



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Filip Konečný

KOMPLEMENTÁRNÍ PASIVNÍ METODA
MONITOROVÁNÍ CÍLŮ

Diplomová práce

ROK ODEVZDÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Filip Konečný

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Komplementární pasivní metoda monitorování cílů**

Název tématu (anglicky): Complementary Passive Target Monitoring Method

Zásady pro vypracování

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

- Současné možnosti monitorování vzdušných cílů
- Návrh komplementární metody monitorování cílů založené na příjmu SSR odpovědí
- Výpočet azimutů SSR v čase na základě příjmu odpovědí vybuzených těmito radary
- Realizování výpočtu polohy letadla pomocí navržené metody na reálných datech
- Statistické vyhodnocení výsledků získaných navrženou metodou



- 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: ADS-B Mode S Decoding Guide
ICAO - Předpisy řady L
Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter

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

Datum zadání diplomové práce: **28. července 2017**
(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: **29. května 2018**
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 diplomové práce.

Bc. Filip Konečný
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 28. února 2018

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D., vyučujícímu na Ústavu letecké dopravy Fakulty dopravní ČVUT, za vstřícnost a užitečné připomínky během zpracovávání této práce.

Zvláštní poděkování náleží panu Ivanu Uhlířovi, metodickému pracovníkovi Řízení letového provozu České republiky, s.p., za poskytnutí jedinečných studijních materiálů a za průběžné konzultace a praktické rady.

Poděkování patří rovněž panu Mgr. Karlu Hantonovi ze společnosti CS SOFT a.s. za cenné připomínky k rozpracovanému textu.

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 etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne 27. května 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

KOMPLEMENTÁRNÍ PASIVNÍ METODA

MONITOROVÁNÍ CÍLŮ

diplomová práce

květen 2018

Bc. Filip Konečný

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce s názvem „Komplementární pasivní metoda monitorování cílů“ je ověřit myšlenku, zda je možné určovat polohu letícího letadla, které není vybavené systémem ADS-B, na základě vyhodnocení mód S odpovědí, při současné znalosti azimutů dotazujících se radarů, získaných pomocí referenčního letícího letadla, které je systémem ADS-B vybaveno. V práci jsou vysvětleny nezbytné pojmy a souvislosti vztahující se k dané problematice a je navržen postup, na jehož základě lze testovat přesnost komplementární metody. Vypočtené hodnoty jsou zdokumentovány statisticky a zjištěná nepřesnost metody je rozebrána chybovou analýzou.

ABSTRACT

The subject of the paper "Complementary passive target monitoring method" is to describe a method that determines a position of a non-ADS-B equipped aircraft based on the evaluation of Mode S responses, while knowing the azimuths of the interrogating radars obtained by a reference aircraft that is equipped with the ADS-B. The aim of the paper is to explain important concepts and contexts related to the given issue. The paper proposes a procedure on the basis of it is possible to test the accuracy of the complementary method. The calculated values are statistically evaluated and the inaccuracy of the method is analyzed by error analysis.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Komplementární metoda, WAM, ADS-B, SSR, mód S radar, DF 11, DF 17

Complementary method, WAM, ADS-B, SSR, mode S radar, DF 11, DF 17

Obsah

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratk.....	7
Úvod	8
1 Současné možnosti monitorování cílů	10
1.1 Múd S	10
1.1.1 Struktura všeobecného dotazu módu S (UF11).....	11
1.1.2 Struktura odpovědi na všeobecný dotaz módu S (DF 11).....	13
1.1.3 Acquisition a Lock Out	14
1.1.4 Nastavení All-Call period radarů.....	15
1.2 WAM.....	17
1.3 ADS technologie	20
1.3.1 ADS-B.....	21
2. Vybrané procesy v přehledové infrastruktuře	25
2.1 Princip mapového pokrytí radaru.....	25
2.2 Klastry.....	27
2.3 IC kódy a formální pravidla pro jejich stanovení.....	27
3. Komplementární metoda monitorování pasivních cílů	29
3.1 Bistatické radarové zpracování pro ADS-B senzory.....	30
3.2 Princip komplementární metody monitorování pasivních cílů.....	32
3.3 Zmapování sady dotazujících se radarů	34
3.3.1 Současná radarová situace ve Střední Evropě.....	34
3.3.2 Postup pro výběr relevantních radarů.....	35
3.3.2.1 První sada dat.....	36
3.3.2.2 Druhá sada dat.....	39
3.3.3 Postup pro přiřazení IC kódů dotazujícím se radarům.....	43
3.3.4 Identifikace parametrů dotazujících se radarů	44
3.3.5 Určení period otáčení radarů.....	49
3.3.5.1 Navržená metoda pro stanovení periody otáčení radaru.....	50
3.3.6 Výpočet azimutů SSR v čase k nereferenčním letadlům.....	54
3.4 Metoda výpočtu polohy.....	55
3.4.1 Teorie určení polohy na prostorovém tělese.....	55
3.4.2 Postup výpočtu určení polohy pro případ elipsoidu.....	57
3.4.3 Výpočet polohy na elipsoidu.....	58

4. Výpočtová část.....	60
4.1 Výpočet polohy letadla.....	60
4.2. Vyhodnocení výsledků výpočtu	62
4.2.1 První sada dat.....	62
4.2.1.1 Metoda průměru časů.....	63
4.2.1.2 Metoda prvních hodnot.....	64
4.2.1.3 Vyhodnocení výsledků výpočtů a porovnání metody průměru časů a metody prvních hodnot pro první sadu dat.....	65
4.2.2 Druhá sada dat.....	66
4.2.2.1 Metoda průměru časů.....	67
4.2.2.2 Metoda prvních hodnot.....	67
4.2.2.3. Vyhodnocení výsledků výpočtů a porovnání metody průměru časů a metody prvních hodnot pro druhou sadu dat.....	67
4.2.3 Histogram pro metodu průměru času.....	68
5 Chybová analýza.....	70
5.1 Chyba v dotazovacím svazku a nepřesnost vlivem geometrické konstelace radarů při aktuálním nasměrování jejich azimutů.....	70
5.1.1 Chybový model geometrické konstelace radarů.....	75
5.2 Vyhodnocení méně závažných chyb.....	80
Závěr	82
Seznam použité literatury.....	84
Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	87
Komentář ke skriptům a funkcím.....	89
Seznam příloh.....	91

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ADS-B	ADS-Broadcast
ATM	Air Traffic Management
APW	Area Proximity Warning
ARTAS	ATM Surveillance Tracker And Server
ASTERIX	All-purpose Structured Eurocontrol Radar Exchange
DF	Downlink Format
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
ICAO	International Civil Aviation Organization
IC	Interrogator Code
IFR	instrument flight rules
II	Interrogator Identifier Codes
MSSR	Monopulse Secondary Surveillance Radar
ŘLP	Řízení letového provozu
SI	Surveillance Identifier
TMA	Terminal Control Area
WAM	Wide Area Multilateration

Úvod

Po celém světě dochází k průběžnému navyšování přepravních objemů realizovaných pomocí letecké dopravy. To s sebou přináší zvyšující se nároky kladené na všechny funkční složky, které se podílí na provozování letectví. Hledají se nové systémy, které by zrychlily přepravu, zvýšily bezpečnost letů a napomohly k vyšší propustnosti a efektivitě provozu.

Jednou z velice podstatných složek letectví jsou přehledové systémy, pomocí nichž probíhá řízení letového provozu. Vlivem zahušťování vzdušného prostoru jsou na tyto systémy kladeny stále větší požadavky tak, aby se udržela bezpečnost letecké dopravy v přijatelných mezích.

Základním prostředkem pro řízení letového provozu jsou radiolokátory v kombinaci s přehledovými systémy, u nichž se informace o letadlech získávají jiným principem. Tyto systémy tvoří společně páteř přehledové infrastruktury pro řízení letového provozu.

Technická řešení přehledových systémů zaznamenala v posledních desetiletích nebývalého pokroku, přesto se cíleně vyvíjí nové aplikace, zpravidla jako modifikace, využívající stávající infrastrukturu, ale založené na novém pohledu na věc. Snahou je vytěžit z množství dostupných dat, prostřednictvím nových postupů jejich zpracování, komplementární informace pro vytvoření souhrnného pohledu na situaci ve vzdušném prostoru.

Jako téma diplomové práce jsem si zvolil ověření funkčnosti jednoho z těchto navrhovaných systémů. Jedná se o komplementární pasivní metodu monitorování vzdušných cílů, založenou na příjmu SSR odpovědí a následným výpočtem polohy.

Zadáním diplomové práce je ověřit myšlenku, zda je možné určovat polohu letícího letadla, které není vybavené systémem ADS-B, na základě vyhodnocení mód S odpovědí, při současné znalosti azimutů dotazujících se radarů, získaných pomocí referenčního letícího letadla, které je systémem ADS-B vybaveno. Úkolem je navrhnout způsob výpočtu polohy letícího cíle a vyhodnotit jeho přesnost porovnáním se záznamem údajů o skutečné poloze cíle.

V první kapitole zmiňuji současné možnosti monitorování vzdušných leteckých cílů. Vzhledem k šíři tohoto tématu se věnuji především kooperativním systémům, založeným na módu S včetně popisu nejrůznějších mód S formátů, které jsou pro správnou funkcionalitu moderních přehledových systémů nezbytné. Popisuji způsob definování pokrytí pro radary módu S a podrobně se zabývám kódováním dat u kategorie UF 11 a DF 11, které budu využívat pro samotný výpočet a které jsou pro správnou funkci nového systému nezbytné.

V kapitole rovněž popisují systémy WAM a ADS-B. Zejména druhý jmenovaný systém je klíčový pro konstrukci určování polohy komplementární metodou. Ve výčtu pomímám primární pulzní radar jako techniku dostatečně známou¹ a pro účely mého výzkumu nepoužitelnou.

V navazující kapitole se zabývám některými specializovanými poznatky, které považuji za vhodné vysvětlit před samotným výkladem komplementární metody. Jedná se o přiblížení principu mapového pokrytí, radarové klastry a způsob přidělování IC kódů jednotlivým radarům.

Třetí část práce je nejobsáhlejší. Věnuji se v ní principu komplementární metody určení letícího cíle a shromažďuji v ní informace potřebné pro výpočtovou část práce. Na základě získaných DF11 identifikuji relevantní radary mód S, které odpověď vyvolaly, a přiřazuji jim IC kódy. Formulují metodu pro výpočet periody otáčení radaru, pro výpočet azimutu k nereferenčnímu letadlu. Stanovují postup pro výpočet polohy letadla na modelu elipsoidu.

Po této metodické přípravě přecházím k výpočtové části. Zpracování dat je provedeno na základě samostatných skriptů, které jsou poskládány z nejrůznějších funkcí Matlab®. Vypočtené hodnoty pak vyhodnocuji statisticky ve formě grafů.

Vzhledem k tomu, že výsledky výpočtů se významně odlišují od reálných dat, vkládám pátou kapitolu, která se zabývá chybovou analýzou, která identifikuje slabá místa použité metody.

Poznatky práce jsou shrnuty do závěru. Nechybí ani komentář ke skriptům a funkcím, seznam příloh, obrázků, tabulek a pramenů.

¹ Blíže např.: Konečný, F. *Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů*. (2016). Bakalářská práce ČVUT.

1 Současné možnosti monitorování cílů

Pro řízení letecké dopravy je v současnosti využíváno několik principů přehledových systémů. Informace, které poskytují, jsou vzájemně kombinovány a tvoří vstupy pro jednotlivé trackery². Vývoj se ubírá od nekooperativních metod sledování prostřednictvím primárních radarů ke kooperativním systémům, případně systémům předpokládajícím vlastní iniciativu sledovaného cíle. A právě těmto metodám se budu v této kapitole podrobněji věnovat.

1.1 Mód S

Na rozdíl od primárního radaru, který vysílá elektromagnetické vlny a přijímá jejich odrazy, sekundární přehledový radar elektromagnetické pulzy sice vysílá, ale jejich odraz neočekává. Účelem vyslání elektromagnetické vlny je iniciovat kooperativní odezvu zařízení instalovaného na palubě letadla, tzv. odpovídače (transpondér).

Veškeré parametry komunikace v rámci SSR jsou upraveny normami ICAO a národními úpravami ve formě předpisů o civilní letecké službě³. Sekundární radar využívá ke svému provozu pevně určené kmitočty. Dotaz je vyslán na frekvenci 1030 MHz, odpověď cíle je přijímána na frekvenci 1090 MHz.

Dotazování může probíhat v několika formátech, přičemž pro civilní letectví se využívají formáty označené A, C, S⁴. Určení, o jaký formát se jedná, je založeno na standardizované délce vysílaných a přijímaných impulzů. Pro mou práci je podstatný mód S, proto se mu budu dále věnovat prakticky výhradně.

Dotazování v módu S probíhá ve dvou fázích. V první fázi, nazvané All-Call⁵, probíhá zjišťování, která letadla vybavená SSR odpovídačem A/C a S se ve sledovaném prostoru nacházejí. Dotazování se liší v délce impulzu P4⁶. Dotazovač, identifikovaný jedinečným IC⁷ kódem, vysílá všeobecný dotaz. Po jeho přijetí palubním odpovídačem módu S dotázané letadlo zašle jako

² V České republice je hlavním trackerem systém ARTAS.

³ V České republice se jedná o letecký předpis L10/IV.

⁴ Podrobně je problematika rozebrána v učebnici Bezoušek, P., Šedivý, P. *Radarová technika*. vyd.1. Praha: ČVÚT v Praze, s. 184.

⁵ Ve většině případů je opakovací frekvence mód S radarů v All-Call periodě minimálně 40 Hz a maximálně 150 Hz.

⁶ Blíže viz předpis L10/IV.

⁷ Blíže viz kapitola 2.3, IC kódy a formální pravidla pro jejich stanovení.

odpověď svou 24 bitovou unikátní adresou⁸. Je-li letadlo v pracovní oblasti radaru, je jeho odpověď přijata, dekodována a následuje selektivní Roll-Call dotaz. V tomto okamžiku je komunikace tzv. „uzamčena“. Je přepnuta do Roll-Call fáze. Uzamčené letadlo sice i nadále přijímá všeobecný All-Call dotaz s daným identifikátorem, avšak odpovědi na něj jsou blokovány. Selektivní dotaz obsahuje informaci, která zajišťuje potlačení odpovědí na všeobecný dotaz. Ostatní letadla vybavená odpovídači módu A a C vyhodnotí selektivní dotazování jako dotaz přijatý z postranního laloku a na dotaz neodpoví.

V Roll-Call periodě probíhá pouze selektivní komunikace s dotazujícím se radarem, přičemž k dispozici je 25 různých formátů zpráv módu S. Současně platí, že transpondér „uzamčeného“ letadla i nadále odpovídá na dotazy od jiných sensorů módu S s odlišným kódem identifikace.

Konkrétní nastavení All-Call a Roll-Call period závisí na dalších parametrech radaru, jako jsou šířka dotazovacího paprsku, maximální dosah radaru a perioda otáčení radaru. Přehled jednotlivých formátů, ať již vzestupného spoje UF (Uplink Format) nebo sestupného spoje DF (Downlink Format) je v bitové struktuře obsažen v leteckém předpisu L 10/IV. Pole UF i DF je 5 bitů dlouhé a udává, o jaký formát vzestupného spoje se jedná. Po převodu z binární do decimální soustavy se nabízí 25 možných sestav. Nutno podotknout, že z nabízených 25 formátů jsou využívány pouze ty, které jsou číselně označeny jako 0, 4, 5, 11, 16, 17, 20 a 21. Pro mé potřeby jsou podstatné formáty UF 11, DF 11 a DF 17. Jimi se budu dále v práci zabývat podrobněji.

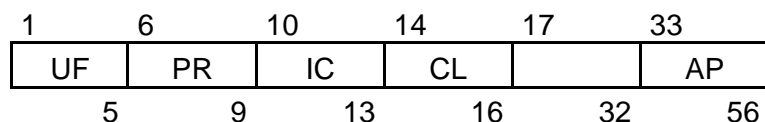
1.1.1 Struktura všeobecného dotazu módu S (UF 11)

Všeobecný dotaz módu S je realizován pomocí UF 11. Odpověď na tento všeobecný dotaz módu S je uskutečňována pomocí DF 11.

Struktura všeobecného dotazu módu S je standardizovaná a má bitovou skladbu dle obrázku č. 1⁹:

⁸ Podrobně se přidělování 24 bitové unikátní adresy věnuje předpis: EUROCONTROL. Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes, [2003]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>

⁹ Struktura kapitoly je převzata z leteckého předpisu L10/IV.



Obrázek 1: Struktura všeobecného dotazu módu S

- a) Pole UF (Uplink Format) je v případě všeobecného dotazu módu S označen číslem 11.
- b) Další pole je označené PR (Probability of Reply) a uvádí pravděpodobnost odpovědi. Zabírá 4 bity a z údaje vyčteme, s jakou pravděpodobností obdržíme od letadla odpověď. Hodnoty pravděpodobností jsou zakódované pomocí následující tabulky.

Tabulka 1: Kódování hodnot pravděpodobnosti¹⁰

0	Odpověď s pravděpodobností 1
1	Odpověď s pravděpodobností 1/2
2	Odpověď s pravděpodobností 1/4
3	Odpověď s pravděpodobností 1/8
4	Odpověď s pravděpodobností 1/16
5, 6, 7	Není přiřazena žádná pravděpodobnost odpovědi
8	Jedná se o odmítnutí uzamčení, odpověď s pravděpodobností 1
9	Odmítnutí uzamčení, odpověď s pravděpodobností 1/2
10	Odmítnutí uzamčení, odpověď s pravděpodobností 1/4
11	Odmítnutí uzamčení, odpověď s pravděpodobností 1/8
12	Odmítnutí uzamčení, odpověď s pravděpodobností 1/16
13,14,15	Není přiřazeno

- c) IC (Interrogator Code) pole definuje kód dotazovače. V případě II (Interrogator Identifier) se jedná o čtyřbitovou hodnotu, v případě SI (Surveillance Identifier) se jedná o první 4 bity z šestibitového kódu.¹¹

- d) Pole CL (Code Label) strukturuje předchozí pole. Jedná se o 3 bitové pole, které určuje obsah pole IC podle následující tabulky:

Tabulka 2: Kódování CL pole¹²

000	IC pole obsahuje II kód
001	IC pole obsahuje SI kódy 1-15
010	IC pole obsahuje SI kódy 16-31
011	IC pole obsahuje SI kódy 32-47
100	IC pole obsahuje SI kódy 48-63

- e) Bity 17-32 jsou volné.

¹⁰ Zdroj: L10/IV, opatření Ministerstva dopravy ČR č. j. 1285/2003-220-SP/1 ze dne 5. 12. 2003. Předpis o civilní letecké telekomunikační službě, svazek IV – přehledový radar a protisrážkový systém.

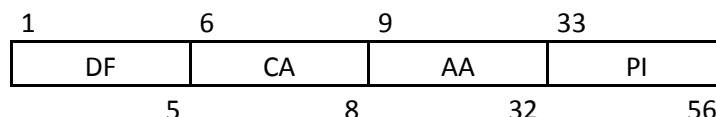
¹¹ Blíže viz kapitola 2.3, IC kódy a formální pravidla pro jejich stanovení.

¹² Zdroj: L10/IV, opatření Ministerstva dopravy ČR č. j. 1285/2003-220-SP/1 ze dne 5. 12. 2003. Předpis o civilní letecké telekomunikační službě, svazek IV – přehledový radar a protisrážkový systém.

f) Pole AP (Adress/Parity) označuje pole adresa/parita a obsahuje kombinaci parity a adresy. Pro UF 11 obsahuje adresu všeobecného dotazu, která sestává ze 24 jedniček¹³.

1.1.2 Struktura odpovědi na všeobecný dotaz módu S (DF 11)

Odpovídač módu S vysílá sestupnou zprávu (Downlink) o délce 56 bitů nebo 112 bitů¹⁴. Struktura odpovědi formátu DF 11¹⁵ na všeobecnou výzvu, která je 56 bitů dlouhá, je následující:



Obrázek 2: Struktura odpovědi DF 11 na všeobecnou výzvu módu S¹⁶

- a) Z nabízených 25 možností formátů budeme pro další úvahy uvažovat, že pro případ odpovědi na všeobecný dotaz módu S je hodnota DF nastavena na 11.
- b) CA (Capability) je 3 bitové pole a uvádí potenciální možnosti transpondéru. Používá se u DF 11 a DF 17. Kódování tohoto pole je definované v níže uvedené tabulce:

Tabulka 3: Kódování CA pole¹⁷

0	Určuje, že odpovídač je úrovně 1 a nastavení CA pole na hodnotu 7, odpovídač je „buď na zemi, nebo ve vzduchu“.
1	Rezervováno
2	Rezervováno
3	Rezervováno
4	Určuje, že odpovídač je úrovně 2 nebo vyšší, nastavení CA pole na hodnotu 7, a nastavení „odpovídač je na zemi“.
5	Určuje, že odpovídač je úrovně 2 nebo vyšší, nastavení CA pole na hodnotu 7 a nastavení na „odpovídač je ve vzduchu“.
6	Určuje, že odpovídač je úrovně 2 nebo vyšší, nastavení CA pole na hodnotu 7, odpovídač je „buď na zemi, nebo ve vzduchu“.
7	DR pole není 0, FS pole je 2,3,4 nebo 5, a „buď na zemi, nebo ve vzduchu“

¹³ Podrobněji viz předpis L10/IV, odstavec 3.1.2.3.2.1.3.

¹⁴ Pro zprávu o délce 112 bitů musí být letadlo vybaveno Extended Squitter.

¹⁵ Pomocí DF 11 se vysílá nejen odpověď na všeobecný dotaz módu S, ale i Acquisition Squitter.

¹⁶ Zdroj: L10/IV, opatření Ministerstva dopravy ČR č. j. 1285/2003-220-SP/1 ze dne 5. 12. 2003. Předpis o civilní letecké telekomunikační službě, svazek IV – přehledový radar a protisrážkový systém.

¹⁷ Zdroj: tamtéž.

c) Pole AA (Aircraft Address) poskytuje informaci o 24-bitové adrese dotazovaného letadla.

d) Pole PI¹⁸ určuje paritu a identifikaci dotazovače. Je třeba jej užívat při odpovědi na všeobecný dotaz pouze módu S a v rozšířeném dotazovacím signálu (DF 17 nebo DF 18). V případě odpovědi, ve kterých je přímo uvedena adresa AA, je toto pole pouze PP, to je v případě DF 17 (ADS-B, které mají vždy oddělené AA). V případě DF 11 je kombinované s identifikátorem IC¹⁹, takže je označeno PI, tedy ($PI = PP + IC$). V ostatních případech je kombinované s adresou, takže PA, tedy ($PA = PP + AA$).

1.1.3 Acquisition a Lock Out

Přechod z All-Call do Roll-Call fáze může proběhnout několika způsoby a jednotlivé metody jsou využívány v návaznosti na konkrétní účely²⁰. Proces je nazýván Acquisition a Lock Out, jako překladový ekvivalent používám výrazy „získání“ a „uzamčení“. Setkáváme se s těmito módy:

- základní získání a uzamčení,
- stochastické získání,
- ignorování uzamčení (Lock Out override)
- střídavé uzamčení.

a) Základní získání a uzamčení probíhá následovně. Letadlo, které vstoupí do oblasti pokrytí mód S radaru je dotazováno v All-Call periodě radarem s konkrétním IC kódem. V odpovědi je 24 bitová adresa letadla a IC kód dotazujícího se senzoru. Po dekodování adresy letadla radarem je vyslán Roll-Call dotaz, čímž je letadlo získané a uzamčené. Tento dotaz je odeslán buď ještě v rámci dané otočky radaru, nebo až v následující otočce. Uzamčené letadlo po dobu 18 sekund neodpovídá na All-Call dotazy se stejným IC kódem.

b) Stochastické získání je metoda, která slouží pro získání letadel, která letí v blízké šikmé vzdálenosti od sebe a kdy by mohlo docházet ke garblingu. Je to opatření, které zvyšuje šanci na správné dekodování odpovědi letadel i za takto nepříznivé konstelace. All-Call dotazy jsou

¹⁸ Hanton K., informace sdělená v rámci připomínkování diplomové práce.

¹⁹ Tím, jak je dekodován IC kód, se v práci nezabývám.

²⁰ Blíže viz dokument EUROCONTROL. Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes [on line]. 2003, Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>

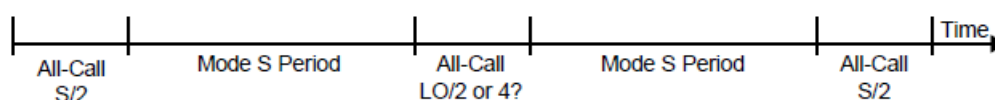
vysílány s přiřazenou pravděpodobností odpovědi. Tyto pravděpodobnosti mohou být 1, 0.5, 0.25, 0.125 nebo 0.0625.

c) Ignorování uzamčení umožňuje radarovému senzoru vyvolat v letadle odpovědi v All-Call periodě, i když je letadlo už tímto radarovým senzorem zamknuté. Opět se používá s přiřazenou pravděpodobností odpovědi, kdy musí být použita možnost s pravděpodobností odpovědi menší než 1. Používá se zejména v oblastech, kde je překryv radarů se stejným IC kódem, nebo když dojde k selhání klastru.

d) Metoda střídatvého uzamčení je využívána v případě, kdy se letadlo pohybuje střídatvě v dosahu dvou senzorů se stejnými IC kódy.

1.1.4 Nastavení All-Call period radarů

Pro správnou funkci mód S radarů je třeba zvolit vhodnou dotazovací konfiguraci tak, aby byl zachován uspokojivý balanc mezi získáváním letadel a All-Call odpověďmi. Je zřejmé, že pokud by při přechodu paprsku dotazovacího radaru všechna letadla s mód S, která nejsou uzamčena radarem, odpověděla, došlo by k velkému zatížení radiofrekvenčního pásma a k velké ztrátě odpovědí. Je proto nezbytné nakonfigurovat All-Call periody tak, aby k tomuto docházelo co nejméně. Optimalizované nastavení je označováno pojmem Mode Interlace Patterns (MIPs). Na následujícím obrázku je příklad, jak může být mód S radar nakonfigurován²¹ v čase.



Obrázek 3: Příklad optimalizované konfigurace mód S radaru v čase²²

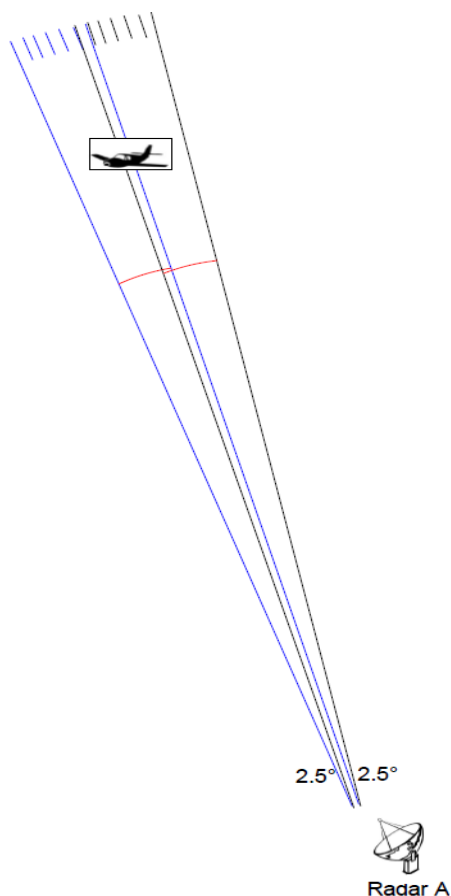
První úsek časové osy, popsany jako All-Call S/2, značí stochastické získávání s pravděpodobností 0.5. Následuje Roll-Call perioda a po ní All-Call LO/2 nebo LO/4, což je ignorování zamknutí s pravděpodobností 0.5 nebo 0.25. Další All-Call perioda je opět stochastická s pravděpodobností 0.5. Délka Roll-Call periody bývá zpravidla delší než All-Call

²¹ České radary jsou všechny nastaveny na pravděpodobnost odpovědi 0.5, zahraniční na 0.5 nebo dokonce 0.25. Ignorování zamknutí se používá jako nouzový postup pro případ konfliktu IC kódu.

²² Zdroj: EUROCONTROL. Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes [on line]. 2003, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>

perioda, přičemž většinou se udává, že 2/3 času z funkce radaru jsou vyhrazeny pro Roll-Call periodu, zbytek času pro All-Call periodu²³.

All-Call perioda bývá opakována s frekvencí minimálně 40 Hz, maximálně 150 Hz, to znamená, že se opakuje každých 0.025 nebo 0.0067 s. Je-li u radaru nastavena opakovací frekvence All-Call periody na 40 Hz, tak se opakuje každých 0.025 s. V případě radaru rotujícího s periodou 4s²⁴ to znamená, že All-Call perioda nastane každých 2.25°. Vzhledem k tomu, že nejčastěji mívají dotazovací laloky 2.5°, potom je letadlo s každou otočkou radaru ozářeno All-Call dotazováním. Tato skutečnost je ilustrována na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 4: Příklad ozáření letadla All-Call dotazováním

Modře je na obrázku znázorněn dotazovací lalok. Černě dotazovací lalok posunutý o 2.25°. Je zřejmé, že laloky se překrývají, tudíž je zajištěno, že letadlo vždy bude ozářeno All-Call

²³ Blíže viz tamtéž.

²⁴ 4 s je minimální perioda otáčení radaru. Pro radar s opakovací frekvencí All-Call periody 40 Hz a periodou otáčení radaru vyšší než 4 s, pro názornost 8 s, bude All-Call perioda nastávat každých 1.25°.

dotazováním. V případě nastavení radarů na vyšší opakovací frekvenci All-Call periody bude překrytí výraznější.

1.2 WAM

„Wide Area Multilateration (WAM) je kooperativní systém sledování, který využívá multilaterální technologie pro určení polohy letadla. Multilaterace²⁵ je proces určení polohy letadla řešením matematického průniku násobných hyperbol na více pozemních stanic, s přihlédnutím k časovému rozdílu mezi příjmem signálu transpondéru.“²⁶

WAM je technologie, při níž několik pozemních stanic, geograficky rozptýlených v prostoru, přijímá sestupné signály²⁷ vysílané ze sledovaného letadla. Požadavkem pro jednoznačné trojrozměrné zobrazení cíle je, aby byl signál přijat minimálně čtyřmi pozemními snímači. Poté je možné provádět výpočet přesné polohy letadla. Každá pozemní přijímací stanice přijatý signál dekóduje a s časovou značkou jej zasílá vyhrazenou nebo komerční komunikační sítí k dalšímu zpracování do řídicí jednotky označované CPS (Central Processing Station). Tam je vypočtena poloha cílů a plánuje se vysílání dotazů jednotlivými přijímacími stanicemi (pokud je systém takto vybaven). Zpracovaná informace o cíli je předávána pro potřeby systémů ATS.

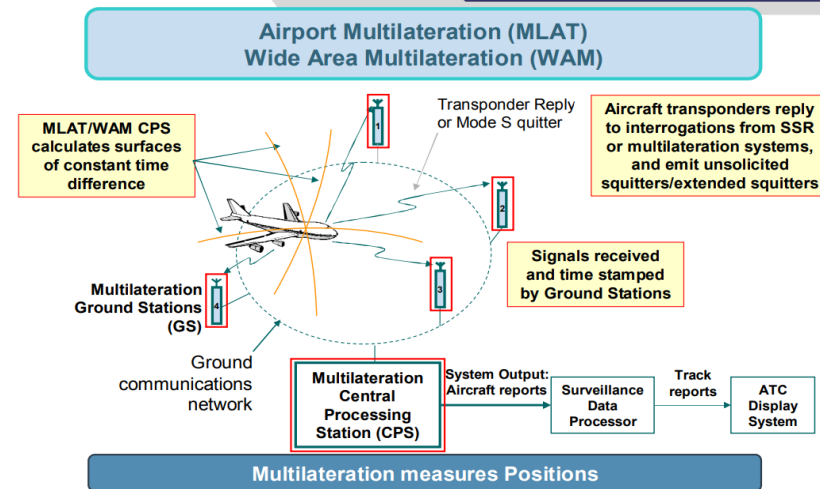
Samotné zpracování je založeno na matematickém algoritmu, který vypočte časový rozdíl na základě odlišného času přijetí signálu vyslaného v jednom okamžiku z palubního vysílače. K výpočtu polohy je využívána časově-hyperbolická metoda TDOA (Time Difference Of Arrival).

Systémy WAM se obvykle skládají ze čtveřice bočních a jednoho středového přijímače. Při této konfiguraci se matematicky dopočte několik hyperbol. Výsledná poloha cíle je určena průnikem všech hyperbol, které mají jedno společné ohnisko. V místě jejich průniku se nachází dohlážený cíl. Pohybuje-li se letadlo uvnitř prostoru ohraničeného bočními stanicemi, je přesnost určování polohy největší. Nachází-li se letadlo mimo tento prostor, přesnost klesá s rostoucí vzdáleností. Příklad uspořádání multilaterálního systému ilustruje obr. č. 5.

²⁵ Multilaterální systémy jsou někdy členěny na MLAT (dohled nad letištní plochou), TMA MLAT (dohled nad koncovou řízenou oblastí) a WAM (dohled nad letovými tratěmi). Srovnej: Ground Stations and Multilateration. Thales Air Systems GmbH. [on line]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_SEA_BOB_ADSB_WG8/SP02_Thales%20ADS-B%20Ground%20Stations%20and%20Multi.pdf

²⁶ U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Air Traffic Organization Policy, N JO 6191.36 [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/notice/n_jo_6191_36.pdf

²⁷ Civilní multilaterace je schopna pracovat s libovolným druhem mód S odpovědí.



Obrázek 5: Příklad uspořádání multilateračního systému WAM²⁸

Reálný systém v praxi pracuje s větším počtem pozemních stanic, což umožňuje zvýšení přesnosti detekce cíle. Výpočet obvykle není, vzhledem k možné chybě v měření času a jiným vlivům, zcela přesný, a proto je výsledná poloha cíle „vyhlazena“ metodou nejmenších čtverců, případně pomocí Kálmánovy filtrace.

Podle způsobu vyvolání odezvy letadla rozlišujeme aktivní a pasivní konfiguraci. V případě pasivní konfigurace pozemní přijímače využívají odpovědi, které jsou iniciovány jinými systémy. Může jít o odezvu na výzvu mód S radaru ve všech známých formátech nebo o odezvu na jiný aktivní WAM systém. Lze využít rovněž i spontánně vysílané ADS-B zprávy nebo squitter jako součást komunikace ACAS. Takto konfigurované systémy jsou obecně jednodušší a zahrnují zpravidla jen boční stanice a CPS.

V místech, kde není dostatečné pokrytí mód S radary, je třeba využít dotazovačů v takzvané aktivní konfiguraci. Použití dotazovačů v systémech WAM umožňuje využít tzv. eliptickou metodu měření polohy. Ta je užitečná zejména v situacích, kdy je malá vzdálenost mezi bočními stanicemi a požadavkem je přesně určit polohu i mimo oblast ohraničenou bočními stanicemi. U standardního měření je totiž úhel protnutí velmi ostrý a tedy méně přesný. Metoda s dotazovačem nám umožňuje hyperboly příčně protnout elipsou a výrazně zvýšit přesnost výpočtu při využití údaje o času vyslání dotazu a času přijetí odpovědi. Nevýhodou aktivní

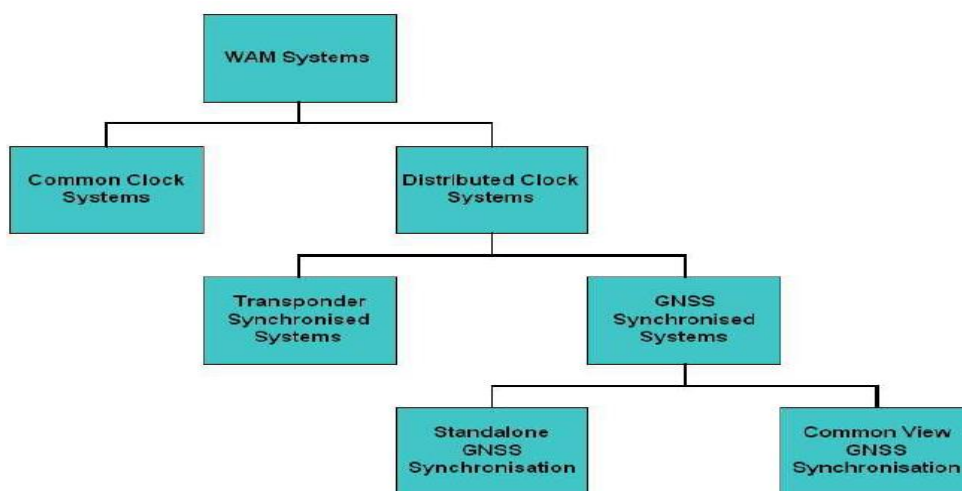
²⁸ Zdroj: ICAO. Ground Stations and Multilateration. Thales Air Systems GmbH. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_SEA_BOB_ADSB_WG8/SP02_Thales%20ADS-B%20Ground%20Stations%20and%20Multi.pdf

konfigurace je vyšší cenová náročnost, celkově složitější konstrukce systému a dále generování většího množství dotazů a odpovědí, než v případě pasivní konfigurace. V praxi se lze setkat i s kombinací pasivní a aktivní konfigurace při využití sektorové antény. Systém se aktivně dotazuje pouze v tom sektoru, který není pokryt radary mód S.

Konstrukce systémů WAM je individualizovaná podle místních podmínek. Z pohledu přidělení časové značky nalezneme systémové konfigurace s centralizovaným časem nebo s distribuovaným časem. Komplexní členění konfigurací z pohledu času uvádí obrázek č. 6.

Přijímače s centralizovaným časem jsou jednodušší, neboť přijatý signál pouze předávají do CPS ke zpracování. Signál je dekodován a je mu přidělena časová značka. Přenos tak probíhá pomocí optických kabelů nebo širokopásmových mikrovlnných pojítek, kde musí být zjištěno časové zpoždění přenosu signálu od pozemní stanice k CPS. O toto dodatečné přenosové zpoždění z jednotlivých stanic se upraví výpočet v CPS. Takové systémy jsou jednodušší, méně finančně náročné a mají prakticky neomezenou kapacitu přenosu. Problematické mohou být v případě přenosu na velkou vzdálenost.

Konfigurace s distribuovaným časem mají přijímače složitější, vybavené dekodérem a zdrojem přesného času (GNSS synchronizace). Přijímač přijatému signálu přiřazuje časovou značku a dále jej odesílá pomocí klasického, cenově dostupného datového spoje do CPS. Tyto konfigurace jsou cenově náročnější, složitější, ale vykazují vyšší spolehlivost při přenosu na velké vzdálenosti.



Obrázek 6: Členění WAM systémů podle konfigurací²⁹

²⁹ Viz Kolektiv autorů. Skripta pro základní výcvik specialistů technických systémů, díl 3. Vyd. 2. Praha: ŘLPČR s.p., 2008.

Uvádí se³⁰, že pro vzdálenosti do cca 80 NM od středu přehledového systému poskytuje WAM výkon srovnatelný se sekundárním sledovacím radarem (SSR) pokud jde o přesnost, pravděpodobnost detekce, rychlost aktualizace a dostupnost/spolehlivost. U větších vzdáleností přesnost klesá. Výkonnost se liší také v závislosti na poloze letadla ve vztahu k pozemním čidlům. WAM lze přizpůsobit rychlostem dotazování, výstupním režimům a výstupním periodám. Systém může zpracovávat informace o vysokém počtu cílů (uvádí se až 750) při zachování vysoké přesnosti. Rychlost obnovy informací je vyšší než u tradičních SSR (běžně se informace obnovují s frekvencí 1Hz).

Míra aktualizace dat a pravděpodobnost detekce cíle mohou být přizpůsobeny různým aplikacím, ať je to kontrola přesné dráhy letu, oblast manévrování v koncových řízených oblastech (TMA) nebo kontrola na přistávací dráze.

Pro letouny vybavené systémem ADS-B poskytuje systém WAM výstupní informaci i v ADS-B. Stávající CPS zpracovávají získané informace do jednotného evropského formátu ASTERIX, použitelného v ATS systémech³¹.

ASTERIX CAT19 for WAM system status

ASTERIX CAT20 for WAM reports

ASTERIX CAT21 for ADS-B reports.

Primární výhodou WAM je, že může být instalován v horském terénu, kde je ztížená viditelnost pro systémy SSR. Neméně podstatnou výhodou jsou výrazně nižší pořizovací náklady oproti nákladům na zřízení systému SSR. V případě, že u pozemních WAM stanic nelze instalovat vyhrazenou komunikační síť, lze využívat i méně garantované přenosy za použití WAM s distribuovaným časem.

1.3 ADS technologie

ADS³² (Automatic Dependent Surveillance) představuje systém automatického závislého sledování, který umožňuje letadlům, letištním provozním prostředkům, ale i jiným objektům automaticky a v krátkých periodách vysílat všesměrově data o své poloze nebo přijímat informace pomocí datového spoje.

³⁰ Viz tamtéž.

³¹ Wikipedia. Wide area multilateration [on line]. 2018, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wide_area_multilateration

³² Blíže Pleninger, S. *CNS Systémy*. Přednáškový kurz. 2017. České vysoké učení technické v Praze.

Pro pochopení systému je vhodné popsat jednotlivá slova v názvu. Systém pracuje automaticky, tedy bez zásahu pilota. Závislost (Dependent) naznačuje, že systém sám o sobě žádné navigační veličiny neměří, ale že je přejímá z externích prostředků (paluby letadla), např. za pomoci GNSS (Global Navigation Satellite Systém), inerce, VOR/ VOR a DME/ DME. Poslední slovo - dohled (Surveillance) říká, že systém slouží k dohledu nad letovým prostorem.

V praxi se můžeme setkat se dvěma podobnými pojmy: ADS-C (kontrakt) a ADS-B (broadcast). ADS-C představuje podmíněnou smlouvu o dozoru nad letadlem prostřednictvím datového spojení. Vzhledem k tomu, že aktivace systému je podmíněna administrativní žádostí, pro účely této práce se jí nebudu zabývat.

1.3.1 ADS-B

ADS-B představuje systém dohledu³³, který spočívá v příjmu zprávy vyslané letadlem a generované palubními systémy. Zpráva je vysílána všesměrově. Je tedy identifikovatelná jak pozemními stanicemi, tak i jinými, poblíž se nacházejícími letadly. Systém pracuje automaticky, oproti SSR nevyžaduje žádný vnější impulz. Posádce letadla není zřejmé, jestli někdo zprávu přijímá a kdo je příjemcem zpráv.

ADS-B disponuje dvěma funkcemi – „Out“ a „In“. V prvním případě letadlo (nebo pozemní prostředek) vysílá svůj stavový vektor, nadmořskou výšku a další informace týkající se letu. Ve druhém případě přijímá systém zprávy z pozemní stanice či jiného letounu³⁴, zpracovává je a zobrazuje posádce. Systémy s funkcí In a Out nejsou vzájemně svázány, komerčně jsou dodávány samostatně.

K podpoře ADS-B zpráv jsou navrženy 3 technologie přenosu³⁵. Jedná se o VDL Mode 4, UAT a 1090 Extended Squitter.

³³ Od 1.1.2020 je ze strany FAA požadováno, aby každé letadlo, které se pohybuje ve vzdušném prostoru USA, v němž je požadován transpondér módu C, bylo vybaveno systémem ADS-B Out. Tento systém nahrazuje konvenční radarové sledování jako primární metodu přehledových služeb. Tomu je dlouhodobě přizpůsobována pozemní infrastruktura. Viz ADS-B Academy. Dostupné na: <https://www.garmin.com/us/intheair/ads-b/squitter/>

³⁴ Např. ze systému ACAS.

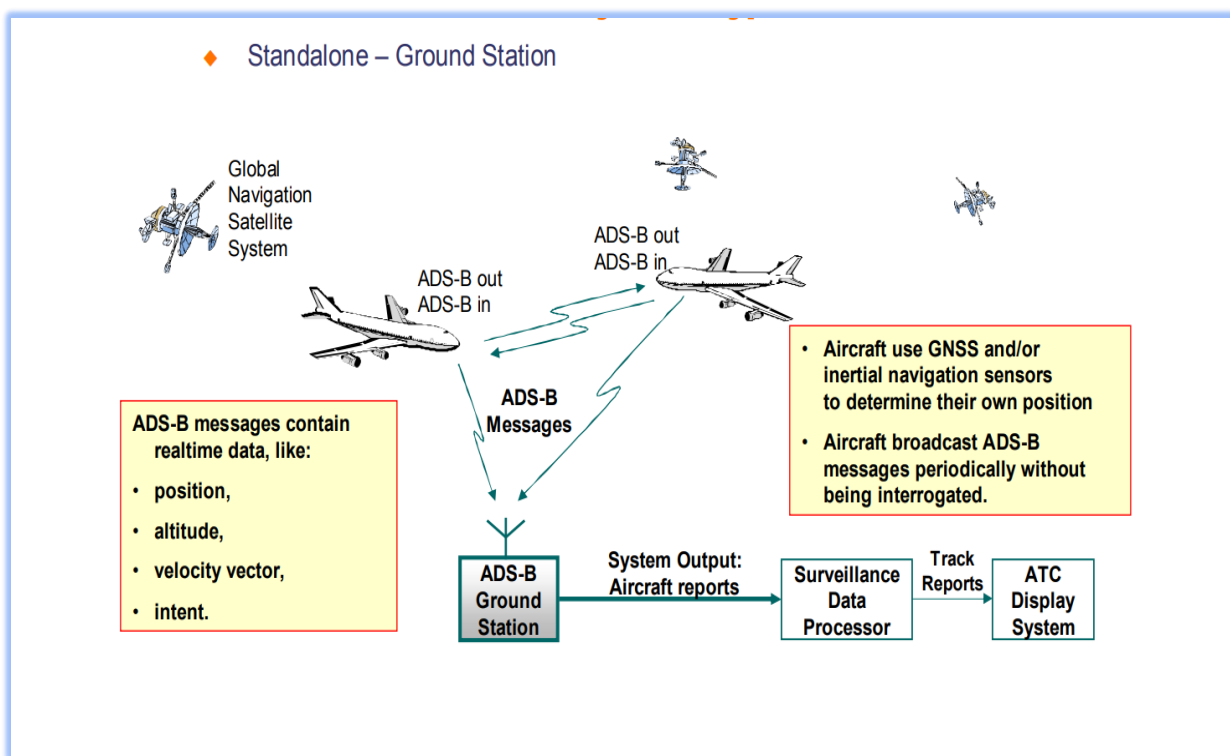
³⁵ Blíže Pleninger, S. *CNS Systémy*. Přednáškový kurz. 2017. České vysoké učení technické v Praze.

1090 Extended Squitter je vysílán na stejné frekvenci (1090 MHz) jako jsou vysílány odpovědi palubních odpovídačů sekundárním radarům. Je vysílán ve formátu DF 17 a vedle zpráv DF 11 poslouží jako vstupní informace k mým výpočtům.

ADS-B systémy pozemních stanic bývají konstruovány dvojím způsobem. Buď se jedná o samostatné nezávislé pozemní stanice, které přijímají informace vysílané letadly. Po přijetí je převedou do odpovídajícího formátu a odesílají do trackeru ke zpracování.

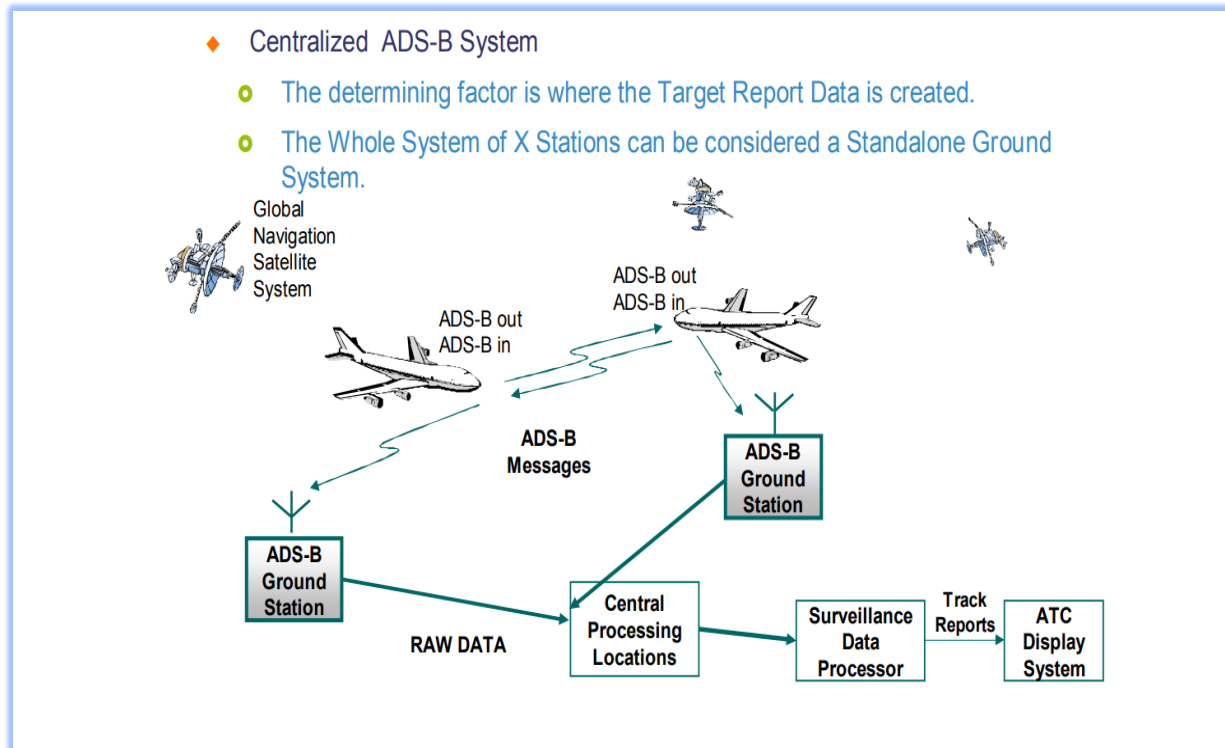
Druhou možností je konfigurace centralizovaného systému. Několik pozemních stanic předává přijaté informace do centrálního místa zpracování. Teprve tam jsou data převedena do dohodnutého formátu a odesílána do trackeru.

Výběr jedné nebo druhé konfigurace je odvislý od toho, jak hustý je letecký provoz v dané lokalitě a zda samostatná stanice je schopna zvládnout datový tok. Příklad uspořádání obou konfigurací je uveden na obrázcích č. 7 a 8.



Obrázek 7: ADS-B konfigurace s nezávislou pozemní stanicí³⁶

³⁶ Zdroj: ICAO. Ground Stations and Multilateration. Thales Air Systems GmbH. [on line]. 2012, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_SEA_BOB_ADSB_WG8/SP02_Thales%20ADS-B%20Ground%20Stations%20and%20Multi.pdf



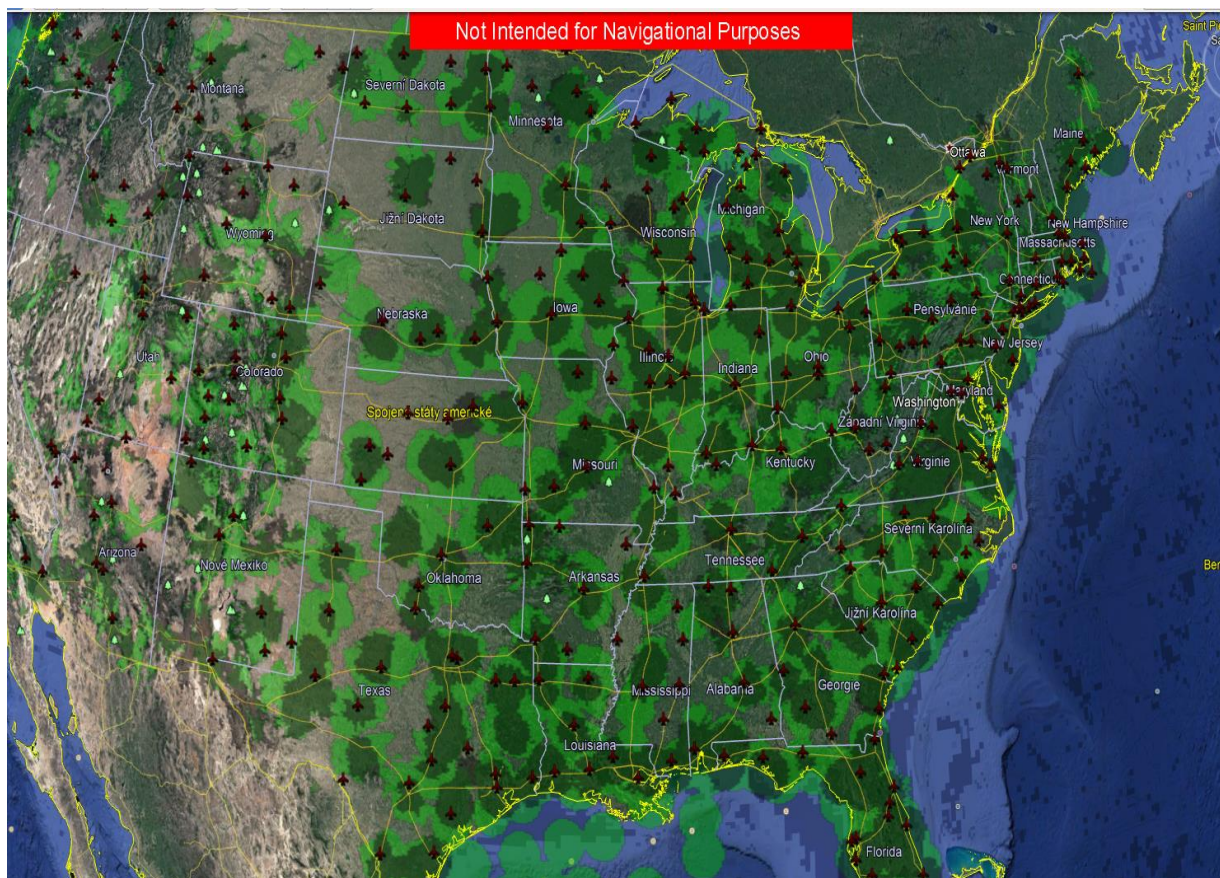
Obrázek 8: ADS-B konfigurace s centralizovaným systémem³⁷

Pro úplnost dodejme ještě dvě informace. Nejvyšší letecké autority USA a Evropské unie (FAA a EASA) spolupracují na projektu harmonizovaného digitalizovaného systému dohledu nad letovým provozem. V USA je projekt nazván NextGen (Next Generation Air Transport System), v rámci evropských struktur pak SESAR (Single European Sky ATM Research). V časovém horizontu roku 2020³⁸ oba projekty plánují zavedení ADS-B out jako nosného prvku systému dohledových služeb³⁹. Obrázek č. 9 na následující straně ilustruje aktuální pokrytí území USA přijímacími stanicemi ADS-B (zelenou barvou).

³⁷ Zdroj: tamtéž.

³⁸ Pro systém SESAR je termín 7.6.2020 velice nejistý. Ukázalo se, že přestavba letadel na ADS-B out systém je nákladná a časově náročná. IATA se proto snaží, aby byl tento termín posunut a letečtí dopravci měli více času na implementaci systému do letadel.

³⁹ V Evropě bude ADS-B out systém povinný pro všechna letadla, která mají maximální vzletovou hmotnost větší než 5700 kg nebo skutečnou vzdušnou rychlost větší než 250 uzlů.



Obrázek 9: ADS-B pokrytí území USA⁴⁰

Modernizovanou verzí ADS-B nabízí systém nazvaný Space Based ADS-B⁴¹. Systém pozemních stanic je doplněn o satelity, které budou na oběžné dráze Země přijímat ADS-B vysílání a přijaté údaje budou zasílat k pozemnímu zpracování. Space Based ADS-B by tak mohl v ideálním případě umožnit přehled o veškerém leteckém provozu na zeměkouli.

Systém vzniká ve dvou projektech produkovaných společností Aireon. První z nich bude vyhodnocovat pohyb letadel ve vzdušném prostoru s rozestupy 3 NM a 5 NM. Druhý, pod názvem Aireon ALERT, má představovat globální bezplatný systém pro letadla v nouzových situacích v oblastech, ve kterých není přehledové pokrytí. V případě potřeby lokalizace letadla vyhodnotí Aireon ALERT na základě jeho 24 bitové adresy kdy a kde naposledy vyslalo své souřadnice.

⁴⁰ Zdroj: Federal Aviation Administration, Equip ADS-B [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.faa.gov/nextgen/equipadsb/airspace/>

⁴¹ Blíže viz IAA. Space-Based ADS-B Projects [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/events/presentation/16-space-based-adsb-oloughlin.pdf>

2 Vybrané procesy v přehledové infrastruktuře

Na radarovou techniku lze nahlížet z mnoha úhlů pohledu, které v krátkosti ani nelze vyjmenovat. V této kapitole se zaměřím pouze na několik detailů, jejichž objasnění mi usnadní výklad v analytické části práce.

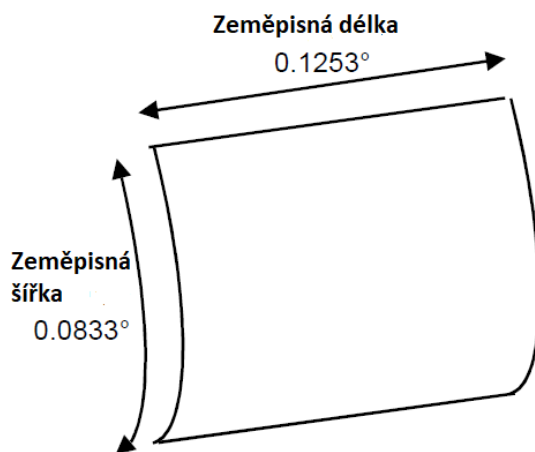
2.1 Princip mapového pokrytí radaru

Mapy pokrytí⁴² mód S radaru jsou definované pro Lockout, Sledování a Datalink. Pokrytí radaru je definováno pomocí buněk. Tím je umožněno definovat pokrytí v horizontální i vertikální rovině a je tak jednoznačně určeno, který radar má kterou oblast ve svém pokrytí.

V horizontální rovině je buňka definovaná pomocí hranic zeměpisné šířky a délky. Každá buňka má přibližně rozměr 5 NM na 5 NM, což je v naší zeměpisné šířce přibližně 0.0833° zeměpisné šířky a 0.1253° zeměpisné délky. Jako model Země se používá elipsoid WGS84.

K tomu, aby všechny buňky zapadaly přesně do sebe, je definován bod, ze kterého vše vychází. Pro Evropu má tento bod východní zeměpisnou délku 15° a severní zeměpisnou šířku 42° .

Vertikální složka buňky je definována maximální a minimální výškou po 200 ft a hodnota se vztahuje ke standardní hladině tlaku 1013.25 hPa. Pro názornost uvádím obrázek č. 10.

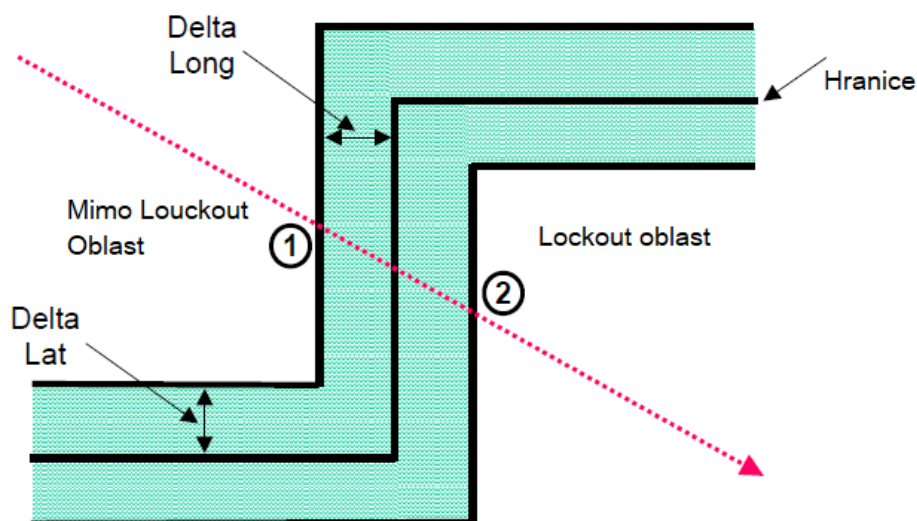


Obrázek 10: Buňka, kterou je definováno pokrytí radaru⁴³

⁴² Blíže viz dokument: EUROCONTROL. Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes [on line]. 2003, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>

Důležitou okolností je, že pokrytí radarem není nikdy dokonale cylindrické. To může být způsobeno faktory, jako jsou místní nerovnosti nebo „kužel ticha“ (cone of silence), někdy také v anglické literatuře označovaný jako overhead gap.

Je-li letadlo na hranici dvou přilehlých buněk, potom pravidla pro určení, do které oblasti oficiálně patří, jsou definována následovně:



Obrázek 11: Detail dvou přilehlých buněk a vymezení jejich hranice⁴⁴

Na obrázku č. 11 vidíme dvě oblasti. Jednu se schopností Lockout a druhou bez této schopnosti. Pohyb letadla je naznačen červenou tečkovanou šipkou. Zelená oblast je hraniční oblast. Tato oblast by neměla být větší než 50 % buňky. Rozhodnutí, zda letadlo patří do první nebo druhé oblasti je provedeno, jakmile letadlo vstoupí do hraniční oblasti. Pak automaticky patří radaru, do jehož pokrytí směřuje.

⁴³ Zdroj: Blíže viz dokument: EUROCONTROL. Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes [on line]. 2003, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>

⁴⁴ Zdroj: EUROCONTROL. European Mode S Station Coverage Map Interface Control Document [on line]. 2005, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/surveillance/surveillance-document-mode-s-station-coverage-map-interface-control-20050509.pdf> Upraveno autorem.

2.2 Klastry

Specializovaným typem mapového pokrytí jsou klastry⁴⁵. Jedná se o shluk několika senzorů s překrývajícím se pokrytím, spřažených do jedné sítě a operujících pod stejným IC. Poskytovatel radarových služeb je povinen zajistit, aby nedocházelo k problémům týkajícím se překrytí radarů se stejným IC kódem. Pro klastry je proces přidělování IC kódů stejný, jako by se jednalo o individuální radarový senzor.

Výhody klastrů oproti individuálním radarovým senzorům jsou v menší náročnosti na přidělování IC kódů a zvýšení výkonnosti systému tím, že dochází ke snížení FRUITU. Nevýhodou je vyšší složitost systému a s tím spojený růst nákladů. Klastry se ve střední Evropě užívají převážně v Německu, kde je velmi vysoký počet jak civilních, tak i vojenských radarů.

Klastry mohou být dvojího druhu:

- Klastry s centralizovaným řízením. V takovém případě je možné všechny radary v klastru ovládat z jednoho stanoviště.
- Klastry s odděleným řízením. Každý radar je odpovědný za některou funkci klastru. Tuto funkcionalitu podporují i klastry prvního typu, které v případě ztráty spojení s centralizovaným stanovištěm přepnou do módu odděleného řízení.

2.3 IC kódy a formální pravidla pro jejich stanovení

Pro identifikaci konkrétního radaru slouží IC kódy⁴⁶. Rozlišujeme je na II kódy a SI kódy. Původně byly z technických důvodů používány pouze identifikační kódy dotazovačů (II – Interrogator Identifier codes). Ty mohou nabývat hodnot 0-15. Postupem času začal být těchto kódů nedostatek, a proto byly definovány nové přehledové identifikační kódy (SI – Surveillance Interrogator codes). Ty mohou, díky tomu, že obsahují více bitů, prezentovat hodnoty z rozsahu 1-63.

Přidělování IC kódů má na starosti kancelář nazvaná MICA Cell, koordinovaná organizací EUROCONTROL. IC kód není konkrétnímu radaru přidělen natrvalo. Vzhledem k četnosti senzorů (zejména v Evropě) je třeba zajistit, aby nedocházelo k překrývání radarových svazků

⁴⁵ Blíže viz tamtéž.

⁴⁶ Blíže viz např. EUROCONTROL. European Mode S Station Coverage Map Interface Control Document [on line]. 2005, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/surveillance/surveillance-document-mode-s-station-coverage-map-interface-control-20050509.pdf>

se shodným IC kódem. K tomu se využívají pokročilé techniky teorie grafů a matematického modelování. Zároveň se jedná o náročnou administrativně organizační operaci, do které vstupuje množství subjektů a zájmů.

Přidělování IC kódů probíhá v MICA⁴⁷ cyklech, přičemž jeden cyklus trvá půl roku. Žadatel o přidělení platného IC kódu je povinen předložit sadu údajů, mimo jiné přesnou polohu radaru ve WGS84 souřadnicovém systému (přesnost je požadována v sekundách stupňů)⁴⁸, výšku antény nad zemí a nadmořskou výšku stanoviště, periodu rotace radaru, požadované pokrytí radaru v NM.

I přes důkladný proces alokace IC kódů může dojít k tomu, že nastane mezi dvěma nebo vícero radary kolize definovaná jako nekoordinované překrytí Lockout oblasti pokrytí. Pro takové případy jsou připravena administrativní pravidla, jak nalézt optimální řešení.

Dodejme, že v praxi je možné, aby některé mód S radarové senzory měly různé IC kódy v závislosti na různých situacích. IC kód může být např. měněn v průběhu otáčky radaru pro určitou výseč azimutů⁴⁹.

⁴⁷ Mode S Interrogator Code Allocation.

⁴⁸ Jedná-li se o citlivou informaci, například vojenské radary, je možno použít s přesností v minutách stupňů.

⁴⁹ Blíže viz EUROCONTROL. Specification for the Mode S IC Allocation Coordination and IC Conflict Management [online]. 2013, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/20130614-mica-spec-v1.0.pdf>

3 Komplementární metoda monitorování pasivních cílů

Úkolem diplomové práce je ověřit koncept, zda je možné určovat polohu letadla, které není vybavené systémem ADS-B, na základě vyhodnocení odpovědí tohoto letadla na dotazování, při současné znalosti azimutů dotazujících se radarů, získaných pomocí referenčního letadla, které je systémem ADS-B vybaveno⁵⁰.

Pro řešení úlohy se nabízí dva přístupy⁵¹. První z nich předpokládá využít všechny přijímané odpovědi od letadel. Úskalím je, že odpovědi letadel na adresné dotazování v sobě nenesou informaci o IC kódu radaru. Zjistit dotazující se radary by vyžadovalo vypracovat komplexní metodu identifikace radaru. Nejprve by bylo třeba ve všech přijatých odpovědích letadla najít periody dotazujících se radarů a poté k těmto periodám přiřadit konkrétní radary. Určit periody ve všech přijatých odpovědích by mělo být schůdné Fourierovou transformací nebo pomocí jiných algoritmů⁵². Následně by bylo nutné tyto vypočtené periody přiřadit konkrétním radarům.

Druhý přístup nabízí možnost určit azimuty dotazujících se radarů výhradně za pomoci odpovědí DF 11. Tato metoda v sobě nese přínos v tom, že DF 11 má v adresně paritním poli zakódovaný IC kód dotazujícího se radaru a je tedy známo, který radar se dotazuje. Z této skutečnosti zároveň plyne omezující podmínka, totiž, že obě sledovaná letadla se musí nacházet přibližně ve stejné oblasti⁵³ mimo Lockout pokrytí radarů.

Vzhledem k menší složitosti jsem se rozhodl ověřit druhý přístup. Jím se budu v dalším textu zabývat.

⁵⁰ Zadání práce bylo formulováno firmou CS SOFT, a.s., IČ: 25781723, a bylo mi představeno v rámci prezentace projektů pod názvem Single-Laterace.

⁵¹ Jistě by se našly i další možnosti, například kombinace uvedených přístupů. Jejich ověření by však přesahovalo únosné meze této práce.

⁵² Blíže např.: Šíma, J. *Mapování přehledové infrastruktury analýzou příjmu SSR odpovědí od letadel*. Praha 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické.

⁵³ Kdyby nebyla splněna tato podmínka, mohlo by se stát, že by byly přijímány odpovědi letadel radarům se stejným IC kódem, ale náležící dvěma různým radarům.

3.1 Bistatické radarové zpracování pro ADS-B sensory

S myšlenkou blízkou zadání mé diplomové práce přišel americký vynálezce Timothy P. Donovan.⁵⁴ Jeho koncepce spočívá v určení polohy letadla nevybaveného ADS-B pomocí letadla, které je tímto systémem vybavené, a dále pomocí bistatického radarového zpracování.

Metoda je navržena následovně:

1. Letadlo 1, které je vybavené ADS-B systémem, vyšle informaci o své poloze.
2. Přijímač tuto informaci od letadla 1 přijme.
3. SSR vyšle dotaz k letadlu 1 v určitém čase.
4. Letadlo 1 odpoví. Přijímač vypočte azimut vysílače SSR pro čas, ve kterém byla přijata odpověď letadla 1 radarem. Při znalosti periody otáčení SSR se dá říci, že azimut je popsán v čase.
6. Na SSR dotaz odpovídá všesměrově i letadlo 2 nevybavené ADS-B systémem.
7. Odpověď je přijata přijímačem.
8. Na základě znalosti azimutu SSR v daném čase, vzdálenosti mezi SSR a přijímačem a známým časem vyslání dotazu, zpožděním odpovídače letadla a časem příjmu na přijímači, je vypočtena poloha letadla 2. V takovém případě vznikne trojúhelník, jehož všechny tři strany a jeden úhel známe. Vzdálenost mezi letadlem a radarem se vypočte pomocí následujícího vzorce:

$$s1 = \left(\frac{t1-z}{2}\right) * v \quad (1)$$

Kde **z** značí zpoždění odpovídače v letadle, **t1** je čas mezi vysláním dotazu a příjmem odpovědi v SSR, **v** je rychlost šíření elektromagnetické vlny v daném prostředí a **s1** značí počítanou stranu.

Vzdálenost mezi letadlem a přijímačem se vypočte pomocí níže uvedeného vzorce.

$$s2 = (t1 - t2) * v \quad (2)$$

Kde **t1** stejně jako v předchozím případě značí čas mezi vysláním dotazu a příjmem odpovědi v SSR, **t2** značí čas mezi vysláním dotazu a příjmem v přijímači, **v** představuje rychlost šíření elektromagnetické vlny v daném prostředí a **s2** počítanou stranu.

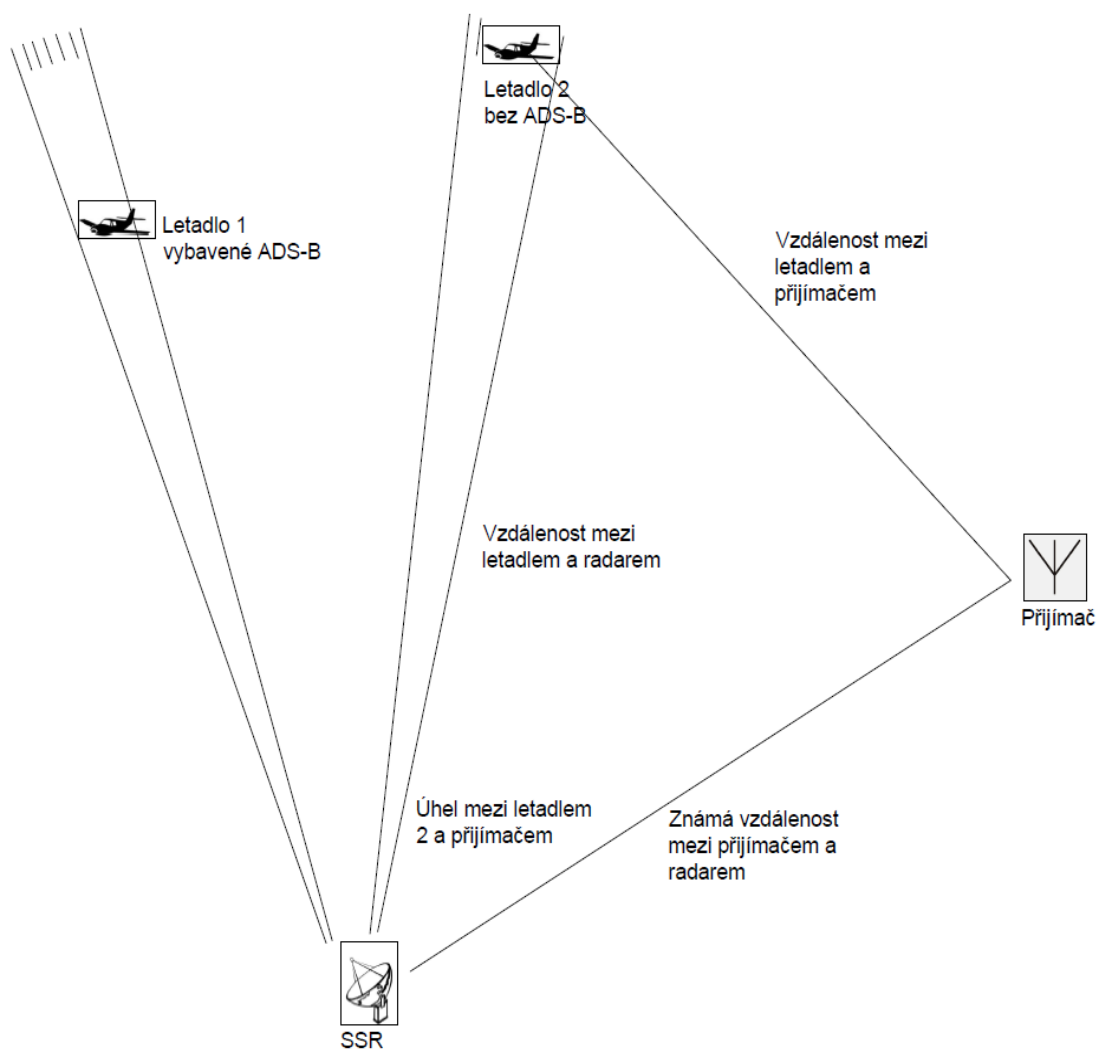
⁵⁴ Patent amerického badatele byl publikován 6. března 2012 a je volně ke zhlédnutí na internetové stránce. Viz DONOVAN Timothy P. Bi-static radar processing for ADS-B sensors. US8130135 B2. USA. Dostupné na: <https://patents.google.com/patent/US8130135z>

Vzdálenost mezi SSR a přijímačem je známá. Pro další popis je označena jako **s3**.

Úhel mezi letadlem 2 a přijímačem je znám ze znalosti azimutu SSR a polohy přijímače.

Základním předpokladem celého výpočtu je znalost času, kdy byl SSR dotaz vyslán a dále zpoždění odpovídače v letadle. To by teoreticky bylo možné vyřešit umístěním přijímače v blízkosti SSR.

Výklad metody bistatického radarového zpracování lze přiblížit na obrázku č. 12.



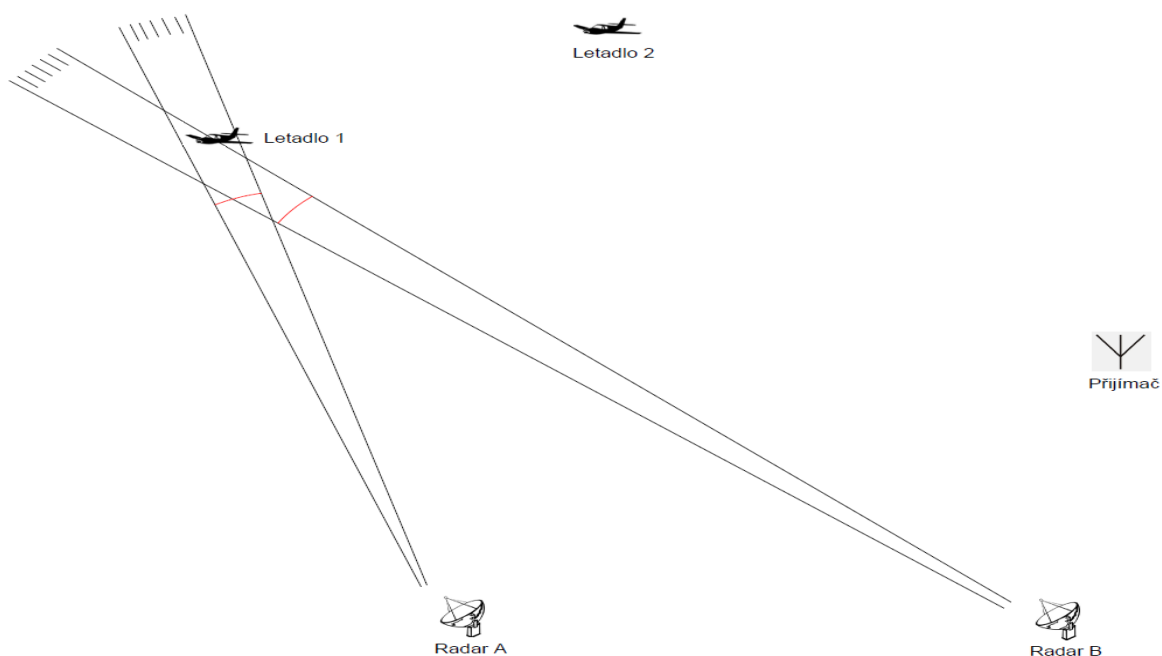
Obrázek 12: Bistatické radarové zpracování⁵⁵

⁵⁵ Zdroj: vlastní zpracování.

3.2 Princip komplementární metody monitorování pasivních cílů

Zadáním mé diplomové práce je ověřit koncept, zda je možné určovat polohu letícího letadla, které není vybavené systémem ADS-B, na základě vyhodnocení odpovědí ve formátu DF 11, při současné znalosti azimutů dotazujících se radarů, získaných pomocí letícího referenčního letadla, které je systémem ADS-B vybaveno. Úkolem je navrhnout způsob výpočtu polohy letícího cíle a vyhodnotit jeho přesnost porovnáním se záznamem údajů o skutečné poloze cíle.

Mnou testovaná metoda vychází zčásti z podobného principu, jaký je popsán v předchozí kapitole, přičemž odstraňuje limit v podobě nutnosti znát časový údaj SSR dotazování. Pro jednoduchost uvažuji se dvěma radary, systém by však bylo možné teoreticky doplnit o další. Metodu lze zjednodušeně představit následujícím obrázkem č. 13.



Obrázek 13: Komplementární metoda-postavení letadel v čase „t“⁵⁶

Na obrázku jsou vyznačeny radary označené jako A a B a letadla označená jako 1 a 2. Jedná se o čas „t“. Radary A a B jsou mód S radary, které se otáčí s předem danou periodou otáčení po směru hodinových ručiček a jsou jednoznačně určeny svými zeměpisnými souřadnicemi a přiděleným IC kódem. Červená křivka v obou dotazovacích svazcích značí dosah Lockout pokrytí radaru.

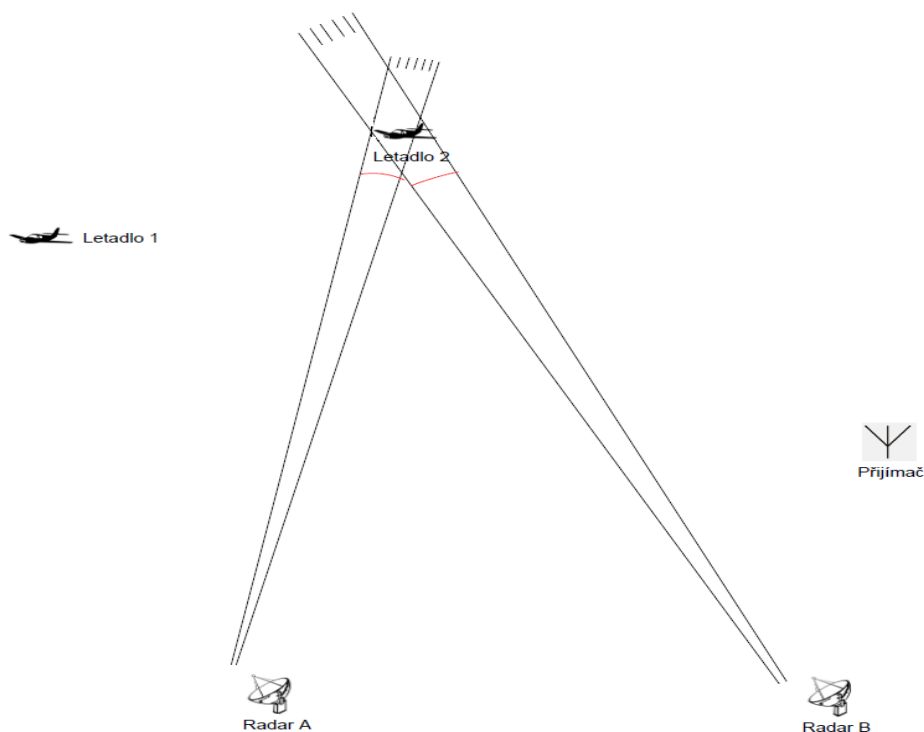
⁵⁶ Zdroj: vlastní zpracování.

Podmínkou metody je, aby obě letadla byla mimo Lockout pokrytí radaru. Připomeňme, že jsou-li letadla zamknutá, probíhá s radarem pouze adresné sledování a v adresně paritním poli odpovědí těchto letadel není obsažen IC kód radarů, tudíž je komplikované určit dotazující se radar.

Letadlo 1 slouží jako referenční. Pomocí ADS-B vysílá svou aktuální polohu a současně odpovídá na SSR dotazy ve formátu DF 11. Metoda předpokládá, že při znalosti těchto informací bude možno určit azimut radarů v konkrétním čase.

Letadlo 2 je objekt, jehož polohu zjišťujeme. Není vybaveno ADS-B systémem a nevysílá informaci o své poloze.

Komplementární metoda předpokládá, že by mělo být možné určit azimuty radarů, na nichž se nachází nereferenční letadlo na základě časového rozdílu příjmu DF 11 od referenčního a nereferenčního letadla, tak, jak je uvedeno na obrázku. Výsledný stav v čase „t+x“ je na obrázku č. 14. Na základě znalosti těchto azimutů od dvou radarů se určí průsečík těchto azimutů, určený zeměpisnými souřadnicemi, kde by se mělo nacházet nereferenční letadlo.



Obrázek 14: Komplementární metoda-postavení letadel v čase „t+1“⁵⁷

⁵⁷ Zdroj: vlastní zpracování.

V případě prokázání úspěšnosti by uplatnění systému mohlo mít řadu výhod. K určení polohy by postačoval pouze jeden přijímač⁵⁸, vyvolání odpovědi DF 11 by bylo postaveno na již existující radarové infrastruktuře a nevznikal by požadavek na dodatečné investice.

Praktické ověření funkčnosti a přesnosti metody vyžaduje shromáždit množství údajů. Zde uvádím jejich přehled. Je nutno:

- zmapovat možné dotazující se radary,
- zjistit přesné souřadnice umístění radarů,
- zjistit periody otáčení dotčených radarů,
- získat ADS-B zprávy referenčního letadla pro popis azimutů v čase,
- získat údaje o průběhu letu nereferenčního letadla k provedení porovnání dopočtených výsledků se skutečností.

3.3 Zmapování sady dotazujících se radaru

Radarové pokrytí evropského kontinentu je husté. Pro další postup práce je třeba vybrat ty radary, jež dosahují na území České republiky, ale jsou dostatečně vzdálené, aby oblast, k níž se vztahují testovaná data, byla mimo Lockout pokrytí. Sledovaná oblast je vyznačena na obrázku č. 17.

3.3.1 Současná radarová situace ve Střední Evropě

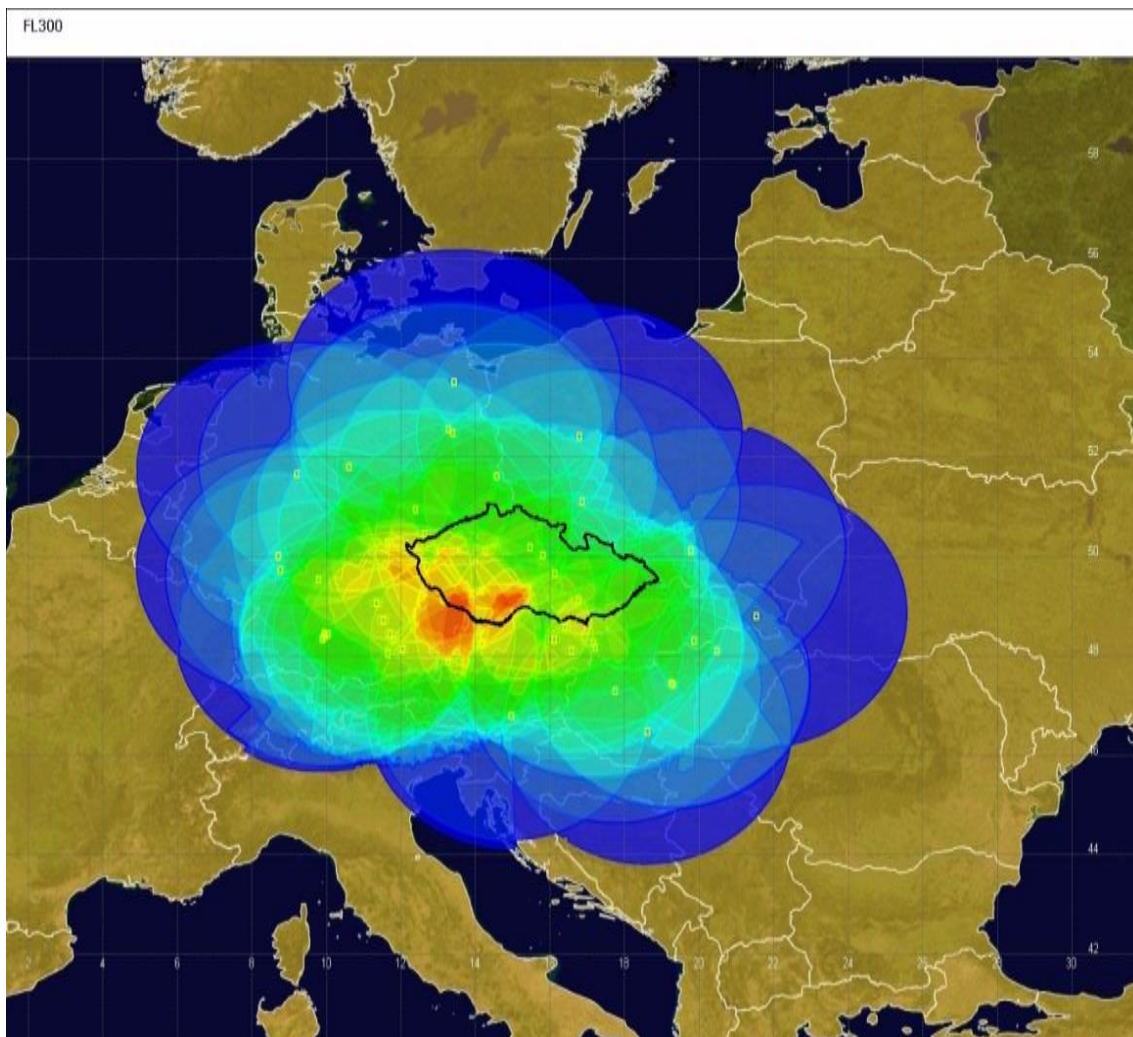
Ve státech Německo, Rakousko, Maďarsko, Slovensko a Česká republika se nachází přibližně 100 radarů.⁵⁹ Vzhledem k jejich operačnímu rozmístění je Česká republika překryta dostatečným množstvím radarových signálů, a to by mělo usnadnit otestování komplementární metody.

Na obrázku č. 15 je zobrazeno pokrytí České republiky mód S radary ve FL 300. Obrázek prezentuje situaci k srpnu 2016, kdy byl 23. MICA cyklus.⁶⁰ Zelené, žluté a především červené odstíny naznačují vysokou míru vzájemného překrytí radarového signálu.

⁵⁸ Jedinou podmínkou pro přijímač je, aby jeho dosah pokrytí zahrnoval obě letadla.

⁵⁹ K srpnu 2016 jich bylo 99.

⁶⁰ Obrázek je použit z bakalářské práce: Konečný, F., *Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů* Praha, 2016, ČVUT.



Obrázek 15: Vyhodnocení pokrytí České republiky radary mód S pro FL 300

Na území České republiky, v jižní části Čech, dochází až k dvaceti osmi násobnému překryvu radarů (červená oblast). Ostatní místa jsou méně pokryta, přesto se dá říci, že jakékoliv místo na našem území je překryto alespoň 16 radary.

3.3.2 Postup pro výběr relevantních radarů

V této kapitole se budu věnovat výběru radarů, které jsou využitelné pro ověření komplementární metody. Ke zpracování jsem použil data, která byla přijata fakultním ADS-B

přijímačem⁶¹ umístěném na Strahově (50.0805°,14.3957°) a která byla upravena školitelem do podoby potřebné ke zpracování v této práci⁶². Na základě přijatých DF 11 odpovědí je možno dekodovat IC kódy dotazujících se radarů. Pro výzkum použiji dvě sady dat. První sada bude obsahovat II kódy i SI kódy. Druhá sada bude obsahovat pouze SI kódy, II kódy se mi nepodařilo úspěšně přiřadit. Samotné vyhodnocení výběru dat a přiřazení IC kódů konkrétním radarům bude provedeno v kapitole 3.3.3

3.3.2.1 První sada dat

Přijaté odpovědi DF 11 byly dekodovány přijímačem a následující tabulka č. 3 prezentuje zjištěné parametry letadel. Pořadí letadel je uvedeno v časové posloupnosti. První sada dat je z 12.6.2017.

Tabulka 3: První sada dat – informace o prolétávajících letadlech

Letadlo	Letadlo 1	Letadlo 2	Letadlo 3	Letadlo 4	Letadlo 5	Letadlo 6
Adresa letadla	4CA802	440823	4CA79C	4A0833	471F53	3C6608
Operátor	Ryanair	Austrian Airlines	Ryanair	Blue Air	Wizz Air	Lufthansa
Registrace	EI-EKD	OE-LWG	EI-FTD	YR-BAS	HA-LWL	D-AIPH
Typ	B737-800	Embraer ERJ-195	B737-800	B737-400	Airbus A320-200	Airbus A320-200

Následující tabulka č. 4 předkládá rozsah měření. Uvádím celkový počet přijatých zpráv, počet zpráv ve formátu DF 11 s IC kódem, DF 17 se stanovením polohy a délku záznamu v sekundách. V této a následujících tabulkách budu označovat letadla jejich registrační značkou zjištěnou z 24-bitové adresy letadla.

⁶¹ Pro přesnost je třeba uvést, že ADS-B přijímačem je myšlen jakýkoliv přijímač vysokofrekvenčního signálu, (frekvence 1090MHz), doplněný o odpovídající anténu, zesilovač a HW a SW.

⁶² Ve všech případech bude čas průletu letadel kolem 24. hodiny. Je to z toho důvodu, že za denního provozu je vzdušný prostor podstatně více zaplněn a mohlo by se stát, že low-cost školní přijímač některé odpovědi nezachytí.

Tabulka 4: První sada dat – informace o četnosti přijatých odpovědí

Registrace	EI-EKD	OE-LWG	EI-FTD	YR-BAS	HA-LWL	D-AIPH
Celkem odpovědí	4767	5966	7094	6865	7263	6158
DF 11 s IC kódem	507	728	1062	989	949	624
DF 17 s polohou	519	567	548	568	601	443
Délka záznamu [s]	267.9	301.8	305.0	302.8	308.9	238.0

Tabulka č. 5 prezentuje, které II kódy od kterého letadla byly přijaty minimálně jednou.

Tabulka 5: První sada dat – četnost přijatých II kódů

II	EI-EKD	OE-LWG	EI-FTD	YR-BAS	HA-LWL	D-AIPH
1						
2						
4						
5						
6						
8						
10						
12						
14						
15						

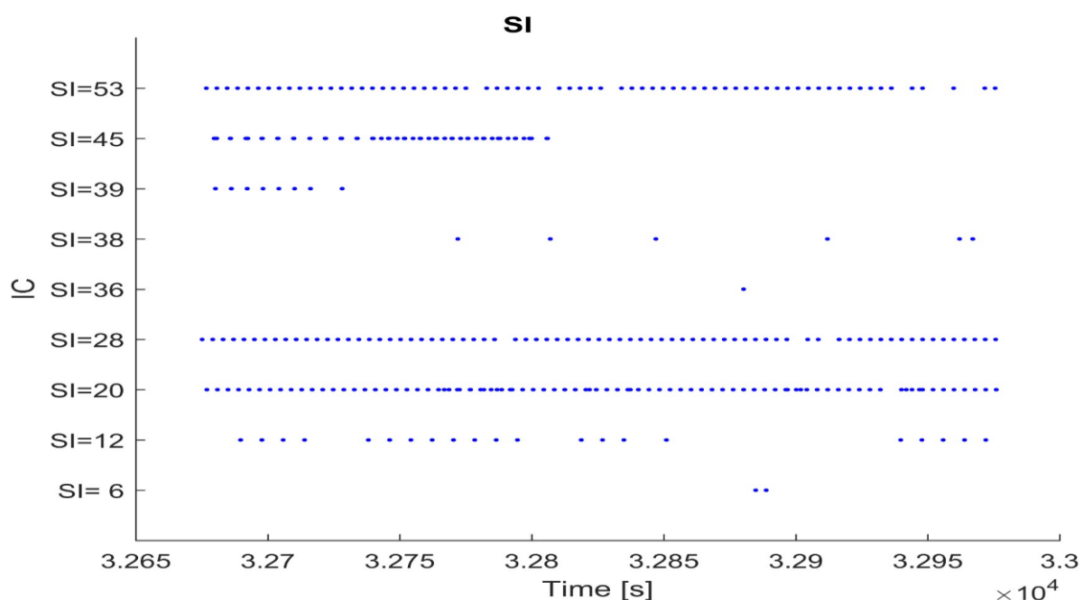
V prvním sloupci uvádím přehled přijatých II kódů. Další sloupce obsahují data přijatá z letadel. Zelené pole v tabulce značí, že letadlo v tomto sloupci odpovědělo s II kódem z příslušného řádku.

Následující tabulka dokládá, kolik bylo přijato SI kódů. Vzhledem k většímu množství SI kódů je v této tabulce podstatně více řádků. Nutno ale podotknout, že pro další zpracování bude z přijatých SI kódů použitelné pouze malé procento.

Tabulka 6: První sada dat – četnost přijatých SI kódů

SI	EI-EKD	OE-LWG	EI-FTD	YR-BAS	HA-LWL	D-AIPH
2						
4						
5						
6						
8						
12						
13						
14						
15						
17						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
28						
29						
30						
31						
35						
36						
38						
39						
44						
45						
46						
47						
49						
51						
52						
53						
54						
55						
56						
57						
60						
62						

Některé SI kódy byly přijaty pouze několikrát nebo v na první pohled nelogických sekvencích. Vysvětlují si to tak, že se jedná o dva radary se stejným SI kódem, které se dotazovaly jednoho letadla. Jako příklad uvádím strukturu přijatých SI kódů od letadla s registrací YR-BAS, viz obrázek 16.



Obrázek 16: První sada dat – sekvence přijatých SI kódů od letadla s registrací YR-BAS

Na obrázku č. 16 vodorovná osa reprezentuje čas a svislá osa přijaté SI kódy. Již při prvním pohledu na výše uvedený obrázek jsou zřejmé nelogické sekvence u radarů s SI kódem 45 a 20. Příčinou je s největší pravděpodobností druhý radar se stejným SI kódem.⁶³

3.3.2.2 Druhá sada dat

Druhá sada dat obsahovala SI kódy přijaté od 13 letadel. Následující dvě tabulky opět shrnují dekodované parametry letadel. Data jsou ze 7.2.2018.

⁶³ Tato skutečnost je zřejmá i v kapitole 3.3.5.1. Spočtená perioda radaru s IC kódem 20 má největší směrodatnou odchylku z počítaných radarů.

Tabulka 7: Druhá sada dat – informace o prolétávajících letadlech

1/2

Letadlo	Letadlo 1	Letadlo 2	Letadlo 3	Letadlo 4	Letadlo 5	Letadlo 6	Letadlo 7
Adresa letadla	48404E	06A083	406D77	06A103	400691	3C09EC	4841C4
Operátor	KLM	Qatar Airways	British Airways	Qatar Airways	British Airways	Germania	KLM
Registrace	PH-BFL	A7-BAQ	G-ZBKA	A7-ALO	G-CIVP	D-ASTR	PH-CKB
Typ	B747-400	B777-300	B787-9	Airbus A350-900	B747-400	Airbus A319-100	B747-400F

2/2

Letadlo	Letadlo 8	Letadlo 9	Letadlo 10	Letadlo 11	Letadlo 12	Letadlo 13
Adresa letadla	896476	434863	780783	4007F3	896160	894029
Operátor	Emirates	Qatar Airways	Air China	British Airways	Etihad Airways	Gulf Air
Registrace	A6-EUL	A7-BEK	B-6533	G-YMMH	A6-EYL	A9C-KA
Typ	Airbus A380-800	B777-300	Airbus A330-200	B777-200	Airbus A330-200	Airbus A330-200

Následující tabulka prezentuje rozsah měření tohoto vzorku dat.

Tabulka 8: Druhá sada dat – informace o četnosti přijatých odpovědí

1/2

Registrace	PH-BFL	A7-BAQ	G-ZBKA	A7-ALO	G-CIVP	D-ASTR	PH-CKB
Celkem odpovědí	3272	3660	5220	5044	4488	3468	4036
DF 11 s IC kódem	573	610	1104	971	823	681	669
DF 17 s polohou	311	338	451	491	440	360	417
Záznam délka [s]	190.9	193.2	263.0	146.0	258.9	200.0	229.7

2/2

Registrace	A6-EUL	A7-BEK	B-6533	G-YMMH	A6-EYL	A9C-KA
Celkem odpovědí	3654	3899	2919	3852	5333	4881
DF 11 s IC kódem	1070	965	549	453	926	1033
DF 17 s polohou	298	342	312	442	554	448
Záznam délka [s]	184.0	201.9	182.8	261.9	324.9	274.0

V tabulce na další straně následuje přehled četnosti přijatých SI kódů. Z důvodu velkého množství letadel budu v tomto případě označovat letadla zkratkou A/C.

Podle četnosti zelené barvy v řádcích je zřejmé, že některé SI kódy radarů se objevily u odpovědí všech letadel. Některé byly zaznamenány v menší nebo neopatrné četnosti.

Všechna letadla, jejichž údaje jsem pro práci používal, se nacházela v oblasti, která je zřejmá z obrázku č. 17.

Tabulka 9: Druhá sada dat – četnost přijatých SI kódů

SI	A/C 1	A/C 2	A/C 3	A/C 4	A/C 5	A/C 6	A/C 7	A/C 8	A/C 9	A/C 10	A/C 11	A/C 12	A/C 13
5													
6													
7													
8													
9													
12													
13													
14													
15													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
36													
37													
38													
39													
44													
45													
46													
47													
51													
52													
53													
54													
55													
60													
62													

3.3.3 Postup pro přiřazení IC kódů dotazujícím se radarům

V předchozích podkapitolách byly identifikovány II a SI kódy relevantních radarů. Nyní je třeba jednotlivé IC kódy přiřadit konkrétním radarům. Určit radar s IC kódem, který vzhledem ke svému geografickému umístění přichází v úvahu, lze za pomoci přílohy k dokumentu ICAO, vydané a označené jako „EUR DOC 024“⁶⁴. V této příloze je uveden seznam států a mezinárodních organizací z ICAO EUR regionu, které jsou zapojeny do procesu přidělování dotazovacích kódů. První použitá data jsou ze dne 12.6.2017, přičemž toto datum spadá do 25. MICA cyklu. Druhá sada dat je ze 7.2.2018, což je 26. MICA cyklus.

Z první sady dat jsem se rozhodl přidělovat dotazovací kódy pouze těm radarům, kterým odpověděly 4 a více letadel. Konkrétně se jedná o radary s II kódem 14 a 15 a s SI kódem 6, 12, 20, 28, 38, 39, 45, 53, 54. Z druhé sady dat jsem se rozhodl přidělovat dotazovací kódy pouze těm radarům, kterým odpovědělo ze 13 letadel alespoň 9. Jedná se o radary s SI kódem 6, 12, 20, 28 38, 39, 45 a 53.

Pro přidělení IC kódů vybírám z radarů okolních států, tedy těch, které se od zkoumaného letadla nacházejí ve vzdálenosti okolo 300 kilometrů. V Rakousku se v 25.⁶⁵ MICA cyklu nacházelo 8 radarů. Radaru KOR je přidělen SI kód 53 a radaru VIE2 je přidělen SI kód 20.

V Maďarsku se nacházelo ve 25. cyklu 7 radarů. Radar Puspokladány má SI kód 38 a Korishegy 12.

V Polsku je 10 radarů. Radar Poznan má SI kód 54 a Lodz1 a Szymany1 mají 39. Radar Lodz1 je v centrální části Polska, zatímco Szymany1 je na severu Polska, z tohoto důvodu je SI kód 39 přiřazen radaru Lodz1.

Na Slovensku jsou 4 mód S radary. Radar Bratislava má SI kód 6, Velký Javorník má SI kód 28. Mosnik má SI kód 53, stejný jako rakouský KOR. Vzhledem k tomu, že Mosnik je velice daleko, přiřazuji SI kód 53 radaru v Rakousku.

II kód 14 patří testovacím radarům, přičemž takových radarů v našem okolí je velké množství a nejsou proto vhodné pro výpočet, a proto je vyřazují. Radar s II kódem 15 se objevil u 5 letadel.

⁶⁴ ICAO. European Principles and Procedures for the Allocation of Secondary Surveillance Radar Mode S Interrogator Codes (IC) [on line]. 2011, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EANPG%20Reports/EANPG%2053/EANPG53_A pp_F%20-%20EUR%20Doc%20024%20-%20proposal.pdf

⁶⁵ IC kódy ve 25. a 26. cyklu se nezměnily.

II kódy 15 jsou alokované pro vojenské radary, o kterých nemám dostatečné informace, a tudíž je opět vyřazuji. Radar s SI kódem 45 jsem neidentifikoval⁶⁶.

Pro lepší přehlednost uvádím na obrázku č. 17 geografické rozmístění identifikovaných radarů na mapce Střední Evropy. Obdélník značí oblast výskytu letadel.



Obrázek 17: Geografická alokace identifikovaných radarů

3.3.4 Identifikace parametrů dotazujících se radarů

V následující tabulce se nachází alokované radary a jejich nejdůležitější parametry.⁶⁷ Pro další postup práce jsou důležité informace o zeměpisných souřadnicích a periodě otáčení.⁶⁸

⁶⁶ Nutno podotknout, že uvedená metoda identifikace dotazujících se radarů není použitelná pro případ klastrů nacházejících se v Německu. Podle mých informací je firmou T-CZ zpracovávána metoda, která by měla být schopna je identifikovat.

⁶⁷ Následující údaje jsem získal za pomoci pana Ivana Uhlíře jako interní materiál ŘLP, s.p.

Tabulka 10: Parametry identifikovaných radarů

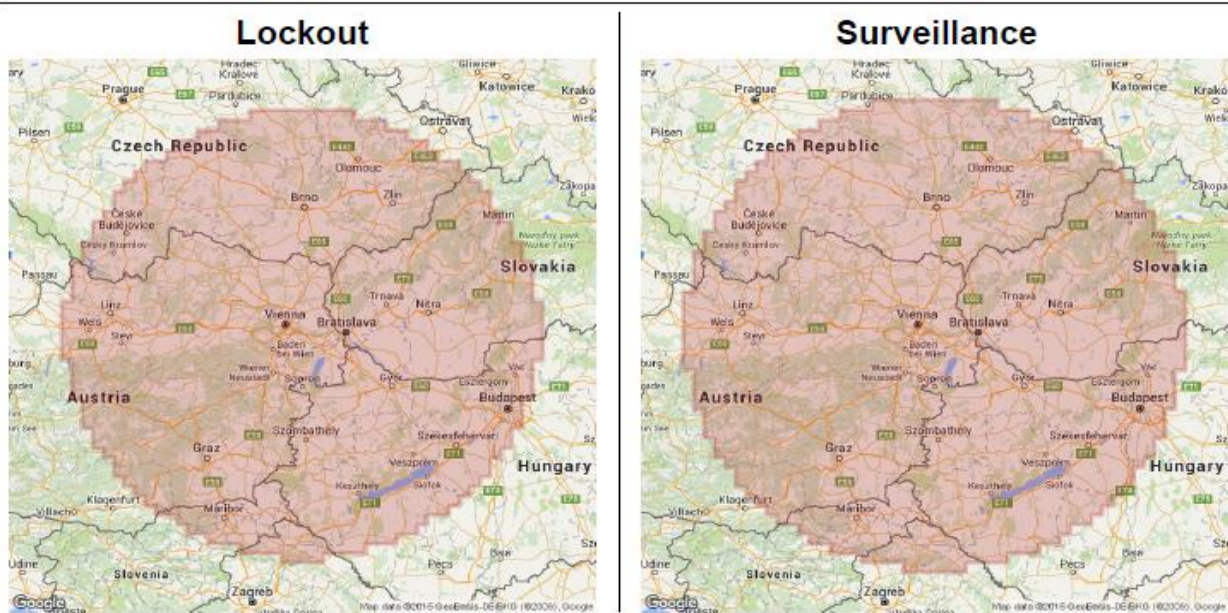
Stát	SI	Identifikace	Lat	Lon	Radon	Perioda otáčení	Dosah	Max Dosah	Kužel ticha [°]	MICA cyklus
Rakousko	20	VIE2	48,104369	16,560975	Ano	4 s	140 NM	256 NM	45	ICAC 13
Rakousko	53	KOR	46,787108	14,97115	Ano	4 s	150 NM	160 NM	45	ICAC 15
Polsko	54	Poznan	52,411389	16,793611		5 s	256 NM	256 NM	45	ICAC 13
Polsko	39	Lodz1				6 s			45	
Slovensko	6	Bratislava	48,171811	17,227647	Ano	4 s	160 NM	256 NM	45	ICAC 9
Slovensko	28	Velký Javorník	48,260714	17,163287	Ano	4 s	160 NM	256 NM	45	ICAC 11
Maďarsko	12	Korishegy	47,293958	17,753581	Ano	8 s	200 NM	256 NM	45	ICAC 11
Maďarsko	38	Puspokladany	47,356361	21,044186	Ano	8 s	200 NM	256 NM	45	ICAC 10

Od pracovníků ŘLP jsem získal oficiální dokumenty EUROCONTROL, které jsou zasílány jednotlivým provozovatelům radarů jako shrnutí toho, jaké parametry byly kterým radarům přiděleny a schváleny. Pro každý radar je právě jeden takovýto dokument. V těchto materiálech se mimo jiné nachází simulace provozního dosahu ve formě obrázku. Pro jednotlivé radary je provedena simulace jak přehledového pokrytí, tak i Lockout pokrytí⁶⁹, které obvykle bývá o 5 NM menší než přehledové a zároveň může být v některých azimutech omezeno.

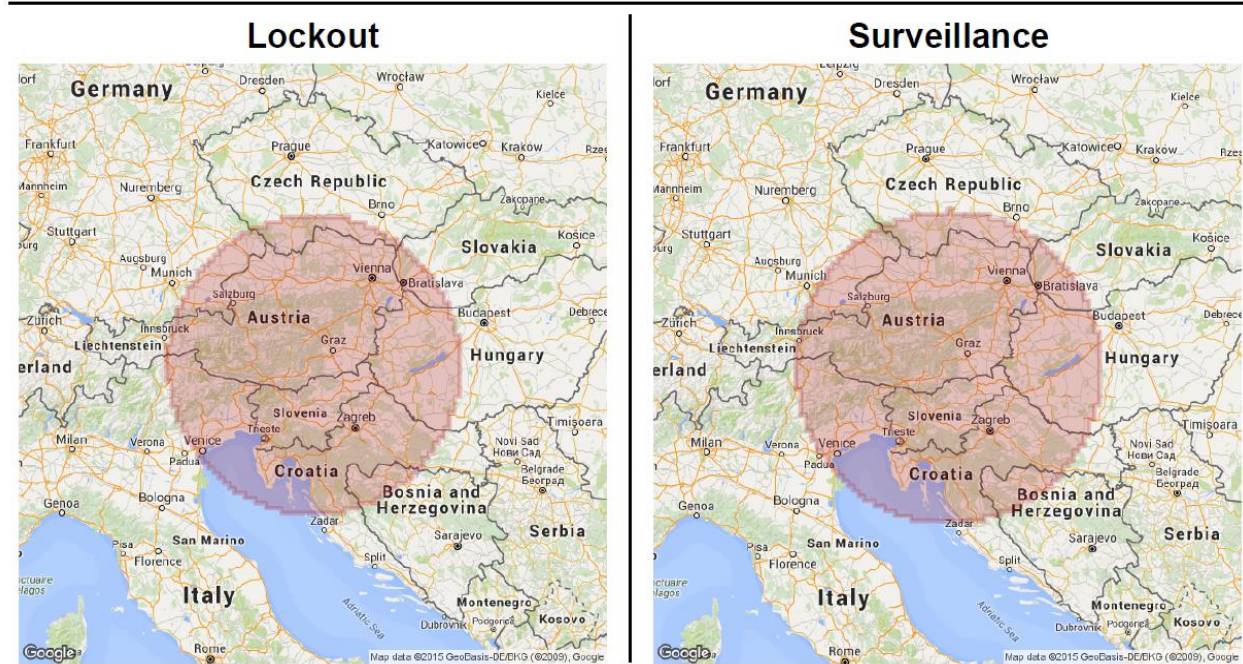
Uvedené údaje jsem použil k ověření, zda mnou identifikované radary svým dosahem jsou schopny působit v oblasti sledovaných letadel. Obrázky jednotlivých Lockout a přehledových pokrytí vybraných radarů uvádím níže. Postupně budou zobrazeny dvojice radarů rakouských, maďarských, slovenských a dále jeden polský.

⁶⁸ Jak bude dále v práci popsáno, uvedené periody otáčení jsou v praxi nepatrně odlišné.

⁶⁹ Je třeba odlišit následující pojmy: Lockout pokrytí představuje oblast, v níž může radar letadlo zamknout. Přehledové pokrytí (Surveillance) je dáno opakovací frekvencí radaru a představuje pracovní rozsah radaru. Pojem „dosah“ je dán radarovou rovnicí a může významně přesahovat přehledové pokrytí. Pro vybuzení DF 11 se musí letadlo nacházet v oblasti dosahu radaru.

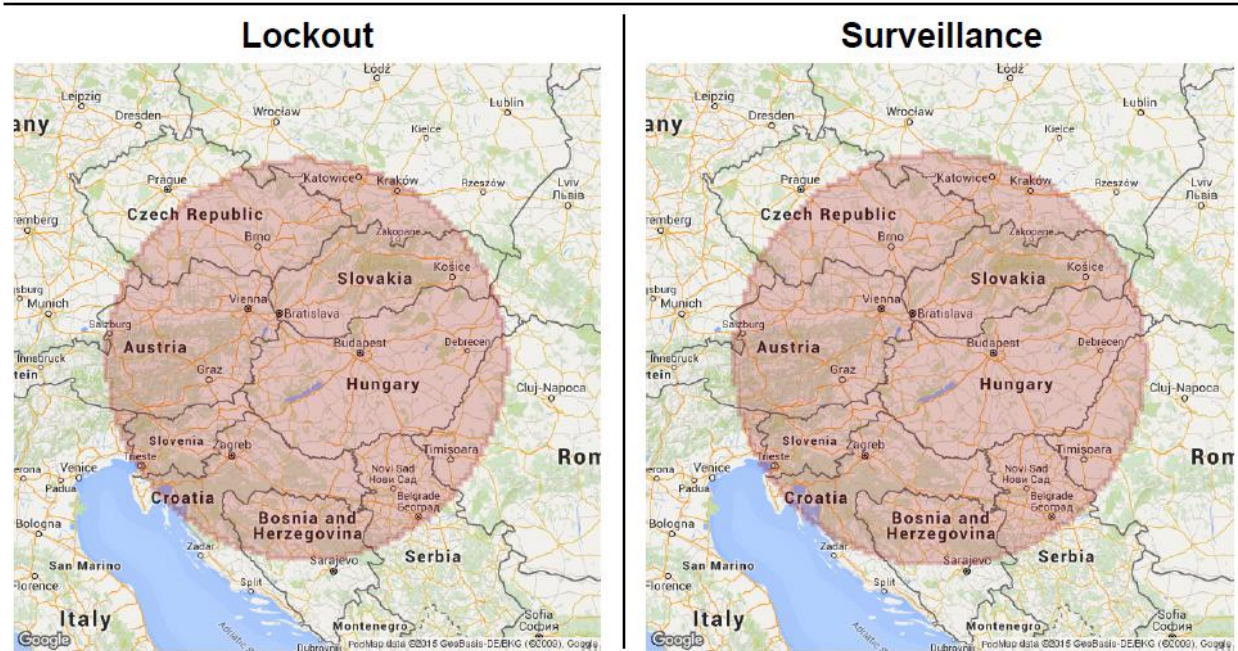


Obrázek 18: Lockout a přehledové pokrytí radarů VIE2

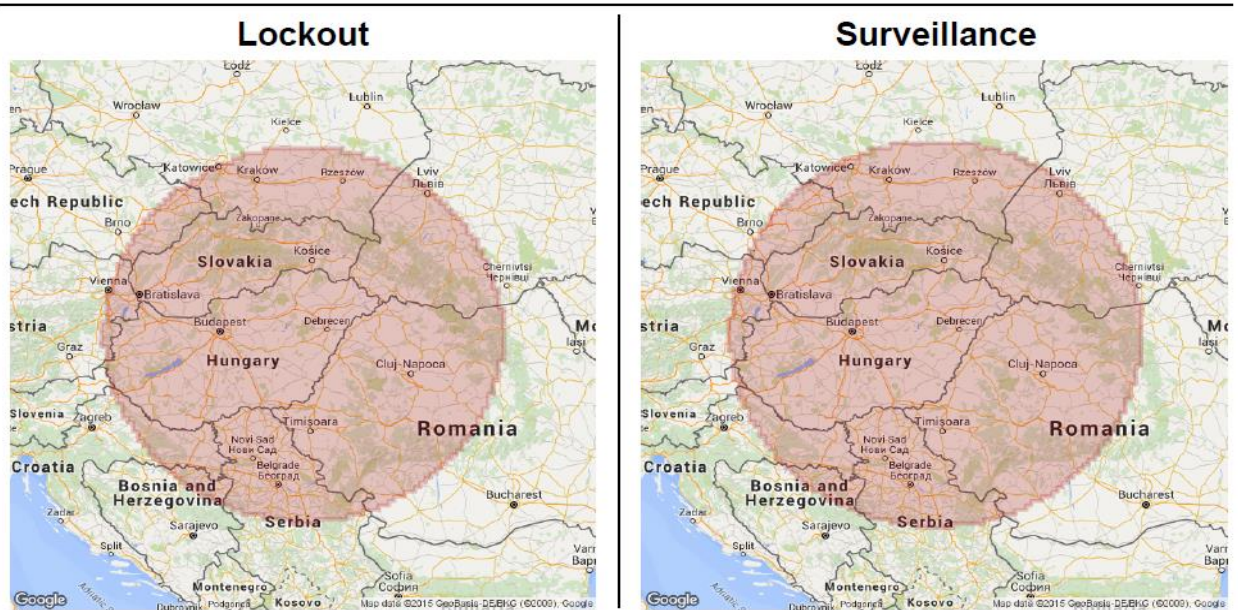


Obrázek 19: Lockout a přehledové pokrytí radarů KOR

Z obrázků č. 18 a 19 je patrné, že oba rakouské radary přibližně zasahují na území, ze kterých byly přijaty odpovědi.



Obrázek 20: Lockout a přehledové pokrytí radarů Korishegy

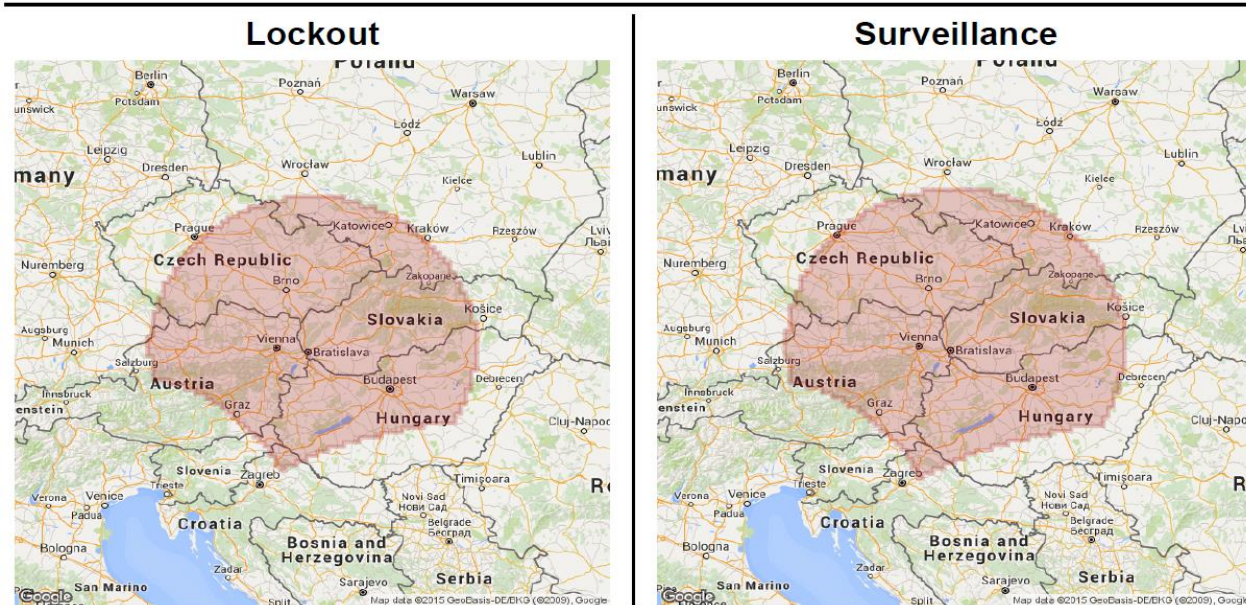


Obrázek 21: Lockout a přehledové pokrytí radarů Puspokladany

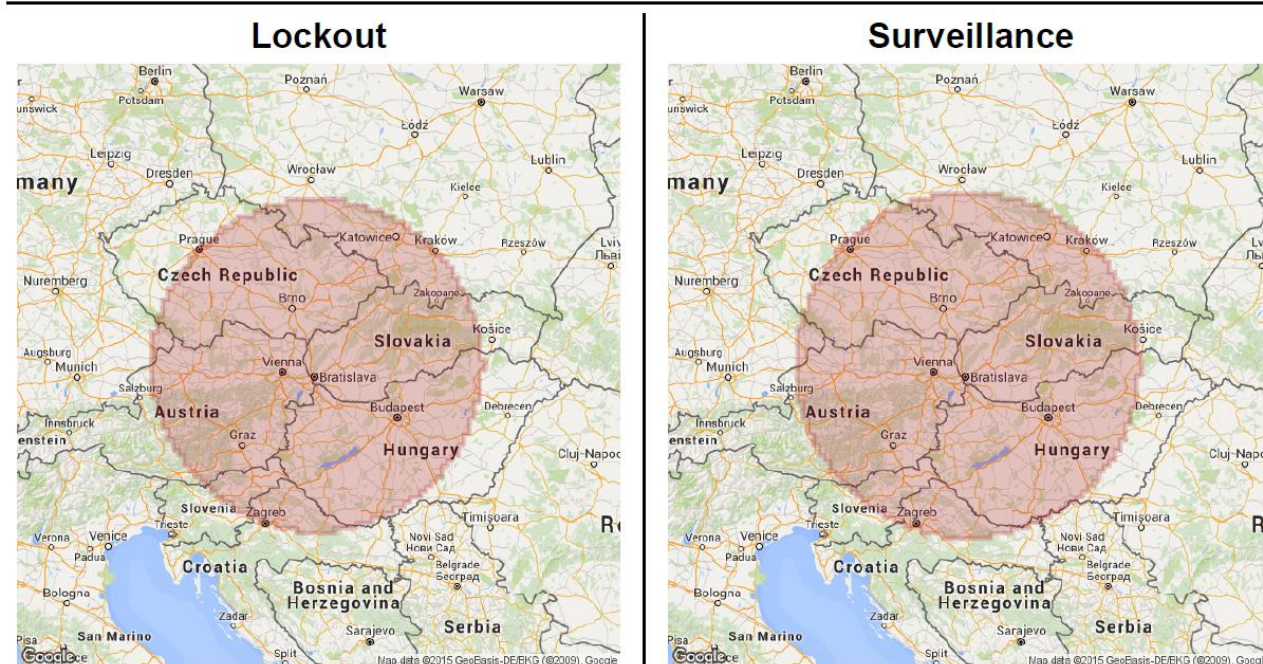
U radaru Puspokladany je zřejmé, že přehledové pokrytí do oblastí, ve které se nacházela testovaná letadla, zdaleka nedosahuje. Vzhledem k faktu, že v okolí se nenachází žádné jiné

radary se stejným dotazovacím kódem, není ale žádných pochyb o tom, že letadla skutečně odpovídala tomuto radaru⁷⁰.

Dále mám Slovenské radary Bratislava a Velký Javorník.



Obrázek 22: Lockout a přehledové pokrytí radarů Bratislava

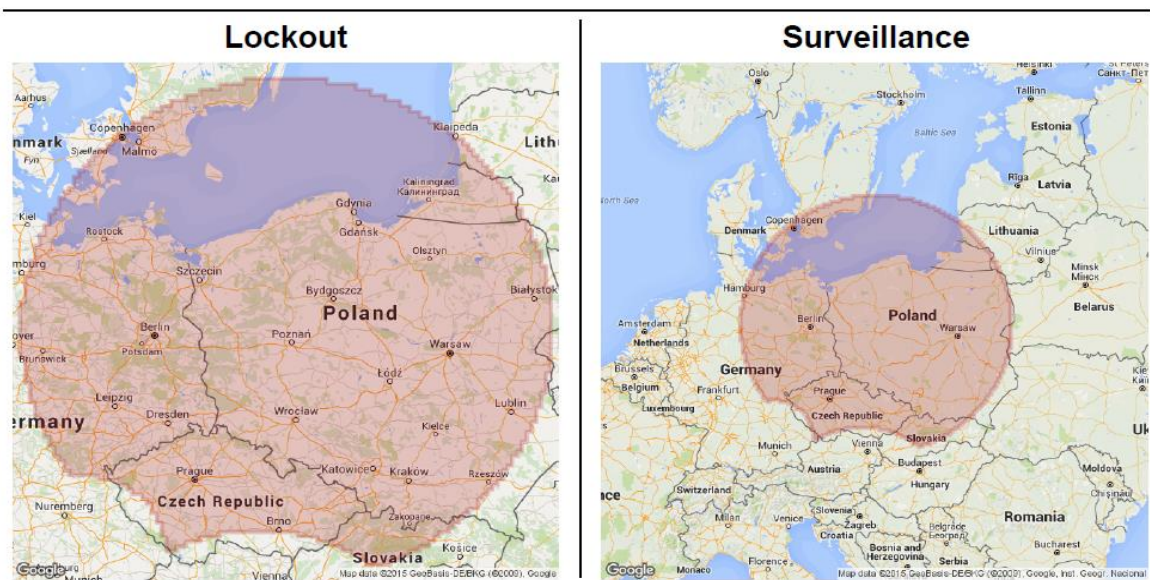


Obrázek 23: Lockout a přehledové pokrytí radarů Velký Javorník

⁷⁰ Je zřejmé, že letadla byly v dosahu radaru.

U radaru Bratislava (obrázek č. 21) je na jižní části zřejmé omezení pokrytí radaru. Dvojitá „vykousnutí“ kružnice naznačuje, že jeho pokrytí je na jihu omezeno v jistých azimutech⁷¹.

Z Polska je k dispozici oficiálně pouze obrázek pokrytí radaru Poznan. Je zřejmé, že pokrytí tohoto radaru obsáhne oblasti mnou sledovaných letadel a taktéž je zřetelné omezení v jižních azimutech.



Obrázek 24: Lockout a přehledové pokrytí radarů Poznan

3.3.5 Určení period otáčení radarů

Ke zjištění period otáčení radarů můžeme dospět několika postupy. První možností je použít hodnoty „perioda otáčení radarů“ z technických podkladů k jednotlivým radarům. V mém případě se jedná o radary zmíněné v předchozí kapitole. Příslušné hodnoty radarů dodané provozovateli uveřejňuje kancelář MICA na své webové stránce. Periody otáčení radarů pro mnou alokované radary jsou uvedeny v následující tabulce.

⁷¹ To se využívá v případech, kdy MICA Cell musí omezit dosah radaru z důvodu možné kolize s jiným radarem se stejným dotazovacím kódem.

Tabulka 11: Normované periody otáčení identifikovaných radarů

Radar	Bratislava	Korishegy	VIE2	Velký Javorník	Puspokladany	Lodz1	KOR	Poznan
IC	6	12	20	28	38	39	53	54
Perioda otáčení	4 s	8 s	4	4 s	8 s	Neuveden	4 s	5 s

Všechny radary v mém seznamu jsou vybaveny radonem, který obklopuje otáčející se radar a slouží jako ochrana proti nepřízní počasí, převážně větru. Připomínám, že v mých datech se nenachází žádné německé radary, které často radonem nejsou vybaveny.⁷²

Můj předpoklad, že zjištěné otáčky se budou shodovat s tabulkovými, se ukázal jako nesprávný. Normované otáčky radarů provozovatelé nedodržují⁷³. Jak bude dále v textu uvedeno, vyskytují se nepatrné odchylky od normy. Zde je na místě podotknout, že i malá časová nepřesnost může znamenat značnou chybu v konečném vypočteném výsledku komplementární metody.

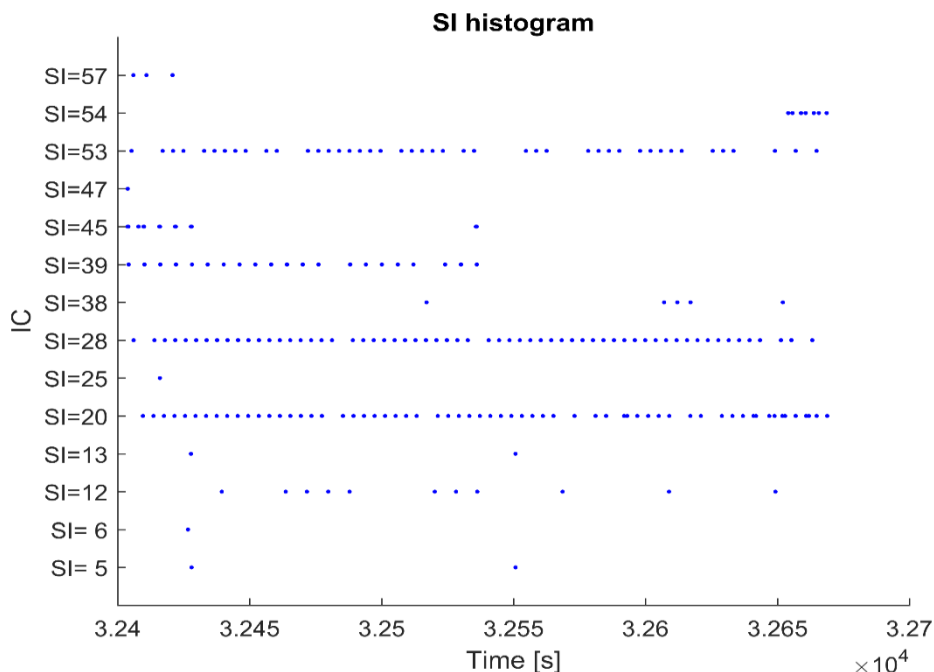
3.3.5.1 Navržená metoda pro stanovení periody otáčení radaru

Dalším způsobem, jak stanovit periodu otáčení radaru je provést vlastní výpočet. Pro tento případ jsem navrhl následující metodu. Z přijímaných dat plyne, že letadlo letí pod konstantním azimutem a stejnou rychlostí (lze ověřit pomocí DF 17). Dále je znám čas přijetí odpovědi DF 11, ale není známo, jakou zeměpisnou polohu v tento čas letadlo zaujímalo.

Při pohledu na přijímané odpovědi DF 11 je patrné, že při jednom přechodu laloku přes letadlo dojde k vyslání několika odpovědí. Struktura dat poté může vypadat jako na obrázku č. 24. V tomto konkrétním případě se jedná o strukturu SI kódů radarů pro letadlo pod registrací EI-EKD přijaté 12.6.2017.

⁷² U těchto radarů pro kompenzaci větru slouží speciálně tvarovaná anténa, kdy se jedna strana antény větrem urychluje a druhá zpomaluje.

⁷³ Nedodržování přesných period otáčení radarů je zcela záměrné. Snahou je, aby radary byly vždy zaměřeny na jiné místo v prostoru.



Obrázek 25: Struktura SI kódů pro letadlo s registrací EI-EKD

Vodorovná osa reprezentuje čas a svislá osa reprezentuje IC kódy radarů. Modré tečky jsou odpovědi těchto radarů, přičemž jedna modrá tečka může obsahovat jednu nebo několik odpovědí.

V prvním kroku je tedy nutno vyřešit určení referenčního času⁷⁴ příjmu odpovědi. Od stanovení tohoto času se odvíjí další výpočty. Stanovení času je složitější o to, že radar má danou šířku dotazovacího svazku a není známo, kde se letadlo v rámci tohoto svazku v okamžiku odpovědi nachází. Dále pak odpovědi mohou být vyžadovány s odlišnou pravděpodobností.

Pro tyto limitující okolnosti jsem použil určitá zjednodušení. K výpočtu jsem navrhl dva postupy, které dále uplatním při výpočtu periody otáčení radaru:

a) metoda průměru časů

Nachází-li se více odpovědí DF 11 v jedné „tečce“, potom je výsledný čas vypočten jako průměr jednotlivých časových údajů. Ve zjednodušení uvažuji, že tato zprůměrovaná časová hodnota přibližně stanovuje, kdy se nacházelo letadlo ve „středu“ laloku.

b) metoda prvních časových hodnot

Výběr první hodnoty volí namísto zprůměrovaných údajů dané „tečky“ první hodnotu v „tečce“.

⁷⁴ Stanovení referenčního času je klíčové, neboť je referencí, od které se budou odvíjet další výpočty.

A) Výpočet periody otáčení při použití metody průměru časů:

V prvním kroku provedeme určení hodnoty zeměpisné šířky a délky letadla ve zprůměrovaných časech. Tady se nabízí možnost určit ji pomocí interpolace. V prostředí MATLAB je tomu určena funkce ***interp1(x,v,xq)***, kde vstupními hodnotami je vektor příchodu časů DF 17, dále vektor hodnot zeměpisné šířky a délky a dále vektor hodnot časů, ve kterých neznáme zeměpisnou šířku nebo zeměpisnou délku. Za vstupní vektor hodnot časů považuji zprůměrované hodnoty časů přijetí DF 11 v tečce. Výstupem je vektor o stejné délce, jako je vektor zprůměrovaných hodnot časů. V něm se nachází pomocí interpolace zjištěné hodnoty zeměpisné šířky nebo zeměpisné délky.

Nyní jsou známy zeměpisné souřadnice v časech příchodu zpráv DF 11. Dalším krokem je určit, jak se s každou otáčkou radaru mění azimut tohoto radaru vůči letadlu. Azimut radaru k těmto zeměpisným souřadnicím se určí Matlab funkcí ***azimuth(lat1, lon1, lat2, lon2)***. Vstupními hodnotami jsou zeměpisné souřadnice radaru a dále interpolací spočtené zeměpisné souřadnice letadla. Výstupem je azimut neboli také natočení radaru k letadlu v čase příjmu DF 11.

Změna azimutu je dána pohybem letadla. Pro všechny radary platí, že se točí po směru hodinových ručiček. Na základě této znalosti a znalosti toho, jestli se dotazovací lalok radaru pohybuje na severu od své zeměpisné polohy (azimut $<0,90$), nebo azimut $(270,360>)$ nebo na jihu, (azimut $(90,180>)$, nebo azimut $<180,270$) jsem schopen určit, jestli bude docházet k nárůstu nebo ke zmenšování azimutu v čase.

Pohybuje-li se letadlo na sever na zeměpisné délce menší, než je zeměpisná délka radaru nebo pohybuje-li se letadlo na jih na zeměpisné délce větší, než je zeměpisná délka radaru, bude docházet k nárůstu azimutu. V opačném případě bude docházet ke klesání azimutu.

Poté se ve vektoru zprůměrovaných časů a azimutů odečte $n+1$ hodnotu od n -té hodnoty. Tak vznikne vektor rozdílů časů a azimutů s každou otáčkou. Zjistíme tak, že například hodnota azimutu za jednu periodu vzrostla o určitou hodnotu, a tudíž by měl vzrůst i časový rozdíl.

Z vektoru časů je třeba odstranit chybové hodnoty, které se mohou objevit. Například, ukazují-li mi všechny hodnoty, že perioda bude přibližně 5 sekund, je třeba odstranit hodnoty, které by mohly dramaticky ovlivnit výslednou hodnotu a které jsou očividně chybové. Mohou vzniknout například tak, že se do těchto dat připlete odpověď na zprávu z jiného radaru, ale se stejným IC kódem.

Dále spočítáme průměr vektoru rozdílů časů a vektoru rozdílů azimutů a výsledkem je průměrná perioda radaru při průměrném nárůstu azimutu. Výsledek může vypadat například tak, že

vycházející hodnota periody bude 5.102 sekundy při průměrném nárůstu azimutu 0.5 stupně. Tyto hodnoty ještě nejsou konečné, neboť perioda 5.102 sekund platí pro 360.5 stupňů. Po úpravě za pomoci přímé úměrnosti určíme, jaká bude hodnota pro 360 stupňů. Výsledky získané při využití průměrovaných časů prezentuje následující tabulka:

Tabulka 12: Výsledky výpočtu periody otáčení radaru využitím metody průměru časů

	Radar 6	Radar 12	Radar 20	Radar 28	Radar 38	Radar 53	Radar 54
EI-EKD	Málo dat	8,06722	3,93313	3,95713	Málo dat	3,93313	4,05000
OE-LWG	Málo dat	8,06082	3,99113	3,95658	Málo dat	3,93490	Málo dat
EI-FTD	Málo dat	8,07830	3,99027	3,95827	Málo dat	3,93451	3,98535
YR-BAS	Málo dat	8,06535	3,98132	3,95483	Málo dat	3,93398	Málo dat
HA-LWL	Málo dat	8,06627	3,99940	3,95686	Málo dat	3,93333	Málo dat
D-AIPH	Málo dat	8,07034	4,00086	3,95799	Málo dat	3,94194	3,93871
Střední hodnota	-	8,068050	3982685	3,956943	-	3,935298	3,991353
Směrodatná odchylna	-	0,00589	0,025282	0,001224	-	0,003323	0,055887

Výsledné údaje jsou uvedeny v sekundách a dokumentují, že vypočtené periody otáčení se nepatrně liší od údajů z technické dokumentace.⁷⁵ Kolonky vyplněné hlášením „Málo dat“ značí, že od daného radaru není dostatek informací pro výpočet period podle výše uvedeného postupu.⁷⁶

B) Výpočet periody otáčení při použití metody prvních hodnot:

Připomeňme, že tento postup je shodný s postupem předchozím s tím rozdílem, že místo zprůměrovaných údajů dané „tečky“, se použije první hodnota v „tečce“. Opět provedu interpolaci hodnoty zeměpisné šířky a délky v čase příjmu prvních DF 11 a zjistím jaký je nárůst azimutu. Na závěr spočítám přímou úměrou, jaká je perioda otáčení pro 360°. Podotýkám, že vyhodnocení přesnosti výpočtu periody otáčení radaru samo o sobě není ověřitelné.

⁷⁵ Srovnej s tabulkou č. 11.

⁷⁶ Radary, pro nichž je nedostatek dat na výpočet period radarů, se na výpočtu polohy prakticky nepodílí.

Tabulka 13: Výsledky výpočtu periody otáčení radaru využitím metody prvních hodnot

	Radar 6	Radar 12	Radar 20	Radar 28	Radar 38	Radar 53	Radar 54
EI-EKD	Málo dat	8,06722	3,98894	3,95763	Málo dat	3,93244	Málo dat
OE-LWG	Málo dat	8,05981	3,99073	3,95722	Málo dat	3,93537	Málo dat
EI-FTD	Málo dat	8,08142	3,96536	3,95727	Málo dat	3,93446	3.85812
YR-BAS	Málo dat	8,07010	3,98862	3,95467	Málo dat	3,93351	Málo dat
HA-LWL	Málo dat	8,05735	3,98748	3,95671	Málo dat	3,93325	Málo dat
D-AIPH	Málo dat	8,06832	3,98748	3,95831	Málo dat	3,94432	Málo dat
Střední hodnota	-	8,067370	3,984768	3,956968	-	3,935558	3.858120
Směrodatná odchylna	-	0,008524	0,009583	0,001244	-	0,004410	-

3.3.6 Výpočet azimutů SSR v čase k nereferenčním letadlům

Dalším postupným krokem komplementární metody je určit natočení radarů v čase k nereferenčnímu letadlu. V této části úlohy jsem postupoval následovně.⁷⁷

1. V prvním kroku je třeba u referenčního letadla zvolit, jestli se bude počítat azimut letadla ke zprůměrovaným hodnotám DF 11 nebo k první přijaté hodnotě DF 11. Pro ověření výsledku provedu výpočet za použití obou hodnot.
2. Poté je třeba spočítat azimut radarů k referenčnímu letadlu dle postupu v předchozí kapitole.
3. Dále je třeba určit azimut letadla, jehož polohu zkoumám. Na základě rozdílu⁷⁸ mezi průměry časů DF 11 u referenčního a nereferenčního letadla, nebo na základě rozdílu časů prvních hodnot DF 11 u referenčního a nereferenčního letadla dopočítám, jak je natočen pomyslný střed radarového svazku na zkoumané letadlo. To určím podle následujícího vzorce.

$$w = azimut - 360 * \left(\frac{\Delta t}{T}\right) \quad (3)$$

⁷⁷ Zprvu jsem uvažoval, že bude postačovat zjistit periody radarů a tyto vypočtené periody dosadit do výše uvedeného vzorce a počítat azimut v jakémkoliv budoucím čase. Tato úvaha je ovšem nesprávná, neboť periody radarů nemusí být spočtené přesně a po několika minutách i malá nepřesnost v určení period radarů by vykazovala obrovskou nepřesnost v určení azimutu.

⁷⁸ Požadavkem je, aby hodnota rozdílu byla nejmenší. Potom bude azimut posouván v rámci stejné otočky.

Kde **azimut** je hodnota azimutu pro referenční letadlo, Δt je rozdíl časů⁷⁹ mezi příjmem DF 11 referenčního letadla a nereferenčního letadla. T je perioda otáčení radarů. V mém případě se jedná o dosazené střední hodnoty period otáčení radarů. V případě počítání azimutu ke zprůměrovaným hodnotám jsou dosazeny střední hodnoty period otáčení radarů podle metody průměru. Ve druhém případě střední hodnoty spočtené podle metody prvních hodnot.

3.4 Metoda výpočtu polohy

Pro ověření funkčnosti komplementární metody je nezbytné zvolit odpovídající způsob určení polohy cíle. Principiálně se jedná o nalezení průsečíku přímek vedených z dotazovacích radarů pod známým azimutem ke zkoumanému letadlu. Elektromagnetická vlna se šíří přímočaře, to znamená, že se jedná o nejkratší spojnicí dvou bodů na prostorovém tělese. Na kouli se taková spojnice nazývá ortodroma a pro letecké použití a školní výpočty se užívá běžně.

Model Země jako koule se dá považovat za dostatečně přesný pouze do vzdáleností přibližně 200-250 km. Chceme-li, aby byl výpočet přesnější a prakticky použitelný, je třeba použít místo koule elipsoid. Nejkratší spojnice na povrchu elipsoidu se nazývá geodetická křivka.

3.4.1 Teorie určení polohy na prostorovém tělese

Jako elipsoid budu uvažovat současný referenční standard World Geodetic System 1984 (WGS84).⁸⁰ Souřadnice WGS84 vychází se souřadnic zeměpisných. Poloha je určena zeměpisnou šířkou, zeměpisnou délkou a výškou. Zeměpisná šířka může nabývat hodnot 0°-90°, počítáno od rovníku, pro severní i jižní šířku. Zeměpisná délka může nabývat hodnot 0°-180° pro západní i východní délku, měřeno od nultého poledníku. Ve WGS84 je nultý poledník „IERS Reference Meridian“, který leží 5,31 úhlových sekund od „Greenwich Prime Meridian“.

WGS84 má střed v těžišti Země, měřeno včetně moří a atmosféry. Kladná osa x směřuje k průsečíku nultého poledníku a rovníku, kladná osa z k severnímu pólu a kladná osa y je na

⁷⁹ Rozdílem časů se uvažuje rozdíl průměrů časů mezi DF 11 referenčního a nereferenčního letadla nebo rozdíl prvních hodnot mezi DF 11 referenčního a nereferenčního letadla.

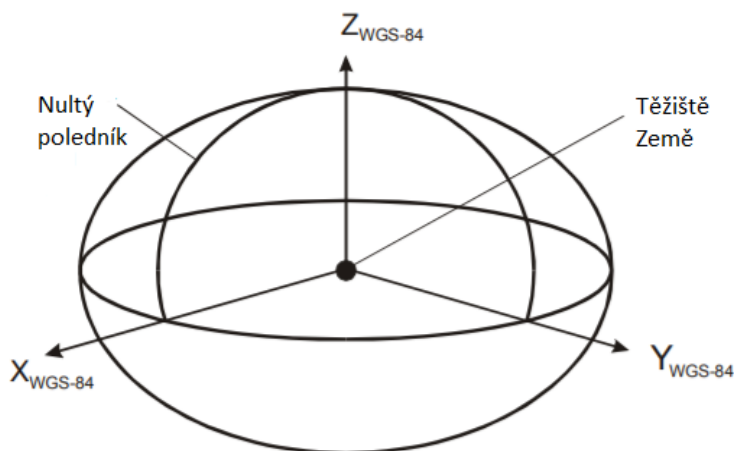
⁸⁰ WGS84 je používán velkým množstvím navigačních systémů. Mezi ně lze řadit například GPS, BeiDou, Galileo, IRNSS, QZSS.

osy x , z kolmá ve směru doleva. Jedná se tedy o pravotočivou soustavu souřadnic. Souřadnicový systém WGS84 je definován následujícími hlavními parametry⁸¹:

- Délkou hlavní poloosy: $a = 6378137 \text{ m}$
- Převrácenou hodnotou zploštění: ($f = 1 - b/a$): $1/f = 298,257223563$
- Uhlovou rychlostí: $w = 7,292115 * 10^{-5} \text{ rad/s}$
- Gravitačním parametrem (součin hmotnosti Země včetně atmosféry a gravitační konstanty):
 $GM = 3986004,418 \pm 0,008 * 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$

Z těchto parametrů lze odvodit mnoho vedlejších parametrů. Například:

- Délka vedlejší poloosy: $b = 6356752,3142 \text{ m}$
- První excentricita: $e = 8,1819190842622 * 10^{-2}$



Obrázek 26: Souřadnicový systém WGS84⁸²

Pro nejkratší spojnici dvou bodů na kouli (ortodroma) i pro nejkratší spojnici dvou bodů na elipsoidu (geodetická křivka) platí, že jejich geodetická křivost je nulová. Azimut ortodromy i geodetické křivky se průběžně mění, a proto je výpočet relativně složitý.

⁸¹ World Geodetic System-1984 (WGS-84) Manual, 2002, ICAO.

⁸² Zdroj: vlastní úprava za použití World Geodetic System — 1984 (WGS-84) Manual [on line]. 2002, Dostupné z: <https://gis.icao.int/egamp/webpdf/REF08-Doc9674.pdf>

3.4.2 Postup výpočtu určení polohy pro případ elipsoidu

Pro určení průsečíku dvou geodetických křivek na povrchu elipsoidu využiji postup popsany ve článku Algorithms for geodesics⁸³. Metoda je vhodná i z pohledu výpočetní kapacity. Balíček funkcí, které je třeba použít lze najít na webové stránce <https://geographiclib.sourceforge.io>.⁸⁴ Zde se nachází nejrůznější geografické funkce v různých programovacích jazycích. Já jsem použil balíček funkcí pro jazyk Matlab.

Řešení tohoto problému se nachází v gnómonické projekci. Jedná se o azimutální zobrazení, které není plochojevné, dálkojevné a ani úhlojevné. Konstruuje se ze středu sféry na tečnou rovinu a výhodné je, že všechny ortodromy se zobrazí jako přímky.

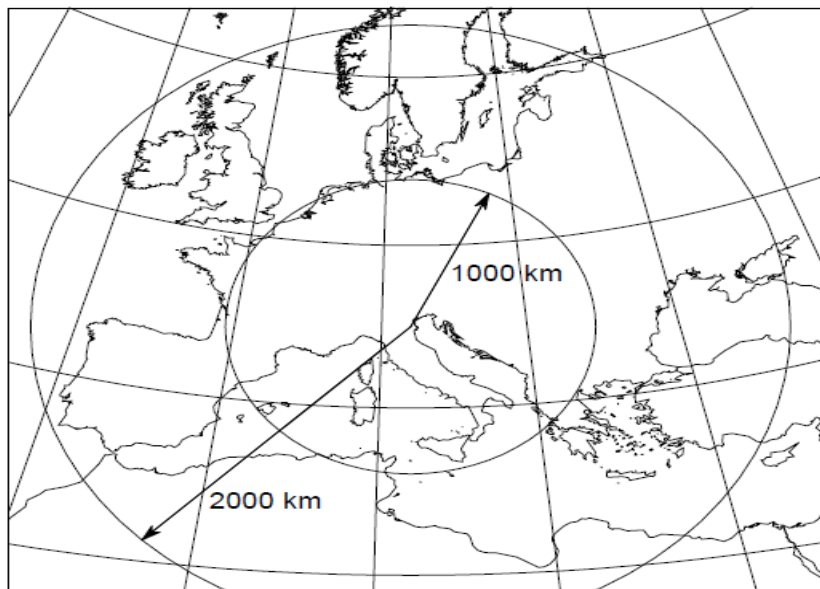
Toto zobrazení obecně nelze použít pro elipsoid, neboť ten, na rozdíl od sféry, nemá konstantní Gaussovské zakřivení. Je ale možné využít diferenciálních vlastností geodetické křivky a konstruovat takovou projekci, ve které se geodetické křivky budou jevit jako přímé.⁸⁵

Kvalitu výše uvedeného řešení ilustrují následující skutečnosti. Na níže uvedeném obrázku jsou 2 kruhy se středem na souřadnicích 45° severní šířky a 12° východní délky. Menší s poloměrem 1000 km a větší s poloměrem 2000 km. Jestliže budeme geodetickou křivku mezi dvěma kterýmikoliv body uvnitř prvního či druhého kruhu považovat za přímou, tak odchylka od skutečné hodnoty bude pouze 1.7 m pro menší kruh a 28 m pro větší kruh. Maximální azimutální chyba bude v prvním případě 1.1", ve druhé, 8.6". Chyba v délce bude pouze 5.4 μm a 730 μm.

⁸³ Charles F.F. Karney, 2012, SRI International, 201 Washington Rd, Princeton, NJ 08543-5300, USA.

⁸⁴ Karney, Charles, F., F. GeographicLib [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://geographiclib.sourceforge.io/>

⁸⁵ Karney, Charles, F., F. 2012, SRI International, 201 Washington Rd, Princeton, NJ 08543-5300, USA.



Obrázek 27: Gnómonická projekce⁸⁶

Zobecněná gnómonická projekce pro elipsoid nám umožní řešit problém průsečíků dvou geodetických křivek a zároveň i problém nalezení nejmenší vzdálenosti od libovolného bodu ke geodetické křivce.

3.4.3 Výpočet polohy na elipsoidu

Nyní, po předchozí teoretické přípravě, je možné přistoupit k samotným výpočtům.

1. Je třeba určit střed promítání gnómonické projekce. Ten je možno zvolit libovolný, ale musí být na stejné hemisféře jako skutečný střed dvou geodetických křivek, který hledáme. Jako počáteční střed promítání gnómonické projekce budu uvažovat 45° zeměpisné šířky a 45° zeměpisné délky.

2. Musíme určit dvojice bodů A, B, a C, D, což jsou polohy bodů dvou geodetických křivek. Bod B (D) je bod v určité vzdálenosti od bodu A (C) v daném azimutu - tím body A, B (C,D) určují požadovanou geodetickou křivku, tedy přímku v gnómonické projekci. Pro mé potřeby tedy bod A (C) představuje polohu dotazujícího se radaru určeného zeměpisnou šířkou a délkou. Bod B (D) je bod určený zeměpisnou šířkou a délkou pomocí matlab funkce **track1**, což je funkce, která vygeneruje 100 hodnot souřadnic tracku. Vstupem této funkce je zeměpisná šířka a délka

⁸⁶ Tamtéž.

bodů A (C), azimut z těchto bodů, dále délka tracku a určení, zda se jedná o sféru či elipsoid. Zde jsem použil délku tracku 0.05 a elipsoid WGS84 a jako polohu bodu B (D) uvažuji poslední, tedy stou vygenerovanou hodnotu tracku.

3. Dále použiji dopřednou gnómonickou projekci. Jedná se o funkci, která je volně ke stažení na výše uvedeném odkazu a má zkratku **gnomonic_fwd**. Do funkce vstupují zeměpisné souřadnice středu projekce promítání a zeměpisné souřadnice bodů A, B, C, D. Výstupem jsou x-ové a y-ové souřadnice bodů A, B, C a D v gnómonické projekci.

3. Následně, pomocí uvedeného obecného vzorce nalezneme průsečík geodetických křivek AB a CD, tedy přímek v gnómonické projekci.

$$O = \frac{(c \times d \cdot \hat{z})(b-a) - (a \times b \cdot \hat{z})(d-c)}{(b-a) \times (d-c) \cdot \hat{z}} \quad (4)$$

Kde \hat{z} značí jednotkový vektor \hat{z} je kolmé na projekční rovinu.

4. Dále převedeme průsečík O z gnómonické projekce na zeměpisné souřadnice na elipsoidu WGS84. Provedeme inverzní gnómonickou projekci pomocí funkce označené jako **gnomonic_inv**. Vstupem této funkce jsou opět zeměpisné souřadnice středu projekce a souřadnice průsečíku geodetických křivek z předchozího vzorce v gnómonické projekci.

5. Nyní je třeba použít tyto zeměpisné souřadnice průsečíku na elipsoidu WGS84 jako nový střed projekce a iterovat do té doby, než se nově vzniklý střed projekce nerovná předchozímu středu projekce. To znamená následující rovnici.

$$O^{(i)} = O^{(i-1)} \quad (5)$$

Pro funkci jsem zvolil kritérium, že iteruji do té doby, dokud není splněna následující nerovnice.

$$|O^{(i)} - O^{(i-1)}| > 0.00000001 \quad (6)$$

6. Výsledkem jsou zeměpisné souřadnice průsečíku dvou geodetických křivek, které jsou definované počátečními zeměpisnými souřadnicemi a azimutem, vedenými po povrchu elipsoidu. Funkce, kterou používám k výpočtu poloh je označena jako **Prusecik_elipsoid00** a je uvedena v příloze č. 1.

4 Výpočtová část

Předchozí přípravná fáze posloužila k výpočtu azimutů radarů v čase a k rozboru metody výpočtu polohy na elipsoidu. Nyní se mohou věnovat výpočtu samotnému a provést jeho vyhodnocení.

4.1. Výpočet polohy letadla

Pro komplementární výpočet polohy letadla použijí následující výpočet. Východiskem jsou opět zprávy DF 11, jejichž čas doručení je stanoven a) metodou průměru časů, nebo b) metodou prvních hodnot.

1. Ve vektoru takto upravených DF 11 zpráv od nereferenčního letadla se odečte n-tá hodnota od n+1 a dále se odečte n-tá od n+2. Výsledkem je vektor rozdílu⁸⁷ časů příchodů odpovědí od nereferenčního letadla k radarům.

2. Z těchto hodnot se vyloučí ty časové rozdíly, které jsou větší než 0.5 sekundy⁸⁸. Z následující tabulky č. 14 je patrné, jak je vzorek dat pro další výpočty sestaven. V prvním a druhém sloupci jsou IC kódy radarů, ve třetím a čtvrtém jsou jejich přepočtené azimuty.

3. Poté se použije funkce ***prusecik_elipsoid00***. Vstupní hodnoty do této funkce jsou následující:

$$[lat,lon]=Prusecik_elipsoid00(ax,ay,az,cx,cy,cz,0,0,45,45) \quad (7)$$

Výsledkem této funkce jsou zeměpisné souřadnice. Vstupem do výpočtu jsou souřadnice dotazujícího se radaru (***ax, ay***), jeho azimut (***ay***), dále souřadnice druhého radaru (***cx, cy***) a jeho azimut (***cz***). Ukázka upraveného výsledku výpočtu určení polohy daného letadla metodou průměrů časů je uvedena v následující tabulce. Ostatní výsledky jsou uvedeny v elektronické příloze s názvem „Výsledky“.

⁸⁷ Důvodem tohoto postupu je skutečnost, že čas přijetí DF 11 od nereferenčního letadla k radarům není nikdy stejný.

⁸⁸ Za 0.5 sekundy letadlo změní polohu nejvýše o 100 metrů.

Tabulka 14: Přepočtené azimuty, (vzorek dat Matlab)

1	2	3	4
53	20	343.6238	313.5082
20	28	313.5082	305.0779
20	28	313.2350	305.4602
53	20	344.4464	313.4653
20	28	313.4653	305.5512
53	20	346.5734	312.7030
20	28	312.7030	305.4352
53	20	344.4820	313.5762
20	28	313.5762	306.3572
53	20	344.1432	313.3509
20	28	313.3509	305.8445
20	28	115.3967	305.4889
12	53	315.7180	343.1051
20	28	316.8962	305.4476
20	28	311.7705	307.5720
12	53	313.3981	345.0599
20	28	312.2270	306.9496
20	28	312.3893	306.2213
53	12	344.2810	314.9430
20	28	313.0280	305.0899
20	28	312.9595	305.1305
28	20	305.1286	312.9613
20	28	312.9613	307.8099

Tabulka 15: Reálné a vypočtené zeměpisné souřadnice (vzorek dat Matlab)

1	2	3	4
49.7633	13.8336	49.7902	13.7274
49.7664	13.8211	49.8494	13.6467
49.7667	13.8199	49.7721	13.7829
49.7689	13.8108	49.6575	13.9113
49.7689	13.8108	49.8783	13.5117
49.7719	13.7976	49.8560	13.6469
49.7719	13.7976	49.9389	13.5004
49.7745	13.7855	49.8610	13.6139
49.7745	13.7855	49.8569	13.6212
49.7761	13.7776	47.1493	19.4092
49.7792	13.7621	50.0714	13.4129
49.7794	13.7611	49.3623	14.7328
49.7818	13.7492	51.0023	11.1895
49.7841	13.7374	49.6556	13.7869
49.7844	13.7357	50.4863	12.3037
49.7918	13.6990	50.1676	12.9369
49.7939	13.6884	49.8822	13.6165
49.7940	13.6876	49.7447	13.7872
49.7964	13.6757	49.7642	13.7454
49.7964	13.6757	49.7635	13.7468

Ve sloupcích 1 a 2 jsou skutečné souřadnice letadla, ve sloupcích 3 a 4 jsou zeměpisné souřadnice, které jsem vypočítal metodou průměru časů příchodů jednotlivých DF 11 zpráv.

4.2. Vyhodnocení výsledků výpočtu

Vyhodnocení výpočtů provedu pro první i druhou sadu dat, a použiju obě metody stanovení času příchodu DF 11, tedy metodu průměru časů i metodu první hodnoty.

Vypočtená data budou konfrontována s reálnými ADS-B polohovými daty sledovaných letadel a úspěšnost vyhodnotím podle následujícího zadání:

- Kolik % výsledků je do 5 km
- Kolik % výsledků se nachází v intervalu od 5 km do 15 km
- Kolik % v intervalu od 15 km do 30
- Kolik % od 30 km do 50 km
- Kolik % od 50 km do 100 km
- Kolik % výsledků je nad 100 km

V tabulkách bude uvedena četnost a procentuální četnost pro všechny vypočtené polohové hodnoty. Dále bude uvedena četnost a procentuální četnost pro vypočtené polohové hodnoty, z nichž budou vyřazeny polohové hodnoty, jejichž vzdálenost od ADS-B letadla v tom čase, pro který je spočtena polohová hodnota, bude vyšší než 60 km⁸⁹. Ty jsou v tabulkách uvedeny v řádcích s hvězdičkou (*). V posledním, pravém sloupci, je doba sledování letadla, tedy rozdíl mezi poslední přijatou časovou hodnotou a první přijatou časovou hodnotou, pro kterou jsem počítal výslednou polohu.

4.2.1 První sada dat

Z první sady dat jsem použil následující dvojice letadel⁹⁰.

- EI-EKD OE-LWG
- OE-LWG EI-EKD
- OE-LWG EI-FTD
- EI-FTD OE-LWG

⁸⁹ Je to z toho důvodu, že referenční a nereferenční letadlo se nachází přibližně ve stejné oblasti. Proto hodnoty, které jsou výrazně mimo polohu referenčního letadla, vyloučím. Jedná se o systematické vyloučení hodnot výrazně mimo reálnou hodnotu.

⁹⁰ Pro tyto dvojice platí, že se ve stejný čas nacházely ve sledované oblasti.

4.2.1.1 Metoda průměru časů

Tabulka 16: Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda průměru časů (4/4)

EI-EKD⁹¹

1/4

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	26	0	9	6	2	4	5	223
[%]	-	0 %	34,6 %	23,1 %	7,7 %	15,4 %	19,2 %	
Četnost*	16	0	9	5	0	2	0	199
[%]*	-	0 %	56,3 %	31,3 %	0 %	12,5 %	0 %	

OE-LWG

2/4

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	29	0	9	8	0	6	6	223
[%]	-	0 %	31,0 %	27,6 %	0 %	20,7 %	20,7 %	
Četnost*	17	0	9	7	0	1	0	195
[%]*	-	0 %	52,9 %	41,2 %	0 %	5,9 %	0 %	

OE-LWG

3/4

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	39	1	4	7	5	4	18	235
[%]	-	2,6 %	10,3 %	17,9 %	12,8 %	10,3 %	46,2 %	
Četnost*	16	1	4	6	4	1	0	207
[%]*	-	6,3 %	25 %	37,5 %	25 %	6,3 %	0 %	

⁹¹ Registrační značka letadla nad tabulkou značí, pro které letadlo byla počítána poloha.

EI-FTD

4/4

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	39	1	4	5	5	6	18	235
[%]	-	2,6 %	10,3 %	12,8 %	12,8 %	15,4 %	46,2 %	
Četnost*	16	1	4	4	4	3	0	207
[%]*	-	6,3 %	25 %	25 %	25 %	18,8 %	0 %	

4.2.1.2 Metoda prvních hodnot

Tabulka 17: Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda prvních hodnot (4/4)

EI-EKD

1/4

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	27	0	6	3	5	6	7	223
[%]	-	0 %	22,2 %	11,1 %	18,5 %	22,2 %	25,9 %	
Četnost*	15	0	6	2	5	2	0	195
[%]*	-	0 %	40 %	13,3 %	33,3 %	13,3 %	0 %	

OE-LWG

2/4

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	29	0	4	3	7	9	6	223
[%]	-	0 %	13,8 %	10,3 %	24,1 %	31,0 %	20,7 %	
Četnost*	17	0	4	3	7	3	0	211
[%]*	-	0 %	23,5 %	17,6 %	41,2 %	17,6 %	0 %	

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	39	1	5	5	6	6	16	235
[%]	-	2,6 %	12,8 %	12,8 %	15,4 %	15,4 %	41,0 %	
Četnost*	16	1	5	5	5	0	0	203
[%]*	-	6,3 %	31,3 %	31,3 %	31,3 %	0 %	0 %	

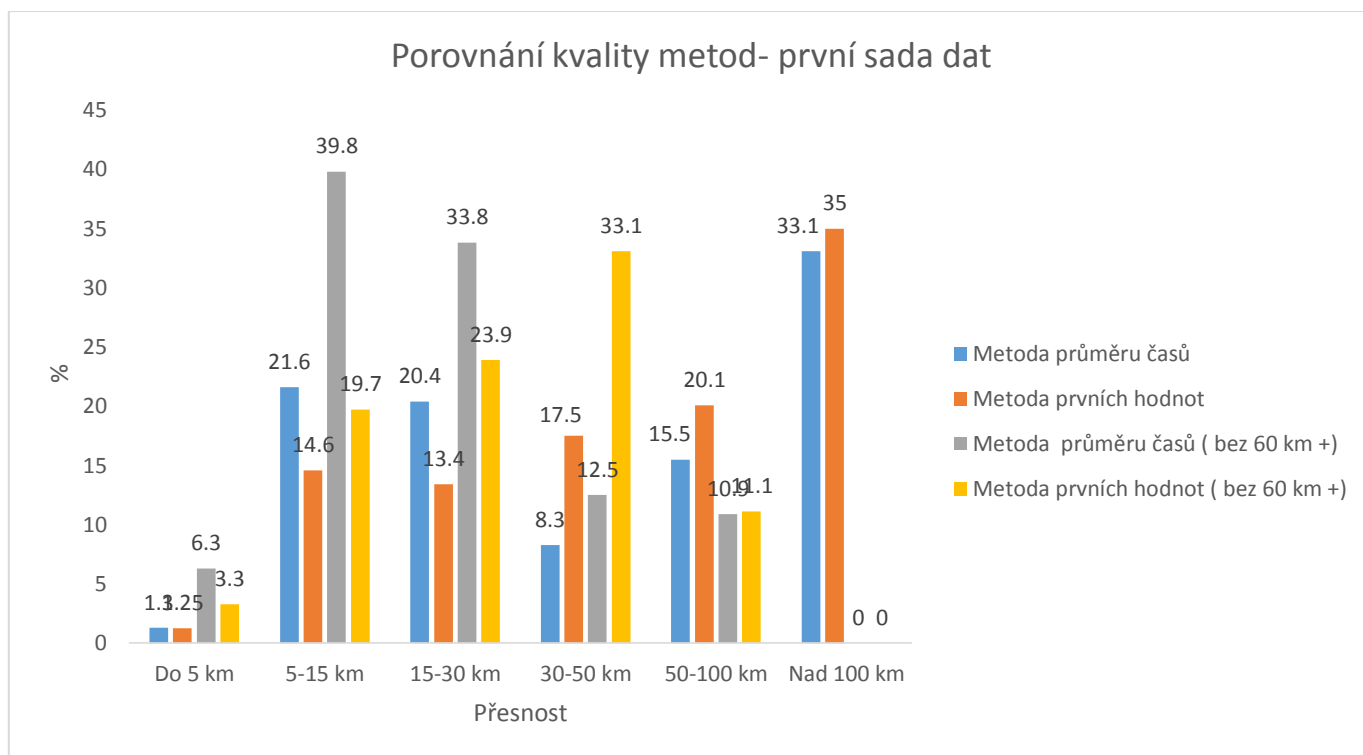
	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	42	1	4	5	5	5	22	235
[%]	-	2,4 %	9,5 %	11,9 %	11,9 %	11,9 %	52,4 %	
Četnost*	15	1	3	5	4	2	0	229
[%]*	-	6,7 %	20 %	33,3 %	26,7 %	13,3 %	0 %	

4.2.1.3. Vyhodnocení výsledků výpočtů a porovnání metody průměru časů a metody prvních hodnot pro první sadu dat

Z výsledných hodnot plyne, že použitá metoda stanovení polohy letadla není dostatečně přesná. Přibližně 70 % hodnot vypočtených metodou průměru časů, z nichž jsou vyloučeny hodnoty, které jsou o více jak 60 km vzdálenější ADS-B letadlu, se nachází do 30 km od reálné polohy. Rozborem důvodů nízké přesnosti metody se budu zabývat v části práce nazvané Chybová analýza.

Pro porovnání přesnosti zvolených metod jsem zvolil výpočet střední hodnoty procentuálního zastoupení všech letadel v intervalech přesnosti. Níže uvedený graf č. 1 znázorňuje všechny polohové hodnoty a zároveň i polohové hodnoty, z nichž byly vyloučeny hodnoty, které jsou vzdálenější ADS-B letadlu o více jak 60 km.

Graf 1: Porovnání kvality vypočtených dat ve vztahu k reálným datům – první sada dat



V uvedeném grafu se nachází střední hodnoty procentuální četnosti ze všech letadel z první sady dat v intervalech přesnosti. Je zřejmé, že metoda průměru přináší relativně lepší výsledky než metoda první hodnoty, která je naopak více zastoupena v méně přesných hodnotách. Tato skutečnost platí pro všechny výsledky hodnot, zároveň i pro hodnoty, z nichž jsou vyloučeny hodnoty vzdálenější o více jak 60 km od ADS-B letadla.

4.2.2 Druhá sada dat

Druhá sada dat je do počtu dvojic letadel o poznání rozsáhlejší. Zvolil jsem následující dvojice letadel.

- PH-BFL A7-BAQ
- A7-BAQ PH-BFL
- G-ZBKA A7-ALO
- A7-ALO G-ZBKA
- G-CIVP D-ASTR
- D-ASTR G-CIVP

- PH-CKB A6-EUL
- A6-EUL PH-CKB
- A6-EYL A9C-KA
- A9C-KA A6-EYL

4.2.2.1 Metoda průměru časů

Tabulka s vyhodnocením určení přesnosti polohy metodou průměru časů je uvedena v tištěné příloze č. 2.

4.2.2.2 Metoda prvních hodnot

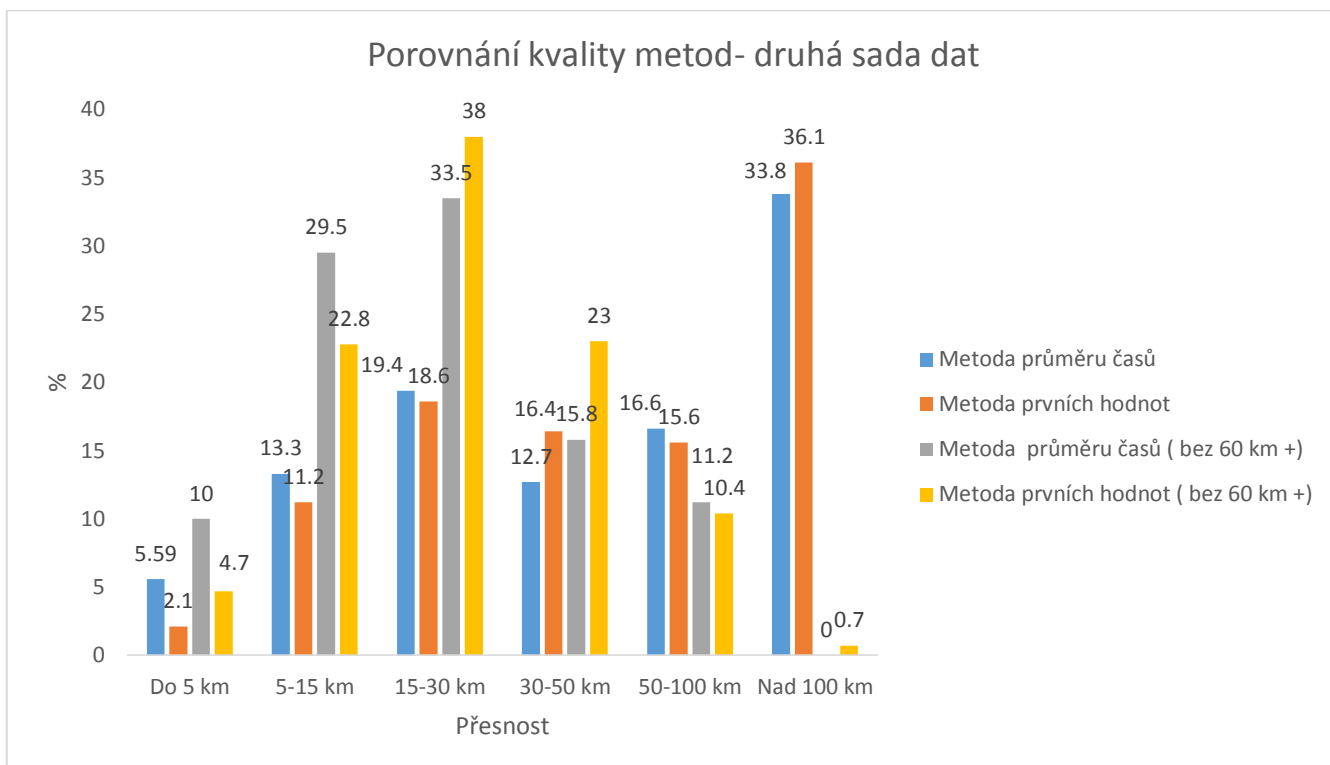
Tabulka s vyhodnocením určení přesnosti polohy metodou prvních hodnot je uvedena v tištěné příloze č. 3.

4.2.2.3 Vyhodnocení výsledků výpočtů a porovnání metody průměru časů a metody prvních hodnot pro druhou sadu dat

Z výsledných hodnot opět plyne, že použitá metoda stanovení polohy letadla není dostatečně přesná. Přibližně 70 % hodnot vypočtených metodou průměru časů, z nichž jsou vyloučeny hodnoty, které jsou o více jak 60 km vzdálenější ADS-B letadlu, se nachází do 30 km od reálné polohy.

Níže uvedený graf nabízí srovnání relativní přesnosti obou metod. Opakovaně byla jako měřítko kvality uvažována střední hodnota ze všech uvažovaných letadel z druhé sady v uvedených intervalech přesnosti.

Graf 2: Porovnání kvality vypočtených dat ve vztahu k reálným datům – druhá sada dat



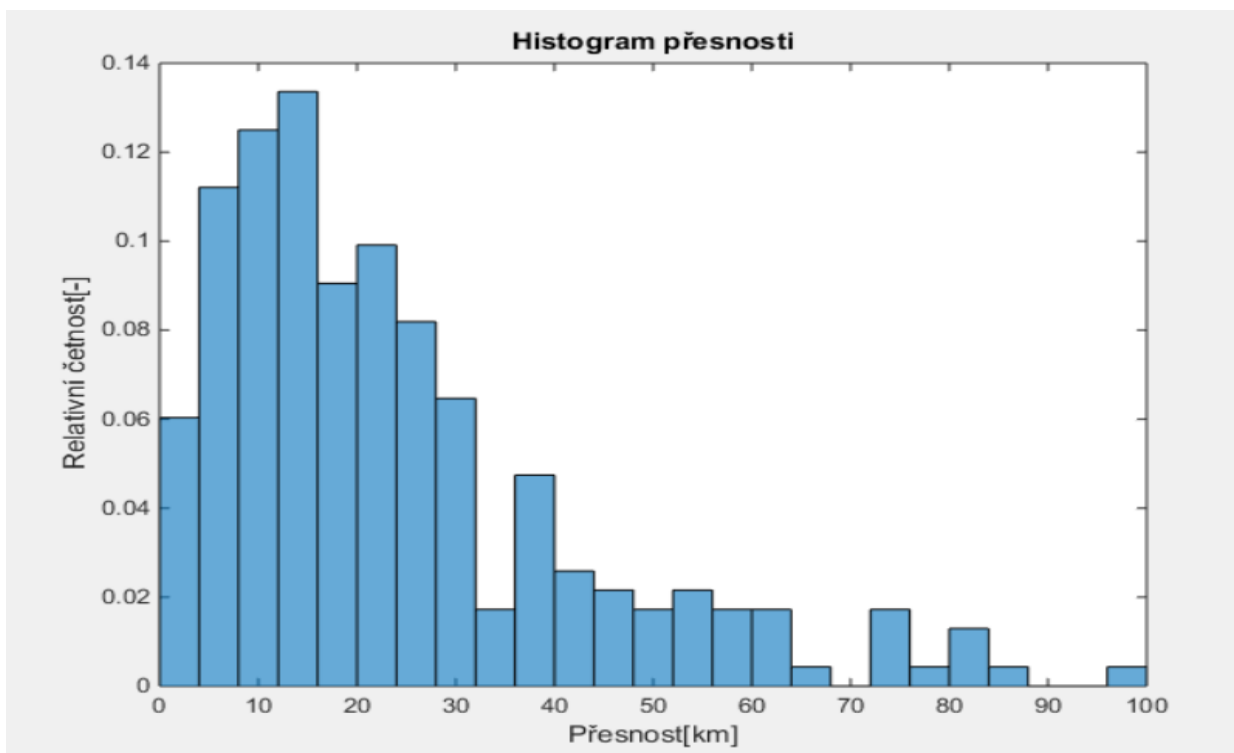
Z grafu názorně plyne, že podobně jako u první sady dat, metoda průměru přináší lepší výsledky než metoda prvních hodnot.

4.2.3 Histogram pro metodu průměru časů

Níže je histogram přesnosti pro metodu průměru časů ze všech vypočtených hodnot (celkem 232 hodnot), z nichž jsou vyloučeny hodnoty vzdálenější ADS-B letadlu o 60 km.

Histogram naznačuje rozložení relativní četnosti v závislosti na přesnosti. Je zřejmé, že do přesnosti 30 km se nachází přibližně 70 % hodnot.

Graf 3: Histogram přesnosti



5 Chybová analýza

Z výše uvedených grafů a tabulek je vyplývá, že mnou zkoumaná komplementární pasivní metoda monitorování cílů nepřináší uspokojivé výsledky. V porovnání s požadavky na přesnost sledování sekundárního radaru nebo WAM jsou výsledky zcela nedostatečné. V následující kapitole bude proveden rozbor chyb a dalších okolností, které do výpočtu více či méně vstupují a které negativně ovlivňují jeho výsledky ve vztahu k reálným polohovým datům.

Testovaná komplementární pasivní metoda produkuje údaje o poloze letadla zcela odlišným způsobem než stávající přehledové systémy. Zároveň tato metoda využívá data generovaná stávajícími systémy. Není proto ani teoreticky možné, aby přesnost určení polohy letícího cíle komplementární metodou byla vyšší než přesnost výsledků systémů, které jsou k tomu přímo uzpůsobené.

Chyby jsem seřadil v pořadí od nejvíce závažných po nejméně závažné:

- Chyba v dotazovacím svazku
- Vliv geometrické konstelace radarů při aktuálním nasměrování jejich azimutů
- Chyba způsobená nepřijetím odpovědí letadel radarům ve stejný čas
- Chyba určení period otáčení radarů
- Chyba průsečíku geodetických křivek na elipsoidu
- Chyba hodin přijímače
- Chyba lineární interpolace
- Chyba iterace
- Chyba polohy radarů.

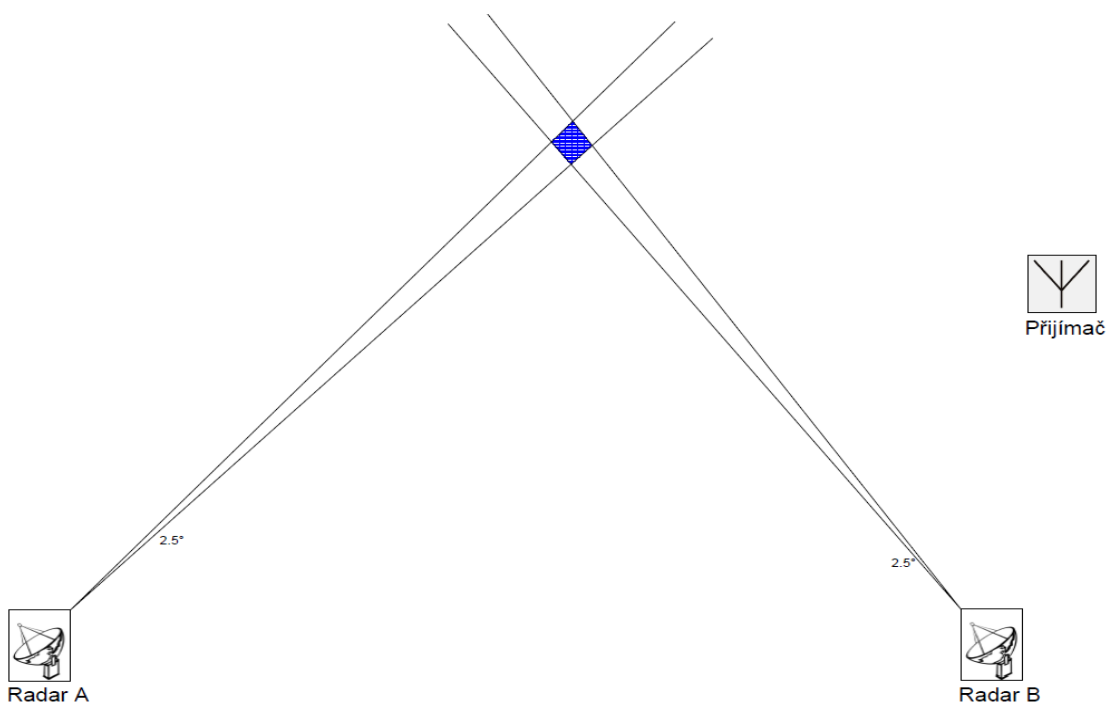
5.1 Chyba v dotazovacím svazku a nepřesnost vlivem geometrické konstelace radarů při aktuálním nasměrování jejich azimutů

Za mimořádně závažné považuji první dvě z vyjmenovaných chyb. Obě vysvětlím a popíšu společně, neboť jsou na sobě závislé. Konstatuji, že je považuji za hlavní příčinu, proč komplementární metoda nepřináší uspokojivé výsledky.

Komplementární metoda využívá stávající radarovou infrastrukturu. Ta byla budována v minulých časech bez koordinace s dalšími zeměmi. Radary tak nejsou rozmístěny optimálně, ale podle dobových kritérií.

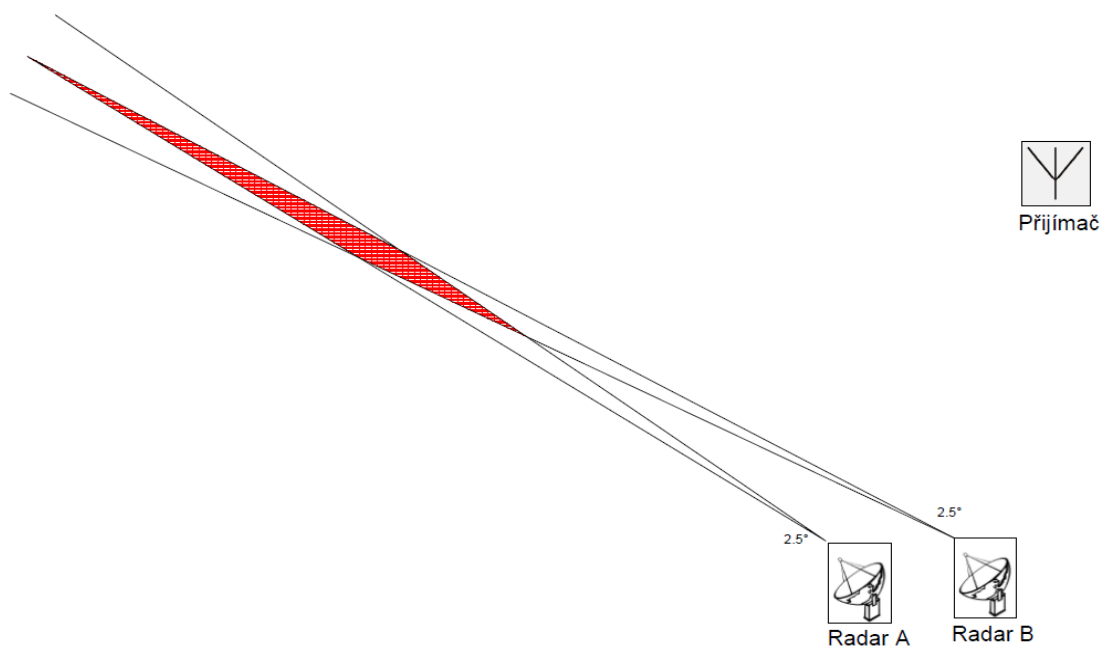
Jak již bylo řečeno, radary, které pro výpočty používám, jsou od zkoumaného i referenčního cíle velmi vzdálené, neboť se musí nacházet mimo Lockout pokrytí. Je-li letadlo v dotazovacím svazku, který je široký standardně 2.5° , potom se pro vzdálenosti ve stovkách kilometrů jedná o kilometrové hodnoty. Jen pro ilustraci. Nachází-li se letadlo v dotazovacím svazku ve vzdálenosti 200 km od radaru, za předpokladu, že je tento svazek 2.5° široký, může se letadlo nacházet v oblasti, která je přibližně 8 km široká. Na problematiku je možné pohlížet stejně jako u systému WAM, kde výsledná přesnost závisí na geometrické konstelaci přijímacích stanic.

Pro názornost prezentuji na následujících dvou obrázcích, jak může chyba v dotazovacím svazku, kterou jsem ohodnotil 1.25° ⁹², ovlivnit výpočet přesnosti v případě dvou různých geometrických konstelací radarů. Obrázek č. 28 prezentuje vhodnou geometrickou konstelaci a vhodné natočení radarů, obrázek č. 29 ukazuje konstelaci nevhodnou a zároveň i nevhodné natočení azimutů. V níže uvedených obrázcích se letadlo může nacházet kdekoliv v barevně vyznačené ploše - modré pro dobrou geometrickou konstelaci, červené pro nevhodnou geometrickou konstelaci.



Obrázek 28: Chybová oblast při dobré geometrické konstelaci radarů a vhodném natočení radarů

⁹² Předpokládám, že letadlo leží uprostřed svazku. Chyba je 1.25° doleva i doprava od středu svazku. Z toho důvodu je chybový dotazovací svazek 2.5° široký.



Obrázek 29: Chybová oblast při nevhodné geometrické konstelaci radarů a nevhodném natočení radarů

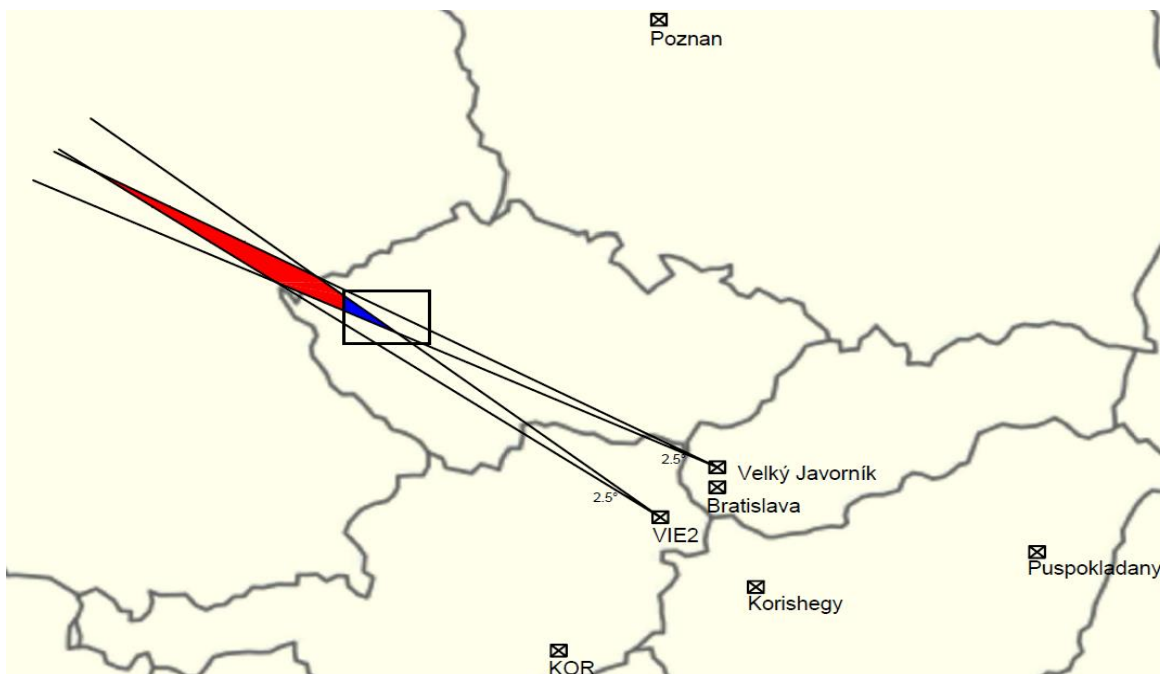
Výsledná chybová oblast je funkcí převážně chyb v dotazovacím svazku, umocněná geometrickou konstelací radarů a aktuálním natočením azimutů radarů. Tato oblast je ohraničena následujícími body:

- průsečíkem azimutů dotazovacích svazků, kde jsou oba azimuty posunuty o + „chybu“,⁹³
- průsečíkem azimutů dotazovacích svazků, kde jsou oba azimuty posunuty o – „chybu“,
- průsečíkem azimutů dotazovacích svazků, kde jeden azimut je posunut o + „chybu“, druhý o – „chybu“,
- průsečíkem azimutů dotazovacích svazků, kde jeden azimut je posunut o – „chybu“, druhý o + „chybu“.

Pro ilustraci přikládám mapu střední Evropy s vyznačenými dotazujícími se radary. Z první a druhé sady dat jsem používal pro určení polohy převážně radary VIE2, Korishegy, Velký Javorník a KOR. Na přiložené mapě je vyznačena chyba pro radary VIE2 a Velký Javorník, které se ukázaly v první a druhé sadě dat jako nejvíce četné. Chyba v dotazovacím svazku je opět odhadnuta na 1.25°.

⁹³ Chybou je myšlena chyba v dotazovacím svazku.

Vyznačený obdélník představuje sledovanou zónu. Modrý výsek v rámci obdélníku, vyznačuje chybovou oblast uvnitř plochy, kde se letadlo nacházelo. Červený útvar, podstatně větší, je chybovou oblastí mimo zónu výskytu letadla.



Obrázek 30: Geometrická konstelace radarů, které byly nejčastěji využity ve výpočtech

Chybu v dotazovacím svazku je možno na základě známých poloh letadla snadno vypočítat. Mnou zjištěné azimuty nereferenčního letadla, ze kterých jsem počítal polohy, srovnám s azimuty stejného letadla, které jsou vztažené k ADS-B polohám tohoto letadla. Je možné tedy určit, jaká je střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku. Tato chyba⁹⁴ je spočtena jako absolutní hodnota rozdílu skutečného azimutu od přepočteného azimutu.

V níže uvedených tabulkách č. 18 a 19 jsou vypočteny tyto chyby v dotazovacím svazku. Chyby jsou vyjádřeny opět pro první i druhou sadu dat a pro stejné dvojice letadel, jako v případě určování poloh letadel. Chyba je spočtena pro metodu průměru i metodu prvních hodnot. Chyba v dotazovacím svazku je spočtena pouze pro polohové hodnoty, jejichž vzdálenost od ADS-B letadla v tom čase, pro který je spočtena polohová hodnota, bude nižší než 60⁹⁵ km.

⁹⁴ Je zjevné, že pro jednu vypočtenou polohu jsou potřeba dva „azimuty“. Z tohoto důvodu je střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku počítána z dvojnásobného počtu údajů, než kolik je spočtených poloh.

⁹⁵ Jedná se o identický princip, jaký byl použit u výpočtu polohy letadla.

Tabulka 18: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro první sadu dat - metoda průměru časů

Letadlo	EI-EKD	OE-LWG	OE-LWG	EI-FTD
Střední hodnota	0,8768	0,8187	0,8851	1,0460
Směrodatná odchylka	0,5428	0,5895	0,5931	0,7030

Tabulka 19: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro první sadu dat - metoda prvních hodnot

Letadlo	EI-EKD	OE-LWG	OE-LWG	EI-FTD
Střední hodnota	0,5365	1,0411	0,9486	1,0395
Směrodatná odchylka	0,7966	0,6813	0,8140	0,7688

Tabulka 18 a 19 udává vypočtené střední hodnoty a směrodatné odchylky chyb v dotazovacím svazku. Metoda průměru, jako přesnější metoda pro počítání polohy, vykazuje menší střední hodnotu chyby. Zároveň i směrodatná odchylka je menší než u metody prvních hodnot.

Obdobné údaje pro druhou sadu dat jsou uvedeny v tabulkách č. 20 a 21.

Tabulka 20: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro druhou sadu dat - metoda průměru časů

1/2

Letadlo	PH-BFL	A7-BAQ	G-ZBKA	A7-ALO	G-CIVP
Střední hod.	0,8486	0,9554	0,6862	0,6690	0,8833
Směr. odchyl.	0,7426	0,8193	0,4986	0,5095	0,8178

2/2

D-ASTR	PH-CKB	A6-EUL	A6-EYL	A9C-KA
0,8835	1,0850	1,0460	1,1369	1,2494
0,8590	0,7306	0,6862	0,7972	0,9853

Tabulka 21: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro druhou sadu dat - metoda prvních hodnot

1/2

Letadlo	PH-BFL	A7-BAQ	G-ZBKA	A7-ALO	G-CIVP
Střední hod.	1,2534	1,1696	0,8737	0,7045	0,8484
Směr. odchyl.	0,9007	0,7395	0,8712	0,6029	0,7556

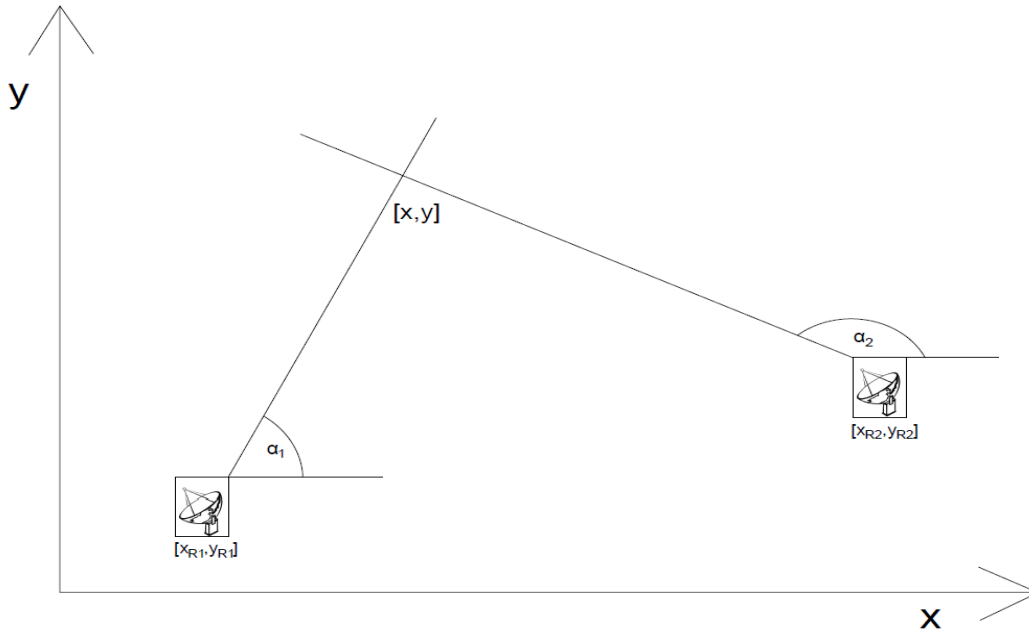
2/2

D-ASTR	PH-CKB	A6-EUL	A6-EYL	A9C-KA
1,1723	1,1967	1,1894	1,2211	1,3752
1,0848	0,9404	1,0410	1,0071	1,2514

Prostým porovnáním údajů z tabulek se ukazuje, že obdobně jako u první sady dat, i u druhé sady, je metoda průměru časů spolehlivější.

5.1.1 Chybový model geometrické konstelace radarů

Podobně jako u WAM, i v případě komplementární pasivní metody, lze zkonstruovat chybový model, který lze popsat v případě roviny následující nelineární soustavou dvou rovnic, jež vychází z níže uvedeného obrázku č. 31.



Obrázek 31: Nákres k chybovému modelu

$$\alpha_1 + \varepsilon_{\alpha_1} = \arctan\left(\frac{y-y_{R1}}{x-x_{R1}}\right) \quad (8)$$

$$\alpha_2 + \varepsilon_{\alpha_2} = \arctan\left(\frac{y-y_{R2}}{x-x_{R2}}\right) \quad (9)$$

Kde α_1 a α_2 jsou azimuty radaru 1 a radaru 2, ε_{α_1} a ε_{α_2} jsou chyby měřených hodnot. Předpokládáme o nich, že jsou nezávislé, popsané normálním rozdělením se střední hodnotou 0 a stejným rozptylem σ^2 . x a y jsou souřadnice letadla, x_{R1} , y_{R1} a x_{R2} , y_{R2} jsou zeměpisné souřadnice radaru 1, respektive 2.

Uvedenou nelineární soustavu rovnic lze linearizovat s pomocí Taylorova rozvoje 1. řádu, který pro výše uvedené rovnice vypadá následovně.

$$\alpha_1 + \varepsilon_{\alpha_1} = \arctan\left(\frac{y-y_{R1}}{x-x_{R1}}\right) + \left(\frac{-(y-y_{R1})}{(x-x_{R1})^2+(y-y_{R1})^2}\right) \cdot \Delta x + \left(\frac{(x-x_{R1})}{(x-x_{R1})^2+(y-y_{R1})^2}\right) \cdot \Delta y \quad (10)$$

$$\alpha_2 + \varepsilon_{\alpha_2} = \arctan\left(\frac{y-y_{R2}}{x-x_{R2}}\right) + \left(\frac{-(y-y_{R2})}{(x-x_{R2})^2+(y-y_{R2})^2}\right) \cdot \Delta x + \left(\frac{(x-x_{R2})}{(x-x_{R2})^2+(y-y_{R2})^2}\right) \cdot \Delta y \quad (11)$$

Kde členy u $\Delta \mathbf{x}$ a $\Delta \mathbf{y}$ jsou parciální derivace podle \mathbf{x} , respektive podle \mathbf{y} . Linearizované rovnice lze maticově zapsat takto.

$$\begin{bmatrix} \Delta \alpha_1 \\ \Delta \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{-(y-y_{R1})}{(x-x_{R1})^2+(y-y_{R1})^2} \right) & \left(\frac{x-x_{R1}}{(x-x_{R1})^2+(y-y_{R1})^2} \right) \\ \left(\frac{-(y-y_{R2})}{(x-x_{R2})^2+(y-y_{R2})^2} \right) & \left(\frac{x-x_{R2}}{(x-x_{R2})^2+(y-y_{R2})^2} \right) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{\alpha 1} \\ \varepsilon_{\alpha 2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Kde matice s parciálními derivacemi představuje matici dále označovanou jako \mathbf{G} . Obecně lze chybový model zapsat níže uvedenou rovnicí.

$$\vec{y} + \vec{\varepsilon}_\alpha = \mathbf{G} * \vec{x} \quad (13)$$

Kde $\vec{\varepsilon}_\alpha$ představuje chyby měřených hodnot, které jsou nezávislé, popsané normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou a stejným rozptylem σ^2 .

Chyba $\vec{\varepsilon}_x$ (chyba vektoru \vec{x}) je náhodným vektorem popsaným vektorem středních hodnot a kovarianční matricí. Střední hodnota $\vec{\varepsilon}_x$ je po odvození dána následující rovnicí.

$$E(\vec{\varepsilon}_x) = [0 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (14)$$

Rozptyl neboli kovarianční matici \mathbf{Q} vektoru vypočtených chyb $\vec{\varepsilon}_x$ lze po odvození spočítat touto rovnicí.

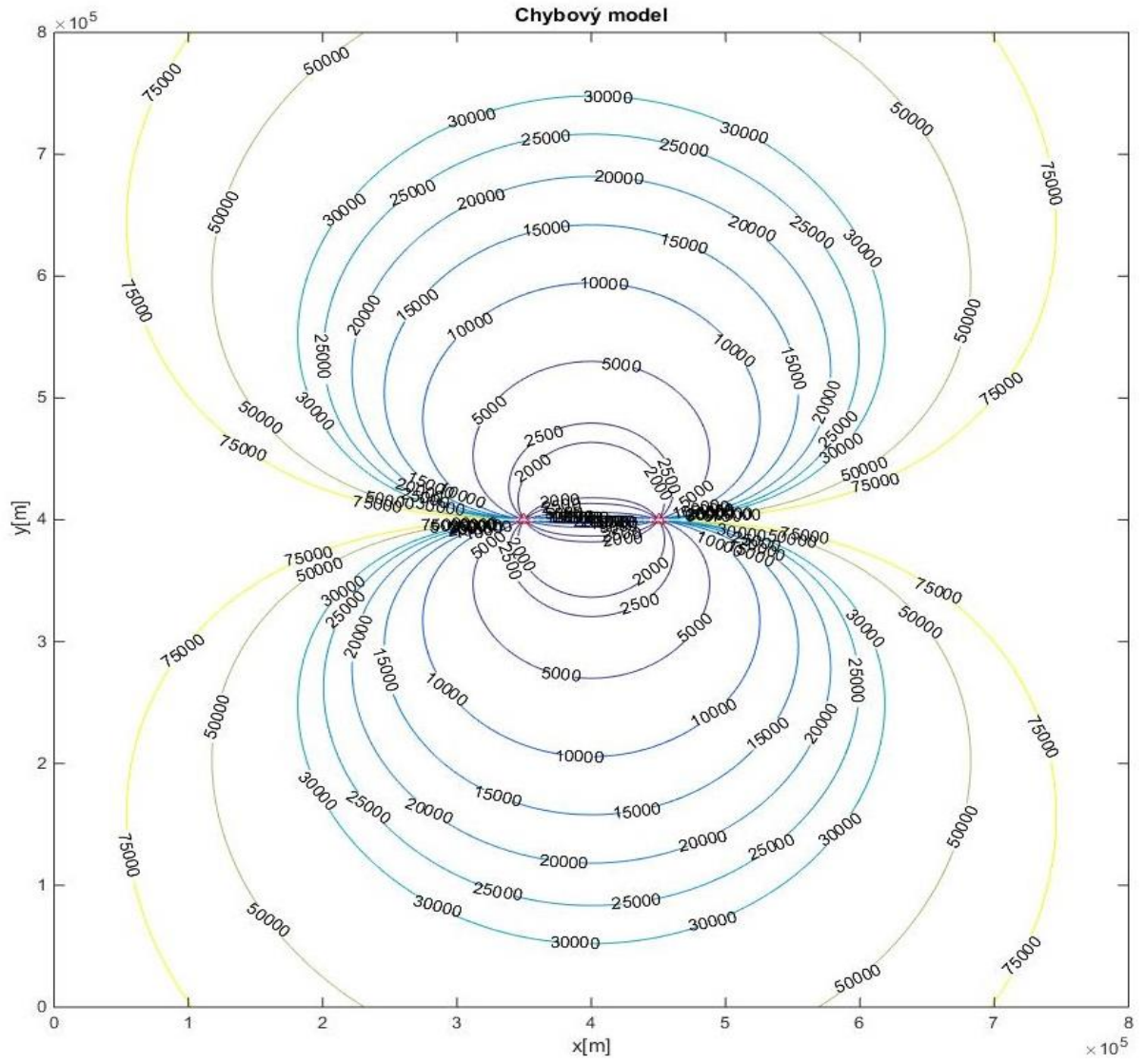
$$\mathbf{Q} = (\mathbf{G}^T * \mathbf{G})^{-1} * \sigma^2 \quad (15)$$

Pro každé místo v prostoru je možno spočítat kovarianční matici \mathbf{Q} vektoru chyb $\vec{\varepsilon}_x$. Dle tohoto postupu byl sestaven obecný chybový model komplementární pasivní metody monitorování cílů, jehož výsledky jsou prezentovány na níže uvedených obrázcích č.32 a 33. Příslušná kódy v jazyce Matlab je uveden v tištěné příloze č. 2.

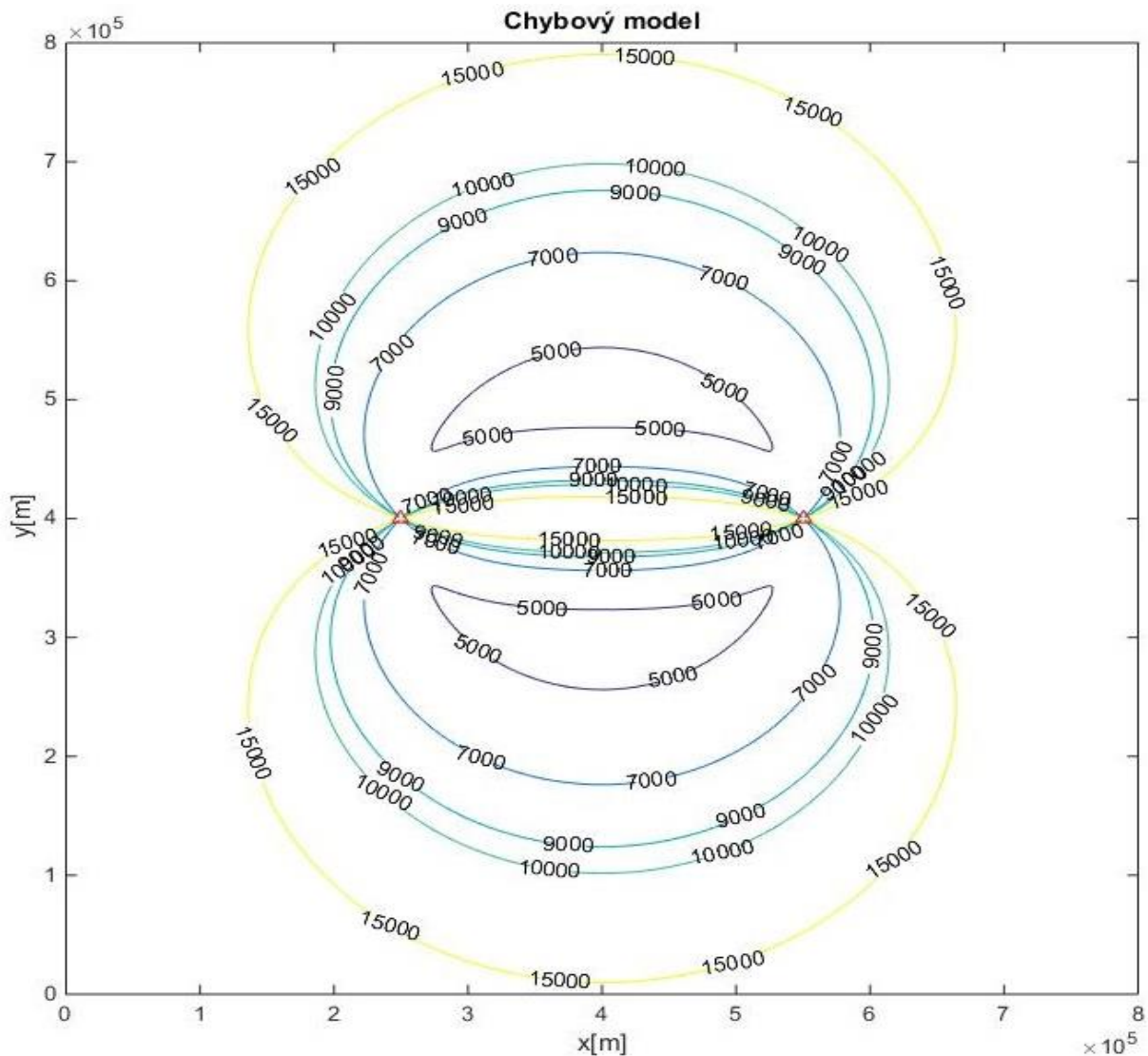
Na prvním obrázku jsou dotazující se radary v konstelaci blízko u sebe (100 km). Na druhém jsou radary od sebe vzdáleny 300 km. Radary jsou prezentovány červenými trojúhelníky. Chyba v dotazovacím svazku je 1° (0.017 radiánu). Spojené křivky jsou místa se stejnou chybou, která je dána číslem na křivce v metrech. Jedná se o horizontální chybu označovanou jako DRMS, která je dána níže uvedenou rovnicí.

$$DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (16)$$

Kde σ_x^2 a σ_y^2 jsou prvky z diagonály kovarianční matice \mathbf{Q} .



Obrázek 32: Rozložení chybových pásem, varianta: radary blízko u sebe



Obrázek 33: Rozložení chybových pásem, varianta: radary daleko od sebe

Z chybového modelu plynou tyto závěry:

- komplementární metoda je zatížena relativně nejmenší chybou u cílů, které se nachází na kolmici vedené ke středu spojnice⁹⁶ radarů. V ostatních případech přesnost klesá.
- přesnost závisí na úhlu mezi azimuty radarů, přičemž úhel 90° mezi azimuty je úhel, kdy je přesnost nejvyšší. Čím ostřejší a čím tupější úhel mezi azimuty radarů, tím nižší přesnost.

⁹⁶ Z obrázků je zřejmé, že na kolmici se mohou nacházet místa se stejnou přesností daleko i blízko od radarů. Je to způsobené tím, že pro místa daleko od radarů, kdy je úhel mezi azimuty ostrý, a pro místa blízko radarů, kdy je úhel mezi azimuty tupý, je výsledná chybová oblast stejně velká. Pro mou metodu ale stejně platí, že letadla se musí nacházet mimo Lockout pokrytí, takže daleko od dvojice radarů.

5.2 Vyhodnocení méně závažných chyb

Chyba způsobená nepřijetím odpovědí letadel radarům ve stejný čas:

Tato chyba vzniká tak, že dotazující radary se dotazují letadla nezávisle na sobě a tím i odpovědi letadel těmto radarům přichází na zem v různé časy. Tato chyba byla korigována způsobem, že z výpočtu polohy byly vyloučeny všechny časové rozdíly větší než 0.5 s.

Chyba určení period otáčení radarů:

Určení period otáčení navrženými dvěma metodami je zjednodušením reality a je zatíženo obtížně specifikovatelnou chybou. V případě střední hodnoty (průměru) je chyba způsobena tím, že vypočtená střední hodnota nemusí nutně znamenat nalezení skutečného středu laloku. I když je střední hodnota počítána z velkého množství vzorků, což chybu minimalizuje, není zcela odstraněna. U metody první hodnoty platí, že se nemusí nutně jednat o první hodnotu v radarovém svazku.

Chyba průsečíku geodetických křivek na elipsoidu:

Chyba vnášená za pomoci gnómonické projekce na elipsoidu je v řádu desítek metrů.

Chyba hodin přijímače:

Přesnost hodin přijímače je velice důležitý údaj například pro systém WAM, který je na rozdíl příchodu časů postaven. V případě zkoumané metody je chyba hodin přijímače zanedbatelná. Pro příklad uvádím, že například za 1 ms se radar s periodou otáčení 4 s otočí o 0.09° . Přijímače měří čas s podstatně vyšší přesností, takže tato chyba výsledek nijak neovlivňuje.

Chyba lineární interpolace:

Chyba lineární interpolace se promítá do určení period otáčení radarů a rovněž i do konečného výpočtu poloh. Vzhledem k tomu, že letadlo se pohybuje pod stále stejným azimutem a stejnou rychlostí, nebude lineární interpolace vkládat významnou chybu. Uvažuji, že je možné ji zanedbat.

Chyba iterace:

V kapitole 3.4.3 je zmíněno kritérium iterace, které jsem pro určení průsečíku geodetických křivek na elipsoidu použil. Považuji toto kritérium za natolik přesné, že chyba vnášená do výpočtu tím, že iterace neprobíhá déle, je zanedbatelná.

Chyba polohy radarů:

Polohy všech radarů, se kterými provádím výpočet, jsou uvedeny s přesností na minimálně 5 desetinných míst, což je přesnost v řádu metrů. Domnívám se, že o kvalitě této informace není třeba pochybovat, a proto považuji význam možné chyby za zanedbatelný.

Závěr

Monitorování cílů v letecké dopravě je postaveno na kombinaci několika systémů, které se vzájemně doplňují a současně fungují jako záloha pro případ technických a jiných obtíží některého z nich. Primární radarový dohled je nahrazován kooperativními systémy, mezi nimiž na evropském kontinentu dominuje mód S. Alternativními systémy dohledu jsou WAM a ADS-B. Vývoj směřuje k doplnění stávajících systémů o satelitní monitoring ve spojení s ADS-B.

Pro naplnění zadání diplomové práce jsem se věnoval pouze některým dílčím aspektům výše uvedených kooperativních systémů, a to s úmyslem objasnit okolnosti, které jsou rozhodující pro konstrukci komplementární pasivní metody monitorování cílů. Podrobněji jsem rozebral strukturu všeobecného dotazu mód S, strukturu odpovědi na tento dotaz, princip All-Call a Roll-Call fáze. ADS-B systém jsem představil z pohledu přijímací stanice, když jí přijaté informace jsem využil pro výpočty v rámci testování komplementární metody.

Samotná komplementární metoda sledování cílů je teoretickým konceptem. Pro ověření její funkčnosti bylo nutné navrhnout ucelený postup, který zahrnuje řadu kroků.

- Jako první bylo třeba identifikovat relevantní mód S radary, které se nacházejí v dostatečně vzdáleném okruhu, aby s dohlíženými letadly komunikovaly pouze mimo Lockout pokrytí.
- V dalším kroku bylo zapotřebí z přijatých DF 11 identifikovat IC kódy a přiřadit je relevantním radarům. Samotné přiřazení radarů bylo provedeno výběrem na základě znalosti geografického umístění radarů a jejich IC kódů přiřazených pro daný MICA cyklus. Ověření správnosti výběru bylo konfrontováno porovnáním s údaji o projektovaném Lockout pokrytí.
- Zároveň byly shromážděny potřebné informace ohledně zeměpisných souřadnic a periodě otáčení. Ukázalo se, že skutečný čas otáčení se liší od deklarované otočky, což má své důvody. Pro určení reálného času otáčení jsem vypracoval dvě metody, které jsem pak ve výpočtové části práce využíval a ověřoval jejich přesnost. Jedná se o metodu zohledňující zprůměrované časové údaje o přijetí DF 11 a dále o metodu využívající první časový údaj přijetí DF 11. Vypočtené údaje potvrdily, že vypočtený čas otočky se nepatrně odlišuje od deklarovaného času uváděného v technické dokumentaci.
- Po stanovení času otočky radaru bylo možné přistoupit k výpočtu azimutu radaru vůči nereferečnímu letadlu. Pro jeho určení byly použity obě výše uvedené metody určení času otočky radaru.

- Posledním přípravným krokem před samotným zpracováním dat bylo stanovení výpočtu pro určení polohy letadla v prostoru. Pro tento účel byl zvolen výpočet polohy na elipsoidu.

Výpočet samotný byl proveden za použití software Matlab®. V jeho rámci byla sestavena soustava skriptů, které umožnily zpracování velkých objemů dat. Vyhodnocení výsledků jsem provedl statisticky, kdy jsem sledoval odchýlení vypočtené polohy od skutečné polohy v definovaných pásmech.

Vypočtené výsledky použité metody ukazují následující:

- Použitá metoda v navržené podobě nabízí pouze orientační určení polohy letadla. V dané konfiguraci není použitelná jako alternativa či doplněk stávajících vysoce přesných kooperativních systémů.

- Porovnání vypočtených hodnot se skutečnými údaji o poloze letadel ukazuje, že přibližně 70 % hodnot se nachází v intervalu do 30 km.

- Z použitých metod výpočtu periody otáčení radaru je nepochybně přesnější metoda průměru časových hodnot. Nutno upozornit, že i tato metoda obsahuje zjednodušení, které se svým dílem projevuje jako nepřesnost.

Pro zdůvodnění velkého rozptylu nepřesnosti jsem vypracoval chybovou analýzu. Komplementární metoda, jako metoda výpočtová, je zatížena řetězcem nepřesností vstupních údajů. Jako dominantní jsem identifikoval chybu v dotazovacím svazku v kombinaci s nepřesností vlivem geometrické konstelace radarů při aktuálním nasměrování jejich azimutů. Výsledná přesnost metody je odvozena od geometrického uspořádání radarů, při jejich aktuálním natočení azimutů.

Z chybového modelu geometrické konstelace vyplynulo, že:

- komplementární metoda je zatížena relativně nejmenší chybou u cílů, které se nachází na kolmici vedené ke středu spojnice radarů,

- přesnost závisí na úhlu mezi azimuty radarů, přičemž úhel 90° mezi azimuty je úhel, kdy je přesnost nejvyšší. Čím ostřejší a čím tupější úhel mezi azimuty radarů, tím nižší přesnost.

Přestože zkoumání komplementární metody nepřineslo výsledek ve formě nalezení nového přehledového postupu, přispělo alespoň k jejímu lepšímu pochopení. Otevírá také příležitost metodou se dále zabývat. Za ověření by stála myšlenka provést výpočet s použitím údajů z více jak dvou radarů nebo nalézt metodu, jak provést výpočet za pomoci odpovědí letadel radarům, v nichž nejsou obsaženy IC kódy.

Seznam použité literatury

Monografie

BEZOUŠEK, P., ŠEDIVÝ, P. *Radarová technika*. Vyd. 1. Praha: ČVUT v Praze, 2004. 217 s. ISBN 80-01-03036-9

Kolektiv autorů. *Skripta pro základní výcvik specialistů technických systémů*, díl 3. Vyd. 2. Praha: ŘLPČR s.p., 2008.

Ostatní zdroje

KONEČNÝ, F. *Zmapování reálných parametrů kooperativních přehledových systémů*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.

PLENINGER, S. *CNS Systémy*. Přednáškový kurz. 2017. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.

ŠÍMA, J. *Mapování přehledové infrastruktury analýzou příjmu SSR odpovědí od letadel*. Praha 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.

Prameny

L10/IV, opatření Ministerstva dopravy ČR č. j. 1285/2003-220-SP/1 ze dne 5. 12. 2003. Předpis o civilní letecké telekomunikační službě, svazek IV – přehledový radar a protisrážkový systém.

Internetové zdroje

ADS-B Academy. Dostupné na: <https://www.garmin.com/us/intheair/ads-b/squit/>

EUROCONTROL. Principles of Mode S Operation and Interrogator Codes [on line]. 2003, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:

<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-modes-principles-of-modes-operation-and-interrogator-codes-20030318.pdf>

EUROCONTROL. European Mode S Station Coverage Map Interface Control Document [on line]. 2005, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/surveillance/surveillance-document-mode-s-station-coverage-map-interface-control-20050509.pdf>

EUROCONTROL. Specification for the Mode S IC Allocation Coordination and IC Conflict Management [on line]. 2013, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/20130614-mica-spec-v1.0.pdf>

Federal Aviation Administration, Equip ADS-B [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné na:
<https://www.faa.gov/nextgen/equipadsb/airspace/>

IAA. Space-Based ADS-B Projects [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/events/presentation/16-space-based-adsb-oloughlin.pdf>

ICAO. European Principles and Procedures for the Allocation of Secondary Surveillance Radar Mode S Interrogator Codes (IC) [on line]. 2011, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EANPG%20Reports/EANPG%2053/EANPG53_App_F%20-%20EUR%20Doc%20024%20-%20proposal.pdf

ICAO. Ground Stations and Multilateration. Thales Air Systems GmbH. [on line]. 2012, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_SEA_BOB_ADSB_WG8/SP02_Thales%20ADS-B%20Ground%20Stations%20and%20Multi.pdf

Ground Stations and Multilateration. Thales Air Systems GmbH. [on line]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_SEA_BOB_ADSB_WG8/SP02_Thales%20ADS-B%20Ground%20Stations%20and%20Multi.pdf

KARNEY Charles F.F., *Algorithms for Geodesics*. SRI International, 201 Washington Rd, Princeton, NJ 08543-5300, USA. [on line]. 2012, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z:
<https://arxiv.org/pdf/1109.4448.pdf>

KARNEY, Charles, F.,F. GeographicLib [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://geographiclib.sourceforge.io/>

U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Air Traffic Organization Policy, N JO 6191.36 [on line]. 2017, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/notice/n_jo_6191_36.pdf

Wikipedia. Wide area multilateration [on line]. 2018, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wide_area_multilateration

World Geodetic System — 1984 (WGS-84) Manual [on line]. 2002, [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <https://gis.icao.int/egapn/webpdf/REF08-Doc9674.pdf>

Patenty

DONOVAN Timothy P. *Bi-static radar processing for ADS-B sensors*. US8130135 B2. USA.
Dostupné na: <https://patents.google.com/patent/US8130135>

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky:

Obrázek 1: Struktura všeobecného dotazu módu S

Obrázek 2: Struktura odpovědi DF 11 na všeobecnou výzvu módu S

Obrázek 3: Příklad optimalizované konfigurace mód S radaru v čase

Obrázek 4: Příklad ozáření letadla All-Call dotazováním

Obrázek 5: Příklad uspořádání multilaterálního systému WAM

Obrázek 6: Členění WAM systémů podle konfigurací

Obrázek 7: ADS-B konfigurace s nezávislou pozemní stanicí

Obrázek 8: ADS-B konfigurace s centralizovaným systémem

Obrázek 9: ADS-B pokrytí území USA

Obrázek 10: Buňka, kterou je definováno pokrytí radaru

Obrázek 11: Detail dvou přilehlých buněk a vymezení jejich hranice

Obrázek 12: Bistatické radarové zpracování

Obrázek 13: Komplementární metoda - postavení letadel v čase „t“

Obrázek 14: Komplementární metoda - postavení letadel v čase „t+1“

Obrázek 15: Vyhodnocení pokrytí České republiky radary mód S pro FL 300

Obrázek 16: První sada dat – sekvence přijatých SI kódů od letadla s registrací YR-BAS

Obrázek 17: Geografická alokace identifikovaných radarů

Obrázek 18: Lockout a přehledové pokrytí radarů VIE2

Obrázek 19: Lockout a přehledové pokrytí radarů KOR

Obrázek 20: Lockout a přehledové pokrytí radarů Korishegy

Obrázek 21: Lockout a přehledové pokrytí radarů Puspokladany

Obrázek 22: Lockout a přehledové pokrytí radarů Bratislava

Obrázek 23: Lockout a přehledové pokrytí radarů Velký Javorník

Obrázek 24: Lockout a přehledové pokrytí radarů Poznan

Obrázek 25: SI histogram pro letadlo s registrací EI-EKD

Obrázek 26: Souřadnicový systém WGS84

Obrázek 27: Gnómonická projekce

Obrázek 28: Chybová oblast při dobré geometrické konstelaci radarů a vhodném natočení radarů

Obrázek 29: Chybová oblast při nevhodné geometrické konstelaci radarů a nevhodném natočení radarů

Obrázek 30: Geometrická konstelace radarů, které byly nejčastěji využity ve výpočtech

Obrázek 31: Nákres k chybovému modelu

Obrázek 32: Rozložení chybových pásem, varianta: radary blízko u sebe

Obrázek 33: Rozložení chybových pásem, varianta: radary daleko od sebe

Tabulky:

Tabulka 1: Kódování hodnot pravděpodobnosti

Tabulka 2: Kódování CL pole

Tabulka 3: První sada dat – informace o prolétávajících letadlech

Tabulka 4: První sada dat – informace o četnosti přijatých odpovědí

Tabulka 5: První sada dat – četnost přijatých II kódů

Tabulka 6: První sada dat – četnost přijatých SI kódů

Tabulka 7: Druhá sada dat – informace o prolétávajících letadlech (2/2)

Tabulka 8: Druhá sada dat – informace o četnosti přijatých odpovědí

Tabulka 9: Druhá sada dat – četnost přijatých SI kódů

Tabulka 10: Parametry identifikovaných radarů

Tabulka 11: Normované periody otáčení identifikovaných radarů

Tabulka 12: Výsledky výpočtu periody otáčení radaru využitím průměrného času odpovědi

Tabulka 13: Výsledky výpočtu periody otáčení radaru využitím metody prvních časových hodnot

Tabulka 14: Výsledky výpočtu periody otáčení radaru využitím metody prvních časových hodnot

Tabulka 15: Reálné a vypočtené zeměpisné souřadnice (vzorek dat Matlab)

Tabulka 16: Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda průměrovaných časů (4/4)

Tabulka 17: Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda první hodnoty (4/4)

Tabulka 18: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro první sadu dat - metoda průměru

Tabulka 19: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro první sadu dat - metoda prvních hodnot

Tabulka 20: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro druhou sadu dat - metoda průměru (2/2)

Tabulka 21: Střední hodnota a směrodatná odchylka chyby v dotazovacím svazku pro druhou sadu dat - metoda prvních hodnot (2/2)

Grafy:

Graf 1: Porovnání kvality vypočtených dat ve vztahu k reálným datům – první sada dat

Graf 2: Porovnání kvality vypočtených dat ve vztahu k reálným datům – druhá sada dat

Graf 3: Histogram přesnosti

Komentář ke skriptům a funkcím

Ke zpracování velkého množství dat, které bylo pro mou práci nezbytné, jsem použil software Matlab®. Vytvářet speciální ucelené softwarové řešení nebylo cílem práce, proto jsem zvolil cestu samostatných skriptů, které jsou poskládány z nejrůznějších funkcí⁹⁷. Zde uvádím výčet a stručný popis skriptů, které jsem pro práci vytvořil a které by mohly být pro mé následovníky užitečné a inspirativní. Poznávám, že pro jejich správnou funkci je třeba uložit skript se všemi funkcemi, které využívá, v jedné složce. Celý soubor skriptů s funkcemi uspořádanými tak, aby je bylo možno spouštět, je přiložen v elektronické příloze. Jsou tam k nalezení tyto skripty:

- Uprava_dat_prijimacu
- Periody_radaru_prumer
- Periody_radaru_prvni_hodnota
- Skript_na_polohy_tri_hodnoty_prumer
- Skript_na_polohy_tri_hodnoty_prvni_hodnota
- Skript_na_porovnani

Je třeba zdůraznit, že skripty nejsou dokonalé. Je možné, že někdy vrátí hodnotu, díky které bude skript hlásit chybu.

Uprava_dat_prijimacu:

Jedná se o skript, který upraví vyseparovaná data z přijímačů do dvou matic, označených jako DF17mat a DF11mat. V obou případech se jedná o matici se 6 sloupci. V případě DF11mat se jedná o přijaté DF 11 zpráva od letadla. V prvním sloupci je hodnota 11, ve čtvrtém sloupci čas příchodu a v šestém sloupci IC kód radaru. V případě DF17mat se jedná o DF 17 zprávy s polohou od letadla. V prvním sloupci je hodnota 17, ve druhém a třetím sloupci zeměpisné souřadnice letadla, ve čtvrtém sloupci čas příchodu, pátý a šestý sloupec je nulový.

Periody_radaru_prumer:

Tento skript spočítá z matic DF17mat a DF11mat periody dotazujících se radarů metodou průměrování „tečky“.

⁹⁷ Ve složce se skripty a funkcemi se nachází velké množství funkcí. Převážně se jedná o nejrůznější filtry, které postupně odstraňují nevhodná data, která mým postupem vznikají. V této práci se těmito filtrovacími funkcemi nezabývám.

Periody_radaru_prvni_hodnota:

Tento skript počítá periodu dotazujících se radarů metodou první hodnoty v „tečce“. Až na pár odchylek je identický s druhým skriptem na periodu radarů.

Skript_na_polohy_tri_hodnoty_prumer:

Do tohoto skriptu vstupují tři matice. DF11mat, DF17mat a DF11mat_nonref. DF11mat a DF17mat jsou hodnoty od referenčního letadla, které slouží pro popis azimutů radarů. DF11mat_nonref jsou DF 11 zprávy od letadla, u něž je počítána poloha. Výstupem tohoto skriptu je matice X. Poté je třeba jít do složku geographiclib⁹⁸ a spustit funkci Poloha(X). Výsledkem jsou spočítané zeměpisné souřadnice nereferenčního letadla.

Skript_na_porovnaní:

Tento skript porovnává vypočtené výsledky s reálnými polohovými daty. Vypíše zároveň, kolik hodnot a procent hodnot se nachází v intervalech přesnosti. Vstupem tohoto skriptu je matice Poloha, což je matice výsledků (matici výsledků nutno přejmenovat). Dále matice DF17mat, což jsou DF 17 zprávy od počítaného letadla a matice DF17, což jsou DF 17 zprávy od referenčního letadla.

Skript_na_porovnaní_azimutu:

Funguje identicky jako výše uvedený skript a porovnává azimuty.

⁹⁸ Funkce Poloha(X) vyžaduje velké množství funkcí ze složky geographiclib. Z toho důvodu jsem se jí rozhodl mít v této složce a kdykoliv ji chci využít, musím jít do této složky, jinak je vypsána chybová hláška.

Seznam příloh

Příloha č. 1 Funkce, která je použita k výpočtu poloh, označena jako ***Prusecik_elipsoid00***

Příloha č. 2 Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda průměru časů (10/10)

Příloha č. 3 Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda prvních hodnot (10/10)

Příloha č. 4 Chybový model

Příloha č. 5 Elektronický soubor na SD kartě, obsahující následující složky.

- DF11 a DF17, obsahující matice DF11 a DF17 jednotlivých letadel
- funkce, obsahující všechny funkce a skripty
- geographiclib, knihovna nezbytná pro správnou funkci funkce ***Prusecik_elipsoid00***
- výsledky, matice s neupravenými výsledky letadel

Příloha č. 1

Funkce, která je použita k výpočtu poloh, označená jako *Prusecik_elipsoid00*

```
clear all
close all
prusecik_lon=nove%% Skript na pocitani pruseciku geodetickych krivek na
povrchu elipsoidu. Krivky jsou definovane
%% bodem A a azimutem b, druha bodem C a azimutem d, odhad1 a odhad2 jsou ze
zacatku nastaveny na 0, nove_o_lat a nove_o_lon jsou
%% pocatecni prusecik (libovolny). Souradnice vstupujici jsou ve WGS84,
elipsoid rovnez nastaven na WGS84.
function
[prusecik_lat,prusecik_lon]=Prusecik_elipsoid(ax,ay,azimut_a,cx,cy,azimut_c,od
had1,odhad2,nove_o_lat,nove_o_lon)

[lat_a,lon_a]=track1(ax,ay,azimut_a,0.05,referenceEllipsoid); %% WGS84

[lat_c,lon_c]=track1(cx,cy,azimut_c,0.05,referenceEllipsoid);

bx=lat_a(100,1); %% Posledni hodnota tracku, namisto azimutu potrebuji bod,
proto delam track pod potrebnym azimutem a беру posledni hodnotu tracku
by=lon_a(100,1);
dx=lat_c(100,1);
dy=lon_c(100,1);

while abs(nove_o_lat-odhad1)>0.00000001

odhad1=nove_o_lat;
odhad2=nove_o_lon;

[xa, ya] = gnomonic_fwd(odhad1, odhad2, ax, ay); %% Dopredna gnomonicka
projekce
[xb, yb] = gnomonic_fwd(odhad1, odhad2, bx, by);
[xc, yc] = gnomonic_fwd(odhad1, odhad2, cx, cy);
[xd, yd] = gnomonic_fwd(odhad1, odhad2, dx, dy);

a=[xa ya];
b=[xb yb];
c=[xc yc];
d=[xd yd];

bb=(b-a);
cc=(d-c);

[o]=((xc*yd-yc*xd)*(b-a)-(xa*yb-ya*xb)*(d-c))/(bb(1,1)*cc(1,2)-
bb(1,2)*cc(1,1)); %% Prusecik geodetickych krivek, Karney algorithmus

[nove_o_lat, nove_o_lon] = gnomonic_inv(odhad1, odhad2,o(1,1),o(1,2)); %%
Zpetna gnomonicka projekce

end

prusecik_lat=nove_o_lat; %% Konecna hodnota pocitani, prusecik dvou
geodetickych krivek s danym azimutem
pruseci_lon=nove_o_lon;

end
```

Příloha č. 2**Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda průměru časů (10/10)**

PH-BFL

1/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	21	2	2	5	2	4	6	115
[%]	-	9,5 %	9,5 %	23,8 %	9,5 %	19,0 %	28,6 %	
Četnost*	12	2	2	4	1	3	0	71
[%]*	-	16,7 %	16,7 %	33,3 %	8,3 %	25 %	0 %	

A7-BAQ

2/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	16	1	2	5	2	5	1	121
[%]	-	6,3 %	12,5 %	31,3 %	12,5 %	31,3 %	6,3 %	
Četnost*	9	1	2	5	1	0	0	75
[%]*	-	11,1 %	22,2 %	55,6 %	11,1 %	0 %	0 %	

G-ZBKA

3/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	25	1	4	6	2	4	8	95
[%]	-	4,2 %	16,7 %	25,0 %	8,3 %	16,7 %	29,2 %	
Četnost*	10	1	3	3	0	3	0	59
[%]*	-	10 %	30 %	30 %	0 %	30 %	0 %	

A7-ALO

4/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	22	0	0	6	4	7	5	66
[%]	-	0 %	0 %	27,3 %	18,2 %	31,8 %	22,7 %	
Četnost*	14	1	6	5	1	1	0	55
[%]*	-	7,1 %	42,9 %	35,7 %	7,1 %	7,1 %	0 %	

G-CIVP

5/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	59	3	5	5	8	9	29	167
[%]	-	5,1 %	8,5 %	8,5 %	13,6 %	15,3 %	49,2 %	
Četnost*	22	3	4	5	5	5	0	99
[%]*	-	13,6 %	18,2 %	22,7 %	22,7 %	22,7 %	0 %	

D-ASTR

6/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	58	4	7	7	9	7	24	140
[%]	-	15,5 %	12,1 %	12,1 %	15,5 %	12,1 %	41,4 %	
Četnost*	30	4	7	7	9	3	0	132
[%]*	-	13,3 %	23,3 %	23,3 %	30 %	10 %	0 %	

PH-CKB

7/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	40	1	6	8	2	7	16	88
[%]	-	2,5 %	15,0 %	20 %	5 %	17,5 %	40 %	
Četnost*	16	1	5	8	2	0	0	67
[%]*	-	6,3 %	31,3 %	50 %	12,5 %	0 %	0 %	

A6-EUL

8/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	29	1	6	6	4	1	11	88
[%]	-	3,4 %	20,7 %	20,7 %	13,8 %	3,4 %	37,9 %	
Četnost*	17	0	6	6	4	1	0	64
[%]*	-	0 %	35,3 %	35,3 %	23,5 %	5,9 %	0 %	

A6-EYL

9/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	38	2	8	4	8	4	12	238
[%]	-	5,3 %	21,1 %	10,5 %	21,1 %	10,5 %	31,6 %	
Četnost*	19	2	8	3	6	0	0	234
[%]*	-	10,5 %	42,1 %	15,8 %	31,6 %	0 %	0 %	

A9C-KA

10/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	48	2	8	7	5	4	22	234
[%]	-	4,2 %	16,7 %	14,6 %	10,4 %	8,3 %	45,8 %	
Četnost*	18	2	6	6	2	2	0	182
[%]*	-	11,1 %	33,3 %	33,3 %	11,1 %	11,1 %	0 %	

Příloha č. 3**Vyhodnocení určení přesnosti polohy, metoda prvních hodnot (10/10)**

PH-BFL

1/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	21	0	2	4	6	2	7	115
[%]	-	0 %	9,5 %	19,0 %	28,6 %	9,5 %	33,3 %	
Četnost*	10	0	2	4	3	1	0	59
[%]*	-	0 %	20 %	40 %	30 %	10 %	0 %	

A7-BAQ

2/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	16	0	2	4	5	3	2	121
[%]	-	0 %	12,5 %	25,0 %	31,3 %	18,8 %	12,5 %	
Četnost*	9	0	2	4	3	0	0	75
[%]*	-	0 %	22,2 %	44,4 %	33,3 %	0 %	0 %	

G-ZBKA

3/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	26	0	3	5	1	7	10	95
[%]	-	0 %	11,5 %	19,2 %	3,8 %	26,9 %	38,5 %	
Četnost*	14	0	2	5	1	5	1	50
[%]*	-	0 %	14,3 %	35,7 %	7,1 %	35,7 %	7,1 %	

A7-ALO

4/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	23	0	5	4	2	6	6	86
[%]	-	0 %	21,7 %	17,4 %	8,7 %	26,1 %	26,1 %	
Četnost*	11	0	5	4	1	1	0	66
[%]*	-	0 %	45,5 %	36,4 %	9,1 %	9,1 %	0 %	

G-CIVP

5/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	60	2	2	7	4	10	35	167
[%]	-	3,3 %	3,3 %	11,7 %	6,7 %	16,7 %	58,3 %	
Četnost*	17	2	2	6	3	4	0	144
[%]*	-	11,8 %	11,8 %	35,3 %	17,6 %	23,5 %	0 %	

D-ASTR

6/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	52	2	5	7	8	6	24	140
[%]	-	3,8 %	9,6 %	13,5 %	15,4 %	11,5 %	46,2 %	
Četnost*	24	2	5	7	8	2	0	115
[%]*	-	8,3 %	20,8 %	29,2 %	33,3 %	8,3 %	0 %	

H-CKB

7/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	41	0	5	9	5	5	17	88
[%]	-	0 %	12,2 %	22,0 %	12,2 %	12,2 %	41,5 %	
Četnost*	19	0	5	8	5	1	0	67
[%]*	-	0 %	26,3 %	42,1 %	26,3 %	5,3 %	0 %	

A6-EUL

8/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	29	0	4	8	6	1	10	88
[%]	-	0 %	13,8 %	27,6 %	20,7 %	3,4 %	34,5 %	
Četnost*	14	0	4	7	2	1	0	59
[%]*	-	0 %	28,6 %	50 %	14,3 %	7,1 %	0 %	

A6-EYL

9/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	40	3	4	6	9	9	9	238
[%]	-	7,5 %	10,0 %	15,0 %	22,5 %	22,5 %	22,5 %	
Četnost*	22	3	4	6	7	1	0	234
[%]*	-	13,6 %	18,2 %	27,3 %	31,8 %	4,5 %	0 %	

A9C-KA

10/10

	Celkem	Do 5 km	5-15 km	15-30 km	30-50 km	50-100 km	Nad 100 km	Čas [s]
Četnost	50	3	4	8	7	4	24	234
[%]	-	6,0 %	8,0 %	16,0 %	14,0 %	8,0 %	48,0 %	
Četnost*	15	2	3	6	4	0	0	155
[%]*	-	13,3 %	20 %	40 %	26,7 %	0 %	0 %	

Příloha č. 4

Chybový model

```
clear all
close all
%zvoleni obecnych souradnic radaru, pro ktere pocitame chybovy model
P1=[250000;400000;0];
P2=[550000;400000;0];

%chyba mereni v azimutu v radianech
sigm=0.0052;
%rozsah matice (800x800 km, skalovani po 1 km)
x=0:1000:800000;
y=0:1000:800000;
z=0:100:20000;

%definovani vektoru
Mx=length(x);
My=length(y);
Mz=length(z);
M=zeros(Mx,My,Mz); %vytvoreni nulove matice, do ktere se budou vkladat
jednotlive vypocitane hodnoty

for k=1:Mx %k - pouze k odhadu v prubehu vypoctu
    for m=1:My
        n=50;
        %for n=1:Mz
        azimut1=atan((y(m)-P1(2))/(x(k)-P1(1)));
        azimut2=atan((y(m)-P2(2))/(x(k)-P2(1)));
        %matice G
        G=[((-y(m)-P1(2))/((x(k)-P1(1))^2+(y(m)-P1(2))^2)) ((x(k)-P1(1))/((x(k)-
P1(1))^2+(y(m)-P1(2))^2))
          ((-y(m)-P2(2))/((x(k)-P2(1))^2+(y(m)-P2(2))^2)) ((x(k)-P2(1))/((x(k)-
P2(1))^2+(y(m)-P2(2))^2))];

        Q1=inv(G'*G);
        Q=Q1*((sigm).^2*eye(2,2)); %kovariancni matice Q vektoru chyby mereneho
polohoveho vektoru
        M(k,m,n)=(Q(1,1)+Q(2,2))^0.5;
    end
end
v2=[1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000]; % definuje krivky, ktere se
vykresli
%v2=[100 1000 2000 2500 5000 10000 15000 20000 25000 30000 50000 75000];

Mxy=(M(:,:,n))'; %transpozice
aaa=real(Mxy);

[C,h]=contour(x,y,Mxy,v2);
clabel(C,h);
axis xy
hold on;
scatter([P1(1) P2(1)], [P1(2) P2(2)], '^r')
axis equal
axis tight
xlabel('x[m]'); ylabel('y[m]')
title('Chybový model')
```