



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

Porovnání polohové informace WAM – ADS-B
Position information comparsion WAM – ADS-B

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph. D.

Pavel Svoboda

Praha 2023

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621..... Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Pavel Svoboda

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Porovnání polohové informace WAM - ADS-B**

Název tématu (anglicky): Position information comparsion WAM - ADS-B

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je potvrdit vliv jevů kosmického počasí na chybu polohové infomrace ADS-B
- Popište jakým způsobem je uvedena polohová infomrace ve zprávách ADS-B
- Popište další způsoby získání polohy o letadle. Především systém MLAT
- Vhodně popište průměrnou chybu polohy ADS-B a vliv kosmického počasí na tuto chybu
- Identifikujte vliv jevů kosmického počasí na přesnot polohy ADS-B za pomoci porovnání s jiným systémam který nezávisí na GNSS
- Diskutujte řešení



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Diplomová práce - MLAT metoda v rámci sítě ADS-B přijímačů na FD - Eliška Turková
Bakalářská práce - ADS - B a VKV přijímače pro Fakultu dopravní ČVUT - Martin Zach

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **7. srpna 2023**
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



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Pavel Svoboda
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 1. prosince 2022



Poděkování

Rád bych zde poděkoval panu doc. Jakubovi Hospodkovi. Díky jeho cenným radám jsem tuto práci dotáhnul do konce. Dále děkuji panu inženýrovi Jakubovi Steinerovi, který mi poskytl pomoc co se týče získání dat. A v poslední řadě patří poděkování nepochybně i mé rodině za podporu a pomoc, a hlavně mé přítelkyni Bc. Markétě Trembaczové, která mi poskytla nesmírnou pomoc s programovací a statistickou částí této práce.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Porovnání polohové informace WAM – ADS-B vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

Praze dne 6. srpna 2023

.....

Podpis



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou potenciálně větších rozdílů mezi polohovými informacemi, které byly získané ze dvou nezávislých systémů, konkrétně ze systémů ADS-B a MLAT. Cílem této práce je porovnat, jaký vliv má kosmické počasí na přesnost jejich polohové informace. V praktické části práce jsou popsány postupy pro dekódování těchto dvou druhů dat v programovacím jazyku Python, výpočet odchylky mezi daty z obou polohových systémů a jednoduchá vizualizace trajektorií letů. Vše je demonstrováno na reálných datech.

Klíčová slova: Multilaterace, ASTERIX, ADS-B, MLAT, Vesmírné počasí, Haversinova vzdálenost, Python



Abstract

This bachelor thesis addresses the issue of potentially larger differences between positional information obtained from two independent systems, namely ADS-B and MLAT. The aim of this thesis is to compare how space weather affects the accuracy of their positional information. The practical part of the thesis describes the procedures for decoding these two types of data in the Python programming language, calculating the deviation between the data from the two positional systems, and a simple visualization of the flight trajectories. Everything is demonstrated on real data.

Keywords: Multilateration, ASTERIX, ADS-B, MLAT, Space Weather, Haversine distance, Python



1 Obsah

Úvod	18
2 Vesmírné počasí	19
2.1 Sluneční vítr	19
2.2 Sluneční aktivita.....	20
2.3 Zemská magnetosféra	20
2.4 Geomagnetické bouře	20
2.5 Sluneční záření.....	21
2.6 Ionosféra	21
2.6.1 Ionosférická scintilace	21
2.7 Solární aktivity	22
2.8 GNSS vs. Kosmické počasí.....	22
3 ADS-B.....	24
3.1 Zprávy ADS-B	25
3.2 ADS-B data.....	27
3.2.1 Filtr na ADS-B data.....	28
4 MLAT.....	29
4.1 WAM	29
4.2 Time difference of arrival (TDOA)	30
4.3 Princip multilaterace	30
4.4 Signály používané pro multilateraci	32
4.4.1 SSR Mode A/C.....	32
4.4.2 SSR Mode S.....	33
4.4.3 Mode S Squitter.....	33
4.4.4 Mode S Extended squitter	33



4.5	ASTERIX	33
4.5.1	Data ve formátu ASTERIX	34
4.5.2	Dekódování formátu ASTERIX	35
5	<i>Srovnání dat</i>.....	38
5.1	Filtrace dat.....	38
5.1.1	Filtrace dle polohy	38
5.1.2	Filtrace dle času	39
5.1.3	Filtrace podle velikosti.....	39
5.2	Postup pro výběr dat.....	39
5.3	Porovnání dat	39
5.4	Vizualizace	40
5.4.1	Graf na vykreslení trasy jednoho letu	40
5.4.2	Graf na porovnání.....	41
	Zobrazení letů na mapě.....	41
6	<i>Výsledky práce</i>	47
6.1	Sluneční aktivita.....	47
6.2	Zpracovaná data	48
	28. říjen 2021.....	48
	29. říjen 2021.....	49
	30. říjen 2021.....	51
	31. říjen 2021.....	52
6.3	Zhodnocení výpočtů	54
6.4	Chyby v postupu porovnání.....	55
7	<i>Použitý software</i>	56
7.1	Sky Analyzer for ASTERIX.....	56
7.2	PyCharm Community Edition 2022	56
7.3	PuTTY	56



8	Závěr	57
9	Bibliografie	58
	Seznam příloh	62



Úvod

Tato práce pojednává o srovnání dvou systémů, respektive jejich polohových dat, kterou udávají ADS-B data a data ze systému WAM. Cílem mé práce je tedy porovnání těchto ze dvou na sobě nezávislých systémů z hlediska přesnosti a závislosti na dalších vnějších faktorech.

V první kapitole se budu zabývat vesmírným počasím a součastem, které k němu patří. Dále nastíním, jaký může mít toto počasí vliv na Globální družicový polohový systém a jaké faktory mohou stát za vlivem vesmírného počasí na signály tohoto systému.

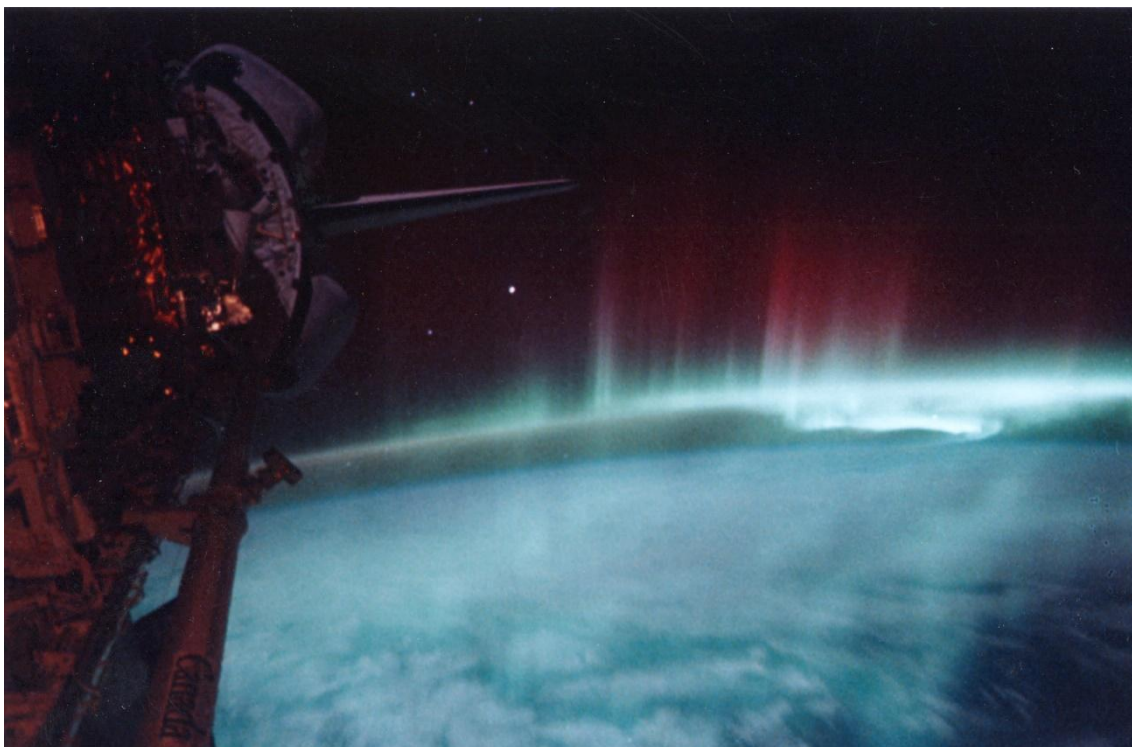
V další kapitole se zaměřím na jeden ze systémů, které porovnávám, a to ADS-B systém. Popíšu, jak funguje, a hlavně jakým způsobem data přenáší. Na reálných datech poté demonstрую jejich formát, jaké informace kromě polohových nesou a v neposlední řadě ukáži způsob jejich dekodování.

Ve třetí kapitole budu popisovat systém WAM, který se zakládá na technologii MLAT a se kterým budu porovnávat ADS-B data v praktické části práce. Tento systém by neměl být ovlivněn vesmírným počasím, měl by tedy být vhodným kandidátem pro srovnání. Dále zmíním i komplikace, které jsou spojeny s dekodováním těchto dat.

Dále se budu věnovat výběru a srovnání dat. V této kapitole popíšu, jakým způsobem jsem data vybíral a filtroval a na jaké překážky jsem při tom narazil. Dále uvedu, zda data byla kompatibilní a v podobných formátech po jejich dekodování a filtraci. Uvedu statistiku chyb a odchylek těchto tras ze zpráv ADS-B od těch, které jsem získal ze systému WAM a předložím jednoduché vizualizace trajektorií letu pocházejících z obou dat. Na základě těchto výpočtů demonstрую, zda má vesmírné počasí vliv na jeden z těchto systémů, a jestli, tak jak velký.

2 Vesmírné počasí

Kosmickým nebo vesmírným počasím označujeme podmínky a změny, ke kterým dochází ve vesmírném prostředí obklopujícím Zemi a další nebeská tělesa v naší sluneční soustavě. Toto kosmické prostředí je ovlivňováno dynamickou aktivitou Slunce, slunečním větrem a interakcemi mezi slunečními částicemi a magnetickým polem Země. Tato práce se věnuje zejména našemu Slunce. Zdroji pro tuto kapitolu byly především přednášky a texty Petra Kulhánka [9] a [10] a informace na webu SpaceWeatherLive [25].



Obrázek 1 - Polární záře pozorovaná z raketoplánu Discovery, květen 1991 [15]

2.1 Sluneční vítr

První složkou kosmického počasí, kterou je třeba zmínit detailněji je sluneční vítr, což je nepřetržitý proud nabitých částic, především elektronů a protonů, který vychází z vnější atmosféry Slunce, sluneční koróny. Tento rychle se pohybující sluneční vítr proudí všemi směry a zaplňuje celou sluneční soustavu vysokoenergetickými částicemi. Vzniká v důsledku intenzivního slunečního tepla, které způsobuje, že se plyn v koróně rozpíná a uniká gravitační síle Slunce. Sluneční vítr se pohybuje rychlostí od 300 do 800 kilometrů za sekundu a přenáší



energii, magnetická pole a ionizované částice. Při interakci slunečního větru s magnetickým polem Země ovlivňuje sluneční vítr kosmické počasí a způsobuje geomagnetické bouře, polární záře a ionosférické poruchy.

2.2 Sluneční aktivita

Sluneční aktivita hraje rovněž hlavní roli v kosmickém počasí. Slunce, dynamické nebeské těleso, vyzařuje energii a nabitě částice ve formě slunečního záření, slunečních erupcí a výronů koronální hmoty (CME). Sluneční záření se skládá z elektromagnetických vln, včetně rentgenového a ultrafialového záření, které ionizují horní vrstvy zemské atmosféry a ovlivňují komunikační systémy a signály GNSS. Sluneční erupce jsou intenzivní výboje záření, zatímco CME jsou mohutné výrony slunečního materiálu do vesmíru. Když tyto události dosáhnou Země, mohou způsobit geomagnetické bouře, které ovlivní magnetosféru a vedou ke kolísání magnetického pole Země.

2.3 Zemská magnetosféra

Zemská magnetosféra je důležitou součástí kosmického počasí. Slouží jako ochranný štít kolem naší planety, který vzniká interakcí mezi magnetickým polem Země a slunečním větrem. Tento magnetický obal funguje jako bariéra, která odvádí většinu částic slunečního větru a brání jim v přímém průniku do zemské atmosféry. Během intenzivních slunečních událostí, jako jsou sluneční erupce a výrony koronální hmoty, však může magnetosféra zaznamenat výkyvy a stlačení, což vede ke změnám její struktury a chování. Pochopení složitosti magnetosféry má zásadní význam pro předpověď kosmického počasí, protože ovlivňuje interakci mezi slunečním větrem a magnetickým polem Země, což má vliv na technologickou infrastrukturu, provoz družic a bezpečnost kosmických misí.

2.4 Geomagnetické bouře

Geomagnetické bouře jsou dalším významným aspektem kosmického počasí. Vznikají při interakci slunečního větru s magnetickým polem Země. Tyto bouře mohou vést k rychlým změnám v magnetosféře a způsobit výkyvy v magnetickém poli Země. Výsledné poruchy mohou narušit provoz družic, rušit rádiovou komunikaci, indukovat elektrické proudy v elektrickém vedení a potenciálně představovat riziko pro astronauty. Monitorování a předpovídání geomagnetických bouří má zásadní význam pro zmírnění jejich dopadu na technologickou infrastrukturu a zajištění bezpečnosti vesmírných misí.



2.5 Sluneční záření

Sluneční záření vyzařované Sluncem hraje zásadní roli v kosmickém počasí. Při slunečních erupcích a výronech koronální hmoty (CME) se uvolňují vysoce energetické nabitě částice nazývané sluneční energetické částice (SEP). SEP mohou představovat riziko pro kosmické lodě a astronauty a rušit citlivá elektronická zařízení. CME mohou způsobit geomagnetické bouře a poruchy v zemské magnetosféře. Sluneční erupce vyzařují intenzivní záření, které ovlivňuje ionosféru a rádiovou komunikaci. Ultrafialové a rentgenové záření Slunce může rovněž ovlivnit ionosféru a ovlivnit šíření rádiových vln a signálů GNSS. Porozumění sluneční aktivitě pomáhá při předpovídání kosmického počasí a ochraně kosmických prostředků a technologií na Zemi.

2.6 Ionosféra

Ionosféra je oblast horních vrstev zemské atmosféry, kde sluneční záření ionizuje molekuly plynu a vytváří nabitě částice. Události kosmického počasí mohou ionosféru významně ovlivnit, což vede k narušení rádiové komunikace a signálů globálních navigačních družicových systémů (GNSS).

Vesmírné počasí globálně mění ionosférickou elektronovou hustotu a způsobuje prostorovou změnu ionosféry. V nízkých a vysokých zeměpisných šířkách se také vytvářejí malé nepravidelnosti, které způsobují změny amplitudy a fáze signálu, známé jako scintilace. Během velkých událostí mohou nepravidelnosti zasáhnout značnou část zeměkoule i po dobu několika dní. Elektronové gradienty hustoty a scintilace jsou příčinou chyb v navigaci a časové přesnosti GNSS, při silné scintilaci může dojít k úplné ztrátě signálu.

2.6.1 Ionosférická scintilace

Ionosférická scintilace je rychlá modifikace rádiových vln způsobená malými strukturami v ionosféře. Silná scintilace může zabránit přijímači GPS v zaměření signálu a znemožnit výpočet polohy. Méně závažné scintilační podmínky mohou snížit přesnost a spolehlivost výsledků určení polohy.

Scintilace rádiových vln ovlivňuje výkon a fázi rádiového signálu. Scintilace je zapříčiněna malou (desítky metrů až jednotky kilometrů) strukturou ionosférické elektronové hustoty podél dráhy signálu a je výsledkem interference lomených a/nebo difraktovaných (rozptýlených) vln. Scintilace se obvykle kvantifikuje pomocí dvou indexů: S4 pro amplitudovou scintilaci a $\sigma\phi$



(sigma-phi) pro fázovou scintilaci. Indexy odrážejí proměnlivost signálu za určitý časový úsek, obvykle za jednu minutu. Scintilace je častější v nízkých a vysokých zeměpisných šířkách, naopak ve středních zeměpisných šířkách, jako jsou Spojené státy, nebo střední Evropa, se scintilace vyskytuje mnohem méně často. Scintilace je silně závislá na místním čase, ročním období, geomagnetické aktivitě a slunečním cyklu, ale ovlivňují ji také vlny šířící se z nižších vrstev atmosféry.

2.7 Solární aktivity

Při této práci jsem se stěžejně opíral o informace na portálu SpaceWeatherLive [12], která poskytuje svým uživatelům mnoho užitečných informací, co se týče vesmírného počasí.

SpaceWeatherLive je iniciativa Parsec vzw, neziskové organizace z Belgie, která se skládá z několika webových stránek o astronomii, vesmíru, vesmírném počasí, polární záři a souvisejících tématech. Tato organizace je řízena pomocí mnoha dobrovolníků, kteří tráví část svého volného času vývojem webových stránek a aplikací a poskytováním aktualizací, tvorbou článků nebo překladem webových stránek a aplikací.

Vesmírné počasí sledují různé vesmírné agentury a observatoře, aby pochopily a předpověděly jeho vliv na Zemi a vesmírné systémy. Tyto předpovědi mají zásadní význam pro ochranu vesmírných misí, družic, energetických sítí, komunikačních systémů a další technologické infrastruktury. Kromě toho, výzkum kosmického počasí pomáhá zlepšit naše chápání základních astrofyzikálních procesů a širšího vesmírného prostředí mimo naši planetu.

2.8 GNSS vs. Kosmické počasí

Kosmické počasí, primárně ionosféra, má za následek největší chybu při určování polohy z Globálního družicového polohového systému neboli GNSS. Především sluneční erupce vytvářejí záblesky rádiových vln, které přímo narušují systémy GNSS, a také způsobují poruchy v zemské atmosféře, kde zkreslují signály. Podle zprávy Meehana a Murtagha [19] tyto rádiové výboje působí jako šum a ruší frekvence.

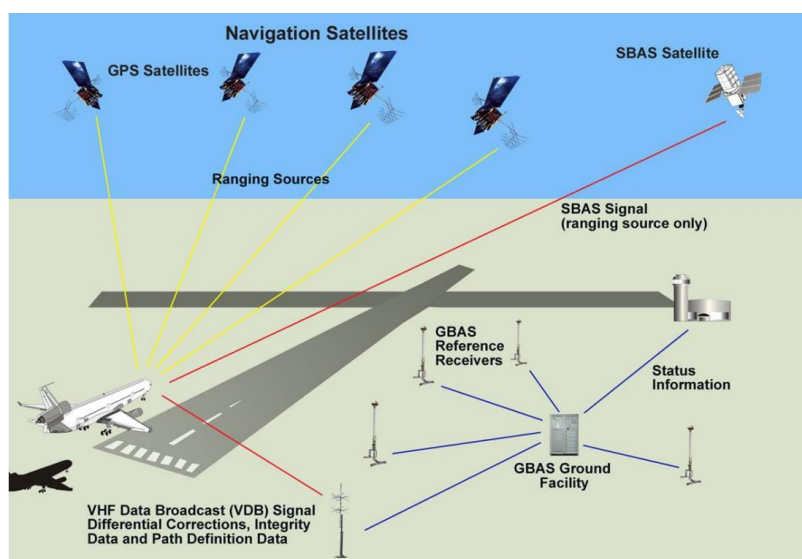
Využití GNSS v leteckém sektoru roste, a to nejen co do počtu uživatelů, ale také v počtu a typu operací, které GNSS podporuje. Ačkoli je GNSS často hlavním navigačním prostředkem, není zpravidla jediným a v případě ztráty signálu GNSS jsou proto používány jiné systémy (konvenční navigace, nebo inerciální referenční systémy).

SBAS (Satellite Based Augmentation System) a GBAS (Ground Based Augmentation System) [16] jsou rozšíření systému GNSS, které využívají diferenční techniky k minimalizaci chyb. Zvyšují přesnost a zahrnují monitorování integrity, aby se snížila pravděpodobnost výskytu chyb.

SBAS je rozšiřující vesmírný systém, který využívá síť geostacionárních družic k poskytování korekcí a informací o integritě standardních signálů GNSS, jako je GPS nebo GLONASS. Tyto korekce pomáhají zlepšit přesnost určení polohy, zejména v oblastech, kde je příjem signálu problematický, jako jsou odlehle oblasti nebo hustá městská zástavba.

<https://skybrary.aero/articles/satellite-based-augmentation-system-sbas>

GBAS (1) je naopak pozemní systém, který doplňuje signály GNSS vysláním korekčních dat z fixovaných referenčních stanic umístěných v blízkosti letiště. Zvyšuje přesnost přistání letadel, zejména za snížené viditelnosti, tím, že poskytuje korekce navigačního systému letadla v reálném čase. Systém GBAS je zvláště přínosný pro přesná přiblížení, jako jsou například přiblížení podle přístrojů ILS kategorie III, což zvyšuje bezpečnost a efektivitu provozu na letištích.



Obrázek 2 - Struktura systému SBAS a GBAS [skybrary]

SBAS zlepšuje celkovou výkonnost GNSS na rozsáhlých územích, zatímco GBAS se zaměřuje na zvýšení přesnosti přistání letadel na konkrétních letištích.



3 ADS-B

Primárním zdrojem pro následující kapitolu byl materiál *Overview of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out* [13] vydaný ICAO.

ADS-B neboli Automatic Dependant Surveillance – Broadcast je všestranný systém, který byl navržen jako doplněk konvenčního radaru, který umožňuje řízení leteckého provozu s větší přesností a nad značnou částí zemského povrchu. S využitím satelitů, vysílačů letadel a pozemních stanic je cílem tohoto systému pomoci jak řídicím letového provozu, tak letové posádce pokrýt 99 % povrchu celé Země.

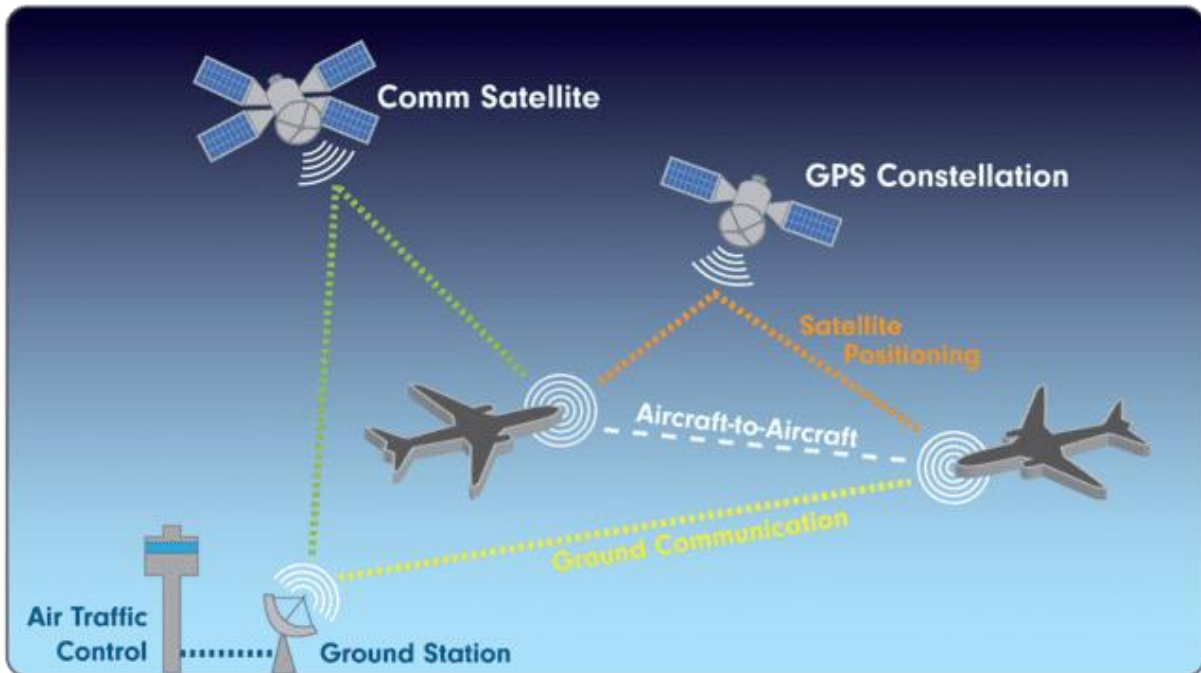
Zkratka ADS-B znamená:

- *Automatic* – automatický, protože informace o poloze a rychlosti se přenášejí automaticky (alespoň jednou za sekundu) a to bez jakéhokoliv zásahu letové posádky, řídicího letového provozu nebo operátora systému.
- *Dependent* – závislý, protože přenos závisí na správné činnosti palubního zařízení, které určuje polohu a rychlost.
- *Surveillance* – sledování nebo monitorování, protože informace o letadle jsou nepřetržitě sledovány.
- *Broadcast* – vysílání, protože informace jsou vysílány do jakéhokoli letadla nebo pozemní stanice vybavené přijímačem ADS-B.

Kromě ADS-B existuje i ADS-C, které pracuje podobně. Zde jsou však data přenášeny na základě výslovného kontraktu mezi ANSP (Air Navigation Service Provider) a letadlem. Zde se pak ještě rozlišuje, kdy je tento kontrakt (informace) vyžádán. Informace se posílají buď periodicky, na vyžádání služby řízení anebo při specifické události, jako je třeba odchýlení od trati, změna výšky, přelet navigačního bodu a podobně.

Hlavními informacemi, které ADS-B poskytuje jsou informace o poloze letadla (zeměpisná šířka, zeměpisná délka, nadmořská výška a čas), další doplňkové informace (informace pro systému TCAS, informace o zásazích pilotů do řízení, bod zatáčení atd.) a informace o letadle (identifikační číslo a kategorie). Kromě toho jsou uvedeny i informace, jako je kurz, rychlost letu, rychlost větru, směr větru a vnější teplota. Tyto informace lze získat pomocí zařízení jako GNSS, INS, FMS a dalších palubních senzorů.

Jak je znázorněno na následující ilustraci, letadlo získává svá data o pozici přes GNSS a informace jako je nadmořská výška a rychlost z jiných palubních systémů. Všechny tyto informace jsou následně přenášeny signálem k družicím, jiným letadlům nebo pozemním stanicím. To je možné díky dvěma anténám, které jsou instalovány jak na vrchní části trupu letadla, tak na té spodní.



Obrázek 3 - Popis komunikační a informační sítě ADS-B [22]

Za posledních pár let bylo nasazeno více než 1000 pozemních stanic ADS-B. Jsou součástí multilateračních systémů (které se skládají ze stanic ADS-B), radarů pro Mode S s funkcí pro ADS-B, ale také samostatných systémů ADS-B. Tím bylo vytvořeno velmi rozsáhlé a neustále se rozšiřující pokrytí ADS-B. Pokrytí systému si lze prohlédnout na stránce EUROCONTROLu, na kterých je vidět i plánované rozšíření na interaktivní mapě [4].

3.1 Zprávy ADS-B

Většina letadel dnes vysílá zprávy ADS-B nepřetržitě. Bylo nezbytné, abych se v rámci této práce naučil tyto zprávy správně dekódovat, což se ukázalo jako mnohem snazší než se zprávami ve formátu ASTERIX, o kterém se detailně věnuji v kapitole 4.5. Při dekódování jsem vyházel primárně ze zdrojů [20] a [21].

Formát ADS-B zprávy má 112 bitů a skládá se z pěti hlavních částí, které jsou popsány v tabulce číslo 1. Šestá speciální část (Type code) je obsažena v rámci části Message.



Bit	Počet bitů	Zkratka	Informace
1–5	5	DF	Downlink Format
6–8	3	CA	Transponder capability
9–32	24	ICAO	ICAO aircraft address
33–88	56	ME	Message, data
(33–37)	(5)	(TC)	Type code
89–112	24	PI	Parity/Interrogator ID

Tabulka 1 - Skladba ADS-B zprávy [guide]

Nezpracovaná neboli nedekódovaná zpráva je v šestnáctkové soustavě a může vypadat například takto:

„8D4840D6202CC371C32CE0576098“

Takto je vyjádřena právě v šestnáctkové soustavě. V Tabulce 2 lze vidět zprávu i v binární soustavě a rozloženou na již zmíněné hlavní části.

HEX	8D		4840D6	202CC371C32CE0	576098
BIN	10001	101	010010000100 000011010110	[00100] 0000010110011000011011100 0111000011001011001110000 0	0101011101100 00010011000
DEC	15	5
	DF	CA	ICAO	[TC] ----- DATA -----	PI

Tabulka 2 – Náhled na zprávu několika číselných soustavách [guide]

Jakýkoli ADS-B záznam musí začínat prvními pěti bity, ve kterých se označuje typ zprávy. Zde je to konkrétně DF 17 (10001 v binárním kódu), což znamená, že letadlo je vybaveno odpovídačem a je zde možnost dotazování. Typů zpráv ale bývá i více, například pokud bude formát DF 18 namísto 17, bude přijímací subsystém ADS-B/TIS-B vědět, že zpráva pochází ze zařízení, které nelze dotazovat. Tyto první bity rovněž sdělují informaci, že se skutečně jedná od ADS-B zprávu.

První informace, která mě z této zprávy zajímá, je její druhá část, ze které jsem si zjistil číslo letadla, respektive jeho odpovídače v hexadecimálním formátu. V každé zprávě ADS-B lze



odesílající letadlo identifikovat pomocí kódu z odpovídače, který disponuje módem S, který má přidělen podle předpisů ICAO. Kód odpovídače se také často označuje jako adresa ICAO nebo takzvaný „*hex code*“, protože je vyjádřený v šestnáctkové soustavě. Adresa ICAO se nachází v rozsahu od 9. bitu až po 32. bit ve dvojkové soustavě (nebo 3. až 8. v šestnáctkové soustavě). Dále je důležitá část třetí, která disponuje již samotnými daty, jako jsou informace o poloze, času a další.

3.2 ADS-B data

Data pro praktickou část mojí práce jsem získal z databáze neziskové organizace OpenSky agregující data od akademických, průmyslových a vládních institucí. V návodu, mně zasláným panem inženýrem Steinerem, byl popsán přístup do databáze obsahující ADS-B data. Užitečný mi byl i návod, který na svých stránkách publikuje i OpenSky [1]. K datům jsem se dostal za pomoci SSH¹ programu PuTTY. K databázovým serverům jsem se připojil skrze přihlašovací údaje laboratoře ATM.

Přes příkazový řádek v programu jsem stahoval letové trasy letadla, s pomocí SQL příkazů z návodů, které mi byly k dispozici. Příkladem takového příkazu může být následující:

```
SELECT * FROM state_vectors_data42
WHERE icao24='hexadecimalni_cislo_odpovidace_letadla'
AND hour >= unix_cas1 AND hour <= unix_cas;
```

Tento příkaz vypíše všechny záznamy letadla s daným ICAO v konkrétním časovém intervalu. Takto jsem postupoval ručně pro každý let, který jsem si v předchozích fázích vybral k porovnání, více o výběru konkrétních letadlech je popsáno v kapitole číslo 5. Veškeré vypsané záznamy se mi uložily do předem vybraného souboru .csv. Z tohoto souboru jsem poté data dále zpracovával pomocí skriptu v jazyce Python s názvem *adsb_filtr_final.py*, který je popsán v následující části práce.

¹ SSH neboli Secure shell (což v překladu znamená přibližně bezpečný příkazový řádek) je označení pro zabezpečený (šifrovaný) komunikační protokol v počítačové síti



```
data.opensky-network.org - PuTTY
OpenSky Network Impala Shell
[hadoop-29:21000] > SELECT * FROM state_vectors_data4 WHERE icao24='4ba9fa' AND hour>= 1635458400 AND hour<= 1635544800 limit 10;
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| time | icao24 | lat | lon | velocity | heading | vertrate | callsign | onground | alert | spi | squawk | b |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1635537601 | 4ba9fa | 40.95046738446769 | 29.38518177379261 | 181.6424471916077 | 113.0068240242046 | 11.05408 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
870.96 | 4023.36 | 1635537598.603 | 1635537600.777 | 1635537600 |
| 1635537602 | 4ba9fa | 40.94846563824152 | 29.39129916104404 | 181.6424471916077 | 113.0068240242046 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
901.44 | 4053.84 | 1635537601.773 | 1635537601.773 | 1635537600 |
| 1635537603 | 4ba9fa | 40.94815063476562 | 29.39239501953125 | 181.6424471916077 | 113.0068240242046 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
909.06 | 4061.46 | 1635537602.32 | 1635537602.775 | 1635537600 |
| 1635537604 | 4ba9fa | 40.94748804124735 | 29.39448269930753 | 181.6424471916077 | 113.0068240242046 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
924.3 | 4061.46 | 1635537603.409 | 1635537603.409 | 1635537600 |
| 1635537605 | 4ba9fa | 40.94682312011719 | 29.396484375 | 181.6424471916077 | 113.0068240242046 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
931.92 | 4091.94 | 1635537604.382 | 1635537604.615 | 1635537600 |
| 1635537606 | 4ba9fa | 40.94609069824219 | 29.3988037109375 | 181.6424471916077 | 113.0068240242046 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
947.16 | 4084.32 | 1635537605.497 | 1635537605.497 | 1635537600 |
| 1635537607 | 4ba9fa | 40.94512939453125 | 29.40167236328125 | 182.1160824400841 | 112.9435664729607 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
962.4 | 4114.8 | 1635537606.963 | 1635537606.964 | 1635537600 |
| 1635537608 | 4ba9fa | 40.94448852539062 | 29.4037475859375 | 182.3172407140756 | 113.0924480276 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
977.64 | 4130.04 | 1635537607.941 | 1635537607.941 | 1635537600 |
| 1635537609 | 4ba9fa | 40.9442138671875 | 29.404541015625 | 182.3172407140756 | 113.0924480276 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
977.64 | 4130.04 | 1635537608.439 | 1635537608.971 | 1635537600 |
| 1635537610 | 4ba9fa | 40.9434379965572 | 29.40696716308594 | 182.3172407140756 | 113.0924480276 | 11.3792 | THY6260 | false | false | false | NULL | 3 |
992.88 | 4145.28 | 1635537609.617 | 1635537609.945 | 1635537600 |
[hadoop-29:21000] >
```

Obrázek 4 - Výpis 10 záznamů v programu PuTTY

3.2.1 Filtr na ADS-B data

Data, která jsem získal z databáze OpenSky, bylo zapotřebí očistit od řádků obsahujících příkazy pro stahování a dále je zpracovat do formy, která by byla vhodná pro srovnávání s MLAT daty. K tomu jsem použil skript *adsb_filtr_final.py*, který je k dispozici v příloze.

Program prochází vstupní .csv soubor stažený manuálně pomocí programu PuTTY po řádcích, detekuje ty řádky, které obsahují záznamy o letu a z nich poté vyfiltruje ICAO, čas a zeměpisnou výšku a šířku. Tyto údaje poté uloží pro každé konkrétní letadlo zvlášť do .csv souboru pojmenovaného podle daného ICAO.



4 MLAT

Informace v této kapitole jsem čerpal především ze zdrojů [23] a [11]. Na počátku 90. let schválila organizace ICAO koncepci budoucího leteckého navigačního systému (FANS) založenou na satelitní technologii a technologii datového spojení, která se později stala známou jako CNS/ATM. Tehdy tradiční přehledové systémy ATM měli určité limitace a omezení, jako například elektromechanické otáčení klasických radarových antén, radar garbling, fruit and splitting a mnoho dalších.

Vzhledem k těmto omezením a do značné míry i vzhledem k nákladům bylo nutné, aby se potřebné úrovně kapacity, flexibility a efektivity, které jsou nutné pro splnění budoucího předpokládaného nárůstu letecké dopravy, byly vyvinuty různé technologie s cílem řešit tato omezení. Patřil mezi ně sekundární přehledový radar (SSR) módu S s rozšířenými službami, ADS-contract (ADS-C), ADS-broadcast (ADS-B) a Multilateration (MLAT). MLAT, je také označován jako hyperbolické určování polohy.

Technologie *multilaterace* je kooperativní, nezávislý systém, který slouží k určování polohy objektu pomocí měření "časů příchodu signálu" (TOA – time of arrival). Nezávislý je proto, že poloha letadla je kalkulována na zemi a není nijak závislá na avionice, a kooperativní je proto, že využívá odpovídače na palubě letadla.

Celosvětově není prozatím MLAT zaváděn na větších územích, ale budoucí koncepce počítá s tím, že by MLAT úplně nahradil současné SSR pokrytí. Z ekonomických důvodů tomu zatím tak není, ale jsou místa, kde se tato koncepce zavádí paralelně se SSR. Příkladem může být polovina FIR Praha, kde se buduje MLAT WAM (viz kapitola 4.1). Přijímací stanice jsou v takové oblasti od sebe vzdálené až do 100 km. Například na letišti Václava Havla v Praze je kromě dvou SSR zaveden MLAT jako třetí plnohodnotné čidlo pro získávání informací o pohybu ve vzdušném prostoru.

4.1 WAM

Jedním ze systémů, který tuto technologii využívá je *Wide Area Multilateration* (WAM) [24]. WAM využívá pozemní radar, který vysílá impulzy o frekvenci 1030 MHz a z dob mezi vysíláním signálu a odpovědí odpovídače na palubě letadla na frekvenci 1090 MHz dokáže určit jeho polohu, včetně výšky. Navíc získá i další informace jako o letadlu, jako například jeho identifikaci, to samozřejmě také záleží na módu odpovídače (A/C/S). Jelikož tento systém

využívá již stávajících vysílání letadel, může být systém WAM zaveden bez jakýchkoliv změn či dodatků k letecké infrastruktuře.

4.2 Time difference of arrival (TDOA)

Jako TDOA se označuje rozdíl časů, za který vyslaný signál z objektu urazí k jednotlivým stanicím těchto systémů. Existují dvě metody výpočtu TDOA. Buď jsou přijímané signály křížově korelované (cross correlated) nebo se měří čas příchodu (time of arrival – TOA) a časové rozdíly těchto signálů se porovnávají. TOA je nejběžnější metodou kalkulace multilaterace SSR.

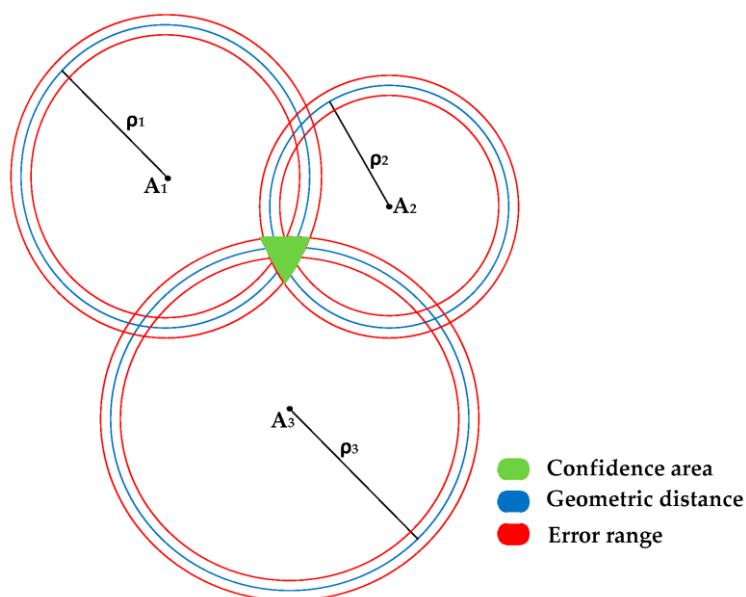
4.3 Princip multilaterace

Celý systém se skládá z několika pozemních stanic s anténami, které dokáží na základě příjmu signálu z odpovídače letadla určit pozici letadla na základě rozdílů časů z příjmu signálu každé z několika pozemních stanic a poté vypočítat polohu objektu. Když známe polohu stanic a časový rozdíl příchodu signálu, dokážeme jednoduchým vzorcem tvaru

$$s = v \cdot t$$

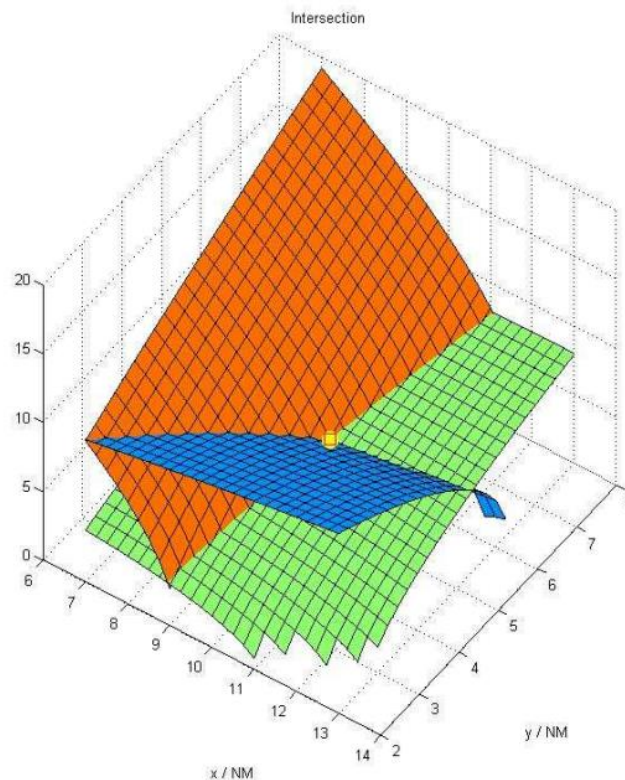
určit vzdálenost, kterou signál urazil za dané časy k daným stanicím/anténám.

Při 2D pohledu nám vznikne průnik několika hyperbol, jak můžeme vidět na obrázku číslo 3.



Obrázek 5 - 2D pohled na určení polohy objektu [8]

Při prostorovém zobrazení pak dostaneme průnik hyperboloidů, viz obrázek číslo 4.



Obrázek 6 - 3D pohled na určení polohy objektu [wam]

Při detekci signálu z letadla pomocí čtyř antén, dokážeme vypočítat přesnou polohu letadla protnutím jednotlivých hyperboloidů. Pokud máme k dispozici pouze tři antény, pozice v trojrozměrném prostoru nemůže být vypočtena přímo. K tomu bychom museli znát výšku daného cíle, a to je možné pouze z jiných zdrojů, jako je například Mode C, nebo SMGCS. Tento způsob je považován za 2D řešení.

Při použití údajů z barometrického výškoměru (Mode C) se může přesná pozice mírně lišit od skutečné, a to kvůli rozdílu mezi výškou tlakovou a skutečnou. Barometrický výškoměr sice může být dobře nastaven na zemi, ale vzhledem k tomu, že se tlak vzduchu v daném místě mění v závislosti na přítomnosti tlakových výšin a nížin, budou výškoměry v daném místě ukazovat v průběhu času různé výsledky.

S více než čtyřmi anténami můžeme zpřesnit tyto informace buď ověřením přesnosti dalších antén anebo kalkulací průměru poloh z různých kombinací výsledků z antén.



4.4 Signály používané pro multilateraci

Vzhledem k tomu, že většina letadel je již vybavena značným počtem antén pro účely komunikační, navigační a přehledové, můžeme prozkoumat, které z nich by mohly být úspěšně použity v systému WAM, pokud jde o možnost přenosu dat identifikace letadla a detekční výkonnosti.

4.4.1 SSR Mode A/C

Systém sekundárního přehledového radaru (SSR) je přímým nástupcem systému PSR a byl navržen tak, aby byl zlepšením, co se týče hlediska nákladů, spolehlivosti a výkonu.

Skládá se z pozemní součásti (radaru) a součásti na palubě letadla (odpovídače). Radar vysílá signál na frekvenci 1030 MHz, který vyvolá odezvu palubního odpovídače na frekvenci 1090 MHz. Když radar zachytí tuto odezvu, může určit polohu ze vzdálenosti a azimutu letadla. Jako součást zprávy z odpovídače letadlo vysílá identifikační informace (mód A) anebo i informace o tlakové výšce (mód C), v závislosti na bitu zakódovaném v radarovém signálu.

Ne vždy je možné rozlišit vysílání módů, aniž bychom znali další informace. Přijímač SSR by v systému WAM mohl mít problém rozlišit mezi módem A a módem C, které se používají pro civilní využití. Dále existují ještě módy 1, 2, 3/A a 3/C, které jsou vyhrazeny pro vojenské využití.

Mezi omezení signálu antény SSR patří „line-of-sight“, neboli přímá viditelnost, která je nutná mezi anténou a vysílačem. Pokud je tato přímá linie mezi radarem a objektem zakryta překážkou, například budovou, může to mít negativní dopad na signál v ohledu refrakce, jeho rozptylování anebo vícecestného šíření. Mezi další nevýhody patří i nízká rychlost aktualizace, která je záměrně snížena jako ochrana na odpovědi od jiných dotazovačů.

Maximální dosah signálu SSR je přibližně 250 NM (v závislosti na citlivosti antény), ale zejména v oblastech s vysokou hustotou interference od provozu jej mohou problémy s rušením omezovat.

V rámci pasivního systému WAM bude rychlost aktualizace záviset na dalších zdrojích sledování, zatímco aktivní systém WAM může v případě potřeby zajistit vysokou rychlost aktualizace.



Vzhledem k tomu, že všechna komerční letadla jsou vybavena odpovídači SSR, je zřejmé, že jsou více než vhodné pro systém WAM i přes všechna jeho omezení.

4.4.2 SSR Mode S

Mód S funguje jako doplněk SSR a nabízí řadu vylepšení oproti módům A a C. Využívá stejných frekvencí (1030 MHz uplink, 1090 MHz downlink) a je kompatibilní s jinými systémy SSR. Umožňuje „selektivní dotazování“ díky unikátní 24bitové adrese od ICAO, přiřazené pro identifikaci letadla. Jako u předchozích módů, má stejné nevýhody, tedy „line-of-sight“ a problémy s interferencí zapříčiněnou obsazeností rádiových kanálů.

Většina letadel už dnes má odpovídače s módem S.

4.4.3 Mode S Squitter

Tento mód funguje tak, že letadlo vybavené odpovídačem módu S vysílá signál, který se nazývá „Acquisition Squitter“, přibližně jednou za sekundu. Tento tok dat obsahuje 24bitovou technickou adresu letadla. Díky vysoké rychlosti aktualizace je velmi užitečný pro pasivní systém WAM.

4.4.4 Mode S Extended squitter

Tento signál je Mode S rozšířený o další pole nesoucí informace, jako jsou například GPS souřadnice a údaje o rychlosti. Je využíván v ADS-B.

4.5 ASTERIX

ASTERIX neboli „All Purpose STructured EUROCONTROL SuRveillance Information Exchange“ kategorie 21 je standard datového formátu, který je celosvětově přijímán v rámci uspořádání letového provozu. Zdroje pro část o tomto protokolu byly především dokumenty vydané EUROCONTROLEM [5] a [6]. a ICAO [7].

Jedná se o formát binárních zpráv pro dohled nad ATM, který umožňuje přenos informací mezi jakýmkoliv dohledovým (surveillance) a automatizačním systémem. ASTERIX definuje strukturu dat, která mají být vyměňována prostřednictvím komunikačního média, od kódování každého bitu informace až po uspořádání dat v rámci datového bloku, a to bez ztráty informací během celého procesu.



Od vydání verze 0.23 systému ASTERIX kategorie 21 v listopadu 2003 prošla tato verze průběžnými revizemi, přičemž bylo vydáno přibližně 14 následných verzí.

4.5.1 Data ve formátu ASTERIX

Na začátku mé práce jsem dostal ke zpracování data z ŘLP ze systému MLAT za dny od 28. října až do 3. listopadu ve třech různých formátech. V pozdější fázi jsem se rozhodl pracovat s těmi ve formátu .ast, která se zdála jako nejsnazší na dekodování a také to byl jediný formát, u kterého jsem s jistotou věděl, že bude podporován pozdějším způsobem dekodování, který jsem si vybral.

Mým cílem bylo dekodovat data tak, abych získal výstup, který bude obsahovat označení konkrétních letů pro jejich identifikaci a poté souřadnice zaznamenané postupem času celého letu, anebo (v mnoha případech) jen po dobu registrace tohoto letu jedním ze systémů.

Dekodování se prokázalo být značně komplikované. Zatímco ke struktuře datového formátu ADS-B existuje spousta velmi dobře zpracovaných a snadno dostupných zdrojů, tak k dekodování formátu ASTERIX tomu tak není. I přes to existovalo několik programů a skriptů na dekodování, ze které jsem mohl k dekodování použít.

Doména radartutorial.eu [3] mi nabízela několik možností k zobrazení tratě ať už z nahraných dat nebo jako živý záznam. Dále stránka obsahovala i pár příkladů pro dekodování tohoto protokolu. Po přezkoumání všech možností, které jsem našel na této stránce, jsem došel k závěru, že budu muset použít jinou metodu, protože většina možností pracovala buď v jiném operačním systému, nebo používala programy, které jsou zpoplatněné anebo programy, které měli velice nešťastně napsaný manuál k jejich použití a některé pro jistotu vůbec nefungovaly.

Z dostupných možností se jako vhodný jevil program *Sky Analyzer for ASTERIX* [17], který mi dovolil vidět složení tohoto formátu a minimálně k jeho pochopení mi tento program posloužil. Další funkce programu jako samotný export dat už byly za platební bránou a také jsem si nebyl jistý, zda by to byl můj hardware schopný zpracovat, vzhledem k technickým potížím, které jsem zaznamenal, když jsem nahrával rozsáhlejší soubor do tohoto programu. Program běžel s velkými obtížemi a po chvíli selhával, což dávám za následek velkému množství dat, které musel načítat a dekodovat.



Country	SAC/SIC	Time Stamp	Type	Track Number	Mode 3/A	Flight Level	Selected Altitude	CallSign	ICAO Address	Polar Coordinates	WGS84 Coordinates	Speed	Heading	Velocity	Vertical Rate
IRL	049/199	05:22:06.789	ADB-B 3460	1000	29700			ABR2396	4CABAE		490751N0111346E	409.35 M	008.43		-1025.00
	049/199	05:22:06.789	ADB-B 3481	3623	13900	10025		DHA5568	440B0F		491446N0162503E	280.15 M	118.12		-1218.75
	049/199	05:22:06.796	ADB-B 2703	3620	27900			TAY4307	440598		490132N0121914E	430.00 M	024.90		
	049/199	05:22:06.851	ADB-B 2054	6101	38025	38025		WZ2528J	471F95		510140N0162821E	422.75 M	292.38		+0.00
	049/199	05:22:06.851	ADB-B 2084	6402	32875	33000		TAY4096	440AF5		490037N0124351E	439.01 M	122.06		+1343.75
DEU	049/199	05:22:06.851	ADB-B 3051	4540	38025	38025		DLH2547	3C65CD		495759N0184548E	397.05 M	264.22		+0.00
	049/199	05:22:06.851	ADB-B 3123	5227	27950	38025		WZ252G	471F6B		500511N0183557E	341.89 M	276.21		+1537.50
	049/199	05:22:06.851	ADB-B 3802	4354	13250	21000		BCS7078	450E50		511135N0115501E	344.57 M	175.84		+2431.25
	049/199	05:22:06.898	ADB-B 2593	1000	17975	14025		AUA78R	44012F		474555N0173054E	395.73 M	297.21		-1025.00
	049/199	05:22:06.898	ADB-B 2722	1000	36000	36000		WZ239PU	471F3E		480156N0191007E	381.01 M	297.50		+0.00
	049/199	05:22:06.898	ADB-B 2730	7103	11175	23000		RYR7161	4D228E		475404N0164036E	310.03 M	189.28		+1087.50
DEU	049/199	05:22:06.898	ADB-B 3455	1444	33000	33000		BOK518	3C458A		494631N0154654E	518.33 M	134.92		-125.00
NLD	049/199	05:22:06.898	ADB-B 3657	1000	40000			KLM84L	484164		483747N0174002E	411.55 M	301.49		
	049/199	05:22:06.898	ADB-B 3662	1000	22000	22025		FRF401	473457		483505N0124612E	217.75 M	291.26		
	049/199	05:22:06.898	ADB-B 3730	7651	37000	37000		FRM5171	4D21B1		492057N0101324E	446.48 M	137.27		+62.50
DEU	049/199	05:22:06.945	ADB-B 2269	1000	07900	24000		DLH208H	3C66BA		480210N0163647E	221.70 M	246.32		+2562.50
	049/199	05:22:06.945	ADB-B 2423	1000	36000	36000		WZ230SL	471F71		493643N0141524E	402.32 M	291.59		+0.00
CHN	049/199	05:22:06.945	ADB-B 2615	1000	38000	38025		CCA355	781AC4		510032N0125657E	449.78 M	226.44		+0.00
	049/199	05:22:06.945	ADB-B 2715	1000	43000	43000		VCJ388	4D20BD		501337N0115558E	440.55 M	228.31		
FRA	049/199	05:22:06.945	ADB-B 3129	1000	38000			AFP998N	3944F5		480640N0171239E	395.73 M	286.74		
	049/199	05:22:07.187	ADB-B 2118	6103	38025	38025		WZ21HX	47340A		491955N0175707E	423.85 M	305.98		+0.00
	049/199	05:22:07.187	ADB-B 2206	5140	02800	05000		WZ2285J	471F6A		480554N0163620E	172.27 M	116.56		+1600.00

Obrázek 7 - Náhled na část záznamů v programu Sky Analyzer for ASTERIX

4.5.2 Dekódování formátu ASTERIX

Nakonec jsem k dekodování dat použil volně dostupný balíček *asterix4py* [2], který poskytoval jednoduché řešení mého problému v programovacím jazyce Python. Balíček slouží k parsování/dekodování binárních dat protokolu EUROCONTROL ASTERIX.

Za použití oficiální dokumentace k balíčku *asterix4py* jsem v editoru PyCharm jsem si vytvořil dekodovací skript. Výstup z dekodéru se skládal ze záznamů o mnoha parametrech a k nim přiřazených dat. Záznamy však byly v pořadí, ve kterém se zapisovala do protokolu v průběhu času. To znamenalo, že informace od stejného cíle byly vždy o několik záznamů od sebe a bylo tedy třeba záznamy vyfiltrovat tak, aby byly vždy záznamy o jednom letadle pospolu. Navíc pro mé účely byly v jednotlivých záznamech určité informace, které byly nadbytečné.

Bylo třeba data vyfiltrovat na základě jednoznačného identifikátoru daného letadla, a podle něho je pak zapisovat do vlastního .csv souboru. Za takový identifikátor jsem si vybral ICAO adresu letadla, která je ve záznamech označována jako parametr „TAddr“. Jak jsou označovány ostatní parametry, můžeme najít v příručce [ast2].

Kód fungoval tak, že při dekodování sady dat vytvořil soubor .csv s názvem shodným s ICAO adresou daného, což byl právě parametr „TAddr“, v záznamu také označený trojčíslím 080. Tento údaj se do výsledného souboru nezapisuje, slouží pouze jako jeho název.

- **Data Item 1021/080** – Target Adress – Cílová adresa (identifikátor vysílače), kterou má každý cíl unikátně přiřazenou



Do souboru se poté zapiší data, která byla pro mě relevantní:

- **Data Item I021/073** – *Time of Message Reception for Position* – čas přijetí zprávy pozemní stanicí ve formě uplynulého času od poslední půlnoci, vyjádřeného ve tvaru UTC.
- **Data Item I021/130** – *Position in WGS-84 Coordinates* – pozice ve stupních zeměpisné šířky a délky
 - Latitude – zeměpisná šířka
 - Longitude – zeměpisná délka

Takto kód postupuje do té chvíle, než narazí na záznam s adresou, od které již CSV soubor se záznamy existuje. V takovém případě do něj data připiše na další řádek.

Při dekódování jsem zjistil, že adresa, kterou jsem si zvolil pro značení letadel je odlišná od jakéhokoliv jiného systému značení letů, jelikož byla v desítkové soustavě. Číslo letu jsem tedy převedl do soustavy šestnáctkové, a poté se již shodovalo s hexadecimálním značením letů. Tento postup demonstruje následující výřez obrazovky na Obrázku 8 ze skriptu, kde jsem kód zkoušel.

```
icao = int("5262915")

print(hex(icao))           # převod do šestnáctkové soustavy      -> 0x504e43
print(hex(icao).upper())   # záměna všech písmen za velká      -> X504E43
print(hex(icao)[2:8].upper()) # výběr 3-8 znaku                    -> 504E43
```

Obrázek 8 - Ukázka skriptu, pro převod do hexadecimální soustavy³

Kód jsem poté zjednodušil vložil do dekódovacího skriptu *asterix_decode_final.py*. Zjednodušení kódu lze vidět na spodním pseudokódu⁴

```
icao_dec = int(result.get('080').get('TAddr'))
```

³ Po převodu z desítkové soustavy na šestnáctkovou jsem dostal výsledek 0x504e43, na dalším řádku jsem změnil všechna písmena na velká, a nakonec v posledním příkazu jsem odečetl první dva znaky, abych dostal finální adresu cíle v hexadecimální soustavě.

⁴ Tomuto druhu zápisu se říká pseudokód, což je kompaktní a neformální způsob zápisu počítačového algoritmu, který používá strukturní konvence programovacích jazyků, avšak typicky nezahrnuje detailní syntaxi jako jsou deklarace proměnných



```
icao_hex = hex(icao_dec)[2:8].upper()
```

I formát času bylo třeba vyřešit, protože záznamy z MLAT jsou v sekundách v čase UTC, které jsou počítány od půlnoci konkrétního dne, ze kterého záznamy jsou. Tento problém jsem vyřešil tak, že jsem k vždy k časovému poli přičetl čas ve formátu UNIX⁵, aby časový údaj zahrnoval i datum a aby seděl s časovým formátem UNIX, kterým disponují ADS-B data.

```
nazev_promene = result.get('073').get('time_reception_position')  
                + datetime(RRRR, MM, DD, hh)  
  
csvfile.write(str(nazev_promene) + 'oddelovac_dat')
```

K dekódování formátu ASTERIX dat jsem vytvořil Python skript *asterix_decode_final.py*, který příkládám v příloze. Do tohoto skriptu jsem promítl řešení všech problémů, které jsem tu nastínil a lze jej využít pro dekódování dat z jakéhokoliv dne, pokud budoucí uživatel splní hlavní podmínku, a to, aby data pro vstup byla ve formátu .ast. Je také třeba nastavit správné datum pro součet k časovým údajům, pokud chce uživatel záznamy v časovém formátu UNIX.

Délka dekódování dat závisel na spoustě proměnných. Dekódování dat z každého datového souboru zabralo podle velikosti od 12 do 60 hodin, jelikož nebylo možné si vybrat konkrétní lety a dekóval se celý den najednou. Celý kód je napsaný tak, že jakmile se dekódování zahájí, nelze proces pozastavit a později pokračovat od stejného bodu a musí být zahájen znovu.

⁵ Unix je formát času, který udává počet sekund od 00:00:00 1.1.1970 v UTC. Využívá se zejména ve výpočetní technice.



5 Srovnání dat

V této kapitole popíšu postup pro filtraci a výběr dat pro praktickou část této práce. Dále zmíním, jakým způsobem budu data srovnávat tak, abych mohl kvantifikovat vliv kosmického počasí.

5.1 Filtrace dat

Pro nejpřesnější výsledky bylo třeba data filtrovat dle několika parametrů, konkrétně podle polohy, času a velikosti datového souboru.

5.1.1 Filtrace dle polohy

Nejprve bylo třeba data filtrovat podle polohy – zajímaly mě totiž pouze lety, které proletěly v blízkosti Prahy. K této úvaze jsem došel na základě nepřesnosti MLAT dat, která vykazují větší nepřesnost s rostoucí vzdáleností sledované objektu od pozemních stanic, které se nachází právě v blízkosti Prahy.

To jsou udělal pomocí jednoduchého *if* příkazu ve skriptu *plot_track.py*, který vyfiltroval lety, které proletěly v blízkosti Prahy. Jako takovou hraniční hodnotu jsem si vybral přibližně padesát kilometrů okolo letiště Václava Havla. Těchto přibližných 50 kilometrů jsem ve skriptu zapsal jako interval:

```
if lon > 13.54 and lon < 14.96 and lat < 50.41 and lat > 49.63
then plot(trajektorie)
```

Hodnoty v pseudokódu výše znázorňují zeměpisnou šířku a délku, které odpovídá čtverci okolo LKPR, přičemž je letiště Václava Havla v jeho středu a délka každé strany tohoto pomyslného čtverce je sto kilometrů.

Pokud let splňoval tyto podmínky, tak skript vykreslil trasu celého letu do grafu, ke kterému jsem přidal bod se souřadnicemi LKPR a kolem bodu barevně vyplněný kruh s průměrem zmíněných padesáti kilometrů.



5.1.2 Filtrace dle času

Dalším způsob filtrace, který bylo potřeba použít, byla filtrace podle času. Zajímaly mě pouze lety okolo časového období největší sluneční erupce za tyto dny, která podle dostupných dat ze stránky Space weather live [18] nastala ve čtvrtek 28. října 2021.

V následujícím pseudokódu ukazují, jak takovou podmínku zapsat. Hraniční časy jsou zapsány ve formátu UNIX a odpovídají času 22:00 UTC ve dnech 27. 10. 2021 a 28. 10. 2021

```
if time > 1635372000 and time < 1635458400
then plot(trajektorie)
```

Tento způsob navíc umožňuje vykreslit trajektorii letu v nějakém konkrétním časovém úseku, který si budoucí uživatel sám zvolí.

5.1.3 Filtrace podle velikosti

Již při prvním vykreslování grafů trajektorií určitých letů bylo jasné, že mnoho z nich je chybných, nebo chybně zaznamenaných, nebo například proletěly skrze oblast, ve které systém multilaterace zaznamenával letadla jen po velice krátkou dobu. Takové datové soubory měly velice málo záznamů, proto jsem se rozhodl pracovat pouze se soubory, které byly větší než 15 kB. Taktéž jsem vyřadil i data, která byla naopak abnormálně velká (v řádu několika tisíců kB). U těchto dat jsem při vykreslení pozoroval v průběhu dne jen velmi malé, ne-li žádné pohyby.

5.2 Postup pro výběr dat

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, svá data jsem si vybíral tak, že jsem si každý let po předchozím základním vyfiltrování zobrazil v grafu pomocí skriptu *plot_track.py*. Lety, které při pohledu na jejich 2D grafické znázornění, neobsahovaly chyby, kterou předešlé filtrace neodhalily, jsem si uložil a ty evidentně chybné jsem opět vyřadil. Mezi tyto lety patřily například ty, u kterých je systém na značné části trasy přestal registrovat.

5.3 Porovnání dat

Pro porovnání dat jsem ve skriptu *porovnaní_final.py* přidal ke grafickému zobrazení na mapě i graf, který zobrazuje odchylku těchto dvou trajektorií od sebe ve stupních zeměpisné šířky a délky. Můj skript obsahuje dvě metody, jak kvantifikovat odchylku mezi ADS-B a WAM daty.



První a zároveň jednodušší metodou je použití Euklidovské metriky, kterou lze spočítat vzdálenosti dvou libovolných bodů, přičemž výsledek této odchylky bývá ve stejných jednotkách, jako osy x a y , v mém případě tedy ve stupních. K výpočtu použijeme vzorec

$$m_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Jako druhou možnost používám Haversinovu vzdálenost [26], která je uzpůsobena pro výpočet vzdálenosti mezi dvěma body na kouli vzhledem k jejich zeměpisným šířkám a délkám. Ta se počítá pomocí vzorce

$$H = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cos(\varphi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

V mém skriptu používám pro oba dva výpočty funkce v Pythonu, Euklidovskou metriku počítám pomocí funkce `dist` ze standardního balíčku `math` a pro Haversinovu vzdálenost používám funkci `distance.geodesic` z balíčku `geopy`.

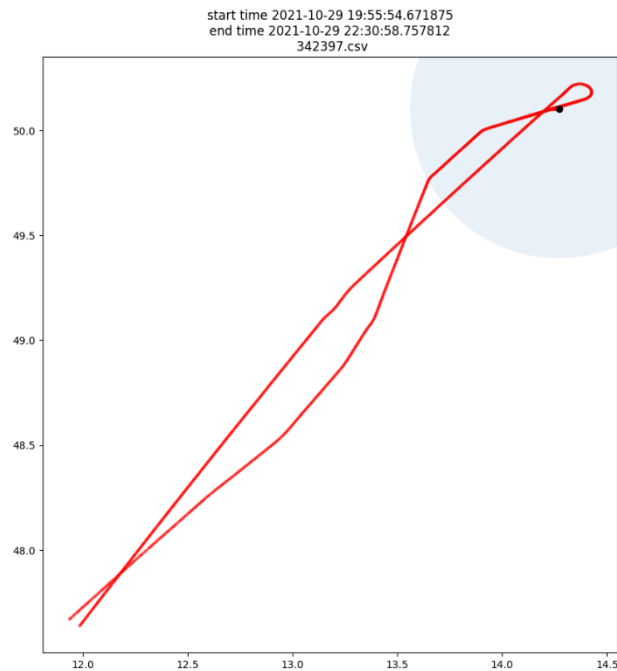
Časový údaj výstupních WAM dat byl po dekodování zaznamenán ve vteřinách s několika desetinnými místy, ke kterým byla přiřazena pozice. Stažená ADS-B data však byla bohužel zaznamenávána v celých sekundách. Při porovnání obou dat bylo důležité, abych porovnával odchylku záznamů, které byly pořízeny ve stejný čas. Takové záznamy ale prakticky neexistují, proto jsem ve skriptu napsal podmínku, aby se tyto odchylky počítaly pouze ze záznamů, které jsou si časově blízko. Skript vzal hodnotu času z ADS-B dat a pokud našel v protějších datech čas, který byl v intervalu jedné desetině sekundy, vypočítal odchylku vzdálenosti těchto záznamů a tu zapsal. Při cestovních nebo přibližovacích rychlostech větších letadel udělají tyto desetině sekund značnou chybu.

5.4 Vizualizace

5.4.1 Graf na vykreslení trasy jednoho letu

Skript `plot_track.py` obsahuje kromě filtrace dat zmíněné v části 5.1 navíc i možnost vykreslení trajektorií ze vstupních `.csv` souborů jako jednoduchý spojnicový graf. Graf obsahuje také vykreslení polohy Letiště Václava Havla v Praze jako orientačního bodu. Kolem LKPR je navíc

znázorněn kruh o poloměru 50 km, který slouží jako indikátor toho, jak blízko letadla proletěla. Skript slouží především k výběru kandidátů, kteří jsou vhodní pro další srovnávání.



Obrázek 9 - Graf jednoduchého vykreslení trasy letadla z MLAT dat

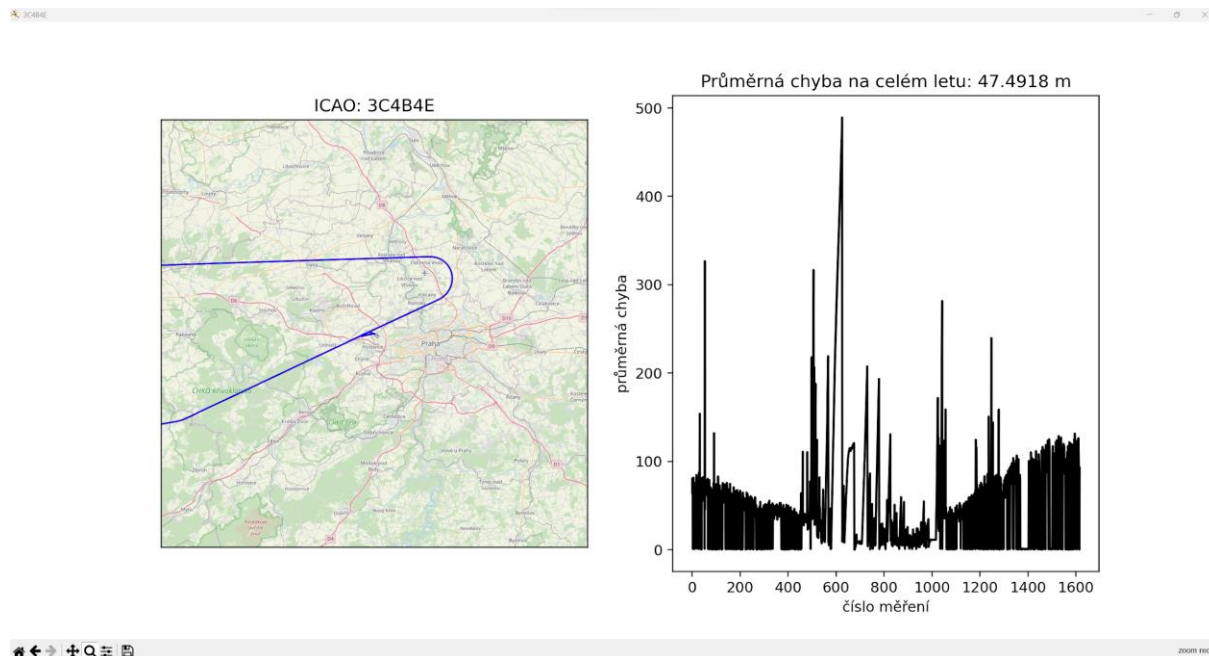
5.4.2 Graf na porovnání

Skript *porovnaní_final.py* obsahuje porovnání dat z obou zdrojů a jejich zobrazení na mapový podklad. Pro porovnání skript načte data z .csv souborů ze dvou složek, obsahujících obě sady dat. Jestliže skript našel soubory, které byly pojmenovány stejně, vykreslí je do jednoho grafu, načte podle přiblížení na určitou oblast mapy z OpenStreetMap a nakonec vykreslí odchylku vzdálenosti jednotlivých bodů v podobě Haversinovy vzdálenosti.

Zobrazení letů na mapě

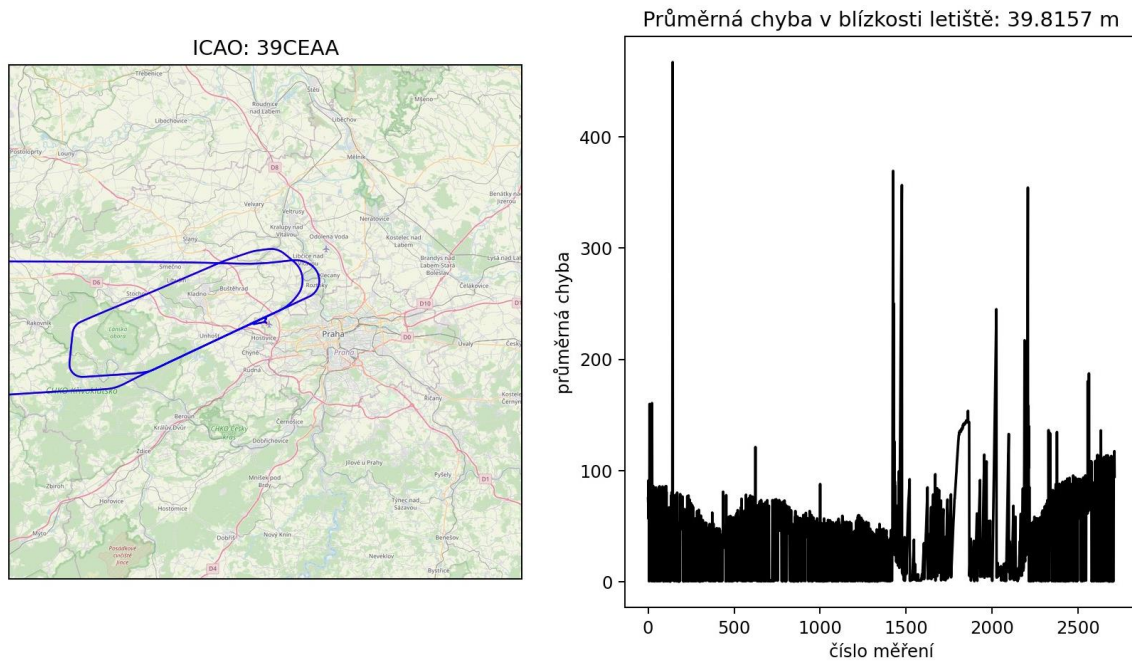
Pro vykreslení mapového podkladu jsem použil volně dostupný Python balíček *TileMapBase*, který mi dovolil jednoduše překrýt trasy letů statickou mapou. Jako zdroj pro práci s touto knihovnou jsem použil stránku [14].

Následující obrázky slouží jako příklady výstupu skriptu *porovnaní_final.py*, ve kterém jsem použil tuto metodu zobrazování trajektorií letů. Skript obsahuje popisky, pro jeho použití včetně ovládání mapy.



Obrázek 10 - Okno výstupu ze skriptu *porovnaní_final.py*

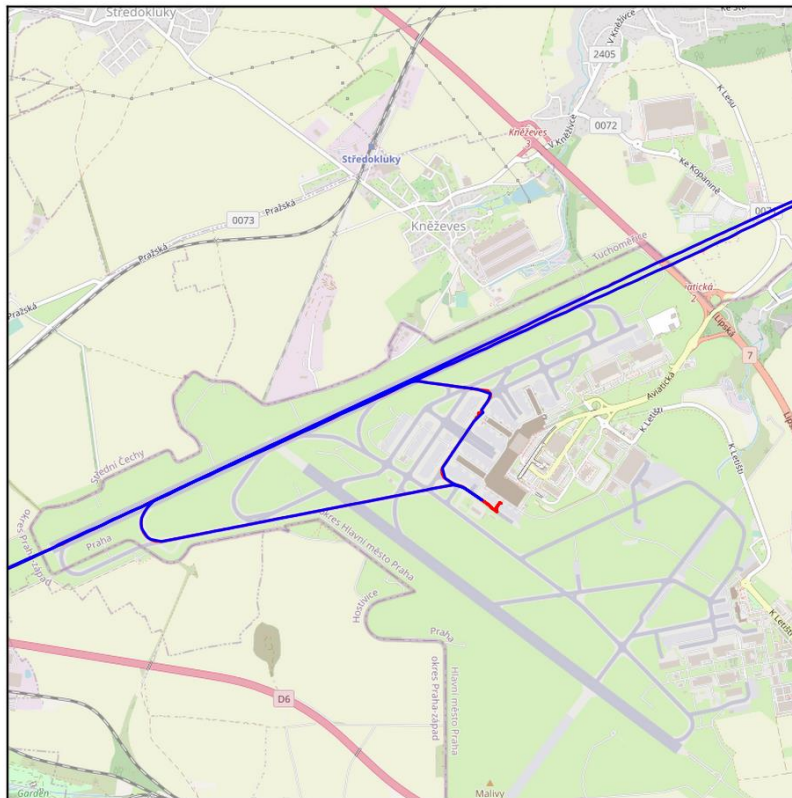
Výstup ze skriptu jsem rozdělil do dvou grafů, které jsem spojil v jednom okně, které se uživateli ukáže poté, co skript spočítá všechny potřebné proměnné k vytvoření těchto grafů. Uživatel může různé části grafu přibližovat a hýbat s nimi, nebo si celé okno uložit v aktuálním stavu jako obrázek .png.



Obrázek 11 - Znáznomení výstupního grafu pro let 39CEAA

Na tomto obrázku lze vidět zobrazení trasy letu konkrétního letadla a graf jeho průměrné chyby v přibližně padesáti kilometrovém okolí letiště. Abychom na zobrazení viděli rozdíl v datech z obou typů měření, můžeme si mapu přiblížit v okně. To však značně sníží rozlišení mapy. Pokud chceme mapu s lepším rozlišením a větším přiblížením upravit v programu parametr `degree_range`.

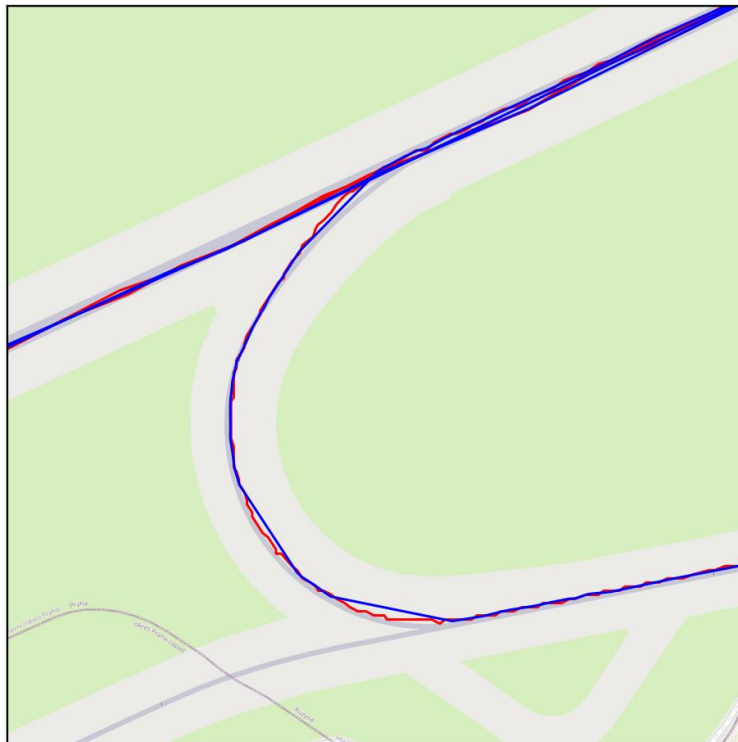
ICAO: 39CEAA



Obrázek 12 - Přiblížený pohled na celé letiště a trasu letadla 39CEAA

Na obrázku 12 už vidíme mírné rozdíly mezi modrou (ADS-B) a červenou (ASTERIX) trajektorií, a to hlavně na zemi, kde jsou data ADS-B značně zkreslená, což je stav, který jsem na zemi pozoroval téměř u všech letů.

ICAO: 39CEAA

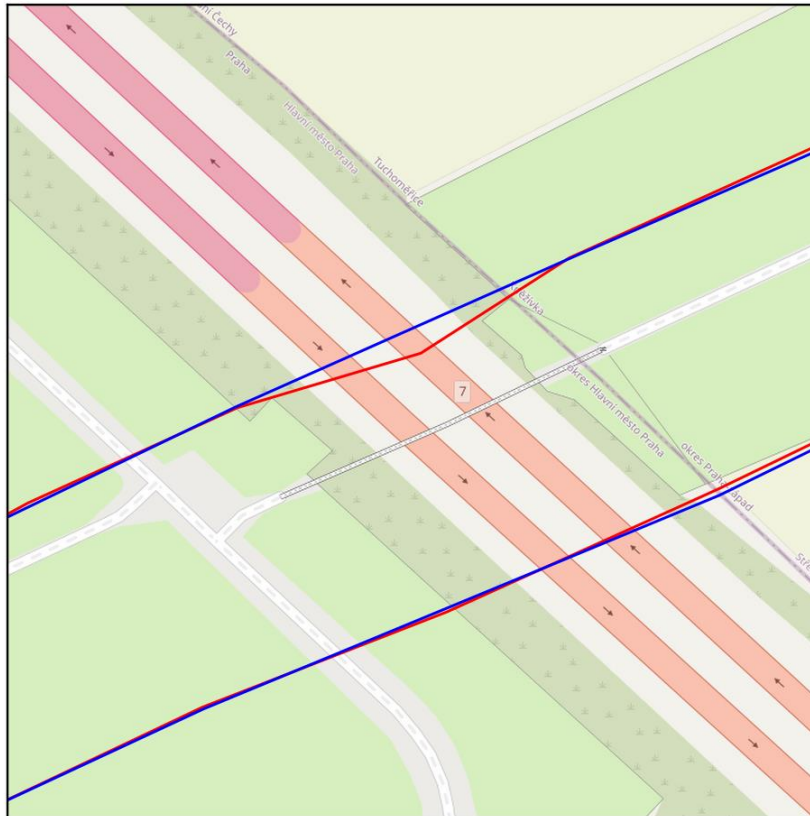


Obrázek 13 - Přiblížený pohled na křižovatku mezi TWY E, F a RWY 06/24

Na obrázku 13 můžeme vidět, že rozdíl obou typů dat není nijak zásadní, což je správně.

Pro lepší popis jsem zde vložil ještě jednu verzi již zmíněného letu (Obrázek 14), kde letadlo dvakrát přelétá nad dálnicí D7 u letiště a jsou zde vidět ještě více přiblížené trasy.

ICAO: 39CEAA



Obrázek 14 - přibližný pohled na přelet nad dálnicí D7

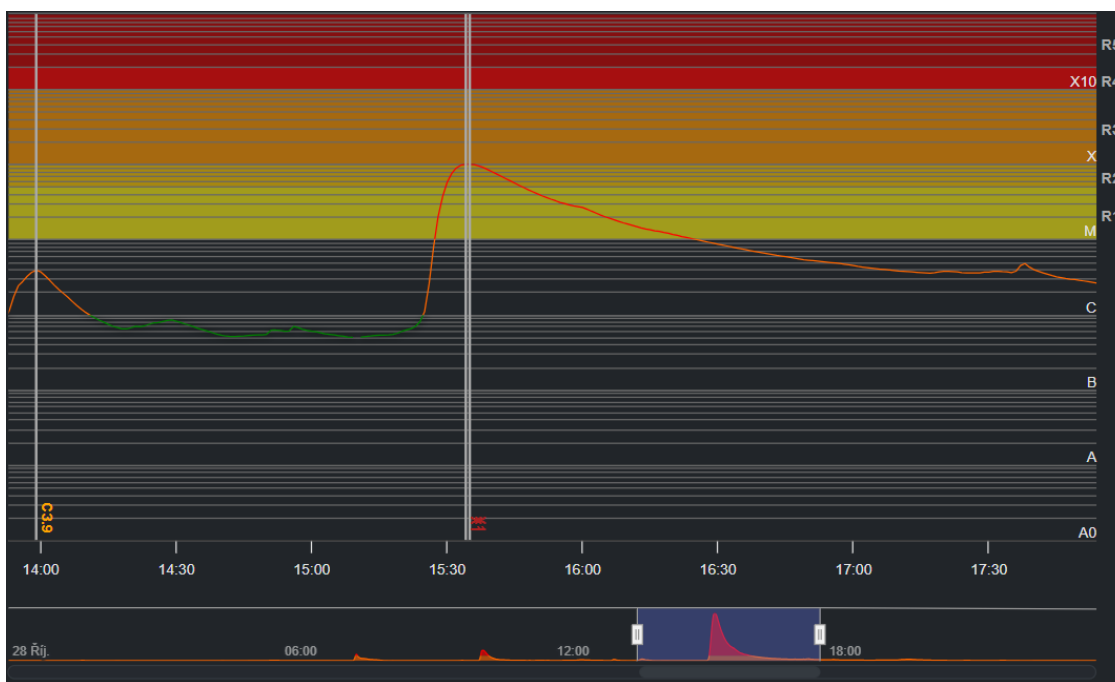
V přílohách práce můžete najít několik příkladů dalších letů a také příklady pohybu vozidel po letištní ploše.

6 Výsledky práce

Cílem této práce bylo porovnat nasbíraná data z obou systémů, jak MLAT, tak ADS-B, a určit vliv sluneční aktivity na tato data. Očekáváním bylo, že data získaná skrze multilateraci by měla zůstat neměnná, jelikož by na ně měla mít sluneční aktivita vcelku zanedbatelný vliv. ADS-B data by se měla naproti tomu od těch druhých lišit, z důvodu závislosti na vesmírném počasí.

6.1 Sluneční aktivita

Každá stránka na monitorování vesmírného počasí udává jiný údaj o času největšího efektu sluneční erupce, která nastala 28. října 2021. Podle stránky SpaceWeatherLive [19], z níž jsem čerpal, došlo k vyvrcholení této události téhož dne v 15:35 UTC.



Obrázek 15 - Přibližný graf sluneční erupce 28. října 2021 [19]

Pokud bychom si zvolili záložku *Report sluneční aktivity* na této stránce [19], tak se můžeme dočíst, že první den (29. října) se očekává klidné až neklidné geomagnetické pole, druhý den (30. října) klidné až silné bouřky a třetí den (31. října) klidné až slabé bouřky. Z těchto informací jsem usoudil, že vliv této události by měl nastat až o pár dnů později po sluneční aktivitě.

Tabulka 3 - Pravděpodobnosti geomagnetické aktivity pro střední zeměpisné šířky



	29. října	30. října	31. října
Aktivní	15%	30%	30%
Menší bouře	05%	10%	10%
Silné bouře	01%	01%	01%

6.2 Zpracovaná data

Následující tabulky obsahují lety, které jsem se rozhodl porovnávat na základě kritérií popsanych v kapitole 5. Do dalších výpočtů, jako jsou průměrné odchylky, tedy nezahrnuji záznamy pohybů na zemi, a záznamy, které jsem označil za zajímavé. Tato data disponují mnohem většími chybami.

Následující tabulky obsahují údaje o průměrných chybách jednotlivých letů v daných dnech.

28. říjen 2021

Tabulka 4 - Záznam všech vhodných letů za 28. říjen

ICAO: 142591	Průměrná chyba: 87.795887 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 76.012017 m	ICAO: 4844C6	Průměrná chyba: 62.090102 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 51.800836 m
ICAO: 34608B	Průměrná chyba: 64.973154 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 49.49011 m	ICAO: 484B32	Průměrná chyba: 90.299132 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.301586 m
ICAO: 39856C	Průměrná chyba: 81.581455 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 42.095589 m	ICAO: 484F72	Průměrná chyba: 103.343605 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 74.139654 m
ICAO: 398570	Průměrná chyba: 85.250894 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 54.978791 m	ICAO: 4892C1	Průměrná chyba: 86.246957 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 75.302541 m
ICAO: 4D0246	Průměrná chyba: 102.297621 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 93.434468 m	ICAO: 48AD80	Průměrná chyba: 74.431762 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.899231 m
ICAO: 3C4581	Průměrná chyba: 95.444132 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 92.747303 m	ICAO: 48B562	Průměrná chyba: 64.948192 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 79.579869 m
ICAO: 3C458A	Průměrná chyba: 82.800892 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 67.266345 m	ICAO: 498B25	Průměrná chyba: 25.28909 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 16.893458 m



ICAO: 3C55F4	Průměrná chyba: 75.404843 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 47.654544 m	ICAO: 49D027	Průměrná chyba: 86.00458 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 53.060434 m
ICAO: 47847F	Průměrná chyba: 87.694065 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 81.786945 m	ICAO: 49D0A4	Průměrná chyba: 55.90942 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 43.181051 m
ICAO: 471F7D	Průměrná chyba: 70.627937 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 33.474432 m	ICAO: 49D213	Průměrná chyba: 75.664933 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.029488 m
ICAO: 424333	Průměrná chyba: 77.111672 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 42.666621 m	ICAO: 4BB1C4	Průměrná chyba: 84.007632 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 72.895396 m
ICAO: 471A74	Průměrná chyba: 110.471327 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 30.891783 m	ICAO: 4BAB52	Průměrná chyba: 80.249195 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 58.460289 m

Záznamy pohybů na zemi			
ICAO: 440BA1	Průměrná chyba: 15.792845 m	ICAO: 49F055	Průměrná chyba: 293.787944 m
ICAO: 49F00D	Průměrná chyba: 566.092268 m	ICAO: 49F07B	Průměrná chyba: 394.177039 m
ICAO: 49F015	Průměrná chyba: 46.09722 m	ICAO: 49F08A	Průměrná chyba: 442.103874 m
ICAO: 49F024	Průměrná chyba: 477.503132 m	ICAO: 49F098	Průměrná chyba: 312.479244 m

Příloha obsahuje příklady zobrazení na mapě i pro pohyby na zemi. Tyto záznamy jsem oddělil i z důvodu, že toto pravděpodobně nebudou záznamy letounů, ale spíše jiných letištních pozemních vozidel, které taky v několika případech disponují odpovídači, většinou z důvodu bezpečnosti a komunikace. Do výpočtů jsem tyto záznamy nezahrnoval. V následujících tabulkách se lze setkat i se záznamy, které mi přišly zajímavé, většinou z jejich neobvyklých tras nebo kvůli velikosti jejich odchylek.

29. říjen 2021

Tabulka 5 - Záznam všech vhodných letů za 29. říjen

ICAO: 34134E	Průměrná chyba: 50.214261 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 46.413062 m	ICAO: 461E15	Průměrná chyba: 65.801679 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 65.984187 m
ICAO: 342397	Průměrná chyba: 49.619267 m	ICAO: 4692CC	Průměrná chyba: 56.24077 m



	Průměrná chyba v okolí LKPR: 47.181403 m		Průměrná chyba v okolí LKPR: 58.499485 m
ICAO: 3455D9	Průměrná chyba: 60.2909 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 45.036428 m	ICAO: 471EA6	Průměrná chyba: 70.927591 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 70.638801 m
ICAO: 3950D1	Průměrná chyba: 49.807394 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 33.909486 m	ICAO: 471F3B	Průměrná chyba: 73.448285 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 66.178008 m
ICAO: 4BA9FA	Průměrná chyba: 52.776785 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 40.891018 m	ICAO: 471F8A	Průměrná chyba: 72.491836 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 64.513223 m
ICAO: 398570	Průměrná chyba: 61.454618 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 28.005054 m	ICAO: 484B2A	Průměrná chyba: 68.123137 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 38.91533 m
ICAO: 3991E8	Průměrná chyba: 63.088537 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 37.716897 m	ICAO: 48548D	Průměrná chyba: 60.421324 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 34.282459 m
ICAO: 3C4581	Průměrná chyba: 69.306527 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 89.964659 m	ICAO: 485A35	Průměrná chyba: 74.121997 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 50.828957 m
ICAO: 3C4586	Průměrná chyba: 60.138351 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 66.967188 m	ICAO: 489785	Průměrná chyba: 47.157183 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 37.148746 m
ICAO: 3C5431	Průměrná chyba: 60.074101 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 71.514514 m	ICAO: 48C126	Průměrná chyba: 47.526106 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 35.579523 m
ICAO: 3C5C41	Průměrná chyba: 72.563486 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 89.871835 m	ICAO: 48C130	Průměrná chyba: 64.276126 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.201458 m
ICAO: 3C65C4	Průměrná chyba: 71.165352 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 42.961817 m	ICAO: 48C237	Průměrná chyba: 57.637141 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 47.592433 m
ICAO: 3C66AB	Průměrná chyba: 74.65874 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 72.613456 m	ICAO: 4951CC	Průměrná chyba: 61.69564 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 57.968182 m
ICAO: 3CCBB6	Průměrná chyba: 47.374511 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 51.273555 m	ICAO: 4952C1	Průměrná chyba: 52.50397 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 37.528211 m
ICAO: 4408F4	Průměrná chyba: 66.066384 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 39.53351 m	ICAO: 440614	Průměrná chyba: 50.702969 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 47.324459 m
ICAO: 405637	Průměrná chyba: 66.002658 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 41.064799 m	ICAO: 44081D	Průměrná chyba: 48.304291 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 40.548079 m



ICAO: 406459	Průměrná chyba: 57.296731 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 83.158157 m	ICAO: 49D38F	Průměrná chyba: 50.22376 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 77.990411 m
ICAO: 4403E0	Průměrná chyba: 64.999251 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 58.075033 m	ICAO: 44CDC3	Průměrná chyba: 60.396598 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.552357 m
ICAO: 424351	Průměrná chyba: 52.975724 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 41.075748 m	ICAO: 44CE72	Průměrná chyba: 55.705426 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 36.545389 m
ICAO: 440469	Průměrná chyba: 53.022936 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 43.401247 m		

Záznamy pohybů na zemi

ICAO: 49F00D	Průměrná chyba: 161.563686 m	ICAO: 49F052	Průměrná chyba: 171.937885 m
ICAO: 49F010	Průměrná chyba: 425.777508 m	ICAO: 49F07B	Průměrná chyba: 384.404906 m
ICAO: 49F024	Průměrná chyba: 547.019784 m		

Zajímavé záznamy

ICAO: 498B25	Průměrná chyba: 18.938774 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 17.324915 m	ICAO: 49C14B	Průměrná chyba: 435.067968 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 435.067968 m
ICAO: 498B26	Průměrná chyba: 127.539815 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 71.5799 m	ICAO: 49C1FB	Průměrná chyba: 53.386267 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 98.067789 m
ICAO: 498B29	Průměrná chyba: 15.743012 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 15.546373 m		

30. říjen 2021

Tabulka 6 - Záznam všech vhodných letů za 30. říjen

ICAO: 3C5428	Průměrná chyba: 55.969634 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 83.981595 m	ICAO: 4BB86F	Průměrná chyba: 64.198699 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 68.421242 m
ICAO: 505E67	Průměrná chyba: 129.789431 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 47.299905 m	ICAO: 4BB872	Průměrná chyba: 69.079181 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 55.250399 m



ICAO: 48C130	Průměrná chyba: 61.307328 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 60.706971 m	ICAO: 4BD156	Průměrná chyba: 60.601299 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 76.870588 m
ICAO: 4B8D0E	Průměrná chyba: 64.94084 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 68.574655 m	ICAO: 4D21A4	Průměrná chyba: 55.451079 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 80.614872 m
ICAO: 4BA8C8	Průměrná chyba: 53.910964 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 50.297542 m		

31. říjen 2021

Tabulka 7 - Záznam všech vhodných letů za 31. říjen

ICAO: 39CEAA	Průměrná chyba: 73.462406 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 39.815691 m	ICAO: 44061C	Průměrná chyba: 92.860052 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 54.009654 m
ICAO: 3C4B4E	Průměrná chyba: 82.321646 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 47.491835 m	ICAO: 440A76	Průměrná chyba: 90.204814 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 54.800744 m
ICAO: 3C86C7	Průměrná chyba: 107.531647 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 74.530864 m	ICAO: 461E15	Průměrná chyba: 76.350533 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.225741 m
ICAO: 400980	Průměrná chyba: 81.407924 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.219511 m	ICAO: 46B8A4	Průměrná chyba: 66.226965 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 38.110004 m
ICAO: 4009DB	Průměrná chyba: 114.487994 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 56.858714 m	ICAO: 4844B2	Průměrná chyba: 73.80324 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 46.06689 m
ICAO: 400D8C	Průměrná chyba: 73.451836 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 39.523422 m	ICAO: 485086	Průměrná chyba: 73.693569 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 41.14474 m
ICAO: 405457	Průměrná chyba: 84.977555 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 47.780176 m	ICAO: 489322	Průměrná chyba: 68.786845 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 44.715693 m
ICAO: 405F12	Průměrná chyba: 79.300841 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 43.840786 m	ICAO: 490D06	Průměrná chyba: 76.123011 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 59.475373 m
ICAO: 406231	Průměrná chyba: 77.15125 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 34.728876 m	ICAO: 4910CB	Průměrná chyba: 139.456627 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 124.032089 m
ICAO: 406544	Průměrná chyba: 72.920935 m	ICAO: 4951D1	Průměrná chyba: 77.997214 m



	Průměrná chyba v okolí LKPR: 41.369982 m		Průměrná chyba v okolí LKPR: 49.122133 m
ICAO: 44015A	Průměrná chyba: 64.160897 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 42.302948 m	ICAO: 4952C1	Průměrná chyba: 67.358504 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 41.416598 m
ICAO: 4403BD	Průměrná chyba: 97.914399 m Průměrná chyba v okolí LKPR: 85.376333 m		

**Zajímavé
záznamy**

ICAO: 498B27	Průměrná chyba: 36.856064 m Průměrná chyba v blízkosti LKPR: 18.327705 m	ICAO: 498B32	Průměrná chyba: 36.750186 m Průměrná chyba v blízkosti LKPR: 30.028314 m
-------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------



6.3 Zhodnocení výpočtů

V následující tabulce uvádím základní statistiky, které jsem spočítal pro jednotlivé dny:

- **Průměrná chyba dne** – hodnota, která značí průměrnou chybu všech letadel z dané tabulky (vyjma těch o kterých jsem psal v předešlém odstavci) za celý jejich let
- **Denní směrodatná odchylka** – míra rozptýlení hodnot ostatních letů od průměrné chyby dne.
- **Průměrná chyba LKPR** – takto jsem si označil hodnotu, která měří průměr průměrné chyby všech letadel z dané tabulky (vyjma těch o kterých jsem psal v předešlém odstavci) za jejich pobyt v blízkosti letiště Václava Havla, přičemž tuto blízkost letišti jsem již dříve nastavil na okruh padesáti kilometrů
- **Směrodatná odchylka LKPR** – míra rozptýlení hodnot ostatních letů od průměrné chyby LKPR.

Tabulka 8 - Shrnutí výsledků

Datum	Průměrná chyba dne	Denní směr. odchylka	Průměrná chyba LKPR	Směrodatná odchylka LKPR
28. října 2021	81,781 m	18,654 m	58,598 m	20,818 m
29. října 2021	59,816 m	8,710 m	52,350 m	16,406 m
30. října 2021	60,682 m	5,303 m	68,090 m	12,088 m
31. října 2021	73,822 m	14,632 m	46,637 m	13,503 m

Podle těchto výsledků lze říci, že zaměření se pouze na okolí letiště v Praze téměř vždy snížilo průměrnou chybu, dle mého očekávání. K tomuto nedošlo pouze u dat ze 30. října, což dávám za následek malému počtu letadel, ze kterých jsem měl na výběr pro porovnání po vyfiltrování.

Z dat, která jsem získal je vidět, že největší odchylky jsem zaznamenal hned 28. října. Průměrná chyba dne, denní směrodatná odchylka a směrodatná odchylka LKPR jsou tři parametry, které jsou největší právě u tohoto dne. To by naznačovalo, že efekt sluneční aktivity nastal opravdu ještě téhož dne.



Na závěr mohu dodat, že vesmírné počasí, v tomto případě zastoupené sluneční aktivitou, opravdu má vliv na přesnost a funkčnost systému GNSS a tedy i na přesnost ADS-B dat. Ačkoliv důsledek sluneční aktivity je na výsledcích vidět, není tak značný, jak jsem očekával.

6.4 Chyby v postupu porovnání

Jedním z nedostatků této práce je, že jsem porovnával diskrétní data, nikoliv spojitá. Data z obou zdrojů obsahovala údaje v různých časech, proto výpočet vzdálenosti pomocí Haversinovy vzdálenosti nebyl úplně přesný, jelikož jsem vzdálenost musel počítat v bodech si blízkých a ne přesných. Tento problém by se dal vyřešit pomocí interpolace jedné sady dat do časových značek té druhé, abychom mohli počítat vzdálenost ve stejných časech, ale to se ukázalo jako problém nad rámec mých schopností.



7 Použitý software

7.1 Sky Analyzer for ASTERIX

Sky Analyzer for ASTERIX [17] je výkonný nástroj pro otevírání, dekódování, analýzu a kontrolu sledovacích dat ve formátu ASTERIX (Eurocontrol All Purpose STructured Eurocontrol SuRveillance Information EXchange). Pro pochopení dekódování a struktury zpráv byl pro mne tento nástroj velice cenný.

7.2 PyCharm Community Edition 2022

PyCharm Community Edition je bezplatné integrované vývojové prostředí (IDE) s otevřeným zdrojovým kódem pro programovací jazyk Python. Vyvinula ho společnost JetBrains a nabízí bohatý editor kódu, integrovaný debugger, integraci správy verzí, podporu webových frameworků, testovacích nástrojů, vědeckých knihoven a dalších funkcí. Zaměřuje se na individuální vývojáře, amatérské uživatele a malé projekty a poskytuje základní funkce pro vylepšení vývoje v jazyce Python, takže je oblíbenou volbou pro ty, kteří hledají výkonnou IDE bez potřeby pokročilých profesionálních nástrojů, které se nacházejí v jeho placené verzi PyCharm Professional Edition. Tím byl pro mě stěžejním nástrojem v průběhu mé práce.

7.3 PuTTY

PuTTY je bezplatný, open source a široce používaný emulátor terminálu a síťový nástroj, který umožňuje bezpečné připojení ke vzdáleným zařízením a serverům. Je k dispozici pro systémy Windows a Unix-like. PuTTY podporuje SSH, Telnet a sériová připojení a nabízí šifrovanou komunikaci pro bezpečný přístup. Jeho emulace terminálu umožňuje uživatelům komunikovat se vzdálenými systémy, provádět příkazy a spravovat soubory. Uživatelé mohou ukládat nastavení připojení jako "relace" pro rychlý přístup k často používaným serverům. Nástroj také podporuje ověřování pomocí klíčů SSH pro zvýšení bezpečnosti. Díky své jednoduchosti, všestrannosti a oblíbenosti je PuTTY oblíbenou volbou mezi správci systémů, síťovými inženýry a vývojáři pro vzdálenou správu systému a bezpečný přenos souborů. Já jej používal jako nástroj pro získání mých ADS-B dat.



8 Závěr

Cílem mé práce bylo porovnání dat ze dvou na sobě nezávislých systémů pro určování polohy letadel a zkoumání vlivu vesmírného počasí na tato data.

V první kapitole jsem se zabýval vesmírným počasím, popsal jsem, jaké jevy mohou mít za následek zkreslení údajů o polohové informaci ze systému využívajícího GNSS. Dále jsem se zabýval systémem ADS-B a jeho zprávami. V této kapitole jsem popisoval i způsob, jakým jsem tato data třídil a filtroval. V následující kapitole jsem se zabýval druhým systémem s názvem WAM, který je založen na technologii MLAT. Zde jsem také popsal jeho princip a zaměřil se na signály, které systém využívá pro zjištění polohy cíle.

V této kapitole jsem se také věnoval nejtěžšímu segmentu této práce, a to dekódování formátu ASTERIX, který WAM využívá. Dekódování bylo značně složité a časově náročné. Zde bych zmínil, že skripty kódů pro toto dekódování jsem tvořil již s úmyslem dát je volně ke stažení, aby je mohl využít kdokoliv, kdo by potřeboval podobná data dekódovat, jelikož se informace k dekódování tohoto formátu velice obtížně hledají a často jsou metody vcelku zbytečně složité a je k nim potřeba několik různých programů zároveň.

V posledních dvou kapitolách jsem se věnoval výběru konkrétních letů pro výpočet odchylky mezi údaji ze systémů ADS-B a WAM. Vytvořil jsem skript v jazyce Python, který vykreslil trajektorie z obou zdrojů na mapový podklad a vypočítal a graficky znázornil odchylku pomocí Haversinovy vzdálenosti. Odchylku jsem spočítal vždy jak pro celý let, tak i pouze za dobu, po kterou se letadlo nacházelo v blízkosti Letiště Václava Havla.

Výsledná data jsem poté zapsal do tabulek a srovnal všechny měřené dny. Dospěl jsem k závěru, že mezi zmiňovanými dvěma způsoby měření polohové informace jsou vždy nějaké rozdíly a tyto rozdíly jsou pravděpodobně umocňovány při větší aktivitě Slunce a jiných událostí, souvisejících s vesmírným počasím.



9 Bibliografie

- [1] A Quick Guide To OpenSky's Impala Shell. *The OpenSky Network* [software]. 2023, 2013-2023 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://opensky-network.org/data/impala>
- [2] Asterix4py. *PyPI* [software]. 2010 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/asterix4py/>
- [3] ASTERIX Tools. *Radartutorial* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/10.processing/sp55.en.html>
- [4] Automatic dependent surveillance – broadcast. In: *EUROCONTROL* [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/service/automatic-dependent-surveillance-broadcast>
- [5] EUROCONTROL Specification for Surveillance Data Exchange ASTERIX: Part 12 Category 21 ADS-B Target Reports. *EUROCONTROL* [online]. 2015 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/asterix/20150615-asterix-adsbtr-cat021-part12-v2.4.pdf>
- [6] EUROCONTROL Standard Document for Surveillance Data Exchange: Part 1 All Purpose Structured Eurocontrol Surveillance Information Exchange. *EUROCONTROL* [online]. 2012 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/part-1-asterix-structure.pdf>
- [7] Guidance Material on Generation, Processing & Sharing of Asterix Category 21 ADS-B Messages. *ICAO* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/cns/Guidance%20Material%20on%20ASTERIX.pdf>
- [8] KAPOOR, Rohan, Subramanian RAMASAMY, Alessandro GARDI, Chad BIEBER, Larry SILVERBERG a Roberto SABATINI. A Novel 3D Multilateration Sensor Using Distributed Ultrasonic Beacons for Indoor Navigation. *Sensors* [online]. 2016, **16**(10) [cit. 2023-07-06]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s16101637
- [9] KULHÁNEK, Petr. Astronomický kurz I – 3. lekce, Slunce [přednáška]. In: YouTube kanál Planetum [online]. Praha: Planetum, 17. listopadu 2021. [vid. 2023-04-06]. Záznam dostupný z: <https://www.youtube.com/watch?v=qdXqS3nndRw>
- [10] KULHÁNEK, Petr. Magnetická pole ve sluneční soustavě II: Terestrické planety. *Astropis*. 2006, **2006**(4), 21-25.
- [11] MLAT. *Air Navigation* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.airnav.eu/index.php?stranka=mlat>



- [12] O SpaceWeatherLive. *SpaceWeatherLive* [online]. 2023, 2003-2023 [cit. 2023-06-06]. Dostupné z: <https://www.spaceweatherlive.com/cs/o.html>
- [13] Overview of Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out. In: *ICAO* [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2021/ADSB/P01-OverviewADSBOut-ENG.pdf>
- [14] Plot GPS Trajectories using Matplotlib. *Sasan Jafarnejad* [online]. 2022 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://sasan.jafarnejad.io/post/trip-plot-basemap-python-matplotlib/>
- [15] Polární záře pozorovaná z raketoplánu Discovery v květnu 1991. In: *Wikipedia* [online]. 1991 [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vesm%C3%ADrn%C3%A9_po%C4%8Das%C3%AD#/media/Soubor:Aurora-SpaceShuttle-EO.jpg
- [16] Satellite Based Augmentation System (SBAS). *SKYbrary* [online]. 2023, 2021-2023 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/satellite-based-augmentation-system-sbas>
- [17] SINOATC. *Sky Analyzer for ASTERIX* [software]. 2013-2022 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <http://www.slunecnice.cz/sw/google-chrome/>. Požadavky na systém: Windows 64-bit.
- [18] Sluneční erupce - čtvrtek 28. října 2021. *SpaceWeatherLive.com* [online]. 2021 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.spaceweatherlive.com/cs/archiv/2021/10/28/xray.html>
- [19] *SPACE WEATHER EFFECTS ON AIRCRAFT NAVIGATION: A PILOT'S PERSPECTIVE*. Baylor University, 2013. Honors Thesis. Baylor University.
- [20] SUN, Junzi. ADS-B Decoding Guide. In: *AirMetar* [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <http://airmetar.main.jp/radio/ADS-B%20Decoding%20Guide.pdf>
- [21] The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals. *Mode-S* [online]. 2021 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://mode-s.org/decode/content/ads-b/1-basics.html>
- [22] The Great Debate: is ADS-B good or bad? In: *Air Facts Journal* [online]. 2013 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://airfactsjournal.com/2013/04/the-great-debate-is-ads-b-good-or-bad/>
- [23] UJCOVÁ, Marcela. Navigace v letecké dopravě s využitím MLAT systémů. *Perner's Contacts*. Univerzita Pardubice, 2010, 5(3), 381-386.
- [24] Wide Area Multilateration: Report on EATMP TRS 131/04. *EUROCONTROL* [online]. 2005 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z:



<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/surveillance-report-wide-area-multilateration-200508.pdf>

- [25] Základy vesmírného počasí. *SpaceWeatherLive* [online]. 2023, 2003-2023 [cit. 2023-06-06]. Dostupné z: <https://www.spaceweatherlive.com/cs/pomoc.html>
- [26] Calculating distance between two geo-locations in Python. *Towards Data Science* [online]. 2020 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/calculating-distance-between-two-geolocations-in-python-26ad3afe287b>



Seznam symbolů a zkratek

ADS-B	Automatic Dependant Surveillance – Broadcast
ASTERIX	All Purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange
ATM	Air Traffic Management
CNS	Communications, Navigation and Surveillance
FANS	Future Air Navigation System
GBAS	Ground Based Augmentation System
GNSS	Global Navigation Satellite System
MLAT	Multilateration
PSR	Primary Surveillance Radar
ŘLP	Řízení letového provozu
SBAS	Space Based Augmentation System
SMGCS	Surface Movement Guidance and Control System
SSR	Secondary Surveillance Radar
TCAS	Terrain Collision Avoidance System
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
WAM	Wide Area Multilateration



Seznam příloh

Příloha 1.1 asterix_decode_final.py

Příloha 1.2 adsb_filtr_final.py

Příloha 1.3 porovnani_final.py

Příloha 1.4 plot_track.py

Příloha 2.1 39CEAA.png

Příloha 2.2 46B8A4.png

Příloha 2.3 46B8A4_priblizeny.png

Příloha 2.4 49F055.png

Příloha 2.5 47847F.png

Příloha 2.6 142591.png

Příloha 3. Složka „asterix“ s CSV soubory letadel v příloze

Příloha 4. Složka „adsb“ s CSV soubory letadel v příloze

Příloha 5 Kvůli možnosti pro upload jen malých souborů, zde vkládám odkaz na můj google disk, kde budou .ast soubory ze všech 4 dnů
https://drive.google.com/drive/folders/1uFcWX81D_Hcnpl-ISswEI0TH86aNs8N9?usp=sharing