nejprve definujeme geometrický význam úhlu  $\varphi$  pro účel lokalizace dotazovače. Využijeme při tom větu o obvodovém úhlu kružnice. Připomeňme, že se pohybujeme v základním prostoru měření  $RA$ , který je definován vztahem (4.7). V prostoru  $RA$  je v ideálním případě skutečná poloha dotazovače  $D$  určena jako bod, který je vrcholem pro každý úhel  $\varphi_{ij}$  z množiny  $\varphi$ .

Hledání bodu, který splňuje takovou podmínku, začneme určením množiny  $\overline{D_{ij}}$ . Tu tvoří body představující potenciální polohy dotazovače pro jednu dvojici pozic letadel  $C_i$  a  $C_j$  z prostoru  $RA$ . Uvažujme proto množinu všech bodů, které jsou dány vrcholem úhlu  $\varphi_{ij}$  jehož ramena procházejí body  $C_i$  a  $C_j$ . Taková množina bodů tvoří oblouky kružnic  $k$  a  $k'$  dle schématu viz Obrázek 8. Tyto oblouky budeme považovat za zájmové části kružnice  $k$  a  $k'$  které odpovídají definici doplňku oblouku příslušejícímu obvodovému úhlu  $\varphi_{ij}$  pro body  $C_i$  a  $C_j$ . Přičemž platí pravidlo, že kružnice  $k$  a  $k'$  jsou osově souměrné, kde osou souměrnosti je spojnice bodů  $C_i$  a  $C_j$ . Body tvořící zájmové části kružnic  $k$  a  $k'$  představují množinu  $\overline{D_{ij}}$  bodů, které považujeme za potenciální polohy dotazovače pro dvojici letadel  $C_i$  a  $C_j$ .



Obrázek 8 Schéma množiny bodů  $\bar{D}$  reprezentující potenciální polohy dotazovače pro dvojici letadel  $C_i$  a  $C_j$ .

Množinu bodů  $\bar{D}_{ij}$  určující potenciální polohu dotazovače pro jednotlivé dvojice letadel v prostoru  $RA$  získáme pomocí parametrů kružnic  $k$  a  $k'$ . Tyto parametry je potřeba nejprve vyjádřit. Při vyjádření budeme vycházet jen z veličin, které už tvoří prostor  $RA$ , a hledané parametry kružnic definujeme jako souřadnice středů  $S$  a  $S'$  kružnic  $k$  a  $k'$ , třetí parametr je poloměr  $r$ , jehož hodnota je pro obě kružnice stejná.



Obrázek 9 Schéma pro odvození parametrů kružnic definující potenciální polohy dotazovače.

Při odvozování parametrů kružnic se stále pohybujeme v 2D prostoru a pro lepší orientaci nám poslouží schéma znázorněné na Obrázek 9. Nejprve si vyjádříme vzdálenost  $a$  jako polovinu vzdálenosti mezi body  $C_i$  a  $C_j$ :

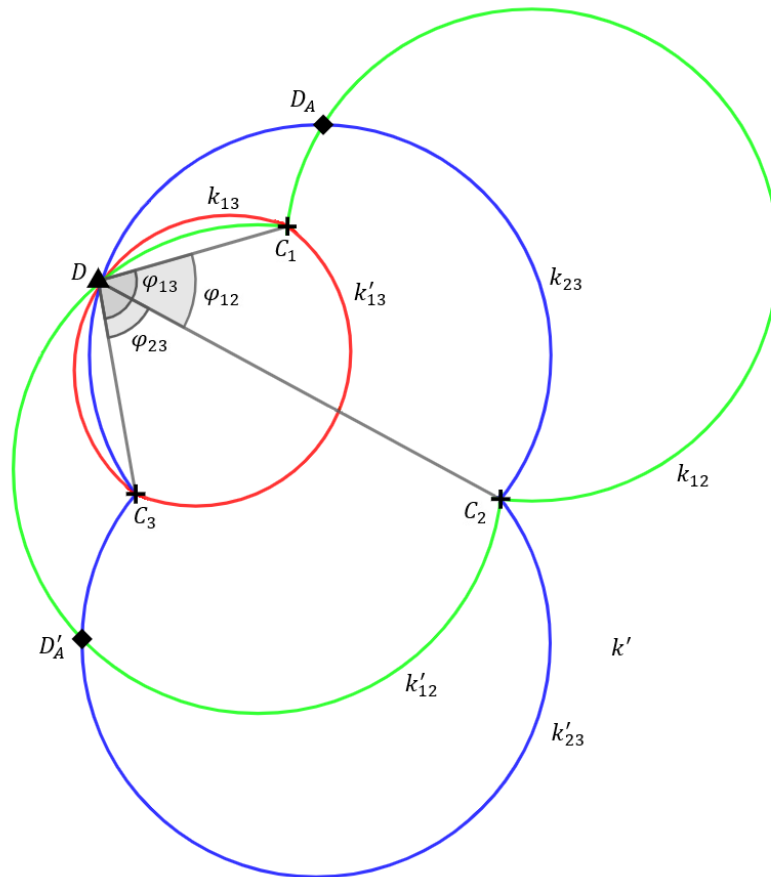


$$a = \frac{\|C_i - C_j\|}{2}, \quad (4.8)$$

kde  $\|C_i - C_j\|$  značí Euklidovu vzdálenost mezi body  $C_i$  a  $C_j$ . Dle věty o obvodovém úhlu je velikost úhlu  $\theta_{ij}$  rovna velikosti úhlu  $\varphi_{ij}$ . Nyní lze poloměr  $r$  vyjádřit rovnicí:

$$r = \frac{a}{\sin \theta_{ij}}. \quad (4.9)$$

Pokud definujeme bod  $z$  jako střed spojnice bodů  $C_i$  a  $C_j$ , a dále vzdálenost bodu  $z$  od středů kružnic označíme  $e$ , pak lze souřadnice středů  $S$  a  $S'$  dostat posunutím bodu  $z$  o vektor velikosti  $e$  se směrem normály ke spojnici bodů  $C_i$  a  $C_j$ . Protože se pohybujeme pouze v rovině, je normálový prostor spojnice bodů  $C_i$  a  $C_j$  tvořen dvěma normálovými vektory. Pomocí každého z nich definujeme právě jeden hledaný střed kružnice. Tento postup provedeme u každé dvojice letadel z prostoru  $RA$  a rozšíříme prostor  $RA$  o získané parametry kružnic  $[S \ S' \ r] \in \mathbb{R}^{3 \times N_C}$ .

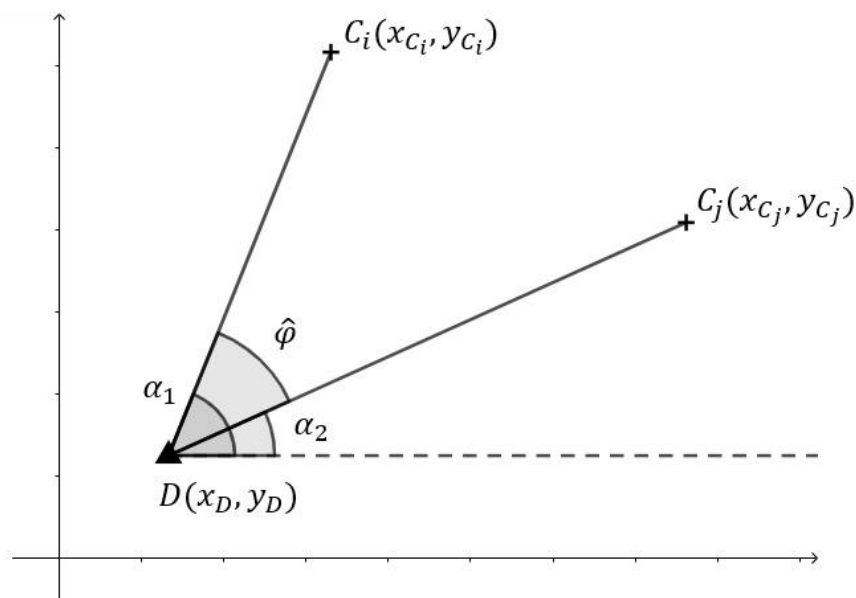


Obrázek 10 Grafické zobrazení vztahu veličin základního prostoru měření  $RA$  a veličiny prostoru sledován.

Po získání parametrů kružnic je možné zobrazit zájmové části kružnic, které tvoří množiny potenciálních poloh dotazovače pro jednotlivé dvojice letadel. Takové schéma pro konfiguraci

tří letadel označených  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$  a jednoho dotazovače  $D$  uvádí Obrázek 10. Jedná se o grafické zobrazení vztahu veličin základního prostoru měření  $RA$  a veličiny prostoru sledování, tj. polohy dotazovače. V případě této konfigurace jsou k dispozici tři dvojice letadel. Pro každou dvojici je barevně odlišena množina potenciálních pozic dotazovače v podobě osově souměrných oblouků, určených z naměřených hodnot úhlů  $\varphi_{ij}$ . Oblouky všech tří dvojic letadel se protínají právě v pozici dotazovače  $D$ , čímž schéma dokazuje dříve stanovené tvrzení, že „v prostoru  $RA$  je v ideálním případě skutečná poloha dotazovače  $D$  určena jako bod, který je vrcholem pro každý úhel  $\varphi$  z množiny  $\varphi$ “.

V ideálním případě bude skutečná poloha dotazovače dána společným průsečíkem oblouků všech dvojic letadel v prostoru  $RA_k$ . Ve skutečnosti ale musíme počítat s vlivem chyb a nejistot při měření úhlu  $\varphi$ , z toho důvodu zájmové části kružnic nebudou obecně tvořit jeden přesný společný průsečík.



Obrázek 11 Schéma pro odvození velikosti úhlu  $\hat{\varphi}$  se závislostí na poloze dotazovače  $D$ .

Proto naším záměrem bude hledání bodu, který minimalizuje chybu úhlu  $\varphi$  všech dvojic letadel prostoru  $RA$ . Abychom toho byli schopni, je nutné si definovat vztah, který zachycuje závislost skutečné hodnoty úhlu  $\hat{\varphi}$  na poloze dotazovače  $D$ . Pro lepší orientaci při odvození vztahu využijeme schéma viz Obrázek 11, které znázorňuje konfiguraci dotazovače  $D$  (vrchol úhlu  $\hat{\varphi}$ ) a dvou letadel  $C_i$  a  $C_j$  (body určující ramena úhlu  $\hat{\varphi}$ ). Velikost úhlu  $\hat{\varphi}$  definujeme jako rozdíl úhlů  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ , které svírají letadla s osou  $x$  v bodě  $D$ . Nejprve obecně definujeme úhel  $\alpha$  pomocí funkce  $atan2$  tak, že:

$$\alpha = \operatorname{atan2}(y, x) = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right), & \text{pro } (x > 0) \wedge (y \geq 0), \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, & \text{pro } (x < 0), \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) + 2\pi, & \text{pro } (x > 0) \wedge (y < 0), \\ \frac{\pi}{2}, & \text{pro } (x = 0) \wedge (y > 0), \\ \frac{3}{2}\pi, & \text{pro } (x = 0) \wedge (y < 0), \end{cases} \quad (4.10)$$

kde  $\operatorname{arctg}$  značí funkci arkus tangens vracející úhel  $\alpha$  sevřený polohovým vektorem (průvodičem) bodu  $[x, y]$  a kladnou poloosou osy  $x$ . Nyní vyjádříme úhel  $\hat{\varphi}$  dle následujícího vztahu:

$$\hat{\varphi} = |\alpha_1 - \alpha_2| = \left| \operatorname{atan2}\left((y_{C_i} - y_D), (x_{C_i} - x_D)\right) - \operatorname{atan2}\left((y_{C_j} - y_D), (x_{C_j} - x_D)\right) \right|, \quad (4.11)$$

kde  $[x_{C_i}, y_{C_i}] \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  jsou souřadnice polohy letadla  $C_i$ ,  $[x_{C_j}, y_{C_j}] \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  jsou souřadnice letadla  $C_j$  a  $[x_D, y_D] \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  jsou souřadnice dotazovače  $D$ .

V prostoru  $RA$  máme vektor měření  $\boldsymbol{\varphi}$ , který můžeme zapsat jako vektor funkčních hodnot  $f_i(x_D, y_D)$  dle vztahu (4.11), ve kterých je společným jmenovatelem neznámá hodnota polohy dotazovače. Zároveň se funkční hodnoty odlišují souřadnicemi poloh příslušné dvojice letadel. Vektor měření  $\boldsymbol{\varphi}$  pomocí funkce  $f_i(x_D, y_D)$  zapíšeme jako:

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{pmatrix} f_1(x_D, y_D) \\ f_2(x_D, y_D) \\ \dots \\ f_{N_C}(x_D, y_D) \end{pmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}_\varphi, \quad (4.12)$$

kde  $\boldsymbol{\varepsilon}_\varphi \in \mathbb{R}^n$  je vektor, který obsahuje vyjádření chyby pro každé měření z množiny  $\boldsymbol{\varphi}$ . V tomto případě můžeme  $\boldsymbol{\varphi}$  považovat za vektorovou funkci, ale jedná se o funkci netriviální, ze které polohu dotazovače nelze vyjádřit. Proto vztah (4.11) linearizujeme pomocí Taylorova rozvoje prvního stupně a zapíšeme vztah ve tvaru rovnice (4.13). Je důležité zmínit, že zavedením linearizace dochází k aproximaci hodnoty funkce a nedosáhneme tak přesného řešení. Výsledek linearizované úlohy bude vždy zatížen zbytkovou chybou, která je závislá na definici samotné linearizace a také na přesnosti zvolených apriorních odhadů. Linearizaci funkce ze vztahu (4.11) pomocí Taylorova rozvoje prvního stupně obecně zapíšeme jako:

$$\boldsymbol{\varphi}(x_D, y_D) = \boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0) + \mathbf{g}\left(\boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0)\right) \Delta \mathbf{x} + \mathbf{R}(2), \quad (4.13)$$

kde  $\boldsymbol{\varphi}(x_D, y_D) \in \mathbb{R}^n$  vyjadřuje vektor naměřených hodnot úhlů  $\varphi_{ij}$  pro jednotlivé dvojice letadel v prostoru  $RA$ ,  $\boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0) \in \mathbb{R}^n$  značí funkční hodnoty vektorové funkce  $\boldsymbol{\varphi}$  pro hodnoty  $[x_D^0, y_D^0]$  apriorních odhadů polohy dotazovače z množiny  $\mathbf{D}_A$ ,  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0)) \in \mathbb{R}^{n \times 2}$  je gradient vektorové funkce  $\boldsymbol{\varphi}$  v bodě  $[x_D^0, y_D^0]$ ,  $\Delta \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  vyjadřuje posun polohy z původního apriorního odhadu k ideální poloze dotazovače a  $\mathbf{R}(2) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  je zbytková chyba druhého řádu.

V případě vektorové funkce je gradient definovaný jako matice parciálních derivací funkce v daném bodě, tzn. jakobián. Označíme si jej jako matici  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0)) = \mathbf{A}. \quad (4.14)$$

Nyní máme definovanou funkci ze vztahu (4.13) zachycující závislost hodnot naměřených úhlu  $\varphi$  na poloze dotazovače  $\mathbf{D}$ . Můžeme tak stanovit určení výsledné polohy dotazovače v rámci základního prostoru měření jako minimalizační úlohu, v níž pro minimalizaci odchylek výsledného řešení vůči naměřeným detekcím využijeme metodu iterativních nejmenších čtverců.

Budeme předpokládat neprázdnou množinu apriorních odhadů poloh dotazovače, které jsou nutnou podmínkou pro využití minimalizační úlohy. Získání apriorních odhadů poloh dotazovače popíšeme níže v této kapitole.

Při aplikování metody iterativních nejmenších čtverců je naším cílem ze vztahu (4.13) vyjádřit veličinu  $\Delta \mathbf{x}$ , abychom mohli zpřesnit apriorní odhad polohy dotazovače. V případě, že ve vztahu (4.13) zanedbáme zbytkovou chybu  $\mathbf{R}$ , pak veličina  $\Delta \mathbf{x}$  zůstane v rovnici jedinou neznámou. Poté můžeme tvrdit, že platí vztah:

$$\boldsymbol{\varphi}(x_D, y_D) - \boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0) = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}, \quad (4.15)$$

kde levou stranu rovnice, tj. rozdíl naměřených hodnot  $\boldsymbol{\varphi}(x_D, y_D)$  a funkčních hodnot vektorové funkce pro známe apriorní odhady polohy dotazovače  $\boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0)$ , označíme jako redukovaná měření  $\tilde{\boldsymbol{\varphi}}$ :

$$\tilde{\boldsymbol{\varphi}} = \boldsymbol{\varphi}(x_D, y_D) - \boldsymbol{\varphi}(x_D^0, y_D^0). \quad (4.16)$$

Chyby redukovaných měření budeme uvažovat stejné jako chyby měření, proto bude kovarianční matice redukovaných měření shodná s kovarianční maticí měření  $\Sigma_\varphi$ . V kovarianční matici  $\Sigma_\varphi$  zohledníme chyby primárního měření, chyby určení periody otáčení antény dotazovače  $T_D$  a chyby určení polohy letadla  $\mathbf{C}$ . Hodnoty matice zvolíme jako odborný odhad.

Poté k vyjádření  $\Delta x$  využijeme metodu nejmenších vážených čtverců, protože vezmeme v potaz kovarianční matici redukovaných měření:

$$\Delta x = (\mathbf{A}^T \Sigma_\varphi^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma_\varphi^{-1} \tilde{\varphi}, \quad (4.17)$$

kde  $^T$  značí transpozici.

V posledním kroku iterace použijeme vypočítanou hodnotu posunu  $\Delta x$  ke zpřesnění vstupního apriorního odhadu polohy dotazovače  $D^0 = [x_D^0, y_D^0]$  dle vztahu:

$$D^1 = D^0 + \Delta x, \quad (4.18)$$

kde  $D^1 \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  označuje teoretickou ideální polohu dotazovače. Tu využijeme při nové iteraci jako hodnotu apriorního odhadu polohy.

Pro metodu iterativních nejmenších čtverců nezvolíme pevný počet opakování, ale zpřesnění polohy dotazovače, provádíme do doby, než norma přírůstku  $\Delta x$  neklesne pod určitou hodnotu  $\varepsilon_x$ .

Poloha dotazovače je určována iteračně Newtonovou metodou, kterou ovšem nelze použít bez startovních hodnot, resp. počátečních odhadů, ze kterých budeme při iteraci vycházet. Při popisu algoritmu získání množiny  $D_A$  apriorních odhadů polohy dotazovače si pomůžeme schématem na Obrázek 10 a budeme vycházet z předchozí definice skutečné polohy dotazovače. Tzn., že se jeví jako průsečík zájmových oblouků (jakožto množin potenciálních poloh dotazovače) všech dvojic letadel. Pokud tedy nalezneme průsečíky oblouků dvou dvojic letadel, musí jeden z nich reprezentovat skutečnou polohu dotazovače. V případě konfigurace z Obrázek 10 lze tuto hypotézu otestovat. Vybereme dvě dvojice letadel, například  $\{[C_1 C_2], [C_2 C_3]\}$ , jímž přísluší oblouky zelené, resp. modré barvy. Tyto oblouky vytváří množinu  $D_A = \{D, D_A, D'_A\}$  společných průsečíků. Zbylé dvě kombinace dvojic letadel vytvoří v obou případech jednoprvkovou množinu průsečíků  $D_A = \{D\}$ . Platnost tvrzení jsme dokázali, protože všechny kombinace dvojic letadel vytvoří množinu průsečíků obsahující polohu dotazovače.

Určení apriorních poloh dotazovače bude analytická úloha bez velkých výpočetních nároků stanovená jako nalezení průsečíků dvou kružnic v rovině. Protože máme pro každou dvojici letadel dvě kružnice, budou průsečíky hledány pro výčet kombinace II. třídy čtyř kružnic. Nakonec si vyfiltrujeme jen průsečíky zájmových částí kružnic.

Letadla, která tvoří dvojice určené k nalezení apriorních průsečíků, mohou být vybrána např. náhodně, nebo na základě stanovení podmínky vzájemné polohy, kterou vybraná dvojice letadel musí splňovat, nebo mohou být zvolena pevně jako odborný odhad.

### 4.3. Výsledný odhad polohy dotazovače

V předchozí kapitole jsme popsali zobrazení prostoru sledování do základního prostoru měření  $RA$ , jehož výsledkem je určení polohy v intervalu jedné otáčky antény dotazovače. Uvažovaná vstupní data obsahují desítky intervalů otáček antény, resp. základních prostorů měření, proto z celého záznamu dat budeme disponovat desítkami určených poloh dotazovače. Výsledný odhad polohy dotazovače pak bude určen na základě všech těchto získaných poloh.

Připomeňme, že detekce dotazovače představuje mimo jiné množinu odpovědí každého zájmového letadla, které považujeme za vybuzené daným dotazovačem. Tato asociace odpovědí je provedena na základě nepřímého parametru dotazovače, proto je nenulová pravděpodobnost, že některé detekce dotazovače budou určeny odpověďmi, které ve skutečnosti nepatří jednomu dotazovači. Takovou detekci budeme považovat za falešnou, nereprezentující žádný skutečný dotazovač.

Falešné detekce dotazovačů odhalíme pomocí lokalizace dvěma způsoby. Data tvořící základní prostor měření  $RA$ , tzn. daná konfigurace letadel a příslušné časy ozáření zájmových letadel, v rámci falešné detekce nedávají z geometrického hlediska relevantní výsledky. V prvním případě z takových to dat není možné vytvořit žádné průsečíky určující pozici dotazovače. V druhém případě bude výsledkem lokalizace neprázdná množina určených pozic dotazovače, ale pozice určené v rámci celého záznamu nebudou konvergovat k jednomu bodu. Naopak se budou po celý záznam stále uchylovat. Po této filtraci falešných detekcí dotazovače pomocí výsledků lokalizace zbydou detekce dotazovačů, u nichž určíme takové polohy dotazovače, které po celý záznam měření konvergují s určitou přesností k jednomu bodu. Ke zvýšení pravděpodobnosti, že detekce dotazovače reprezentuje skutečný dotazovač nám pomůže databáze SSR radarů z bakalářské práce F. Konečného [9]. Z celé databáze jsme vytvořili výběrovou množinu radarů nacházející se v námi sledované oblasti, které bychom mohli být schopni detekovat. Seznam vybraných radarů i s jejich parametry uvádí Tabulka 10.

Tabulka 9 Seznam použitých radarů a jejich parametry. Zdroj [9].

ID	Country	Sensor ID	LAT (°)	LON (°)	Dosah (NM)	RPM (ot/min)	Perioda (s)
1	Germany	Greding	49,0614	11,3522	256	12	5,00
2	Germany	Ottobrun	48,0447	11,6564	256	12	5,00
3	Germany	Auersberg	50,4557	12,6484	150	5,17	11,61
4	Germany	BBN	52,3828	13,5079	100	12	5,00
5	Germany	Brocken	51,7999	10,6155	150	12	5,00
6	Germany	Grosshaager Forst	48,1359	12,0505	178	5,17	11,61
7	Germany	Munchen Sud ASR	48,3111	11,8139	130	12,5	4,80
8	Germany	Tegel	52,5636	13,9090	150	12,5	4,80
9	Germany	Berlin Tempelhof	52,4827	13,3993	256	6	10,00
10	Germany	Dobern DO	51,6126	14,5759	256	6	10,00
11	Germany	Dobraberg DB	50,2786	11,6458	256	6	10,00
12	Germany	Freising (FS)	48,4345	11,7205	256	10	6,00
13	Germany	Gleina GL	50,9331	12,3977	256	6	10,00
14	Germany	Grosser Arber GA	49,1131	13,1360	256	6	10,00
15	Germany	Holzdorf (HZ)	51,7678	13,1675	65	12	5,00
16	Germany	Ingolstadt-Manching	48,7156	11,5336	85	12	5,00
17	Germany	Lauda (LA)	49,5258	9,8014	256	10	6,00
18	Germany	Neuburg (NG)	48,7111	11,2114	65	12	5,00
19	Germany	Niederstetten (NN)	49,3883	9,9619	65	12	5,00
20	Austria	Linz	48,2390	14,1822	120	15	4,00
21	Austria	Vie2	48,1006	16,5779	120	15	4,00
22	Austria	KOL SSR	47,8769	13,2676	250	5	12,00
23	Austria	LOXT ASR	48,3250	16,1189	80	12	5,00
24	Austria	STM LRR	48,5783	16,4104	250	5	12,00
25	Czech Rep.	Bukop	49,6514	16,1358	250	7,5	8,00
26	Czech Rep.	Pisek*	49,7849	14,0345	250	7,5	8,00
27	Czech Rep.	Prague	50,1053	14,2673	250	7,5	8,00
28	Czech Rep.	Nepolisy	50,1825	15,4688	470	12	5,00
29	Czech Rep.	Sokolnice	49,1205	16,7591	470	12	5,00
30	Poland	Poznan	52,4114	16,7936	256	12	5,00
31	Poland	Wroclaw	51,0981	16,8664	256	12	5,00

\* Změna polohy radaru oproti zdroji [9]. Nová poloha určena dle [13].

## 5. Vyhodnocení úspěšnosti navrhované metody

### 5.1. Aspekty metody při využití třech letadel

Metoda mapování přehledové infrastruktury popsaná v kapitole 4 pro případ vstupních dat zahrnující odpovědi obecného počtu  $n$  zájmových letadel, kdy platí  $n \geq 3$ . Dolní hranice počtu využitelných letadel je dána určováním polohy dotazovače ve 2D prostoru. Při současné implementaci metody mapování jsme z důvodů výpočetní náročnosti zvolili množinu primárních dat třech letadel, ačkoli to má své nevýhody v části lokalizace dotazovače.

S rostoucím počtem zájmových letadel zahrnutých do metody neúměrně roste výpočetní náročnost z důvodu velké neurčitosti asociace přijatých odpovědí k dotazovačům. Připomeňme, že asociace odpovědí je založena na principu vyhledání periodických řetězců v množině přijatých odpovědí jednotlivých zájmových letadel. Tyto řetězce indikují komunikaci daného letadla s potenciálním dotazovačem. Takovému detekovanému dotazovači u daného zájmového letadla momentálně přiřazujeme pouze jediný rozlišovací parametr, kterým je perioda otáčení jeho antény. Na základě tohoto jediného parametru jsme schopni vytvářet potenciální dotazovače společné pro všechna zájmová letadla. Uvažujme hodnotu  $P$  rozlišovacího parametru dotazovače (tj. periody otáčení jeho antény). Společný potenciální dotazovač je pak určen tak, že v množině přijatých odpovědí každého zájmového letadla nalezneme periodický řetězec s periodou rovnou  $P \pm \Delta P$ , kde  $\Delta P$  je určená povolená odchylka. Pokud u některého ze zájmových letadel nalezneme více než jeden periodický řetězec splňující podmínku velikosti periody  $P \pm \Delta P$ , pak jsme nuceni vytvořit všechny kombinace těchto řetězců s řetězci ostatních letadel, které taktéž splňují danou podmínku. S navyšujícím se počtem zájmových letadel, u kterých jsme určili více než jeden řetězec splňující danou podmínku, exponenciálně roste počet kombinací řetězců a tím pádem i počet určených potenciálních společných dotazovačů, které následně vstupují do části metody lokalizace. Tato závislost počtu určených potenciálních dotazovačů je zachycena v Tabulka 10, ve které je řádkům přiřazen počet zájmových letadel a sloupcích určují počty periodických řetězců nalezených u jednotlivých zájmových letadel, které všechny splňují výše uvedenou společnou podmínku  $P \pm \Delta P$ .

Tabulka 10 Závislost počtu určených potenciálních dotazovačů na počtu zájmových letadel a nalezených periodických řetězců.

Počet letadel	Počet řetězců			
	1	2	3	4
3	1	8	27	64
4	1	16	81	256
5	1	32	243	1024
6	1	64	729	4096



Výsledné počty potenciálních dotazovačů v tabulce jsou odvozené z následujícího vztahu:

$$C = n^k, \quad (5.1)$$

kde  $k$  definuje počet zájmových letadel a  $n$  značí počet periodických řetězců splňující uvedenou podmínku  $P \pm \Delta P$ , které jsme našli u každého zájmového letadla.

Uvedeme zde tři základní příčiny, které vedou k nalezení více periodických řetězců splňující podmínku  $P \pm \Delta P$  u jednoho letadla:

- nemůžeme zajistit podmínku, že se v mapované oblasti nachází jen dotazovače s unikátní periodou otáčení své antény, tzn. aby každý dotazovač měl unikátní rozlišovací parametr,
- u implementovaného algoritmu hledání periodických řetězců je nenulová pravděpodobnost, že ve výsledné množině řetězců uvede více řetězců odkazujících na jednu stejnou komunikaci daného letadla s radarem (nedokonalý filtr periodických řetězců),
- je nenulová pravděpodobnost existence náhodné sekvence přijatých odpovědí splňující parametry komunikace s dotazovačem (periodicitu), ačkoli žádnou reálnou komunikaci nereprezentuje.

Dle dat z Tabulka 9 předpokládáme, že se v mapované oblasti budou nacházet dotazovače jejichž antény mají odlišné úhlové rychlosti otáčení. V opačném případě je důležité si uvědomit, že Tabulka 10 je definována pouze pro případ řetězců jedné hodnoty periody. Je tudíž nutné počítat s uvedeným exponenciálním nárůstem počtu společných potenciálních dotazovačů, pro každou unikátní hodnotu periody, kterou sdílí více detekovaných řetězců. Až následný součet společných dotazovačů přes všechny unikátní periody otáčení radarové antény udává výsledný počet společných potenciálních dotazovačů, které následně vstoupí do části lokalizace. Abychom zajistili minimalizaci celkového počtu potenciálních společných dotazovačů, zvolil jsme pro vstupní data odpovědi pouze třech zájmových letadel.

## 5.2. Měření přesnosti odhadu polohy dotazovače

U detekovaného dotazovače proběhne výsledné určení polohy na základě statistického zpracování poloh určených v jednotlivých základních prostorech měření neboli intervalech jednotlivých otáček radarové antény. Budeme sledovat, zda polohy detekcí nekonvergují k některé z pozici radaru, které uvádí Tabulka 9.

Při hodnocení algoritmů odhadu je klíčovým aspektem výběr a správná interpretace metrik používaných k měření a určování výkonu a charakteristik algoritmů. K vyhodnocení úspěšnosti

metody lokalizace dotazovače využijeme měření přesnosti výsledných odhadů polohy dotazovače. Využijeme metriku AEE (Average Euclidian Error) hodnotící kvality odhadů z hlediska jejich absolutní chyby

Metriky mohou být klasifikovány dvěma způsoby:

- zda jsou absolutní nebo relativní,
- podle tolerance chyb na metriky:
  - optimistické – jak dobrý odhad je (tolerance velkých chyb),
  - pesimistické – jak špatný odhad je (penalizace velkých chyb),
  - vyvážené – ani optimistické ani pesimistické.

Metriky absolutní chyby jsou zdaleka nejoblíbenějším a nejpřirozenějším měřítkem kvality odhadu. Je důležité si uvědomit, že vztahy zde představené jsou ve skutečnosti pouze odhadem, který se snaží aproximovat skutečné hodnoty metriky z konečného počtu realizací. Když tedy bude řeč například o mediánu chyby, půjde ve skutečnosti pouze o odhad mediánu z  $M$  vzorků.

Průměrná eukleidovská chyba (AEE) je definovaná jako:

$$AEE(\tilde{x}) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M \|\tilde{x}_i\| \quad (5.2)$$

*„Jak i její název naznačuje, AEE vychází z konceptu eukleidovské vzdálenosti nebo také eukleidovské normy. Občas se o ní mluví (především ve skalárním případě) jako o střední absolutní chybě (Mean Absolute Error), nicméně tento název je pro vektory zavádějící, a ještě k tomu může vést k domněnì, že jde o absolutní chybu ve smyslu opaku relativní chyby. AEE je výběrový průměr skutečné střední hodnoty  $\bar{e}$  eukleidovské normy  $\bar{e} = E[\|\tilde{x}_k\|]$ , a proto je také jeho nejlepší aproximací. Z tohoto důvodu má AEE spoustu cenných a žádoucích vlastností. Například AEE je nestranný odhad  $\bar{e}$  nezávisle na distribuci  $\|\tilde{x}_k\|$  a AEE je také nejlepší odhad  $\bar{e}$  ve smyslu nejmenších čtverců.“ [14]*

Na druhou stranu pro skalární nezávislé odhady je AEE nejpřirozenější aproximací konečné odchylky střední odchylky (tj. prvního absolutního centrálního momentu). [14]

### 5.3. Simulovaný vzdušný prostor

V této části se zaměříme na vyhodnocení úspěšnosti navržené metody mapování přehledové infrastruktury při využití syntetických vstupních dat poskytnutých ze softwarového modelu

vzdušného prostoru [7]. Přesné vyhodnocení výsledků lze učinit díky znalosti úplné informace o simulovaném provozu. Nicméně je důležité poznamenat, že simulovaný vzdušný prostor je model, který postrádá jednu pro nás důležitou vlastnost reálného leteckého provozu, a to dynamiku letadel. Tím, že jsou v modelu letadla statická, nelze otestovat metodu mapování přehledové infrastruktury v celém rozsahu. Omezení, blíže popíšeme v jednotlivých podkapitolách vyhodnocení výsledků.

Využitá vstupní data poskytnutá softwarovým modelem jsou podrobně popsána v kapitole 3.3. Zde pro připomenutí uvedeme jen základní informace o zvolené konfiguraci přehledové infrastruktury a letadel tvořící letový provoz. Konfiguraci simulovaného vzdušného prostoru tvoří:

- 3 statická letadla,
- 10 dotazovačů.

Všechna tři letadla jsou v pokrytí všech deseti dotazovačů. Protože jsou letadla statická, nehrozí to, že by letadla během záznamu vyletěla z krytí dotazovačů. Je proto zajištěna komunikace mezi letadly a dotazovači po celý záznam primárního měření, který je dlouhý 180 s. Grafické zobrazení zvolené konfigurace je uvedeno na Obrázek 4.

### **5.3.1. Výsledky detekce dotazovačů**

Připomeneme, že detekce dotazovače má dvě fáze. Nejprve detekujeme dotazovače u jednotlivých zájmových letadel a následně vytváříme množinu potenciálních dotazovačů společných pro všechna zájmová letadla.

V první fázi je detekce dotazovače založena na identifikaci komunikace letadla s dotazovačem v množině přijatých odpovědích daného letadla. Kdy se komunikace letadla s dotazovačem projevuje jako periodická sekvence odpovědí, kdy jejich periodicitu reflektuje úhlovou rychlost otáčení antény dotazovače. Tyto sekvence rekonstruujeme v podobě periodických řetězců, které považujeme za potenciální komunikaci s dotazovačem.

V druhé fázi detekce dotazovače pak dochází k seskupení periodických řetězců jednotlivých letadel a vytváří se společné potenciální dotazovače, u nichž se provede asociace odpovědí tzn., že ke každému z nich se definuje množina odpovědí, které u zájmových letadel vybudily.

V případě dat ze softwarového modelu disponujeme kompletní informací o simulovaném vzdušném prostoru, proto jsme v první fázi detekce dotazovače schopni u nalezených periodických řetězců v odpovědích letadla určit:

- úspěšnost přiřazení zpráv řetězce k danému dotazovači,
- odchylku periody nalezeného periodického řetězce od skutečné periody otáčení antény dotazovače,
- poměr délky nalezeného periodického řetězce vůči skutečné délce komunikace letadla s dotazovačem, na kterou řetězec reprezentuje,
- poměr počtu přiřazených odpovědí do řetězce vůči počtu všech zpráv tvořící komunikace mezi letadlem a daným dotazovačem

Vyhodnocení úspěšnosti první fáze detekce dotazovače je uvedeno v tabulkách níže. Pro každé letadlo je uvedena samostatná tabulka s výsledky. Kromě výše definovaných hodnotících charakteristik periodických řetězců se v tabulkách nachází hodnota skutečné periody otáčení antény dotazovače.

Výše zmíněná a v tabulkách uvedená odchylka periody  $\Delta T$  je dána rozdílem mezi hodnotou periody řetězce  $T_S$  a skutečnou periodou otáčení antény dotazovače  $T_D$  dle vzorce:

$$\Delta T = \sqrt{(T_D - T_S)^2}. \quad (5.3)$$

V ideálním případě bychom u každého letadla měli nalézt právě deset periodických řetězců, kdy každý z nich reprezentuje komunikaci s odlišným simulovaným radarem.

### Letadlo 1

Výsledky detekce dotazovačů provedené v přijatých odpovědích letadla 1 jsou uvedeny v Tabulce 11. Identifikovali jsme 10 periodických řetězců. Ke každému simulovanému radaru jsme přiřadili právě jeden z nalezených periodických řetězců, a to na základě parametru úspěšnosti přiřazení odpovědí k danému dotazovači. U všech řetězců jsme dosáhli stoprocentního přiřazení, tj., že zprávy obsažené v řetězci vybudil právě přiřazený dotazovač. Po úspěšném přiřazení řetězců k dotazovačům můžeme odvodit odchylky period  $\Delta T$  z hodnot period řetězců a skutečných period otáčení antén dotazovačů. Maximální hodnoty odchylky periody  $\Delta T$  se pohybují v řádech jednotek tisícín sekundy. Délka všech nalezených řetězců je 100 % tzn., že všechny řetězce obsahují odpovědi z každého intervalu ozáření letadla dotazovacím svazkem, při kterém dochází ke komunikaci mezi letadlem a radarem. V posledním sloupci tabulky je uvedený procentuální poměr počtu odpovědí obsažených v řetězci ku počtu přijatých odpovědí patřící do komunikace s daným dotazovačem. Z hodnot je patrné, že by dotazovače měly průměrně vybudit cca 5 odpovědí během jedné doby ozáření dotazovacím svazkem.

Tabulka 11 Výsledky detekce dotazovačů z přijatých odpovědí letadla 1.

Označení dotazovače	Skutečná perioda (s)	Určená perioda (s)	Odchylna periody $\Delta T$ (s)	Délka řetězce (%)	Přiřazení k dotazovači (%)	Řetězec/komunikace (%)
2	5	4,9999	8,04E-05	100	100	19
3	6	6,0001	9,61E-05	100	100	16
4	5	4,9999	7,29E-05	100	100	19
5	6	6,0000	3,17E-05	100	100	16
6	7	7,0006	6,18E-04	100	100	16
7	8	7,9993	6,93E-04	100	100	16
8	9	9,0000	0,00E+00	100	100	17
9	5	5,0000	6,94E-06	100	100	19
10	8	7,9989	1,09E-03	100	100	16
11	6	6,0000	3,34E-05	100	100	16

## Letadlo 2

Vyhodnocení detekovaných dotazovačů u letadla 2 jsou uvedeny v Tabulka 12. V případě letadla 2 jsme našli 11 periodických řetězců, kdy dva z nich reprezentovaly komunikaci s jedním dotazovačem (konkrétně s dotazovačem 2). Jedná se chybu způsobenou nedokonalou implementací filtru nalezených paralelních řetězců. V Tabulka 12 je uveden už pouze jeden z těchto dvou řetězců. Na základě stoprocentních hodnot parametru úspěšnosti přiřazení odpovědí k jednotlivým dotazovačům (předposlední sloupec tabulky) jsme ke každému simulovanému radaru přiřadili právě jeden z uvedených periodických řetězců. Odchylny period  $\Delta T$  dosahují maximálních hodnot v řádech deseti tisíciny sekundy, tedy o řád méně než u letadla 1. Délka všech nalezených řetězců je 100 %, tzn. že jsme také zachytili odpověď z každé doby ozáření letadla všemi dotazovači. A procentuální poměry počtu odpovědí obsažených v řetězci ku počtu přijatých odpovědí patřící do komunikace s jednotlivými dotazovači se shodují s hodnotami letadla 1, z čehož vyplývá, že dotazovače vybudily u obou letadel stejný průměrný počet zpráv během jedné doby ozáření dotazovacím svazkem.

Tabulka 12 Výsledky detekce dotazovačů z přijatých odpovědí letadla 2.

Označení dotazovače	Skutečná perioda (s)	Určená perioda (s)	Odchylka periody $\Delta T$ (s)	Délka řetězce (%)	Přiřazení k dotazovači (%)	Řetězec/komunikace (%)
2	5	4,9997	3,20E-04	100	100	19
3	6	6,0001	9,37E-05	100	100	16
4	5	4,9999	7,29E-05	100	100	19
5	6	5,9996	4,40E-04	100	100	16
6	7	6,9999	9,86E-05	100	100	16
7	8	7,9999	8,00E-05	100	100	16
8	9	9,0001	5,91E-05	100	100	16
9	5	4,9993	7,16E-04	100	100	19
10	8	7,9999	8,00E-05	100	100	16
11	6	5,9994	6,10E-04	100	100	16

### Letadlo 3

V případě letadla 3 jsou výsledky první fáze detekce uvedeny v Tabulka 13. Tak jako u letadla 1 jsme identifikovali 10 periodických řetězců. Přiřazení řetězců k jednotlivým dotazovačům je jednoznačné až na řetězec reprezentující komunikaci s dotazovačem 7, u kterého je pozitivně přiřazených pouze 73 % odpovědí. Tento řetězec je tvořen celkem 22 odpověďmi a z toho 6 jich bylo vybuzeno dotazovačem 5. Příčinou toho je kombinace třech aspektů. Jednak, že počáteční azimuty os antén dvou zmíněných dotazovačů jsou nastaveny zrovna tak, že se jejich dotazovací svazky překrývají v oblasti pozice letadla 3. Druhým aspektem je to, že jsou letadla v simulaci statická, a letadlo proto během měření neopustí tuto oblast dvojitého překrytí. Posledním aspektem je, že periody dotazovačů 5 a 7 mají nejmenší společný násobek číslo 24, proto v simulaci dojde jednou za 24 sekund k ozáření letadla 3 oběma dotazovači najednou. To způsobí pravděpodobné souběžné dotazování letadla 3 radarem 5 a 7 a to může vést k záměně odpovědí těchto dvou dotazovačů.

Maximální hodnota odchylky periody  $\Delta T$  je tak jako u letadla 1 v řádu jednotek tisícín sekundy. Délka všech nalezených řetězců je jako v případě obou předešlých letadel 100 %. To, že jsme u všech letadel našli řetězce reprezentující celou délku komunikace má pozitivní vliv na následné přiřazení odpovědí do jednotlivých intervalů otáček antény dotazovače, tzv. základních prostorů měření.

Tabulka 13 Výsledky detekce dotazovačů z přijatých odpovědí letadla 3.

Označení dotazovače	Skutečná perioda (s)	Určená perioda (s)	Odchylka periody $\Delta T$ (s)	Délka řetězce (%)	Přiřazení k dotazovači (%)	Řetězec/komunikace (%)
2	5	4,9999	1,22E-04	100	100	20
3	6	5,9996	3,70E-04	100	100	16
4	5	4,9999	1,35E-04	100	100	20
5	6	5,9995	4,96E-04	100	100	16
6	7	6,9998	1,60E-04	100	100	16
7	8	7,9989	1,06E-03	100	73	16
8	9	9,0000	0,00E+00	100	100	16
9	5	4,9998	1,88E-04	100	100	19
10	8	7,9999	8,00E-05	100	100	16
11	6	5,9996	4,11E-04	100	100	16

### Detekce společných dotazovačů

Druhá fáze detekce dotazovačů je zaměřena na vytvoření množiny společných dotazovačů pro všechna tři zájmová letadla. Při vytváření společných dotazovačů v rámci simulovaných dat využijeme úplné informace, kterou u simulovaného prostoru disponujeme. Vznikne tak množina deseti společných dotazovačů, které reprezentují skutečně simulované dotazovače.

Pro porovnání, pokud bychom byly odkázáni na postup vytváření společných dotazovačů u reálných dat, tzn. pouze za pomoci parametru periodicity nalezených řetězců, pak jen v případě hodnoty periody 5 s bychom dle vztahu XY určili 27 společných dotazovačů, místo třech skutečných.

Nyní se zaměříme na tabulku XY, která obsahuje informace o deseti výsledných dotazovačích. Námí odhadovaná hodnota periody otáčení antény společného dotazovače je určena jako aritmetický průměr hodnot periodicity řetězců asociovaných k danému dotazovači. Jak úspěšní jsme v odhadování periody otáčení antény byli, přibližují hodnoty ve čtvrtém sloupci tabulky XY. Odchylka periody se řídí stejným vztahem 5.3 jako odchylky v první fázi detekce dotazovačů. Maximální hodnoty odchylek jsou v řádech deseti tisíciny sekundy, průměrná hodnota je  $2,47 \cdot 10^{-4}$  s. K uvedeným odchylkám periody otáčení antény je v pátém sloupci tabulky XY odvozena maximální hodnota odchylky úhlu  $\varphi$ , tj. úhlu pootočení antény mezi dotázáním dvou letadel. V posledním sloupci je pak hodnota chyba určení polohy dotazovače při uvedených odchylkách úhlu  $\varphi$  při nejméně vhodné konfiguraci letadel vůči hledanému dotazovači.

Tabulka 14 Výsledky detekce dotazovačů společných pro všechna tři letadla

Označení dotazovače	Skutečná perioda (s)	Odhad periody (s)	Odchylnka periody (s)	Odchylnka $\varphi$ (rad)	Chyba určení pozice (m)
2	5	4,9998	1,74E-04	2,19E-04	200
3	6	5,9999	6,00E-05	6,28E-05	57
4	5	4,9999	9,35E-05	1,18E-04	107
5	6	5,9997	3,23E-04	3,38E-04	309
6	7	7,0001	1,20E-04	1,07E-04	98
7	8	7,9994	6,12E-04	4,81E-04	439
8	9	9,0000	1,97E-05	1,37E-05	13
9	5	4,9997	3,04E-04	3,82E-04	349
10	8	7,9996	4,18E-04	3,28E-04	300
11	6	5,9996	3,51E-04	3,68E-04	336
Průměrné hodnoty:			2,47E-04	2,42E-04	221

U všech deseti dotazovačů stojí za připomenutí také velká úspěšnost detekce odpovědí z každé doby ozáření zájmových letadel. To je důležité pro část lokalizace detekovaných dotazovačů. Interval jedné otáčky antény dotazovače v rámci lokalizace definuje základní prostor měření, ve kterém jsme schopni určit polohu dotazovače. Protože máme k dispozici data tří letadel, každý chybějící prvek periodického řetězce pak způsobí neschopnost určit polohu dotazovače v příslušném intervalu otáčky antény. Avšak v našem případě o žádná data nepřijdeme, protože celistvost všech nalezených periodických řetězců je 100 %.

Z uvedených výsledků může tvrdit, že v rámci poskytnutých dat simulovaného vzdušného prostoru proběhla detekce dotazovačů s vysokou přesností. U každé

U žádného ze zájmových letadel jsme neidentifikovali žádnou falešnou komunikaci, která by určila falešnou detekci dotazovače. Všechny určené řetězce tedy reprezentovaly skutečnou komunikaci letadla s dotazovačem. Pouze v jednom případě přidal navržený algoritmus detekce do výsledné množiny periodických řetězců dva řetězce odkazující na stejnou komunikaci.

Je nutné zmínit, že jedním z důvodů vysoké přesnosti odhadu periody otáčení antény dotazovače je, že simulovaný vzdušný prostor zahrnuje pouze statická letadla. Proto se zde neprojeví případné změny periodicity komunikace zapříčiněné pohybem letadla, které by měly vliv na



přesnost výsledného odhadu periody otáčení antény. Nelze tak jednoznačně předpokládat stejnou míru přesnosti detekce dotazovačů i u dat z reálného provozu.

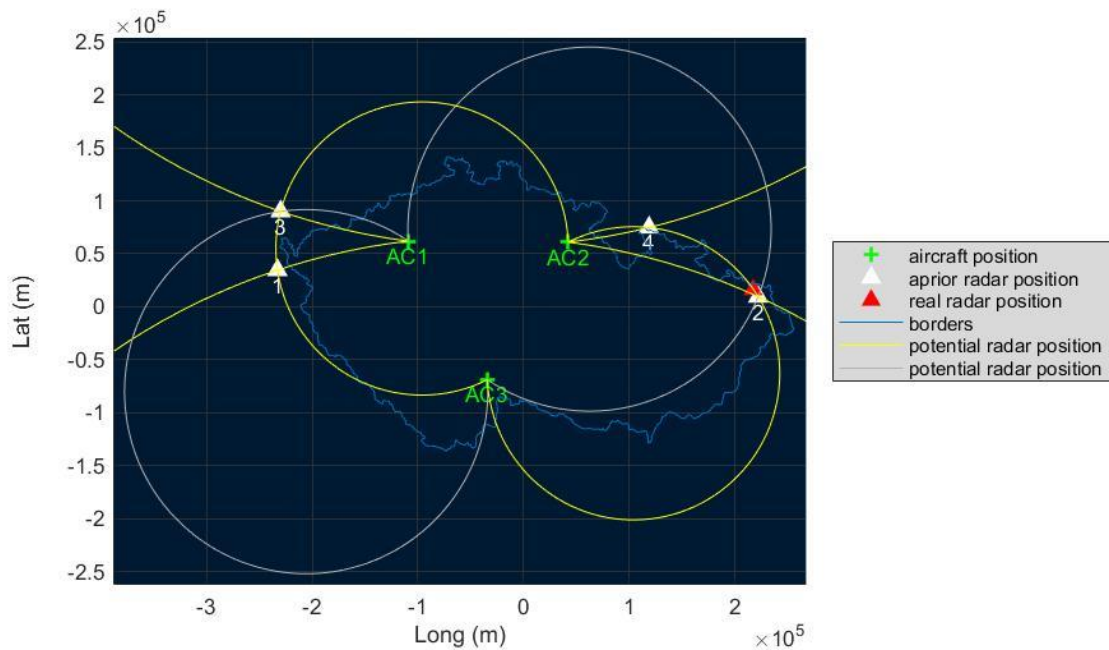
### 5.3.2. Výsledky lokalizace

Ke každému detekovanému dotazovači máme přiřazenou množinu odpovědí všech zájmových letadel, které pravděpodobně daný dotazovač u letadel vybudil. Posloupnost časů TOA přiřazených zpráv rozdělujeme základní prostory měření, jejichž velikost určuje perioda otáčení antény příslušného dotazovače. V každém základním prostoru se snažíme určit čas *tod* natočení osy antény detekovaného dotazovače na zájmová letadla. Naším cílem je následně pro každý základní prostor odvodit data využitelná k lokalizaci dotazovače. V případě dat simulovaného prostoru jsme ovšem limitováni tím, že letadla jsou statická, což má za následek, že podmínky pro výpočet polohy dotazovače jsou u všech základních prostorů identické. Nicméně naše metoda lokalizace dotazovače je postavena na předpokladu, že vlivem pohybu letadel získáme v základních prostorech různá vstupní data pro výpočet neměnné polohy dotazovače. Ačkoli tedy máme ze softwarového modelu k dispozici měření dlouhé 180 sekund, tzn. obsahující desítky základních prostorů simulovaných dotazovačů, musíme počítat s tím, že všechny tyto základní prostory budou simulovat situaci jedné otáčky antény dotazovače.

#### Apriorní odhady

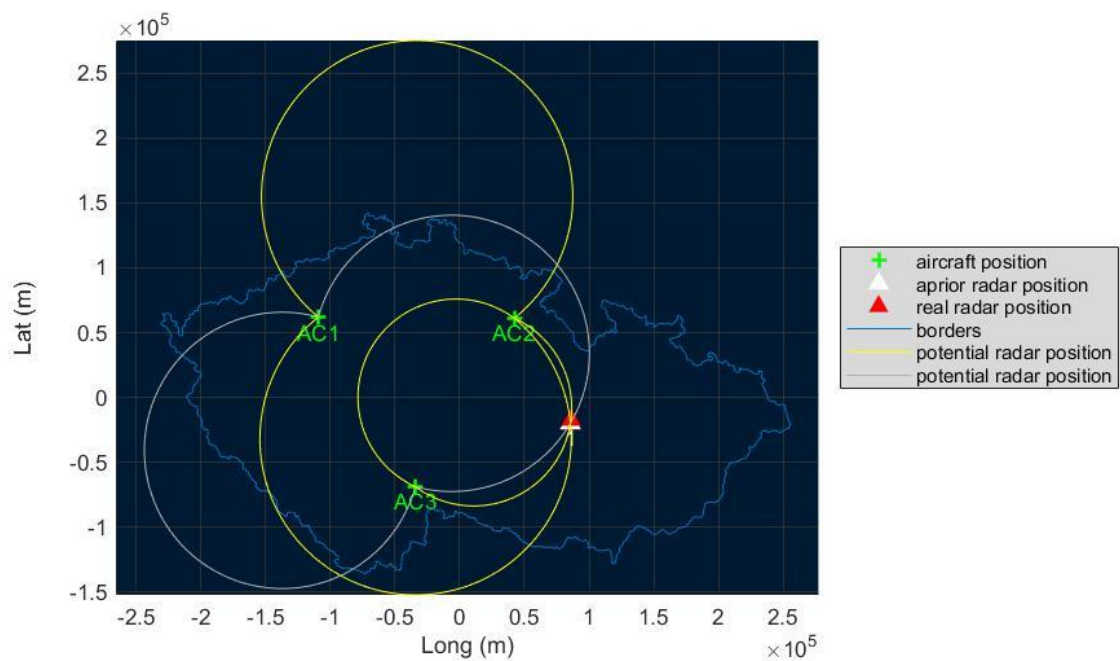
Apriorní odhady definujeme z toho důvodu, že pozici dotazovače určujeme jako minimum funkce hledané iteračně Newtonovou metodou, pro kterou je nutné stanovit počáteční odhady polohy dotazovače. V této části se zaměříme na vyhodnocení zvolených apriorních odhadů dat ze simulovaného prostoru.

Při určování apriorních odhadů se objevil diskutovaný problém falešně pozitivních odhadů polohy dotazovače při využití třech zájmových letadel. Falešně pozitivní odhad polohy definujeme jako bod, který splňuje zvolené podmínky skutečné polohy dotazovače, tudíž bude lokálním minimem funkce zvolené pro nalezení pozice dotazovače. Tento případ je vidět na Obrázek 12, kde jsou zobrazeny apriorní odhady poloh dotazovače v rámci jednoho základního prostoru měření. Pozici zájmových letadel určují zelené křížky s příslušným popisem označení letadla. Kruhové výseče reprezentují potenciální pozice dotazovače pro danou dvojici letadel. Přitom žluté křivky jsou využité při určení apriorního odhadu pozice dotazovače. Šedé křivky jsou spjaté se zbývající dvojicí letadel a jsou vykresleny kvůli odhalení falešně pozitivního odhadu pozice dotazovače. Bílý trojúhelník určuje apriorní odhad polohy dotazovače s označením jeho pořadí. Červený trojúhelník definuje skutečnou polohu dotazovače. Jako reference jsou modře vyznačeny hranice České republiky.



Obrázek 12 Zobrazení určených apriorních odhadů polohy dotazovače v rámci jedno základního prostoru měření.

Falešně pozitivní odhad polohy je na Obrázek 12 označen jako bílý trojúhelník s číslem 3, kdy je vidět, že stejně jako apriorní odhad číslo 2 odkazující na skutečnou polohu dotazovače je určen průsečíkem křivek všech tří dvojic letadel. A každý takový bod je minimem pro funkci, kterou využíváme k určení polohy dotazovače v rámci základního prostoru měření.



Obrázek 13 Zobrazení určených apriorních odhadů polohy dotazovače v rámci jedno základního prostoru měření.

V ideálním případě se v rámci základního prostoru vyskytne pouze jeden bod splňující podmínku skutečné polohy dotazovače, tj. jediné minimum funkce. Tento případ je uveden na Obrázek 13, kde pro zvolené dvě dvojice letadel vznikl jediný apriorní odhad, který je blízký skutečné pozici dotazovače.

Výsledky určení apriorních odhadů polohy všech detekovaných společných dotazovačů jsou uvedeny v Tabulka 15. Údaje v tabulce jsou výsledky z jednoho základního prostoru měření. U dat ze simulace je to postačující, protože zbylé základní prostory jednotlivých dotazovačů jsou identické z důvodu statických letadel. Ve druhém sloupci Tabulka 15 jsou celkové počty určených apriorních odhadů. Ve třetím sloupci jsou uvedeny počty falešně pozitivních odhadů, což nám naznačuje, že u pěti dotazovačů s těmito falešně pozitivními odhady se vyskytne falešné určení polohy. Čtvrtý sloupec nám pak říká, že jsme u každého dotazovače našli zájmové apriorní odhad, který je blízký skutečné poloze dotazovače. V posledním sloupci je uvedena průměrná euklidovská chyba (AEE) pozitivního apriorního odhadu od skutečné polohy dotazovače.

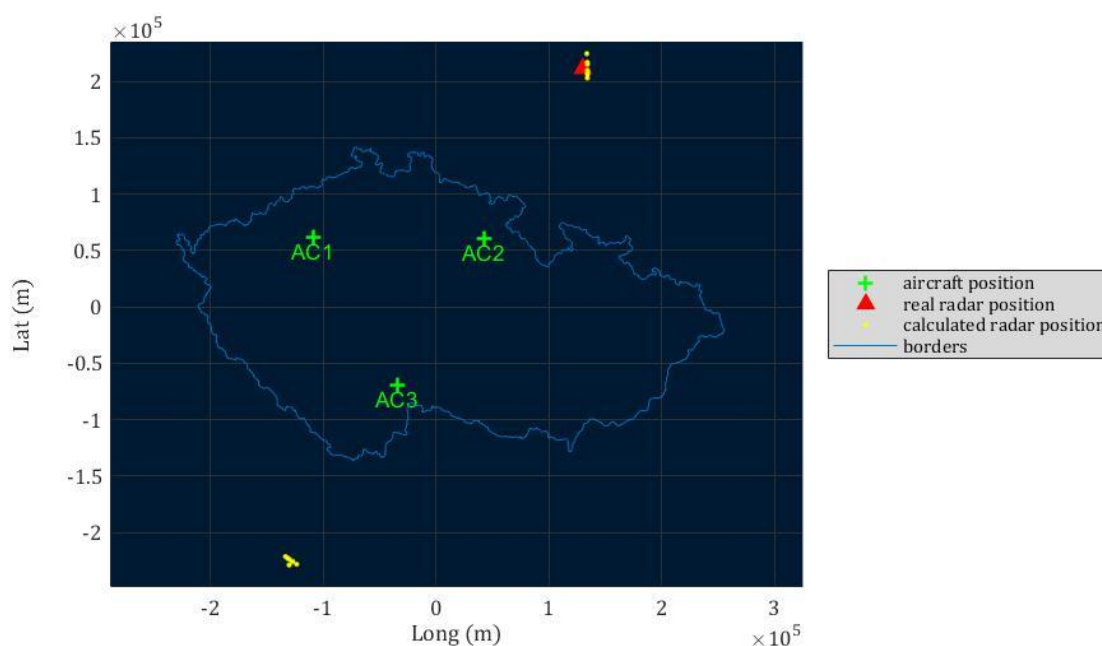
*Tabulka 15 Vyhodnocení určených apriorních odhadů poloh dotazovače.*

Označení dotazovače	Celkem apriorních odhadů	Falešně pozitivní odhady	Zájmové odhady	AEE (km)
2	3	0	1	4,592
3	1	0	1	0,087
4	2	0	1	0,092
5	1	0	1	3,619
6	4	1	1	4,795
7	4	1	1	8,089
8	1	0	1	1,335
9	4	1	1	2,278
10	4	1	1	2,107
11	3	1	1	1,998
Průměrná odchylka				2,899

## Výsledné polohy dotazovače

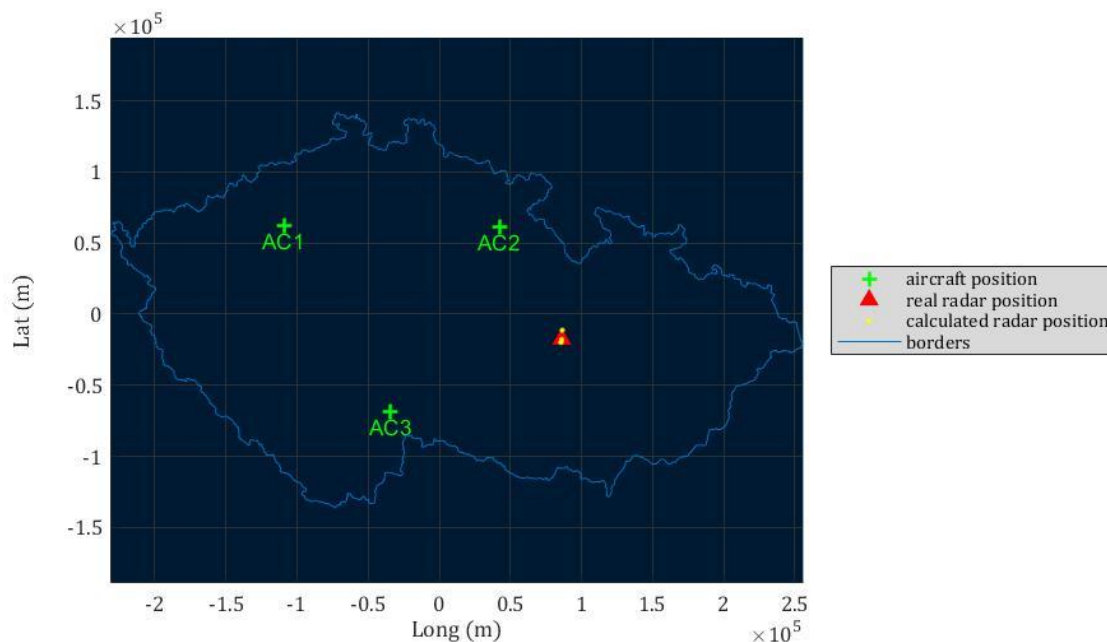
Nyní se budeme věnovat vyhodnocení výsledných poloh dotazovačů, které určujeme pomocí Newtonovy metody z každého určeného apriorního odhadu polohy dotazovače v rámci jedno základního prostoru měření. Prezentované odhady poloh dotazovače v této části jsou určeny z celého intervalu primárního měření, tzn. uvedené polohy jsou výsledky ze všech základních prostorů dané komunikace letadla a dotazovače.

Výsledky uvedené na Obrázek 14 potvrzují předpoklad výskytu falešného určení polohy dotazovače. Žlutými body jsou znázorněny vypočítané odhady polohy dotazovače ze všech základních prostorů měření. Červeným trojúhelníkem je vyznačena skutečná poloha dotazovače, u které vidíme jeden klastr určených odhadů poloh dotazovače. Nicméně se na jih od České republiky nachází ještě druhý klastr, který je tvořen falešnými řešeními. V příloze jsou přiloženy obrázky, které zobrazují vypočítané polohy pro všech deset zvolených dotazovačů. V případě pěti dotazovačů, u kterých jsme určili falešně pozitivní apriorní odhady polohy, se taktéž objevují falešné určení výsledné polohy dotazovače.



Obrázek 14 Zobrazení vypočteného odhadu polohy dotazovače s falešnou detekcí pozice

V případě zbylých pěti dotazovačů, u kterých nedošlo k určení falešně pozitivních apriorních odhadů polohy dotazovače, vypočítané výsledné odhady polohy dotazovače tvoří jeden klastr okolo skutečné polohy dotazovače, jako je to vidět na příkladu na Obrázek 15.



Obrázek 15 Zobrazení vypočteného odhadu polohy dotazovače bez falešné detekce pozice

Sumarizace vypočítaných výsledných odhadů polohy všech deseti simulovaných dotazovačů je uvedena v Tabulka 16. Druhý sloupec této tabulky určuje počet otáček, který anténa daného dotazovače během primárního měření dat provedla, resp. je to údaj o počtu základních prostorů měření učených u jednotlivých dotazovačů. Třetí sloupec uvádí celkový počet vypočítaných zájmových odhadů poloh dotazovače určených v rámci všech základních prostorů měření. U některých dotazovačů je počet výsledných odhadů dvojnásobný oproti počtu základních prostorů měření, což je způsobeno tím, že krom výpočtu vycházejícího ze zájmového apriorního odhadu polohy dotazovače konvergoval do minima funkce i výpočet vycházející z jiného než zájmového apriorního odhadu polohy dotazovače. V posledním sloupci tabulky jsou uvedeny průměrné euklidovské chyby (AEE) určených odhadů poloh od skutečné polohy dotazovače. Jsou brány v potaz pouze výsledné odhady z klastrů okolo skutečné polohy dotazovače. Filtrace falešných odhadů polohy dotazovače je postavena na předpokladu jejich uchylování během celého intervalu primárního měření, a to v případě simulace jakožto statického modelu není možné otestovat. Nevýrazné odchylky hodnot AEE výsledných odhadů poloh dotazovačů oproti AEE zájmových apriorních odhadů (viz Tabulka 15) značí, že v případě simulovaných dat zájmové apriorní odhady velmi přesně určují hledaná minima funkce reprezentující pozici hledaného dotazovače.

Tabulka 16 Přesnost výsledných odhadů poloh dotazovačů

Označení dotazovače	Počet otáček	Počet poloh	AEE (km)
2	36	81	4,194
3	30	29	14,878
4	36	62	0,108
5	30	30	3,619
6	26	26	4,795
7	22	21	6,989
8	20	20	1,335
9	36	72	2,309
10	23	46	2,107
11	30	30	1,998
			2,754

#### 5.4. Reálný vzdušný prostor

V případě dat získaných z reálného vzdušného provozu je naším hlavním cílem potvrdit stanovený předpoklad týkající se vlivu dynamicky systému na výsledky metody mapování přehledové infrastruktury, a který jsme v rámci dostupných simulovaných dat neměli možnost prozkoumat. Především bude předmětem našeho zájmu to, jak se chovají falešné určení polohy dotazovače z pohledu celého intervalu záznamu měření dat. Dalším cílem bude sledování vlivu dynamiky sledovaných letadel na změnu periodicity komunikace letadla s dotazovačem, resp. vliv na detekci dotazovačů, která je založena na principu rekonstrukce komunikace. Obecně lze říci, že výsledky mapování přehledové infrastruktury na základě reálných dat nebudeme schopni zhodnotit tak podrobně, jako tomu bylo u dat ze simulovaného prostoru, u kterých jsme k dispozici úplnou informací o daném prostoru. Proto zde disponujeme velmi omezenou možností zpětné kontroly mapování.

Data z reálného provozu jsou pro účely této práce poskytnuta společností Era a.s. Podrobný popis dat a jejich zpracování do formátu vstupních dat vhodného pro metodu mapování přehledové infrastruktury je uveden v kapitole 3.2.

### 5.4.1. Výsledky detekce dotazovačů

Algoritmus detekce dotazovačů před spuštěním vyžaduje od uživatele zadat určité parametry, které jsou nutné při hledání periodických řetězců v přijatých odpovědích letadel. U reálných dat jsme k detekci dotazovačů zadali tyto hodnoty parametrů:

- Interval periody otáčení antény dotazovače: 3,5 – 12,5 s.
- Šířka svazku antény dotazovače: 3°.
- Minimální délka řetězce: 80 % délky primárního měření.

Za pomoci uvedených parametrů detekce jsme na výstupu algoritmu dostali tyto výsledky:

- letadla 1: 34 nalezených periodických řetězců,
- letadla 2: 32 nalezených periodických řetězců,
- letadla 3: 21 nalezených periodických řetězců.

Z dat uvedených v bakalářské práci [9] nejsou počty nalezených periodických řetězců, kde každý z nich indikuje individuální komunikaci s dotazovačem, nikterak přehnané. V [9] se násobnosti radarového krytí pro námi sledovaný region pohybuje okolo hodnoty 25. Avšak počet nalezených periodických řetězců není tak podstatný. V této fázi vývoje je podstatné detekovat komunikace letadla s radary, i za cenu určení falešných komunikací. Ačkoli tento postup má negativní vliv na celkovou výpočetní náročnost v dalších částech metody mapování přehledové infrastruktury.

U reálných dat se detekce společných dotazovačů provádí pomocí nejednoznačného parametru, jehož hodnotu definuje perioda detekovaných dotazovačů u jednotlivých letadel. Důvodem nejednoznačnosti je fakt, že se ve sledované oblasti může vyskytovat více dotazovačů, jenž mají shodnou úhlovou rychlost otáčení antény. V našem případě se tato nevýhoda projeví, protože některé zrekonstruované komunikace jednotlivých letadel mají shodnou hodnotu periodicity. Z tohoto důvodu musíme při definování společných dotazovačů počítat s tím, že se objeví falešné definice dotazovačů, které neodpovídají žádnému skutečnému dotazovači.

Společné potenciální dotazovače vytváříme na základě porovnání period řetězců nalezených u jednotlivých zájmových letadel. Podařilo se vytvořit množinu 142 společných potenciálních dotazovačů, které dále využijeme ve fázi lokalizace.

## 5.4.2. Výsledky lokalizace dotazovačů

Lokalizaci podstoupilo všech 142 vytvořených společných potenciálních dotazovačů. Ty, které odpovídají skutečným dotazovačům, budou při lokalizaci konvergovat ke skutečné poloze daného dotazovače. Výsledkem zbylých falešných potenciálních dotazovačů bude prázdná množina výsledných odhadů polohy, nebo jejich výsledné odhady nebudou během celého intervalu měření konvergovat k jednoznačnému řešení.

U 38 společných potenciálních dotazovačů je výsledkem neprázdná množina odhadů poloh dotazovače. Tuto množinu jsme dále omezili na jedenáct společných potenciálních dotazovačů, u kterých výsledné odhady polohy dotazovače tvoří klastry indukující pozici dotazovače. Výsledky lokalizace těchto jedenácti společných dotazovačů budeme porovnávat s parametry radarů z Tabulka 9. Určené průměrné euklidovské chyby apriorních, resp. výsledných, odhadů polohy dotazovačů vůči skutečným polohám jsou uvedeny v tabulce 16, resp. 17.

*Tabulka 17 Průměrné euklidovské chyby apriorních odhadů polohy dotazovače vůči skutečné poloze*

ID	Country	Sensor ID	Počet otáček	Počet apriorních odhadů	AEE (km)
9	Germany	Berlin Tempelhof	18	18	11,323
11	Germany	Dobraberg DB	18	18	2,377
12	Germany	Freising (FS)	20	40	11,598
13	Germany	Gleina GL	15	11	2,879
14	Germany	Grosser Arber GA	14	14	2,110
17	Germany	Lauda (LA)	26	26	6,121
25	Czech Rep.	Bukop	35	35	9,174
27	Czech Rep.	Prague	36	36	3,457
29	Czech Rep.	Sokolnice	15	15	4,904
30	Poland	Poznan	37	31	14,778
31	Poland	Wroclaw	35	32	17,312

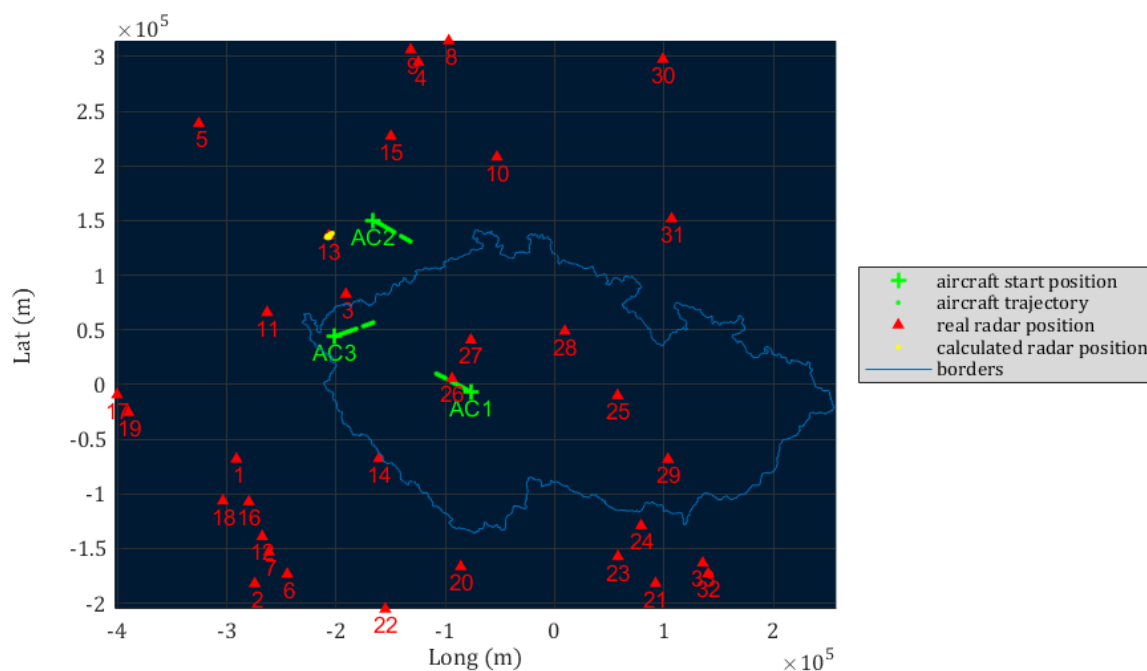
Výsledné odhady poloh čtyř společných potenciálních dotazovačů vykazují malou průměrnou euklidovskou chybu (AEE) vůči skutečným pozicím radarů označených v tabulce 18 čísly ID 11, 13, 14, 27. Navíc u těchto čtyř potenciálních dotazovačů není ve výsledné množině odhadů poloh zaznamenán falešný odhad. Chyba určení polohy se pohybuje v nižších jednotkách kilometrů. Na Obrázku 16 je grafické zobrazení příkladu takového společného dotazovače.



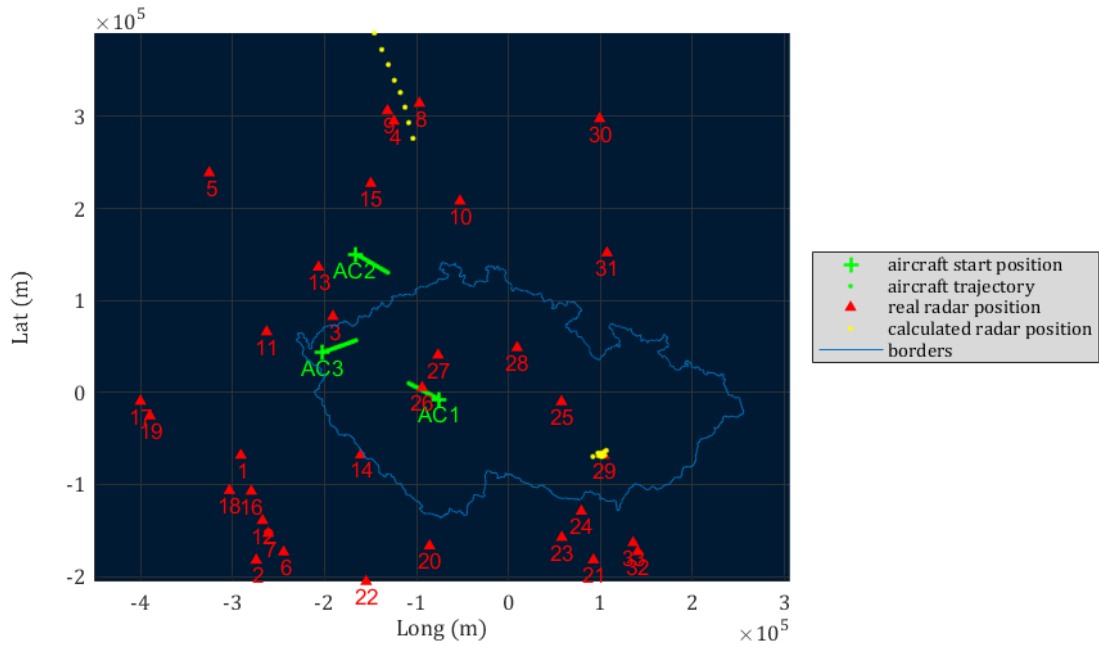
Tabulka 18 Průměrné euklidovské chyby výsledných odhadů polohy dotazovače vůči skutečné poloze

ID	Country	Sensor ID	Počet otáček	Počet poloh	Průměrná odchylka (km)
9	Germany	Berlin Tempelhof	18	28	10,844
11	Germany	Dobraberg DB	18	18	2,377
12	Germany	Freising (FS)	20	20	4,058
13	Germany	Gleina GL	15	10	1,999
14	Germany	Grosser Arber GA	14	14	2,110
17	Germany	Lauda (LA)	26	26	6,121
25	Czech Rep.	Bukop	35	35	9,174
27	Czech Rep.	Prague	36	36	3,457
29	Czech Rep.	Sokolnice	15	15	4,904
30	Poland	Poznan	37	37	18,923
31	Poland	Wroclaw	35	35	19,128

U dalších tří společných dotazovačů je možné krom jednoho dominantních shluku odhadů poloh dotazovače pozorovat předpokládané uchylování falešných odhadů polohy dotazovače. Dominantní sluky odhadů poloh navíc odkazují na skutečné radary s ID 9, 17 a 29. Zde už chyba v určení polohy dosahuje vyšších jednotek kilometrů. Příklad grafického zobrazení takového výsledku je vidět na Obrázku 16.

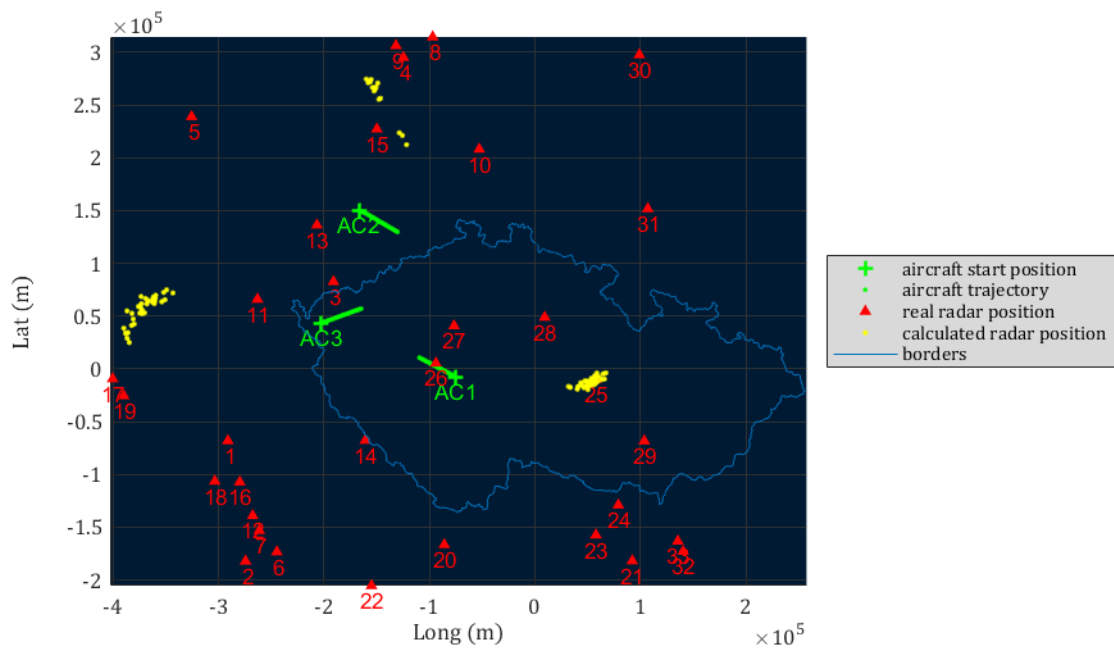


Obrázek 16 Zobrazení výsledného určení polohy dotazovače bez falešných detekcí



Obrázek 17 Zobrazení výsledného určení polohy dotazovače s falešnými detekcemi

Poslední podmnožinou společných dotazovačů jsou ty, jejichž výsledky nejsou zcela průkazné, protože výsledné odhady tvoří více dominantních shluků. Nelze jednoznačně určit falešné odhady polohy pomocí uchylování během celého intervalu měření, protože jsou odchylky nevýrazné. Ale pokud tyto naše odhady poloh proložíme skutečnými polohami radarů z tabulky 18, pak vždy jeden ze shluků odpovídá jednomu z radarů. Chyba v určení polohy dosahuje desítek kilometrů. Příklad grafického zobrazení takového výsledku je vidět na obrázku 17.



Obrázek 18 Zobrazení výsledného určení polohy dotazovače s falešnými detekcemi

## 6. Závěr

Zde uvedeme shrnutí navržené metody a zhodnotíme části, které mají vliv na mapování přehledové infrastruktury, ať už se jedná o samotnou detekci dotazovače nebo následné určování polohy detekovaných dotazovačů.

Navržená metoda mapování přehledové infrastruktury je rozdělena na dvě hlavní části. První část se zabývá detekcí dotazovačů v zájmové oblasti. Detekce je založena na principu rekonstrukce komunikace radarů s jednotlivými letadly. V množině přijatých odpovědí letadla se snažíme určit množiny odpovědí, které splňují charakteristiky komunikace letadla radarem. Čím přesněji dokážeme zrekonstruovat komunikaci, tzn. čím více přijatých odpovědí vybuzených daným dotazovačem přiřadíme do komunikace, tím přesnější získáme data, která se využívají v druhé fázi metody, kterou je lokalizace dotazovače. Konkrétně nám jde o to, určit pomocí zrekonstruované komunikace čas natočení osy antény na zájmové letadlo a určení periody otáčení antény dotazovače.

V současné fázi vývoje metody je výsledkem rekonstrukce komunikace periodický řetězec zpráv, které hledáme v množině přijatých odpovědí letadla. Platí, že jedna zpráva řetězce je odpověď vybuzená dotazovačem během jednoho intervalu ozáření letadla dotazovacím svazkem. Tento svazek ovšem dosahuje určité šíře, cca  $3^\circ$ , a dotazovač obvykle během jednoho intervalu ozáření vybudí u daného letadla více odpovědí. Naším cílem je alespoň jednu tuto odpověď přiřadit do periodického řetězce. Nadále bereme čas této odpovědi jako čas natočení osy antény na dané letadlo. Předpokládáme, že toto zjednodušení určení času natočení osy antény na letadlo způsobuje největší zatížení chyby při lokalizaci dotazovače.

Druhý parametr, který určujeme z zrekonstruované komunikace letadla s dotazovačem a využíváme jej při lokalizaci dotazovače, je perioda otáčení antény dotazovače. A ačkoli předpokládáme konstantní úhlovou rychlost otáčení antény dotazovače, nebude komunikace v reálném prostředí zcela periodická. Příčinou toho je pohyb letadel vůči dotazovači během jednotlivých ozáření letadla dotazovacím svazkem. V závislosti na rychlosti a směru letu vůči dotazovači se bude změna periodicity komunikace lišit. Nicméně v této fázi vývoje metody tento aspekt nepřesného určení periody otáčení antény zanedbáváme, což do výsledného určení polohy dotazovače zanáší další chybu.

Alespoň částečnou eliminaci těchto chyb by měla poskytnout rekonstrukce komunikace založená na určování dotazovacích period radarů. Z histogramu rozestupů času přijatých odpovědí lze odhadnout dotazovací periody radarů, se kterými se dotazují během jednoho přechodu letadla dotazovacím svazkem. To by nám umožnilo přiřadit do komunikace většinu odpovědí,

kteřé daný dotazovač u letadla vybudil. Tím pádem bychom byli schopni i přesněji určit střed dotazovacího svazku neboli čas natočení osy antény na letadlo.

Další výhodou této rozšířené rekonstrukce komunikace je i snížení neurčitosti při vytváření množiny společných dotazovačů. Mohli bychom k určení společného dotazovače využít nejen hodnotu periody otáčení antény, ale i dotazovací periodu. Snížení neurčitosti při vytváření společných dotazovačů zvýšilo možnosti využít v metodě více zájmových letadel. A zapojení více zájmových letadel by znamenalo eliminaci falešných určení polohy dotazovače. Navíc přesnost určení polohy dotazovače je závislá i na konfiguraci letadel a hledaného dotazovače, proto je výhodou mít k dispozici více zájmových letadel, a zvýšit tak pravděpodobnost, že alespoň tři zájmová letadla budou tvořit vhodnou konfiguraci.

Co se týká části lokalizace, zde je možné pro zvýšení přesnosti určení polohy využít vhodnější vztah pro linearizaci funkce, nebo zvolit polynom vyššího stupně pro přesnější aproximaci. Nicméně tento aspekt nezatěžuje výsledek lokalizace, tak moc jako nepřesnosti parametrů určených z rekonstrukce komunikace letadla s radarem.

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Struktura odpovědí na adresné dotazy formátu krátkého typu DF 4 a DF 5. ....	19
Tabulka 2 Struktura odpovědí na adresné dotazy formátu dlouhého typu DF 20 a DF 21. ....	20
Tabulka 3 Struktura zpráv formátu DF 17. ....	20
Tabulka 4 Přehled přijatých odpovědí zájmových letadel .....	23
Tabulka 5 Hodnoty intervalů period vysílání zpráv DF17 Extended Squitter. [6].....	23
Tabulka 6 Počet přijatých zpráv DF17 Extended Squitter zájmových letadel.....	24
Tabulka 7 Přehled parametrů dotazovačů využitých v simulaci vzdušného prostoru .....	26
Tabulka 8 Přehled parametrů letadel využitých v simulaci vzdušného prostoru .....	26
Tabulka 9 Seznam použitých radarů a jejich parametry. Zdroj [9]. ....	45
Tabulka 10 Závislost počtu určených potenciálních dotazovačů na počtu zájmových letadel a nalezených periodických řetězců. ....	46
Tabulka 11 Výsledky detekce dotazovačů z přijatých odpovědí letadla 1.....	51
Tabulka 12 Výsledky detekce dotazovačů z přijatých odpovědí letadla 2.....	52
Tabulka 13 Výsledky detekce dotazovačů z přijatých odpovědí letadla 3.....	53
Tabulka 14 Výsledky detekce dotazovačů společných pro všechna tři letadla .....	54
Tabulka 15 Vyhodnocení určených apriorních odhadů poloh dotazovače. ....	57
Tabulka 16 Přesnost výsledných odhadů poloh dotazovačů .....	60
Tabulka 17 Průměrné euklidovské chyby apriorních odhadů polohy dotazovače vůči skutečné poloze .....	62
Tabulka 18 Průměrné euklidovské chyby výsledných odhadů polohy dotazovače vůči skutečné poloze .....	63

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma přeletu letadla přes oblast krytí SSR [3] .....	12
Obrázek 2 Architektura pozemní stanice systému SIMON. [5] .....	16
Obrázek 3 Příklad lokalizace SSR radaru BUKOP systémem SIMON. [5] .....	17
Obrázek 4 Grafické zobrazení konfigurace simulovaného vzdušného prostoru.....	27
Obrázek 5 Schéma komunikace letadlo-dotazovač v podobě sekvence časů TOA přijatých odpovědí.....	30
Obrázek 6 Rozdělení komunikace letadel s dotazovačem na základní prostory měření $RA$ .	35
Obrázek 7 Schéma natočení osy antény dotazovače při dotazování letadel .....	36
Obrázek 8 Schéma množiny bodů $D$ reprezentující potenciální polohy dotazovače pro dvojici letadel $C_i$ a $C_j$ . .....	38
Obrázek 9 Schéma pro odvození parametrů kružnic definující potenciální polohy dotazovače. ....	38
Obrázek 10 Grafické zobrazení vztahu veličin základního prostoru měření $RA$ a veličiny prostoru sledován. ....	39
Obrázek 11 Schéma pro odvození velikosti úhlu $\varphi$ se závislostí na poloze dotazovače $D$ . ...	40
Obrázek 12 Zobrazení určených apriorních odhadů polohy dotazovače v rámci jedno základního prostoru měření. ....	56
Obrázek 13 Zobrazení určených apriorních odhadů polohy dotazovače v rámci jedno základního prostoru měření. ....	56
Obrázek 14 Zobrazení vypočteného odhadu polohy dotazovače s falešnou detekcí pozice. 58	
Obrázek 15 Zobrazení vypočteného odhadu polohy dotazovače bez falešné detekce pozice .....	59
Obrázek 16 Zobrazení výsledného určení polohy dotazovače bez falešných detekcí .....	63
Obrázek 17 Zobrazení výsledného určení polohy dotazovače s falešnými detekcemi.....	64
Obrázek 18 Zobrazení výsledného určení polohy dotazovače s falešnými detekcemi.....	64

## Zdroje a Literatura

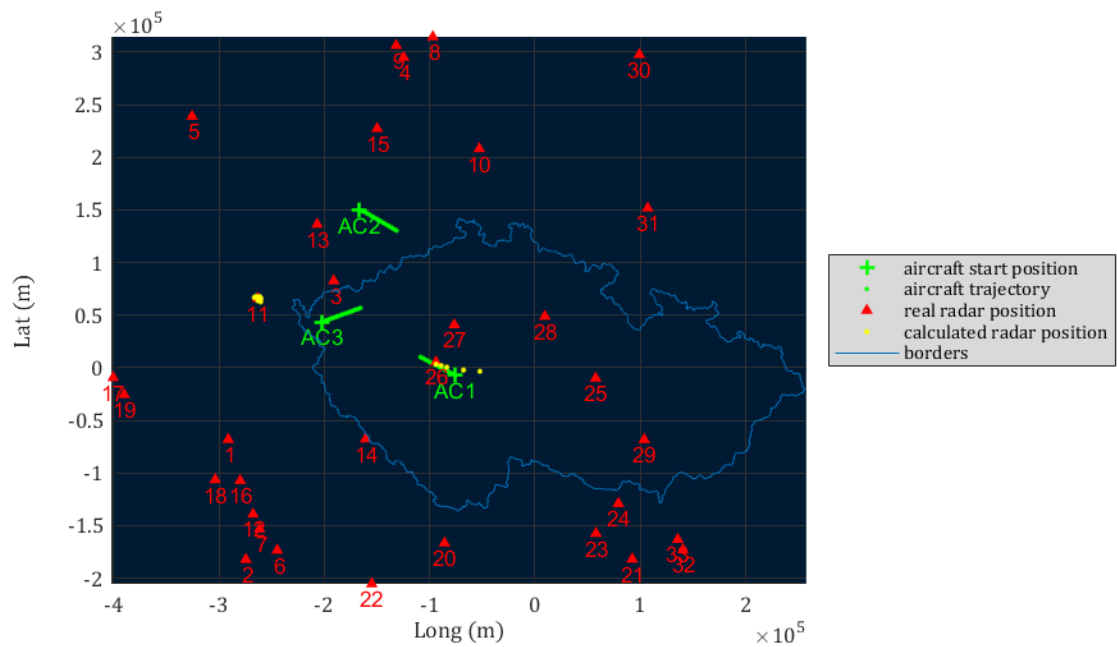
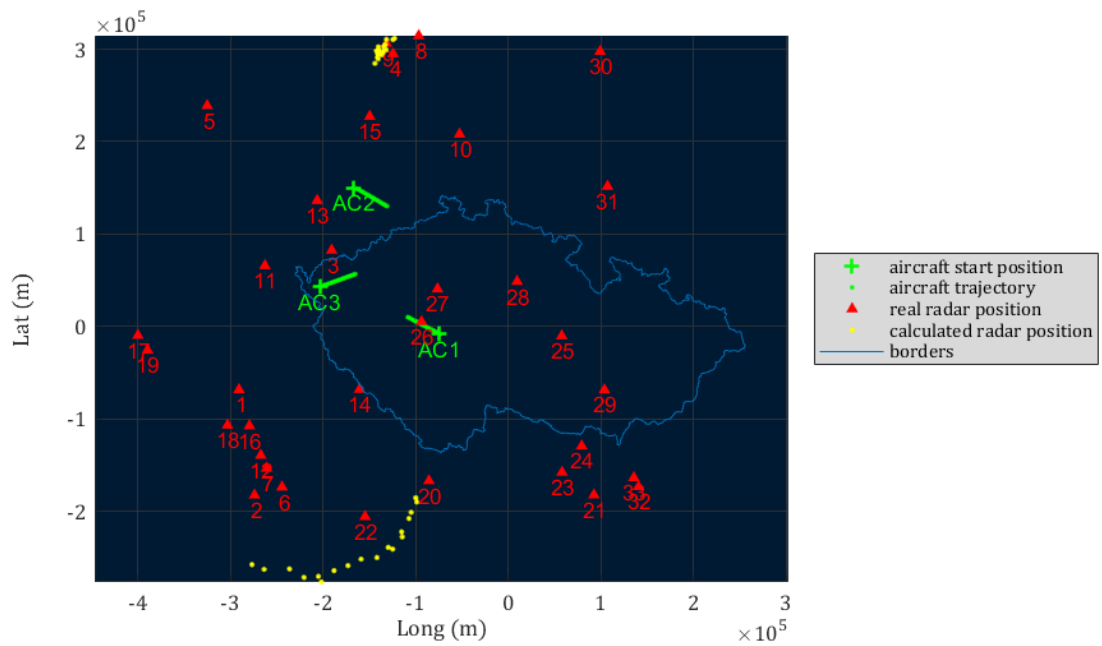
- [1] Radartutorial.eu: [online]. [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>.
- [2] MINIMUM OPERATIONAL PERFORMANCE SPECIFICATION FOR SECONDARY SURVEILLANCE RADAR MODE S TRANSPONDERS. ED-73E. Malakoff France: EUROCAE, 2011.
- [3] Mode S Surveillance Principle. EUROCONTROL [online]. 26.2.2019 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.icao.int/MID/Documents/2019/MICA/MICA-MID%20-%20WP%2002%20-%20Mode%20S%20Surveillance%20Principle.pdf>
- [4] ICAO. Annex 10: Aeronautical Telecommunication Volume IV, Surveillance and Collision Avoidance System, 4th ed., 2007.
- [5] SIMON: 1030/1090 MHz Monitoring System [online]. In: T-CZ, 2018 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://www.dropbox.com/s/wmohqpfec1oejin/1030%201090%20Monitoring%20System.ppsx?dl=0>.
- [6] Doc 9684: Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems. 3rd ed. Montreal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization, 2004.
- [7] *Nástroj pro analýzu zatížení RF pásem 1030/1090 MHz*, Studentský projekt (SGS17/153/OHK2/2T/16), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha
- [8] *CNS/ATM technologie a provozní postupy: Studentský projekt Nástroj pro analýzu zatížení RF pásem 1030/1090 MHz (SGS17/153/OHK2/2T/16)* [online]. 2018 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/projects/k621x1ca/aktualne.html>
- [9] KONEČNÝ, F.: *Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů*. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha 2016
- [10] Radar Programming - MIP. EUROCONTROL [online]. 26.2.2019 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.icao.int/MID/Documents/2019/MICA/MICA-MID%20-%20WP%2012%20-%20Radar%20programming%20-%20MIP.pdf>

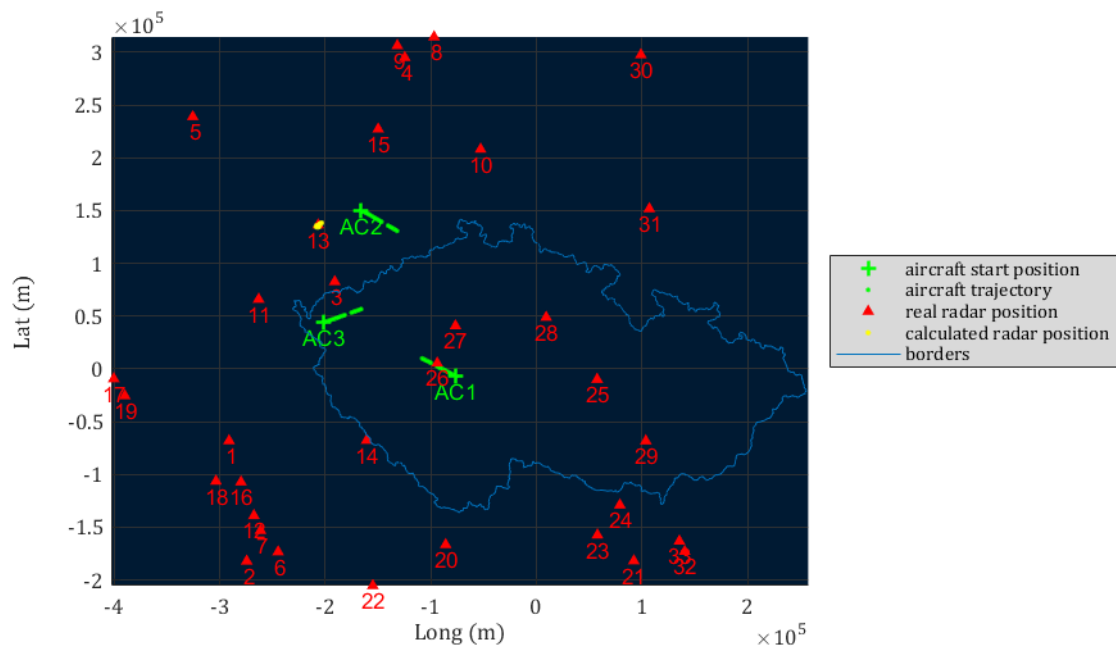
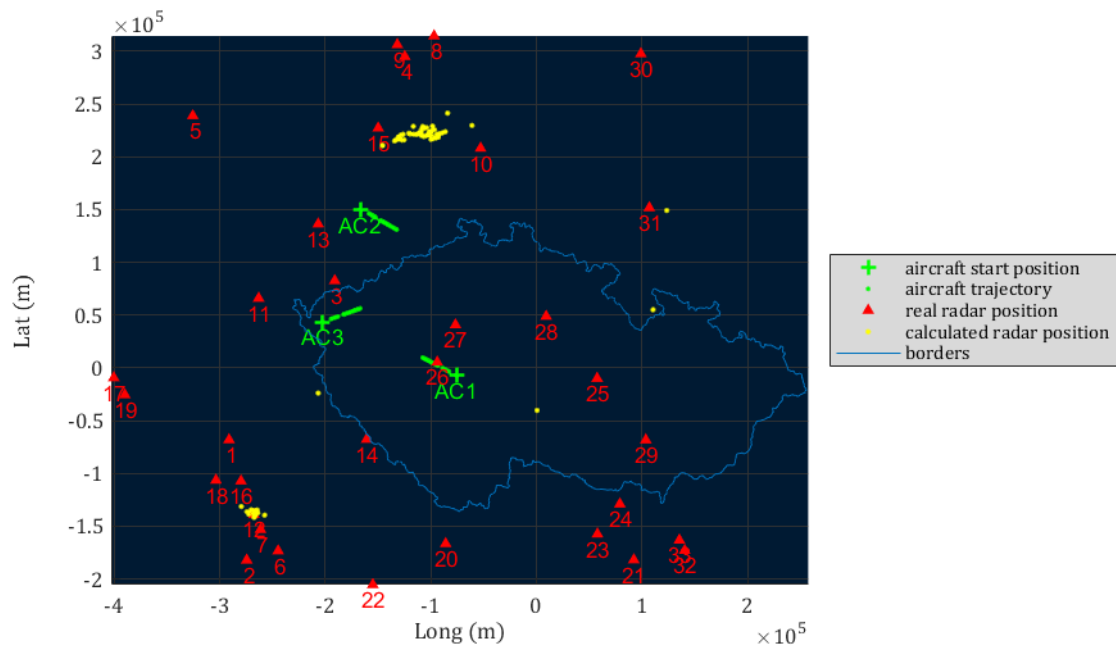
- [11] ŠÍMA, J.: *Mapování přehledové infrastruktury analýzou příjmu SSR odpovědí od letadla*. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha 2016
- [12] YUAN, Quan a spol. *Detecting Multiple Periods and Periodic Patterns in Event Time Sequences* [online]. 2017 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <http://chaozhang.org/papers/2017-cikm-periodic.pdf>
- [13] *MAPY.CZ* [online]. Seznam.cz, 2020 [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://en.mapy.cz/zkladni?x=14.0345233&y=49.7849207&z=17&source=base&id=2231988>
- [14] Havlík, J.: *Hodnocení kvality odhadu stavu stochastických systémů*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Plzeň 2014
- [15] Bezoušek, P., Šedivý, P. (2004) *Radarová technika*. 1. vydání. Praha: ČVUT v Praze. ISBN 80-01-03036-9.
- [16] Doc 9871 *Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter*, 2nd ed, Montreal, Quebec, Canada: International Civil Aviation Organization, 2011

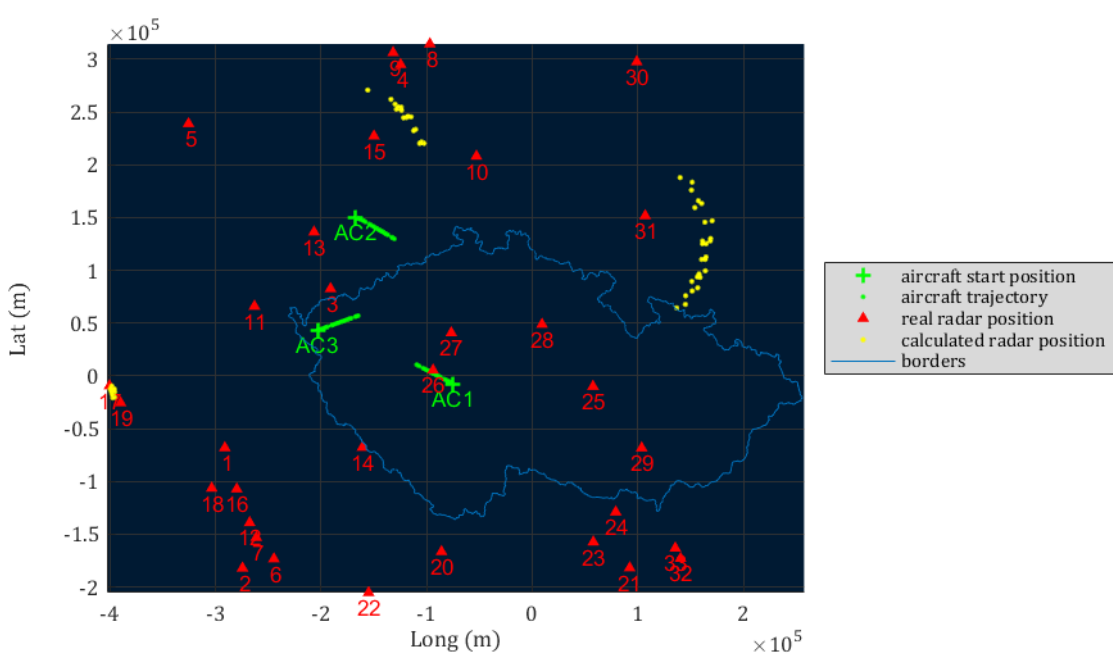
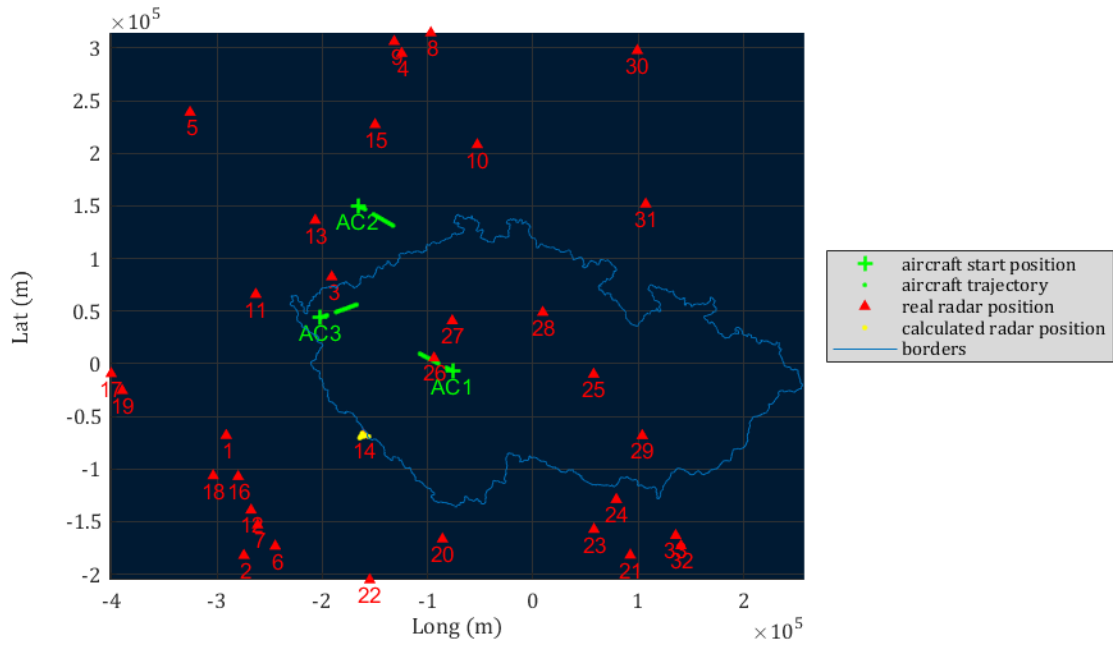


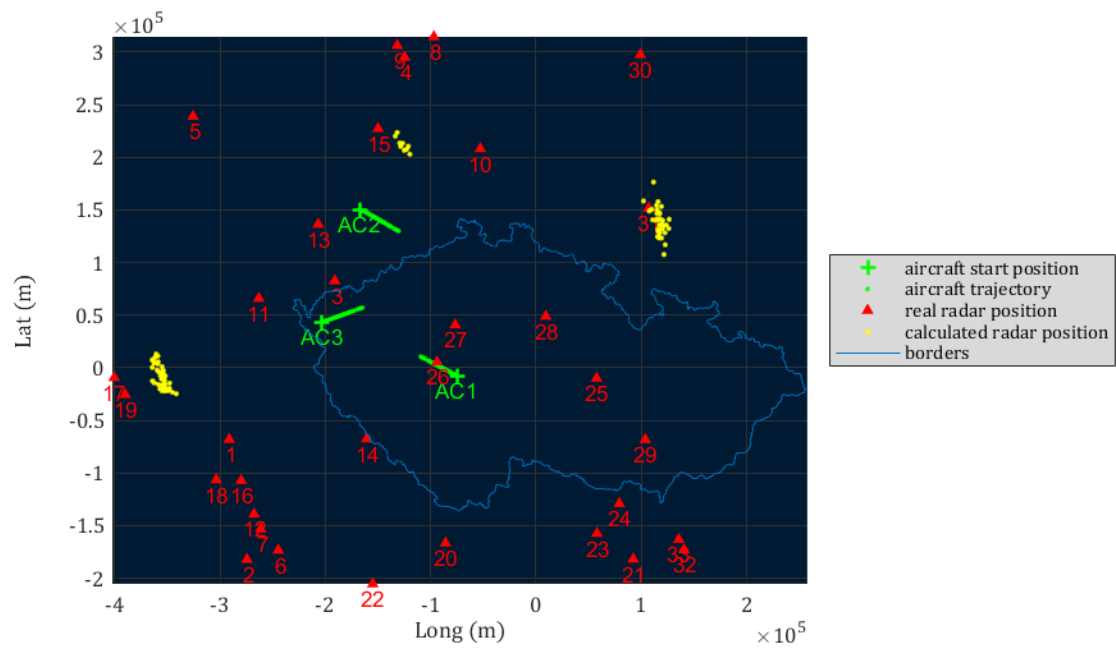
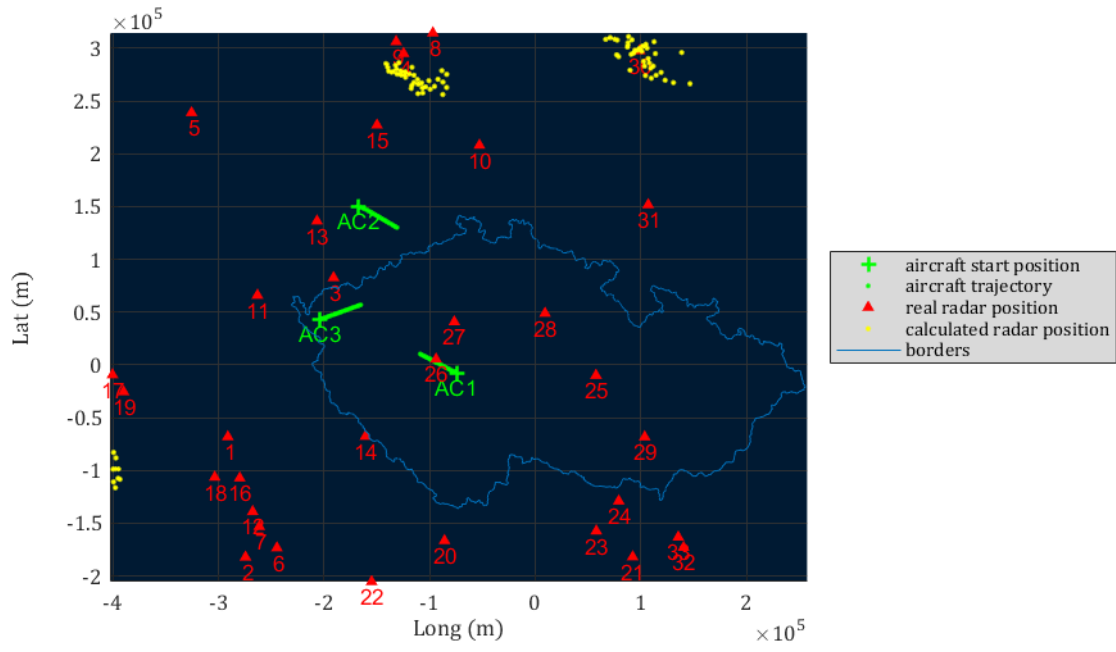
# Přílohy

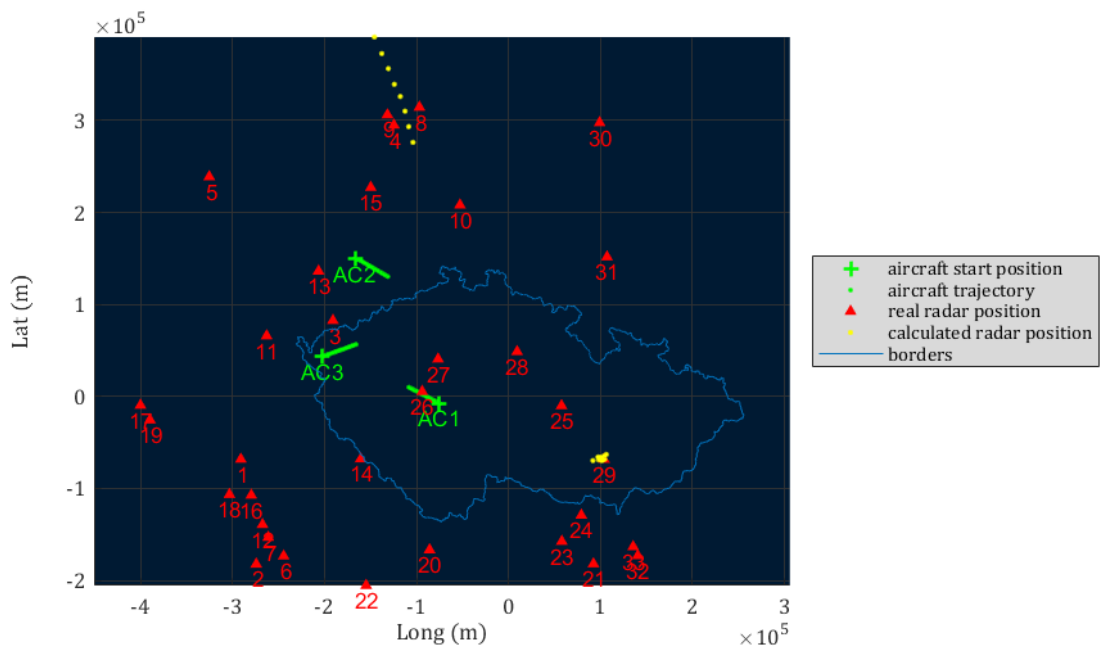
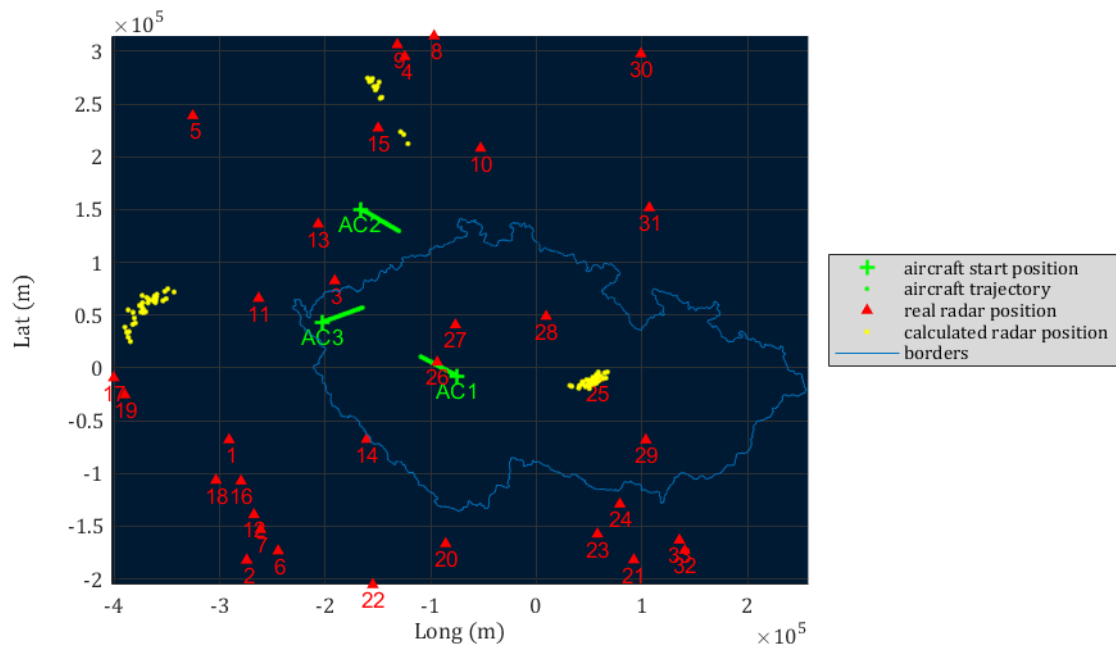
Grafické zobrazení odhadu polohy dotazovačů – reálný vzdušný prostor:











### Grafické zobrazení odhadu polohy dotazovačů – simulace vzdušného prostoru:

