



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

Vliv SBAS a vícefrekvenčních GNSS přijímačů ke snížení  
ionosférické chyby GNSS

SBAS and Multifrequency GNSS Receiver Impact Towards ionospheric  
Error

**Diplomová práce**

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojkách

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Mgr. Jaroslav Urbář, Ph.D.

doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.

---

**Bc. Jakub Trýb**

Praha 2023



**K621.....Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jakub Trýb**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **Vliv SBAS a vícefrekvenčních GNSS přijímačů ke snížení ionosferické chyby GNSS**

Název tématu (anglicky): **SBAS and Multifrequency GNSS Receiver Impact Towards Ionospheric Error**

### **Zásady pro vypracování**


Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:


- Cílem práce je analyzovat snížení chyby získané pozice při využití systémů SBAS/EGNOS v porovnání s využitím dodatečné frekvence (Galileo, BDS, GLONAS) a porovnat polohové chyby dvou GNSS přijímačů na společné anténě.
- Moderní možnosti geolokace pomocí GNSS v letectví.
- Porovnání pozičních dat získaných dvěma přijímači na přesně geolokované společné anténě, z nichž jeden využívá SBAS korekce či dodatečnou frekvenci (např. Galileo E6).
- Statistika snížení chyby pozice při využití SBAS či dodatečné frekvence.
- Možné souvislosti chyby pozice s různorodými monitorovanými ionosférickými poruchami.
- Diskuze řešení.

- 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: International Civil Aviation Organization (ICAO) Manual on Space Weather  
Information in Support of International Air Navigation, 2018, ICAO doc n. 10100  
US NOAA SPACE WEATHER PREDICTION CENTER  
AVIATION COMMUNITY DASHBOARD  
AU Aviation Meteorological Services, space weather
- Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**  
**Mgr. Jaroslav Urbář, Ph.D.**


Datum zadání diplomové práce: **15. července 2022**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 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 diplomové práce.

  
.....  
Bc. Jakub Trýb  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. května 2023



## Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje analýze vlivu systémů SBAS/EGNOS a vícefrekvenčních přijímačů na snížení efektu ionosférické chyby na GNSS přijímačem uváděnou pozici. Hlavní cílem je porovnání polohových chyb dvou přijímačů připojených na společnou geolokovanou anténu tak, aby bylo možné je mezi sebou porovnat s použitím a bez použití SBAS. Se stále větším užíváním GNSS navigace v letectví se totiž klade větší důraz na jeho přesnost. GNSS, která se v letectví nevyužívá jen při přeletech, kde jsou podstatně menší nároky na přesnost, ale i v konečných fázích přiblížení, kde musí být přesnost co největší. Zároveň je motivace k postupnému odpouštění od konvenčního druhu navigace, tedy využívání pozemních zařízení typu VOR, ILS a dalšího, a přechod na družicovou GNSS navigaci v letectví. Jedna z největších chyb v rámci polohování GNSS je ionosférická chyba. Tuto chybu již vícefrekvenční GNSS přijímače dokáží kompenzovat, zbytkovou chybu též částečně umíme předvídat, ale při zvýšené ionosférické aktivitě může stále docházet k velikým chybám, které mají v důsledku vliv na polohování. Provedeným výzkumem se zjistila jasná korelace/závislost s ionosférickými poruchami. Zároveň, že přijímač s SBAS si vedl o poznání lépe oproti přijímači, který SBAS opravy neměl. Úplně nejlépe si vedl profesionální přijímač s největším množstvím přijímaných družicových systémů, který se na základě statistického srovnání se zvýšenou ionosférickou aktivitou vypořádával úplně nejlépe.

**Klíčová slova:** GNSS, SBAS, ionosférické poruchy, kosmické počasí, polohování



## Abstract

This master's thesis focuses on analyzing the impact of SBAS/EGNOS systems and multi-frequency receivers on reducing ionospheric errors in position measurements. The main objective is to compare the positional errors of two receivers placed on a common precisely geolocated antenna, enabling their comparison with and without the use of SBAS. With the increasing use of GNSS navigation in aviation, there is a greater emphasis on GNSS accuracy. This is crucial not only during flights, where precision requirements are significantly lower, but mainly in the final stages of approach, where maximum accuracy is essential.

Simultaneously, there is a trend to gradually move away from conventional navigation methods, such as using ground-based equipment like VOR, ILS, and others, and transition to satellite-based GNSS navigation in aviation. One of the significant challenges in GNSS positioning is the ionospheric error. While multi-frequency receivers can correct for the ionospheric delay to mitigate this error, increased ionospheric activity can still lead to substantial errors, primarily higher-order effects of signal delays in GNSS, affecting positioning accuracy.

The conducted research identified a clear correlation/dependence on ionospheric disturbances. Additionally, the receiver with SBAS performed noticeably better compared to the receiver without SBAS corrections. The professional receiver excelled, especially when dealing with increased ionospheric activity, according to statistical comparisons.

**Keywords:** GNSS, SBAS, ionospheric disturbances, space weather, positioning



## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Jaroslavovi Urbářovi, Ph.D. a panu doc. Ing. Jakubovi Hospodkovi, Ph.D. za odborné a trpělivé vedení mé diplomové práce. Velké poděkování též patří dalším zaměstnancům ÚFA AV ČR za pomoc se zprovozněním a provozem potřebných nástrojů na observatoři Panská Ves.

V neposlední řadě děkuji mé rodině a blízkým přátelům za pevnou a neochvějnou podporu při mém studiu.

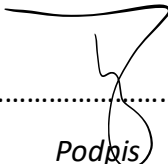


## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou prací s názvem Vliv SBAS a vícefrekvenčních GNSS přijímačů ke snížení ionosférické chyby GNSS vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové 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 30. listopadu 2023

  
.....  
Podpis



# Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>12</b>
<b>Seznam grafů .....</b>	<b>12</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>14</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>19</b>
<b>1 Globální Navigační Družicový Systém GNSS a jeho využití.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Princip a architektura GNSS .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Signál GNSS .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 Polohové chyby GNSS .....</b>	<b>22</b>
1.3.1 Vícecestné šíření signálu .....	22
1.3.2 Chyba hodin družic.....	22
1.3.3 Efemerická chyba .....	23
1.3.4 Troposférická refrakce .....	23
1.3.5 Ionosférické poruchy signálu .....	23
<b>2 Kosmické počasí a jeho projevy.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Sluneční skvrny a sluneční cyklus .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Sluneční erupce .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3 Výron koronální hmoty (CMEs) .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4 Sluneční vítr .....</b>	<b>28</b>
<b>3 Šíření signálu ionosférou.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Ionosférická vrstevnatost.....</b>	<b>31</b>
3.1.1 D-vrstva .....	32
3.1.2 E-vrstva.....	32
3.1.3 F-vrstva .....	33
<b>3.2 Ionosférická scintilace.....</b>	<b>34</b>





<b>3.3</b>	<b>Ionosférická refrakce .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Difúze elektronů v ionosféře .....</b>	<b>35</b>
<b>3.5</b>	<b>Absorpce signálu v ionosféře.....</b>	<b>35</b>
<b>3.6</b>	<b>Ionosférické bouře.....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b><i>Korekce a indikátory ionosférických poruch.....</i></b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>SBAS.....</b>	<b>36</b>
4.1.1	Zprávy SBAS.....	38
<b>4.2</b>	<b>GBAS .....</b>	<b>40</b>
<b>4.3</b>	<b>Využití dodatečné frekvence.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4</b>	<b>Indikátory narušení ionosféry a geomagnetického pole .....</b>	<b>41</b>
1.1.1	AATR .....	41
4.4.1	Dopplerovská měření .....	41
4.4.2	ASY/SYM .....	42
<b>5</b>	<b><i>Metodika .....</i></b>	<b>44</b>
<b>5.1</b>	<b>Postup měření pozičních dat .....</b>	<b>44</b>
5.1.1	Využitý hardware a jeho nastavení .....	44
<b>5.2</b>	<b>Zpracování naměřených dat.....</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>Shrnutí metodiky .....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b><i>Výsledky.....</i></b>	<b>49</b>
<b>6.1</b>	<b>Porovnání naměřených chyb pozic U-Blox a Septentrio .....</b>	<b>49</b>
<b>6.2</b>	<b>Analýza zvýšené ionosférické aktivity.....</b>	<b>50</b>
<b>6.3</b>	<b>Závislosti ionosférické aktivity a odchylek pozice z přijímačů .....</b>	<b>52</b>
6.3.1	Statistické závislosti odchylek pozice na Dopplerově posunu .....	53
6.3.2	Statistické závislosti odchylek pozice na AATR indexu .....	57
6.3.3	Statistické závislosti odchylek na ASY/SYM.....	62
	<b><i>Diskuse .....</i></b>	<b>68</b>



---

<b>Závěr .....</b>	<b>71</b>
<b>Zdroje .....</b>	<b>72</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>77</b>



## Seznam obrázků

Obrázek 1 – znázornění vícecestného šíření signálu GNSS [39], upraveno autorem .....	22
Obrázek 2 – elektronová hustota v závislosti na výšce a denní době [17] .....	30
Obrázek 3 – hustota elektronů v závislosti na výšce a vrstevnatost [20] .....	32
Obrázek 4 – světová mapa současného i plánovaného pokrytí SBAS [24] .....	37
Obrázek 5 – distribuce observatoří pro ASY/SYM [33] .....	43
Obrázek 6 – U-Center, přehled přijímaných konstelací a signálů .....	45
Obrázek 7 – rozhraní při měření U-Center (2xF9P s různou konfigurací) .....	46



## Seznam tabulek

Tabulka 1 – nosné frekvence pro konstelace GNSS [8] .....	20
Tabulka 2 – přiřazené kód v konstelaci [9, 10] .....	21
Tabulka 3 – NOAA tabulka závažností ionosférických poruch na rádia [13] .....	25
Tabulka 4 – klasifikace solárních erupcí podle intenzity [15] .....	27
Tabulka 5 – struktura využívaných SBAS zpráv.....	38

## Seznam grafů

Graf 1 – časová osa odchylek pozice (3D) pro přijímače U-Blox se zapnutým a vypnutými SBAS opravami .....	49
Graf 2 – časová osa odchylek výškové pozice pro přijímače U-Blox se zapnutými a vypnutými SBAS opravami .....	50
Graf 3 – časová osa s indexy ASY, ASYH a AATR omezená na interval měření přijímačů .....	50
Graf 4 – časová osa s indexy ASY, ASYH a AATR omezená na interval během březnové zvýšené ionosférické aktivity – geomagnetické bouře .....	51
Graf 5 – časová osa s indexy ASY, ASYH a AATR omezená na interval během zvýšené ionosférické aktivity – geomagnetické bouře.....	51
Graf 6 – časová osa s vyobrazením závislostí indexů ionosférické aktivity a odchylek pozic přijímačů U-Blox.....	52



Graf 7 – statistická závislost dF7 s chybou výškové pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	53
Graf 8 – statistická závislost dF7 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	54
Graf 9 – statistická závislost dF3 s chybou výškové pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	55
Graf 10 – statistická závislost dF3 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	56
Graf 11 – statistická závislost dF7 s chybou 3D pozice přijímače Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS .....	56
Graf 12 – statistická závislost dF3 s chybou 3D pozice přijímače Septentrio Mosaic a U-Blox se zapnutým SBAS .....	57
Graf 13 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	58
Graf 14 – statistická závislost AATR s chybou výškové pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	59
Graf 15 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS .....	60
Graf 16 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů Septentrio PolaRxS a Septentrio Mosaic .....	61
Graf 17 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	62
Graf 18 – Graf 17 – statistická závislost SYMH s chybou výškové pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	63



Graf 19 – statistická závislost ASYH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	64
Graf 20 – statistická závislost ASYH s chybou výškové pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	65
Graf 21 – statistická závislost ASYH s výškovou chybou pozice přijímačů U-Blox se zapnutým SBAS a Septentrio PolaRxS.....	66
Graf 22 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox se zapnutým SBAS a Septentrio PolaRxS.....	68

## Seznam příloh

Příloha 1 – statistická závislost dF7 s chybou výškové pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	77
Příloha 2 – – statistická závislost dF7 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	78
Příloha 3 – statistická závislost dF3 s chybou výškové pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	79
Příloha 4 – statistická závislost dF3 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS .....	80
Příloha 5 – statistická závislost dF7 s chybou pozice přijímače Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS .....	81
Příloha 6 – statistická závislost dF3 s chybou pozice přijímače Septentrio Mosaic a U-Blox se zapnutým SBAS.....	82



---

Příloha 7 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	83
Příloha 8 – statistická závislost AATR s chybou pozice přijímačů Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS .....	84
Příloha 9 – statistická závislost AATR s chybou pozice přijímačů Septentrio PolaRxS a Septentrio Mosaic .....	85
Příloha 10 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	86
Příloha 11 – statistická závislost ASYH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS .....	87
Příloha 12 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox se zapnutým SBAS a Septentrio PolaRxS .....	88



## Seznam zkratek

AATR	index míry změny TEC podél oblouku <i>(Along Arc TEC Rate)</i>
ASY	asymetrický index geomagnetických poruch <i>(Asymmetric disturbance index)</i>
CME	Výron koronální hmoty <i>(Coronal Mass Ejection)</i>
CDMA	kódový multiplex <i>(Code Division Multiple Access)</i>
C/A	Coarse/Acquisition kód <i>(Coarse Acquisition code)</i>
DME	zařízení pro měření vzdálenosti <i>(Distance Measuring Equipment)</i>
EGNOS	Evropský systém pro řízení letového provozu a navigaci <i>(European Geostationary Navigation Overlay Service)</i>
FAS	konečný úsek přiblížení <i>(Final Approach Segment)</i>
FDMA	Frekvenční multiplex <i>(Frequency Division Multiple Access)</i>
GBAS	Pozemní systém augmentace navigace <i>(Ground-Based Augmentation System)</i>
GNSS	Globální Navigační Družicový Systém <i>(Global Navigation Satellite System)</i>
GPS	Globální poziční systém <i>(Global Positioning System)</i>
GHz	Gigahertz
HPL	horizontální úroveň ochrany <i>(Horizontal Protection Level)</i>





---

ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví <i>(International Civil Aviation Organisation)</i>
IGP	ionosférický mřížkový bod <i>(Ionospheric Grid Point)</i>
ILS	Přístrojový přistávací systém <i>(Instrument Landing System)</i>
KV/HF	krátké vlny <i>(High Frequency)</i>
L	frekvenční pásmo L <i>(L band)</i>
MHz	Megahertz
NaN	není číslem <i>(Not a Number)</i>
nT	nanoTesla
P-kód	Precizní kód <i>(Precise Code)</i>
PRN	Pseudonáhodné kódy <i>(Pseudorandom Number)</i>
QZSS	Kvazi-Zenitální družicový systém <i>(Quasi-Zenith Satellite System)</i>
RAWX	zprávy obsahující surová data z GNSS <i>(GNSS Raw Measurements Data)</i>
RINEX	Formát pro výměnu dat nezávisle na přijímači <i>(Receiver Independent Exchange Format)</i>
RNAV	prostorová navigace <i>(Area Navigation)</i>
SBAS	Systém Augmentace Satelitní Navigace <i>(Satellite-Based Augmentation System)</i>
SOHO	Solární a heliosférická observatoř <i>(Solar &amp; Heliospheric Observatory)</i>



---

SATCOM	Satelitní komunikace <i>(Satellite Communications datalink)</i>
SYM	symetrický index geomagnetických poruch <i>(symmetric disturbance index)</i>
TEC	Celkový obsah elektronů <i>(Total Electron Content)</i>
TDMA	Časový multiplex <i>(Time Division Multiple Access)</i>
TTA	čas do výstrahy <i>(Time To Alert)</i>
UDREi	Index chyby uživatelského diferenciálního rozsahu <i>(User Differential Range Error index)</i>
UKV/UHF	Ultra krátké vlny <i>(Ultra High Frequency)</i>
UTC	Světový koordinovaný čas/světový čas <i>(Coordinated Universal Time)</i>
VOR	VKV všesměrový radiomaják <i>(VHF omnidirectional radio range)</i>
VKV/VHF	Velmi krátké vlny <i>(Very High Frequency)</i>



## Úvod

V oblasti globální navigace a letectví je neustálým vývojem využívání systémů GNSS (Globální Navigační Družicový Systém) klíčovým faktorem pro dosažení maximální přesnosti polohování. Tato diplomová práce se zabývá důkladnou analýzou vlivu systémů SBAS/EGNOS a vícefrekvenčních přijímačů na redukci ionosférických chyb při měření pozice.

V současném kontextu letectví získává GNSS navigace stále větší význam nejen během letových operací s menšími nároky na přesnost, ale i ve finálních fázích přistání, kde vyžaduje maximální přesnost pro bezpečné přiblížení. Tím vzniká potřeba důkladného porovnání polohových chyb přijímačů umístěných na společné anténě, s důrazem na použití a nevyužití systému SBAS.

Současně s tímto trendem směrem k modernějším technologiím se objevuje motivace k postupnému opuštění konvenčních forem navigace, jako jsou pozemní zařízení typu VOR a ILS, ve prospěch družicové GNSS navigace v letectví. Jedním z klíčových faktorů ovlivňujících přesnost GNSS polohování je ionosférická chyba, kterou tato práce detailně zkoumá.

V rámci práce budou provedena měření a komplexní analýzy vztahu mezi ionosférickými poruchami a odchylkami pozice, přičemž statistické metody budou použity k objasnění této závislosti.

Tímto způsobem je tato práce zaměřena na poskytnutí hlubšího vhledu do komplexních vztahů mezi systémy SBAS/EGNOS, vícefrekvenčními přijímači a ionosférickými poruchami v kontextu letectví, s cílem přispět k dalšímu zdokonalení navigačních technologií a zvýšení bezpečnosti leteckých operací.

# 1 Globální Navigační Družicový Systém GNSS a jeho využití v letectví

Tato kapitola je věnována vysvětlení principů GNSS (Global Navigation Satellite System), jejich typů a využití primárně v letectví. Základní princip určování polohy a času spočívá v přijímání a zpracování speciálního signálu od družic umístěných na oběžné dráze Země. Obecně ale můžeme považovat za GNSS jakýkoliv systém, jež se družicovou navigací zabývá. Mezi základní typy družicových navigací se řadí například nejznámější systém GPS (USA), dále pak GLONASS (Rusko) a neposlední řadě nejnovější systém družicové navigace Galileo (EU) nebo BeiDou (Čína). Existují ale i augmentační systémy, které zdokonalují přesnost, integritu, kontinuitu a dostupnost GNSS navigace. Vzhledem k zaměření práce je text založen primárně na princip systémů GPS a SBAS, pokud není zmíněno jinak. [1, 2]

Součásti GNSS dělíme do tří základních úrovní – kosmické, uživatelské, řídicí a dodatečně augmentační. Nejvyšší kosmická úroveň je v podobě družic obíhající zemi ve svých ustálených oběžných drahách. Tyto družice vysílají nepřetržitý signál se směrem k Zemi. Rozdílnými parametry provozovatelů GNSS jsou počty oběžných drah, po kterých družice obíhají, výškou, sklonem a rozmístění těchto družic a počtem družic s různými technickými parametry – například vybavením a zejména tedy principem modulace signálu. Druhou úrovní je úroveň uživatelská, do které spadají GNSS přijímače a které zpracovávají signál od družic pro výpočet pozic. Třetí úrovní je řídicí segment, známý též jako operační, který se skládá z hlavní řídicí stanice, monitorovací stanice a komunikační stanice, jež je určena právě pro komunikaci s družicemi. Tato úroveň je úrovní správní, tzn. stará se o systém jako celek – sleduje a spravuje stav družicové konstelace, udržuje jednotný čas v družicích, generuje obsah navigačních zpráv a předpovídá stav družicových hodin a efemeridy.[3]



## 1.1 Princip a architektura GNSS

Základním principem družicové navigace je příjem signálu od družice ke koncovému přijímači a jeho zpracování. Každá družice totiž kontinuálně vysílá speciální signál, ve kterém je, vyjma dalších podstatných informací, zakódovaná i velmi přesná časová značka. [4]

Na základě získané časové značky lze – po výpočtu času uraženého mezi satelitem a přijímačem, a s využitím principu triangulace, určit polohu přijímače, přesněji antény, která signál přijímá. Výraz triangulace znamená, že je potřeba minimálně tří viditelných družic pro výpočet polohy, avšak je nutná též čtvrtá pro časování. Této metodě se jinak také říká dálkoměrná a výslednou vzdálenost mezi satelitem nazýváme pojmem pseudovzdálenost. Tu lze vypočítat jako: [4, 5, 6]

$$D_k^i = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}, i = 1, 2, 3$$

Rovnice 1 – vzorec pro dálkoměrnou metodu [6]

Kde  $D_k^i$  je pseudovzdálenost mezi přijímačem a satelitem v trojrozměrném prostoru,  $i = 1, 2, 3$  jsou v našem případě například body přijímače, a každý z nich je definován svými souřadnicemi značenými jako  $x_i, y_i, z_i$ . Dalšími body jsou pak  $x_k, y_k, z_k$ , jež značí polohu satelitů. Vzhledem k rozdílné časové základně vzniká 4. neznámá, kterou je čas neboli chyba času přijímače. Nelze v každém přijímači – a to ani v těch nejvýkonnějších, provozovat atomové hodiny pro přesný výpočet času. Aby byl tedy přijímač schopen dopočítat vzdálenost ke konkrétním satelitům, potřebuje znát jejich přesný čas. Tento čas, ale i další informace, jsou načítány z tzn. almanachu a efemerid. Efemeridy jsou Keplerovské parametry drah jednotlivých družic a jsou zasílány v tzn. navigační zprávě. Navigační zpráva obsahuje informace o zdravotním stavu družic, o časovém údaji atomových hodin pro opravu chyby času přijímače, dále pak předpokládané efemeridy družic, jež jsou obvykle aktualizovány jednou za hodinu, stavu ionosféry a zmíněný almanach, jež obsahuje provizorní efemeridy satelitů, využívané v přijímači pro snazší příjem signálu. [4, 6]



## 1.2 Signál GNSS

Signál GNSS značíme v letectví do pásma L a je na vysokých frekvencích v řádu 1 až 2 GHz. Tento rozsah frekvence je v letectví využíván zpravidla pro komunikační (například SATCOM) a navigační účely (zmíněný GNSS, DME a další). [8]

L-Pásma nosných frekvencí GNSS dále řadíme v běžně používané rovině na L1, L2 a L5 podle vlastností a účelů. L1 je využívána jako základní pro přenos navigačních a polohových informací, skládá se mimo jiné i z C/A a P-kódu. Většina běžně užívaných přijímačů využívá právě tuto frekvenci pro určování polohy. L2 je frekvence využívaná pro vyšší přesnosti a odstraňování vlivů atmosféry na signál – tyto vlivy dokážou některé přijímače snižovat právě kombinací signálů L1 a L2. L5 spadá mezi nejnovější frekvenci a je určen pro civilní využití s vyšší přesností než L1, primárně díky nižší náchylnosti na atmosférické jevy. Ne všechny systémy GNSS ale na frekvencích L5 vysílají. Jsou však i frekvence L3 a L4 – tyto pásma se ale využívají pro vojenské a kalibrační účely a nejsou tedy veřejně využívány.[8]



Zde je výčet nosných frekvencí pro základní systémy GNSS:

Systém:	Frekvence L1 (MHz)	Frekvence L2 (MHz)	Frekvence L5 (MHz)
<b>GPS</b>	1575.42	1227.60	1176.45
<b>GLONASS</b>	1602	1246	N/A
<b>Galileo</b>	1575.42	1191.795 (AltBOC) 1207.14 (QPSK)	1176.45
<b>BeiDou</b>	1561.098	1207.140	1207.140

Tabulka 1 – nosné frekvence pro konstelace GNSS [8]

Na tyto nosné vlny jsou modulovány, společně s navigační zprávou, tzv. pseudonáhodné kódy – PRN. Kódy PRN ale nejsou náhodné, nýbrž mají tak vysokou frekvenci opakování až se mohou jevit jako náhodné – odtud tedy pseudonáhodné. Jsou to posloupně generované hodnoty 0 a 1 s dlouhou periodou. Jedná se o složitý matematický způsob Goldovských posloupností. [8, 9]

U GNSS dělíme odlišení družic v rámci systému na 3 metody. U GPS se jedná o CDMA – Code Division Multiple Access, kódový multiplex. Tato metoda využívá vysílání různých kódů – přiřazených pro konkrétní družice, na stejné frekvenci s charakteristikou PRN. Využívá se při tom 1023 bitů přesně přiřazených na daném satelitu o frekvenci L1, díky čemuž je možné rozeznat konkrétní satelit od ostatních. Přijímače na základě předchozí znalosti PRN a využitím korelace vyhledává signály z konkrétních družic, ostatní nekorelovaný signál se projevuje jako šum. Tyto satelity ale musí být přijímači dopředu známé, jsou přidělovány v rámci konstelace a nejsou trvalé. Není zároveň možné, aby bylo v dané konstelaci více jak 32 satelitů, protože stav 32 PRN je maximální číslo pro správnou korelaci, tzn. při přidání dalšího PRN by se podstatně zhoršovala autokorelace a starší přijímače, potažmo v letectví avionika, by nemusela rozeznávat jednotlivé kódy mezi sebou. Celkový počet 235 kódů, jakožto součet PRN pro všechny konstelace, je poté tedy maximálním možným počtem. Vyjma GPS využívá metody CDMA i nejnovější systém Galileo. [7, 8]



Další metodou je metoda FDMA – Frequency Division Multiple Access, česky jako frekvenční multiplex, jež vychází z opačného principu než metoda CDMA. Této metody stále využívá poměrně zastaralý systém GLONASS. Principem je vysílání stejného kódu, ale na odlišných frekvencích. Je zapotřebí mít tedy dostatek vhodných frekvencí – z tohoto důvodu je kód vysílán na stejných frekvencích na opačných stranách zeměkoule. Bohužel je u tohoto systému přítomna vysoká interference a interoperabilita v rámci GNSS. U systému GLONASS se ale do budoucna počítá s kódovým multiplexem jako u CDMA. Poslední metodou je TDMA – Time Division Multiple Access, česky jako časový multiplex, který využívá rozdílnosti na základě času, tedy každá družice vysílá stejný kód na totožné frekvenci, pouze v jiný časový interval. Vzhledem ke komplikovanosti a náchylnosti přijímačů se nepoužívá. [7]

Jednotlivé počty kódů PRN a jejich rozdělení do systémů lze vyčíst v následující tabulce:

Počet kódů v konstelaci	Přiřazená konstelace
<b>1-32</b>	GPS
<b>33-54</b>	SBAS GPS
<b>65-68</b>	GLONASS
<b>89-96</b>	SBAS GLONASS
<b>97-192</b>	nepřiděleno
<b>193-200</b>	QZSS
<b>201-235</b>	BEIDOU

Tabulka 2 – přiřazené kód v konstelaci [9, 10]

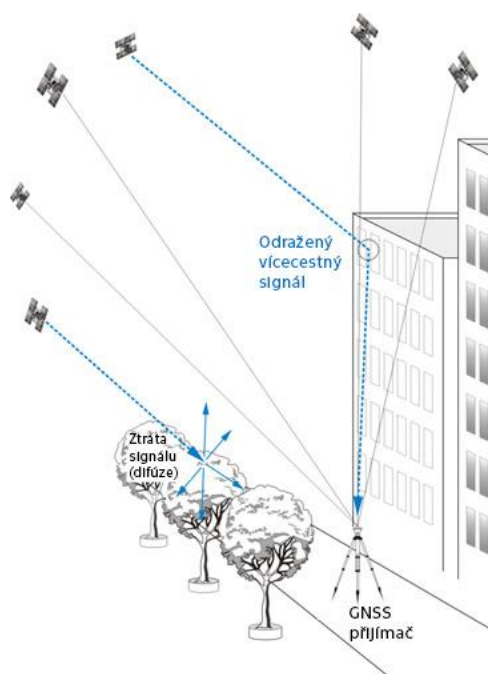


### 1.3 Polohové chyby GNSS

Polohové chyby systémů GNSS bývají způsobovány různými faktory a liší se v závislostech na podmínkách a okolnostech daných přijímačů a satelitů.

#### 1.3.1 Vícecestné šíření signálu

Jedná se o odrazy přijímaného signálu o různé povrchy, plochy apod., signál tedy nepřichází přímo od družice, ale odrazem a s velkým zpožděním a výsledná chyba pozice se může projevit až v rámci metrů. Vhodnými opravami může být měření na více frekvencích, s vyššími citlivostmi přijímání a vhodným umístěním antény. [6, 9]



Obrázek 1 – znázornění vícecestného šíření signálu GNSS [39], upraveno autorem

#### 1.3.2 Chyba hodin družic

Jedná se jednoduše o chybu způsobenou špatným nastavením či parametry hodin. Družice disponují atomovými hodinami. Navigační zprávu, ve které je obsažena oprava na tuto chybu, lze po případné korekci hodin přijímačem úplně odstranit. [6, 9]



### **1.3.3 Efemerická chyba**

Efemerickou chybou rozumíme nejistotu pozic družic, které jsou vypočtené. Tato chyba většinou narůstá s dobou poslední opravy, tedy publikování efemerid, případně vrácením družic na svojí orbitu. Tato chyba může narůst až do řádů několika málo metrů. [6, 9]

### **1.3.4 Troposférická refrakce**

Jedná se o chybu způsobenou troposférickými proměnnými, tedy počasím, sahajícím od země až od výšky tropopauzy (tzn. cca. 10-12 km nad zemí). Tato chyba může být od několika metrů až po desítky metrů v závislosti na aktivitě v troposféře a vliv má na chybu polohování hlavně u metody CDMA. [6, 9]

### **1.3.5 Ionosférické poruchy signálu**

Faktorům, které ovlivňují aktivitu, a tedy zvýšení ionosférické chyby polohování, je věnována samostatná kapitola, stejně tak možným korekcím těchto chyb pomocí SBAS či využitím dodatečné frekvence. V metodice této práce pak lze vyčíslit velikost těchto chyb na základě naměřených indikátorů.



## 2 Kosmické počasí a jeho projevy

Kosmické počasí, známé též jako vesmírné počasí nebo pod anglickým názvem jako „Space Weather“, ve vztahu Země-vesmír, lze chápat jako dynamicky velice proměnlivé prostředí. Toto prostředí zahrnuje dění na zemi, ale také Slunce, sluneční vítr, magnetosféru, ionosférický systém, termosféru a exosféru. Vesmírné počasí má pro účely této práce negativními podmínky nejen na systémy kosmických lodí a vesmírných satelitů, tedy vesmírné prostředků, ale i na ty pozemní – vyznačující se například ve zhoršení výkonů a spolehlivosti v systémech pro komunikaci, navigaci ale i v napájení potřebných systémů. Specifické jevy kosmického počasí pak lze chápat jako interakci slunečních a magnetosférických nabitých částic v blízkosti Země. Vzhledem ke značnému vlivu na sociální a ekonomický dopad, je této problematice v posledních letech věnován zvýšený výzkum. [11, 12]

Sluneční aktivitou je jinak myšleno zvýšeného výskytu erupcí a koronálního výtrysku hmot Slunce. Jedná se tak o změny ve spektrálním složení slunečního záření. Za zvýšenými výskyty stojí magnetické pole Slunce. Právě Sluneční aktivita stojí za degradací a selhávání satelitů a vesmírných přístrojů. Energie Slunce vzniká z procesu termonukleárních reakcí v jeho jádře, a to při slučování protonů za vzniku jader hélia. Poměrná část se nakonec z jádra dostává až na povrch, kde dále dochází k propagaci do vesmíru jako elektromagnetické záření. Na Slunci a uvnitř něj jsou obrovské teploty – v jádru přibližně 15 milionů Kelvinů, přičemž na povrchu je to 5778 Kelvinů, díky čemuž dochází k ionizaci plynů, což produkuje kladně nabitě atomy, které tvoří silné elektrické pole, jež vytváří silné magnetické pole. Slunce má tak vlastnosti dynamické a proměnlivé hvězdy, která mění své magnetické póly. Důležitým aspektem Slunce je jeho cyklus, který je zhruba 11 let a má své maximum a minimum. Dalším maximum se očekává rok 2025 a znamená to právě jeho zvýšenou aktivitu a dopady na Zemi. [11]

NOAA – Americká National Oceanic and Atmospheric Administration, klasifikuje dopad sluneční aktivity ve vztahu rádiové přenosu podle následující tabulky podle závažnosti a četnosti do 5 úrovní:



Měřítko	Závažnost	Vliv	Průměrná četnost (1 sluneční cyklus = 11 let)
R 5	Extrémní	<b>HF Rádio:</b> Úplný výpadek HF (vysokofrekvenčního) rádia na celé sluneční straně Země po několik hodin.	méně než 1 za cyklus
		<b>GNSS:</b> Nízkofrekvenční navigační signály na sluneční straně Země jsou s mnoha hodinovými výpadky, což má za důsledek ztráty polohování, tyto chyby se mohou rozšířit i na noční stranu Země.	
R 4	Závažná	<b>HF Rádio:</b> Úplný výpadek HF (vysokofrekvenčního) rádia na většině sluneční strany Země po dobu jedné až dvou hodin.	8 za cyklus
		<b>GNSS:</b> Výpadky navigačních signálů nízké frekvence s důsledky zvýšené chybovosti polohování GNSS po dobu jedné až dvou hodin v rozsahu drobného narušené na osvětlené straně Země.	(8 dní za cyklus)
R 3	silná	<b>HF rádio:</b> rozsáhlé výpadky HF rádiokové komunikace, ztráty v rozsahu jedné hodiny na osvětlené straně Země.	175 za cyklus
		<b>Navigace:</b> Výpadky navigačních signálů nízké frekvence s důsledky zvýšené chybovosti polohování GNSS po dobu jedné až dvou hodin v rozsahu drobného narušené na osvětlené straně Země.	(140 dní za cyklus)
R 2	průměrná	<b>HF rádio:</b> Občasné výpadky HF rádiové komunikace na osvětlené strany po dobu desítek minut.	350 za cyklus
		<b>GNSS:</b> degradace navigačních signálů nízké frekvence po dobu desítek minut.	(300 dní za cyklus)
R 1	Slabá	<b>HF rádio:</b> slabá nebo nepatrná degradace HF rádiové komunikace na osvětlené straně, občasné ztráty signálu.	2000 za cyklus
		<b>GNSS:</b> Navigační signály jsou degradovány po krátkých intervalech.	(950 dní za cyklus)

Tabulka 3 – NOAA tabulka závažností ionosférických poruch na rádia [13]



Ve vztahu předvídatelnost a možných korekcí na ovlivnitelné systémy hraje významnou roli také propagace směrem k zemi, který může být v řádu dní, hodin ale i pár minut – a to až 8, tedy při rychlosti propagace směrem k zemi v rychlosti světla. Tyto časové údaje hrají tedy významnou roli právě pro síť GNSS, potažmo i SBAS a dalších systémů.[12]

## 2.1 Sluneční skvrny a sluneční cyklus

Sluneční skvrny mají projev na Slunci jako tmavá místa. Obvyklá sluneční skvrna má vnitřní a vnější část. Vnitřní část nazýváme Umbrou – stínem, a vnější, světlejší, jako Penumbrou – polostínem. Nově vzniklá skvrna má projev jako póry a velikost cca. 1000 km, těchto pór můžeme pozorovat několik. Další fází je buďto zánik těchto skvrn nebo naopak růst – v případě růstu může dosahovat jejich rozměr až 50 tisíc kilometrů a ze Země jsou pozorovatelné pouhým okem. Sluneční skvrny jsou svými vlastnostmi chladnější než jejich povrchové okolí. Toto chladnější prostředí je způsobeno lokálním magnetickým polem, jež snižuje konvekci plazmatu.[12]

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, sluneční cyklus je udáván zhruba na 11 let, během něhož nastává solární minimum a maximum, potažmo i četnost slunečních skvrn, erupcí a výronů koronální hmoty. Během slunečního cyklu zároveň dochází ke změnám magnetického pole Slunce, což souvisí s četností slunečních skvrn, které tak mohou být dobrým indikátorem magnetické aktivity, potažmo fází cyklu Slunce. Při nejnižší aktivitě Slunce nejsou na Slunci četné téměř žádné skvrny a při nejvyšší sluneční aktivitě, tj. při velké erupční a rádiové aktivitě, je četnost skvrn naopak nejvyšší. [12, 14]

## 2.2 Sluneční erupce

Sluneční erupce jsou náhlými a intenzivními událostmi v podobě výbuchů s obrovským množstvím energie na Slunci, které se vyznačují intenzivním výbuchem v celém elektromagnetickém spektru (rentgenovém až ultrafialovém) záření v atmosféře Slunce doprovázené výtryskem plazmatu a částic. Děje se tomu tak v aktivních oblastech slunečního povrchu, přesněji v chromosféře a koruně, a trvají obvykle několik minut, s



rychlostí propagace blízkou rychlosti světla. Koronální výrony, spojené s korunou jako vnější částí sluneční atmosféry, při těchto erupcích způsobují náhlé uvolnění energie ionizací plynu v koróně a emitují záblesky světla na okrajích slunečního disku. Projev na Zemi je téměř okamžitý, a to díky výraznému uvolnění energie, dosahující až 100 milionů Kelvinů – což je násobně více než má jádro Slunce. [12]

Mechanismus slunečních erupcí není zcela znám, avšak víme, že jsou spojeny s rychlou konverzí energie magnetické na energii kinetickou. Tyto erupce se často vyskytují v aktivních zónách se silným magnetickým polem, obvykle v přítomnosti slunečních skvrn a v oblasti opačné magnetické polarity. Důsledky takových erupcí mohou mít vliv na elektromagnetické pole Země, vedoucí ke geomagnetickým bouřím. Tyto jevy lze sledovat pomocí observatoří Solar nebo SOHO. [12, 14]

Solární erupce dělíme podle intenzity do tříd, které jsou uvedeny v následující tabulce podle její vrcholové intenzity ve spektru měkkého rentgenového záření pásma 0,1-0,8 nm:

Klasifikace	Intenzita toku rentgenového záření [watt/m <sup>2</sup> ]
<b>A</b>	$I < 10^{-8}$
<b>B</b>	$10^{-7} \leq I < 10^{-6}$
<b>C</b>	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
<b>M</b>	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
<b>X</b>	$I \leq 10^{-4}$

Tabulka 4 – klasifikace solárních erupcí podle intenzity [15]

V případě dostatečně silné sluneční erupce – tj. podle klasifikace M až X dochází při zásahu Země k interferenci s rádiovým spektrem, což zároveň nepříznivě ovlivňuje GNSS signál a zároveň může dojít až k poškození satelitů, konkrétně při průchodu radiace stíněním družic a tím poškozením elektroniky, potažmo čipů družic. [12]



### 2.3 Výron koronální hmoty (CMEs)

Výron koronální hmoty, též známý pod anglickým pojmem CME – Coronal Mass Ejection, představuje druhý nejsilnější jev sluneční aktivity, hned po erupci. Jeho vznik je dán destrukcí lokálních magnetických polí Slunce při erupcích nebo eruptivních protuberacích, což má za následek propagaci silného kosmického záření. Hmota při koronálním výronu se pohybuje okolo 10<sup>12</sup>-10<sup>13</sup> kg, složená primárně z protonů, hélia, elektronů a jiných těžších prvků) a dosahuje rychlosti 400 až 2000 km/s při kinetické energii 10<sup>23</sup> až 10<sup>25</sup> J. [12]

Při výronu koronální hmoty dochází k jeho expanzi, což má při zasažení Země za důsledek objem až polovinu prostoru mezi Zemí a Slunce a oblak může procházet přes Zemi i desítky hodin. Pohyb k Zemi však nemusí být podmínkou, záleží na směru výronu. Oproti sluneční erupci je výron koronální hmoty podstatně pomalejší a trvá tak v 15 hodin, v některých případech až 3-5 dní, než zasáhne zemi. Při zásahu Země dochází nejen k typickým viditelným projevům – polárním zářím, známé též jako aurora, což je projev reakce kyslíku a dusíku vůči slunečním částicím, ale i k možným výpadkům proudu a pro účely této práce hlavně k rušení rádiového signálu. [12, 14]

### 2.4 Sluneční vítr

Jako i ostatní projevy Slunce, i solární vítr souvisí se slunečním cyklem. V období solárního minima je sluneční vítr pomalejší v oblasti rovníku a je více strukturovaný, během solárního maxima se liší po celém svém povrchu Slunce. Sluneční vítr jako takový je proud elektricky nabitých částic unikajícího plazmatu ze Slunce, konkrétně z jeho aktivního regionu, a objem tohoto plazmatu je náhle zahřeje a následně se vznítí. Tento vítr postihuje celou sluneční soustavu rychlostí až okolo 800 km/s – nazývaný se přístižně rychlý sluneční vítr, pomalý sluneční vítr má rychlost okolo 400 km/s a je detekován jeho rentgenovým zářením. [12]



### 3 Šíření signálu ionosférou

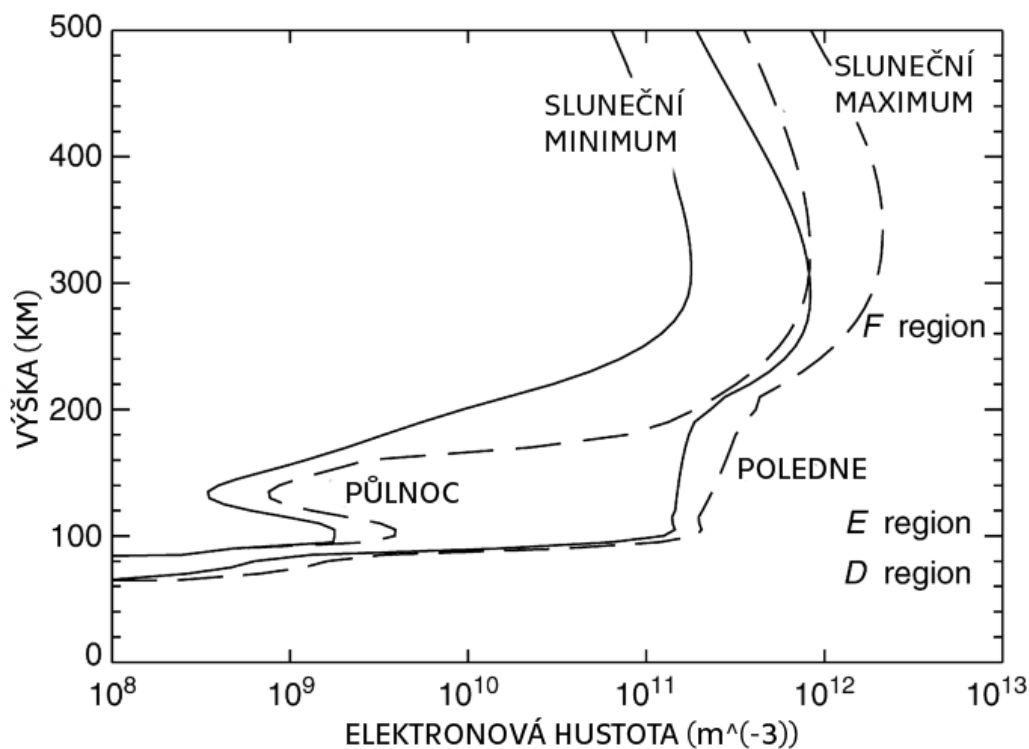
Ionosféra se nachází v oblasti mezoféry a termosféry, a to ve výšce 60 až 2.000 km na zemi. Tato část atmosféry obsahuje mimo neutrálních plynů také ionizované částice a volné elektrony, které jsou výsledkem měkkého rentgenového (X) a ultrafialového (UV) záření ze Slunce, případně kosmického záření. Díky sluneční či kosmické aktivitě dochází k ionizaci ionosféry na vodivé prostředí. Pokud je prostředí kladně nabitě, dochází ke zpomalování šířeného rádiového signálu, případně na jeho lámání (odklony) – a to na pomezí elektricky inertní části atmosféry a elektricky vodivém prostředí. Vzduch v takových ionosféře, tedy v takových výškách, je extrémně řídký, trvá tedy relativně dlouhou dobu, než dojde ke srážce elektronů a atomů, a tedy k neutralizaci iontů. V nižších výškách ionosféry je vzduch o něco hustší, je zde tedy větší pravděpodobnost k rekombinacím kladných iontů s elektrony, a tedy vznik neutrálních atomů nebo iontů. V nočních, neslunečných hodinách, tak rychle dochází k úbytku nabitých částic, a tedy ionizované částice prakticky mizí. Naopak tedy ve vyšších vrstvách je životnost, díky nižším pravděpodobnostem setkávání elektronů s atomem, a tedy neutralizacím iontů, ionizovaných částic delší a může docházet k další rekombinaci částic. Z těchto důvodů rozdělujeme ionosféru na další vrstvy se specifickými vlastnostmi. Takové vrstvy nazýváme D, E, F, potažmo F1 a F2 v letních měsících. Pouhým okem viditelnou část ionosféry známe jako polární záři – auroru. [12, 14]

Na ionosférickou chybu pozice je nejvíce náchylná metoda CDMA, tedy nejčastěji využívané systémy GPS a nejnovější systém Galileo, ale chyba má vliv na všechny druhy GNSS polohování a HF komunikačního spektra rádiových vln. V extrémních případech může mít kosmické počasí vliv i na samotné satelity, jako tomu bylo i v případě satelitů Starlink během 3.-4. února 2022, kdy 38 satelitů bylo zničeno geomagnetickou bouří. [16]

Projevy ionosférických poruch jsou z většiny na sluneční denní straně planety, kdy ke sluneční aktivitě vyšší než v nočních časech, jak je vidět v následujícím grafu, kde je na



ose x vidět změna šíření signálu jednotlivými vrstvami ionosféry a na ose y elektronová hustota. Z grafu je jednoznačné, že větší výskyt TEC bude pro denní časy. [12, 17]]



Obrázek 2 – elektronová hustota v závislosti na výšce a denní době [17]

V denních hodinách totiž dochází k podstatně vyšší elektronové hustotě a šíření signálu mezi družicí a přijímačem je tak náchylnější na chybu šíření signálu. [17]

Nad rámec chyby získané zvýšenou elektronovou hustotou v ionosféře se chyba zvyšuje při delším šíření ionosférou postavením družic, tedy když je pozice satelitu vůči přijímači při horizontu a signál tak musí putovat delší vzdálenost ionosférou, než kdyby byla vůči přijímači přímo nad ním, kdy je vrstva cesta vrstvou podstatně kratší. V neposlední řadě velikou roli v ionizaci atomů a molekul hraje též spektrum plynů a jejich koncentrace, stejně tak jako intenzita a spektrum tohoto záření. [18]



Jak rádiové se samotné rádiové vlny budou chovat v ionizovaném médiu nám poté říkají následující rovnice:

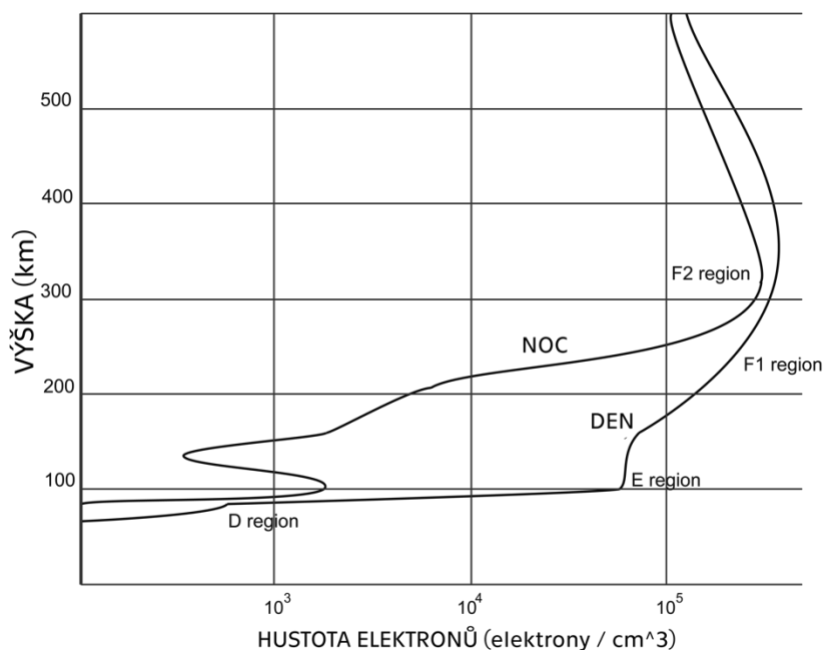
$$f_p \propto \sqrt{n_o} \quad \left| \quad n = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}\right.$$

Rovnice 2 – chování rádiových vln v ionizovaném médiu [18]

První rovnice říká, že frekvence plazma  $f_p$  je přímo úměrná odmocnině z  $n_o$  (počet nositelů náboje v jednotkovém objemu, například elektrony v plazmatu). Druhá rovnice poté popisuje, index lomu  $n$  v prostředí přítomného na plazma s frekvencí  $f_p^2$ , načež  $f$  je frekvencí elektromagnetického pole, které prochází tímto plazmatem. Výsledná rovnice tedy uvádí vztah mezi indexem lomu a frekvencí elektromagnetického pole v plazmatu. Znamená to tedy, že obsah elektronů v každé vrstvě definuje kritickou frekvenci, která zase ovlivňuje index lomu média. Každá vrstva buďto odráží, absorbuje nebo nechává projít rádiové vlny v závislosti na jejich frekvenčním spektru a na frekvenční charakteristice, a to na základě pravidla, že pokud je  $f > f_p$  elektromagnetická vlna prochází ionosférou a pokud  $f < f_p$ , vlna je ionosférou odražena. [18, 19]

### 3.1 Ionosférická vrstevnatost

Při průchodu atmosférou se sluneční záření filtruje, a tedy mění své vlastnosti. Čím vyšší nadmořská výška, tím menší hustota plynů, a tedy vyšší intenzita záření skrze takovou vrstvu. Tyto změny můžeme pozorovat v chemickém složení plynů s rostoucí výškou, značené jako D, E, F, případně pak F rozdělujeme ještě na F1 a F2. Celkově pak řadíme tyto vrstvy od nejméně ionizované vrstvy D po nejvíce ionizovanou vrstvu F2. Vrstvy mění své vlastnosti během průběhu dne, roku, jedenáctiletého slunečního cyklu, ale též podle zeměpisné šířky. Obecně sice hustota plynů klesá s výškou, ale hustota nabitých částic je závislá na chemických procesech v daných výškách, především sluneční fotoionizací s výsledkem viz obr.2.[20]



Obrázek 3 – hustota elektronů v závislosti na výšce a vrstevnatost [20]

### 3.1.1 D-vrstva

Jedná se nejnižše položenou ionosférickou vrstvou ve výškách zhruba 80 km. Je zde tlak o 2 Pa a teplota -76 °C. Koncentrace elektronů se zde pohybuje mezi  $10^7$  až  $10^{10}$  elektronů na krychlový metr. Tato vrstva je charakteristická svou ionizací, která je ovlivňována slunečním zářením. Právě tato část vrstvy v noci mizí, protože zde dochází k reakcím iontů a elektronů. Vlny o vysokých frekvencích HF využívané v letectví například vzdálenější komunikaci nejsou odraženy a vysokofrekvenčních rádiové vlny jsou naopak pohlcovány. [14, 20]

### 3.1.2 E-vrstva

Tato vrstva se nachází ve výšce zhruba 110 km s tlakem 0,01 Pa a teplotou okolo -50 °C. Koncentrace elektronů v této vrstvě je v hodnotách  $10^{11}$  elektronů na krychlový metr a projevuje se zde podobné chování jako v nižší vrstvě D, tedy maximální ionizace v přímý sluneční svit (lokální poledne). Ionty v této oblasti jsou převážně  $O^{2+}$ , který vzniká při absorpci slunečního záření a  $NO^+$ , který vzniká jako důsledek přenosu náboje srážek s ostatními ionty ionizovaných slunečními rentgenovými paprsky. V oblastech polární



záře dochází k ionizaci též pomocí tzv. precipitujících "pršících" energetických nabitých částic horní atmosférou. [14, 20]

### 3.1.3 F-vrstva

Nejvrchnější vrstva F leží 120 až 800 km nad zemí, s tlakem  $10^{-4}$  Pa a teplotou okolo 1000K. Koncentrace elektronů je zde okolo  $10^{11}$  elektronů na krychlový metr. Tato koncentrace je způsobena ionizací atomového kyslíku Lymanovými emisemi a emisemi helia. [14, 20]

Při vyšší sluneční aktivitě je tato vrstva rozdělena na dvě části – F1 a F2. F1 je zhruba ve výšce 200 km nad zemí.  $O^+$  ionty se zde přenášejí na náboj neutrální a vytvářejí  $NO^+$ , v noci zde opět mizí. Nejvyšší koncentraci elektronů lze nalézt F2 ve výšce 350 km, zde jsou hlavně  $O^+$  jakožto hlavní ionty. Z pohledu letectví je právě tato vrstva důležitá pro komunikaci v rozsahu HF. [14, 20]



## 3.2 Ionosférická scintilace

Ionosférickými scintilacemi jsou nazývány jevy, které se projevují jako rychlé fluktuace amplitudy/intenzity anebo fáze v intenzitách elektromagnetických signálů při průchodu ionosférou, způsobených turbulencemi v malém škálovém měřítku struktury ionosféry (stovky metrů a méně). Obvykle jsou scintilace způsobeny nerovnoměrným rozložením ionizovaných částic v konkrétní části ionosféry. Jev lze připodobnit například viditelnému blikání hvězd na obloze, když jejich světlo prochází atmosférou Země. Při průchodu elektromagnetických vln – nejčastěji o frekvencích nižších GHz dochází k nárazům na nerovnoměrnosti v hustotách ionizovaných částic, a tedy k rozptylu vln. Výsledek se na zemi projevuje v podobě časových variací intenzity signálu, dle velikosti ionosférických struktur i prostorovými - mezi různými směry - dle spojnic družic a zařízení na zemi, procházejících od sebe desítky kilometrů vzdálenými částmi ionosféry. Problematické narušení průchodu GNSS signálu nastává zejména v oblastech blízko rovníku v období soumraku především do půlnoci a v polárních oblastech při geomagnetických bouřích. Scintilace mohou způsobit nejen ztráty fixace – Loss of Lock, tedy ztrátu synchronizace signálů zařízení GNSS, ale například též zvýšení chybovosti GNSS zařízení, náhlé změny v Dopplerovu posunu díky závislosti GNSS na fázových posunutích signálu satelitů. Pro družicovou navigaci je proto důležité sledování přijímače GNSS co nejvíce satelitů, díky čemuž může přijímač získávat signál i od těch satelitů, jež nejsou v ose přijímač-satelit zasaženy právě scintilací průchodem signálu ionosférou. Mezi čtyři hlavní mechanismy, které vedou ke scintilacím, jsou plazmové bubliny, precipitující částice v rámci polárních září především v aurorálním oválu, či plasma patches v polární oblasti a cestující ionosférické vlnové narušení (TID). [14, 21]



### **3.3 Ionosférická refrakce**

Jedná se o jev, při kterém elektromagnetické vlny mění svůj směr na základě změn elektrické vodivosti v ionosféře a hustotě ionizovaných částic v ní obsažené. Elektromagnetické vlny jsou v ionosféře rozptylovány a to má za následek zakřivování dráhy těchto vln. Takto zakřivené vlny se k přijímači mohou dostávat s nežádoucím časovým posunem či s jiným frekvenčním průběhem. [22]

### **3.4 Difúze elektronů v ionosféře**

Excitované elektrony se v ionosféře pohybují náhodně nebo difúzně jakožto důsledek dodání tepelné energie, a to díky tendenci přechodu z prostředí o vyšší koncentraci do prostředí o koncentraci nižší. Takový pohyb může způsobovat difúzi určitým směrem, a tedy ovlivňovat šíření signálu GNSS. [22]

### **3.5 Absorpce signálu v ionosféře**

Ionosféra, jakožto plazmové médium, má tendenci odrážet nebo zpomalovat šíření elektromagnetického signálu. Tyto ionosférické absorpce jsou nejvíce silné v nejnižší vrstvě D, která je nejhustší na neutrální částice. [22]

### **3.6 Ionosférické bouře**

Ionosférické bouře jsou započaty interakcemi slunečního větru s magnetosférou Země. Sluneční plazma s magnetickým polem, unášeným slunečním větrem, ovlivňuje geomagnetické pole Země, jinak řečeno, právě interakcí slunečního větru a magnetosféry Země dochází k poruchám geomagnetického pole Země. Tyto projevy nazýváme geomagnetické bouře, mající trvání od několika hodin až do několika dní. Projevem jsou různě zvýšené ionizace ionosféry, ale také geomagnetické indukce, mající negativní vliv na signál GNSS, ale i na transformátory. Vizuálním projevem při vhodných podmínkách mohou být také polární záře, známé též jako aurory. [14, 22]



## 4 Korekce a indikátory ionosférických poruch

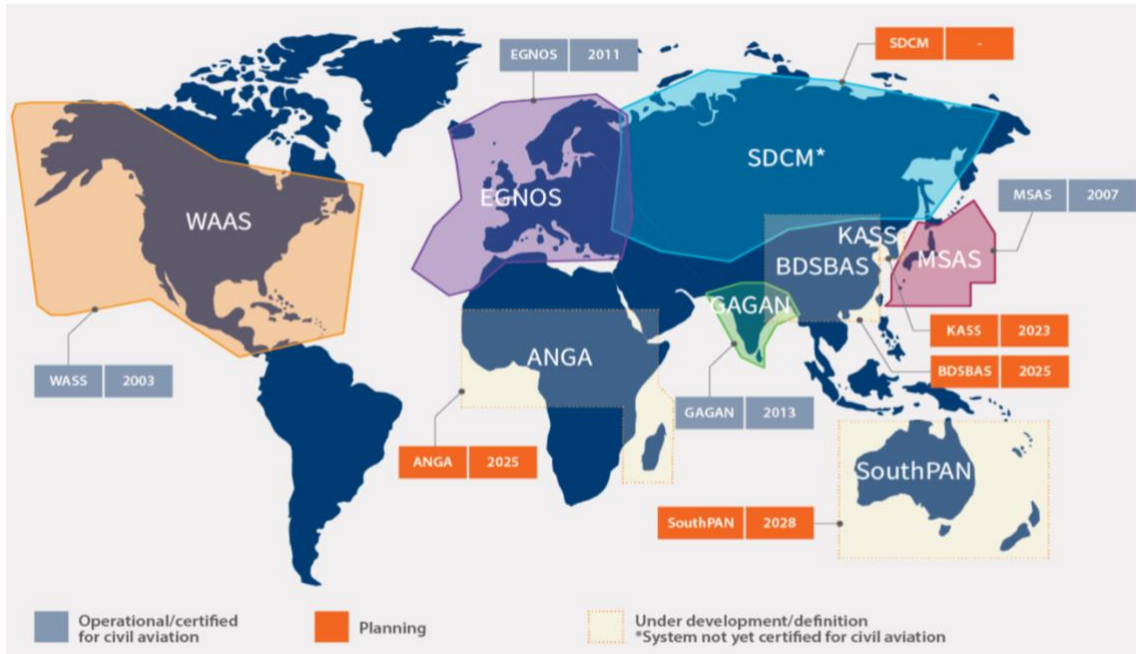
Průchod signálu GNSS ionosférou patří k největším zdrojům chyby polohování GNSS, navigace a časování GNSS. Většinu těchto chyb průchodu GNSS signálu plazmou nabitou vrstvou pro stavy „průměrné“ a „klidné“ ionosféry, kompenzují samotné GNSS přijímače. Jednofrekvenční používají model korekce ionosférického zpoždění, vícefrekvenční zpoždění přímo kompenzují jeho rozdílným efektem na různé frekvence. Během zvýšené aktivity ionosférických bouří nebo kdy se ionosféra může výrazně lišit od svých normálních podmínek, mohou být korekční modely nedostačující pro opravy ionosférické chyby a díky tomu mohou být opravy na chybu polohy ionosférou nedostačující. Ačkoliv máme augmentační systémy SBAS nebo GBAS, kterým se věnuje tato hlavní kapitola, během silných ionosférických bouří nemusí být ani tyto augmentační systémy dostačující pro opravy. GNSS je též náchylné k interferenci se slunečními rádiovými emisemi v UHF rádiovém spektru, což může vést ke ztrátě signálu od satelitů až po několik desítek minut. – Tomu se tak děje naštěstí je v extrémních případech, jak je zmíněno v Tabulce 3. [13, 14, 23]

### 4.1 SBAS

SBAS – Satellite Based Augmentation System, neboli Systém s družicovým rozšířením je regionální systém využívaný za účelem zvyšování přesnosti, integrity a dostupnosti navigačních služeb pomocí přijímačů GNSS. Poskytuje korekce a doplňkové informace pro přijímače GNSS, díky čemuž se zvyšuje spolehlivost a přesnost výsledných poskytovaných pozičních informací. [25]

V letectví oblasti využití SBAS dělíme na dvě kategorie – oblast pokrytí, tzn. všude tam, kde lze signál SBAS přijmout, a pak obsluhovaná oblast, kterou je nejen oblast s dosahem signálu, ale zároveň dostupností ho použít pro provoz, protože je již v oblasti referenčních stanic, které opravy (korekce) dopočítávají a tedy systém korigují. Ačkoliv se SBAS dělí na několik provozovatelů, jak lze vyčíst z následujícího obrázku, pro uživatele zůstává princip stejný, tzn. nezáleží na tom, který používá, protože jsou stejné.

Přesto si však pilot může vybrat, který systém SBAS využije. Dostupnost služby SBAS musí být zajištěna na 99,9 % času. [26, 27]



Obrázek 4 – světová mapa současného i plánovaného pokrytí SBAS [24]

Vzhledem k nedostatečnosti samotné GPS pro kritické fáze letu přístrojového přiblížení jsou právě systémy jako SBAS využívány a splňují tak požadavky ICAO pro minimální přesnosti RNP navigace GNSS. [26, 27]





#### 4.1.1 Zprávy SBAS

Každá zpráva SBAS má svojí ustálenou strukturu podle svého typu – celkem je 64 typů zpráv, používá se avšak 20 typů. Tyto zprávy mají kapacitu až 250 bitů za sekundu.

[27] Struktura a obsah zpráv lze vyčíst v následující tabulce:

Typ	Obsah
0	Flagování – nepoužívejte SBAS
1	Jaké informace jsou ve zprávách 2-5 - Jaké satelity se opravují a kde to v 2-5 zprávě nalézt
2-5	Rychlé korekce UDREI
6	Informace o integritě
7	Degradační faktor rychlých korekcí
9	Geostacionární navigační zpráva (X,Y,Z, čas,..)
10	Degradační faktory
12	SBAS konstelační čas nebo UTC offsetové parametry
17	geostacionární satelitní almanachy
18	Ionosférické gridové body masky
24	Směšené rychlé korekce/dlouhodobé opravy chyb satelitů
25	Dlouhodobé opravy chyb satelitů
26	Ionosférické opravy na chybu zpoždění
27	SBAS provozní zpráva
28	hodinová efemerní zpráva kovarianční matice
62	Interní testovací zpráva
63	Prázdná/nulová zpráva

Tabulka 5 – struktura využívaných SBAS zpráv

Zprávy 2-5 obsahují i tzn. fast correction, tedy rychlé korekce. Jsou to korekce založené na opravě času, které systém GPS nedokáže sám zpřesňovat. Opravuje částečně i troposférickou chybu. Výstupem jsou čísla UDREi, které vykazují, jak velké chyby v metrech jsou a v jakém vektoru, s jeho rychlostí a významností kolísání do příští zprávy. Ve zprávě 6 lze pak nalézt informace o integritě, tzn. když se změní UDREi, sdělí nám hodnoty UDRE i pro všechny viditelné satelity, s tím souvisí, jak rychle se mění zbytková chyba po opravě pseudovzdálenosti. Není tedy potřeba přijímač zprávy 2-5 a zkracuje se tím i TTA – Time To Alert (čas do výstrahy). Zpráva 7 obsahuje informaci o fast correction s vyjádřením vektoru změn, a tedy informaci o času, kdy není potřeba SBAS zprávu



přijímat. Z hlediska bezpečného letu nastavují zprávy 6 a 7 trendy vývoje pseudovzdálenosti a UDREi do zpráv 2-5. Zprávou 9 rozumíme možnost využívání samotného geostacionárního satelitu jako navigačního. 10. zpráva obsahuje parametry o degradaci chování systému SBAS – chyby jako FLT, GRID chyby HPL a další. V průběhu času se totiž sigma FLT může měnit, lze se tedy dozvědět o aktuálních hodnotách FLT a částečně ionosférickou sigmu pro výpočet HPL. Změna těchto hodnot bývá ale v průměru 2 za rok. 12. zpráva udává informace o časových posunech sítí SBAS – tzn. rozdíly mezi SBAS a UTC časy. 17. zpráva obsahuje almanach konkrétního geostacionárního satelitu pro přehled GNSS přijímače. [26, 27]

**Zpráva 18** obsahuje IGP masku (IGPs – Ionospheric Grid Point mask (rastr ionosférických bodů) označuje celosvětovou síť 2192 předem definovaných bodů v jednotné výšce nad zemí 350 km, kde každý bod má číslo a pro konkrétní IGP bod pak SBAS udává opravu na ionosférickou chybu pro signál L1. [27].

24. a 25. zpráva udává indexy dlouhodobých změn, tedy čísla, která se neaplikují přímo v reálném čase na dané družice, ale pro dlouhodobé korekce. Tyto zprávy jsou využívány při delším výpadku GPS nebo SBAS – to je ale pro letectví nepotřebné, aplikuje se například na místa jako jsou tunely nebo mimo signál přijímače. [27]

Nejdůležitější zprávou na ionosférické opravy je **zpráva 26**, která má kapacitu až 15 IGP bodů a je nad rámec rychlých korekcí. Udává, jak velké zpoždění je způsobeno v rámci IGP v ionosféře, udává GIVEi, tedy index zbytkové chyby po aplikaci časové opravy. Ionosférická chyba se jinak mění s elevací satelitu, tzn. když je satelit více než 5 stupňů nad horizontem vůči přijímači, tak se dle elevace toho dopočítá. [27]

27. zpráva udává UDRE pro danou zeměpisnou oblast. Tato zpráva je ale nepodstatná, pokud není v užívání jiný SBAS. Zpráva mimo jiné obsahuje informace o jiných SBAS. EGNOS například 27. (stejně tak 28.) zprávu nevysílá, využívá se ale například v oblasti Číny, kde je přítomný spoofing. S nástupem L5 pro GPS je potřeba dodefinovat ještě další zprávy SBAS, pro které jsou rezervovány typy 31-40. [27]



## 4.2 GBAS

GBAS – Ground Based Augmentation System, neboli pozemní augmentační systém, funguje na podobném principu jako SBAS, nicméně se liší několika významnými aspekty. Hlavním posláním GBAS je poskytování různé další služby v rámci navigace – zejména pro FAS – Final Approach Segment v rámci rozsahu služby přiblížení. V současné době je celosvětově málo se vyskytujícím systémem. Využívá se zejména v oblastech, kde není k dispozici SBAS, potažmo kde není dosah geostacionárních satelitů, které se nacházejí v oblasti rovníku – tedy ve vysokých geografických šířkách jako je Norsko nebo Rusko. Každý však funguje na trochu jiném principu. Bohužel však GBAS se systémem GPS nesplňuje požadavky na přesné přiblížení třídy CAT III a jeho maximální standard zůstává na úrovni CAT I. Základním principem GBAS je poskytování informací o horizontální poloze pro zajišťování operací RNAV v provozním rozsahu služby určování polohy. Opravy chyb jsou buďto tzn. natvrdo – tedy v určení maximální vzdálenosti od GBASu nebo v informaci o přijímači spočítáme, jestli je možné GBAS používat. Motivací je nahrazení systémů ILS právě systémy GBAS, které to zatím ale nedokážou. [28]

## 4.3 Využití dodatečné frekvence

Tato metoda zahrnuje používání více než jedné frekvence pro získání polohy nebo dalších navigačních informací. Jedná se o pokročilý přístup, kdy přijímač využívá signály na více než jedné frekvenci pro získání přesných polohovacích informací. Princip fungování vícefrekvenčního polohování spočívá v současném zpracování signálu na více frekvencích přijímačem. To dovoluje přijímači rozlišovat a korigovat různé vlivy, které mohou ovlivňovat přesnosti polohování. Za jednu z hlavních výhod pro opravu, či eliminaci, se udává ionosférické zpoždění. Mimo to je minimalizace vícecestného šíření signálu [29]. Z těchto důvodů již většina přijímačů vícefrekvenční koncept používá.

Principem snížení nebo eliminace ionosférické chyby pozice je její výpočet, který se liší s přijímanou frekvencí. Porovnáním zpoždění dvou rozdílných frekvencí, například L1 a L2 lze dopočítat ionosférické zpoždění, a tedy zmenšit polohovou chybu. [29]



## 4.4 Indikátory narušení ionosféry a geomagnetického pole

Pro správné analyzování korelací, a tedy závislostí odchylek pozic na ionosférické poruchy, je nutné využití vhodných indikátorů. Následující indikátory slouží pro analýzu možných souvislosti s odchylkami polohování z důvodu ionosférické poruchy.

### 1.1.1 AATR

Index AATR – Along Track TEC Rate byl vyvinut v rámci projektu ICASES podpořeného Evropskou Vesmírnou Agenturou ESA španělským týmem gAGE/UPC. Index má za cíl identifikaci podmínek, při nichž se očekává degradace výkonů pro uživatele systémů SBAS. Jedná se o klíčový indikátor pro SBAS korekce, zejména pro EGNOS. [30]

Výsledky z měření po dobu více než jednoho slunečního cyklu během období 2002 až 2017 s 140 přijímači ukazují, že je zde značná korelace s ionosférickou aktivitou. Je velice citlivý na regionální chování ionosféry a identifikuje zároveň specifické efekty na uživatele GNSS přijímačů. Z výsledků vyplývá, že za různých ionosférických podmínek lze považovat AATR jako spolehlivý nástroj pro odhalování anomálií spojených s dostupností SBAS. [31, 32]

### 4.4.1 Dopplerovská měření

Tento typ indikátorů využívá rádiové vlny o frekvencích několika MHz, které se od ionosféry odrážejí, pro studium jevů jako je infrazvuk, akustické gravitační vlny a geomagnetické fluktuace. Díky tomuto měření lze zjistit posuv frekvence odražených vln, což dává za výsledek pohyby elektronů v ionosféře. Posun rádiových vln, které jsou odražené od ionosféry dává informaci, pokud se vrstva pohybuje či jestli v ní dochází ke změně hustoty elektronů. Systém též dokáže detekovat fluktuace v ionosféře, které souvisí s geomagnetickými jevy, díky čemuž lze také lépe chápat interakci mezi Sluncem a Zemí. Pro potřeby této práce lze díky Dopplerova sondování analyzovat možné souvislosti s dynamikou ionosféry, zejména pak v F-vrstvě. [32]

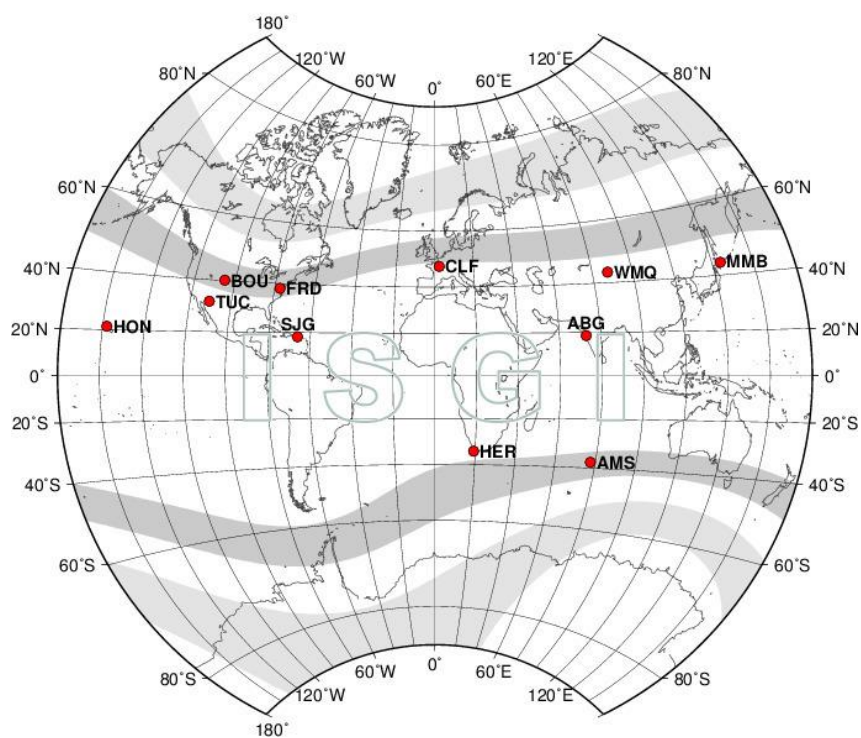


Pro měření v České republice byly využity frekvence sondování o  $\sim 3.59$  MHz (dále jen 3 MHz) a 7.04 MHz (dále jen 7 MHz). Tyto frekvence se v rámci měření v různých částech světa liší v závislosti na místních podmínkách a potřebách, tedy schopnosti pronikání do různých vrstev ionosféry. Nižší frekvence je citlivější na nižší vrstvy a vyšší se odráží od výše položených vrstev. [32]

#### **4.4.2 ASY/SYM**

Jedná se o geomagnetické indexy délkově asymetrických (ASY) a symetrických (SYM) horizontálních poruch používané od roku 1981. Využívají se primárně k indikaci magnetických bouří a jejich asymetrií v horizontálních složkách geomagnetického pole s rozlišením 1 minuty. Jednotkou je nanotesla (nT). [33]

ASY-D a ASY-H se týkají poruch v paralelních a kolmých rovinách k dipólové ose Země. SYM-D a SYM-H popisují tyto poruchy v symetrické rovině dipólu. Všechny tyto indikátory jsou určeny k popisu ve středních zeměpisných šířkách a jsou měřeny v 6 observatořích, jež jsou rovnoměrně rozloženy v celé délce měření. Dalších 5 observatoří (tedy celkem 11) jsou jako záložní a mění se podle dostupnosti. [33]



Obrázek 5 – distribuce observatoří pro ASY/SYM [33]

ASY/SYM indexy jsou vhodným nástrojem pro kvantifikaci a možné další zkoumání ve vztahu k poruchám v ionosféře, potažmo průchodu signálu GNSS, jelikož dávají jasné informace o změnách v ionosféře způsobených geomagnetickými poruchami. [33]



## 5 Metodika

Cílem analytické části této práce je zjištění chyby naměřené pozice s využitím systémů SBAS, v našem případě EGNOS, v porovnání bez využití tohoto systému, a to srovnáním polohových chyb, tedy odchylek od přesně geolokované antény. Na základě takto naměřených pozičních dat poté zhodnotit, jaký vliv mají na odchylky pozic monitorované ionosférické poruchy.

### 5.1 Postup měření pozičních dat

Pro měření pro potřeby této práce bylo využito dvojice „low-cost“ přijímačů U-Blox F9P a srovnávacích profesionálních Septentrio PolaRxS, potažmo ve druhé polovině měření Septentrio Mosaic. Všechna tato zařízení byla nainstalována na observatoři v Panské Vsi k jedné přesně geolokované anténě za pomoci napájeného splitteru – rozdělovače tak, aby nedocházelo ke ztrátám kvality GNSS signálu z antény. Observatoř Panská Ves byla využita primárně z důvodu odlehlé lokality od možného rušení a vhodných podmínek pro instalace právě takového typu.

#### 5.1.1 Využití hardware a jeho nastavení

GNSS přijímač U-Blox s čipem ZED-F9P byl duplicitně s druhým nainstalován a zprovozněn s adaptéry MIKROE-2882 a rozhraními MIKROE-1433. Tyto GNSS přijímače dovolují přesnost na úrovni centimetrů (technologie multi-band RTK, v této práci však nevyužitá) s možností příjmu signálu z více pásem a to až ze čtyř konstelací GNSS současně (v této práci využito). Jako anténa byla využita produkt Harxon GPS500 disponující pokrytí příjmu signálu od všech měřených konstelací. [34, 35, 36]

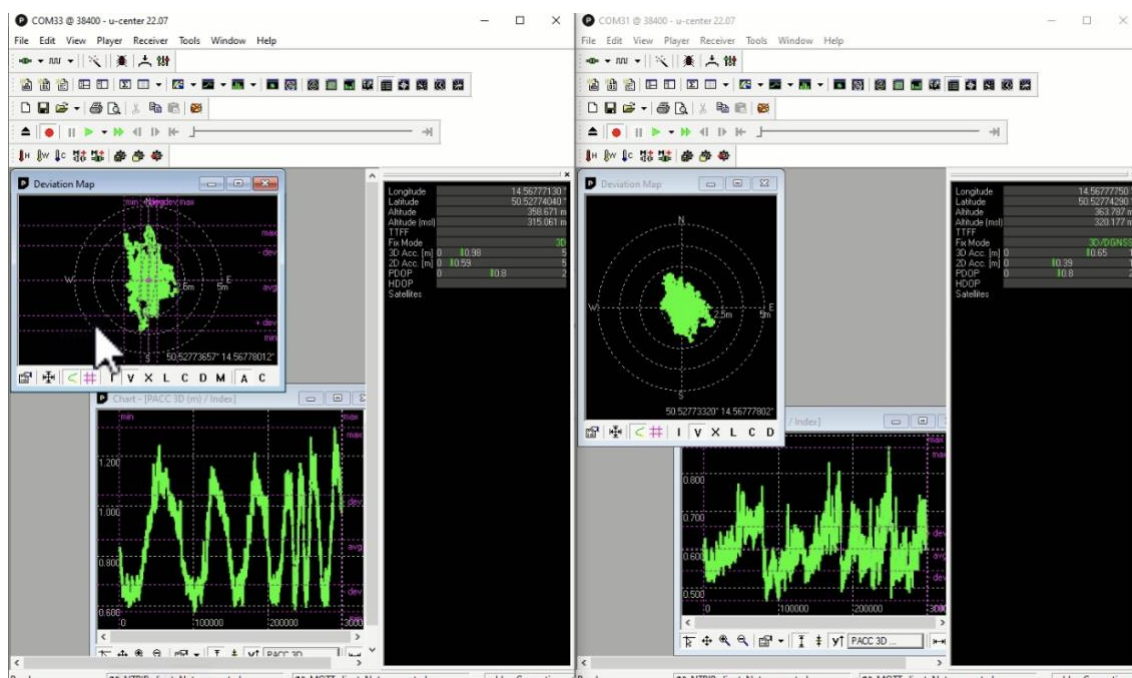
U jednoho přijímače F9P bylo nastaveno měření se zapnutým systémem SBAS a u druhého byl tento systém vypnut, aby bylo možné následné porovnání. Paralelně s tímto měřením U-Blox probíhalo i měření s profesionálními GNSS Septentrio. U všech těchto přijímačů byla nastavena minimálně kadence měření po 1 vteřině či vyšší.



Obrázek 6 – U-Center, přehled přijímaných konstelací a signálů

Pro záznam dat a jejich ukládání bylo využito z přijímačů F9P softwaru U-Center, který je nativním programem právě pro produkty U-Blox. U přijímačů Septentrio byl využit primárně software RxTools. Konfigurace výstupů z přijímačů, a tedy ukládání do potřebných dat do souborů pro následné konverze a zpracování, bylo nastaveno ve formátu RAWX – Multi-GNSS Raw Measurements Data, které dovolují ukládání dat do souborů ve formátu, se kterým lze dále pracovat pro potřeby této práce.





Obrázek 7 – rozhraní při měření U-Center (2xF9P s různou konfigurací)

Všechna data byla automaticky ukládána do vyčleněného počítače, do kterého bylo možné se i na dálku připojit. V rámci zálohy dat, a následného snazšího přístupu k nim, byla data přesunována i na zabezpečené FTP úložiště ÚFA AV ČR.

Tyto soubory, s příponou a strukturou UBX bylo potřeba dále konvertovat do ASCII formátu, aby bylo možné data dále zpracovávat a analyzovat. Pro konverzi bylo využito softwaru Emlid Studio 1.6 – s výstupy ve formátech .pos a RINEX.

Na přelomu roku 2022 a 2023 probíhalo testování různých konfigurací přijímačů, kdy bylo potřeba vyřešit ještě některé drobné problémy doprovázející měření. Od 27. února 2023 probíhalo již stabilní měření dat všemi přijímači najednou. Toto měření probíhalo až do poloviny září. Od tohoto data do vydání tohoto textu na Observatoři stále měří a zaznamenává jeden z přijímačů F9P a přijímač Septentrio Mosaic. [37]



## 5.2 Zpracování naměřených dat

Pro zpracování a analýzu dat z přijímačů U-Blox a Septentrio bylo využito Matlab (ve verzích 2022b až 2023b). Celý kód pro zpracování lze nalézt v příloze této práce.

Z načteného souboru byla vyextrahována data do vstupních matic proměnných. Dále bylo potřeba data převést na společný čas, tzn. na čas GPS pro lepší orientaci v maticích proměnných. Tedy všechny, také polohové chyby, byly uvedeny na společnou časovou bázi pro jednodušší následnou práci s nimi. Vstupní poziční data uBlox byla ve formátu stupňů zeměpisné šířky a délky a výšky v metrech. Šířka a délka byla převedena na metry a všechny počítané veličiny odečteny od přesně geolokované pozice antény, tedy bylo dosaženo odchylek od zaměřené pozice. Tento a další postup byl aplikován pro všechny přijímače zvláště – tedy pro U-Blox F9P se zapnutým SBAS a pro F9P s vypnutým SBASem, pro Septentrio PolaRxS a Mosaic.

Ačkoliv bylo v procesu zkoušení práce s daty vyzkoušeno několik postupů jejich zpracování, jako optimální a statisticky korektní byl vybrán následující postup. Pomocí paralelní smyčky pro rychlejší výpočty bylo v hlavním kroku indexována data podle časových rozmezí, v našem případě 60-vteřinové shrnutí hodnot, ve kterém byla data přepočítávána na průměrnou hodnotu a standardní odchylku. Takto zpracovaná data byla uložena do proměnných, aby bylo možné je výsledně porovnávat v rámci jejich analýzy. Pro výše uvedený postup platí zpracování i indikátorů a dalších naměřených dat potřebných pro analýzu, jejichž dostupná kadence nebyla nikdy vyšší než minutová, což právě bylo důvodem těchto 60-vteřinových shrnutí GNSS dat.



### 5.3 Shrnutí metodiky

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, pro low-cost přijímače u-Blox probíhalo měření mezi F9P se zapnutými a vypnutými SBAS korekcemi v Panské Vsi na přesně geolokované anténě s cílem zjistit možné závislosti, případně dodatečnou frekvenci, na ionosférické aktivitě. Měření byla snaha provést v co možná nejdelším intervalu kontinuálně, a to od března do září 2023. Existují však v měření i prázdné intervaly, kdy jeden nebo oba z přijímačů na kratší dobu neměřili vlivem technických problémů či jejich úpravami pro větší stabilitu měření.

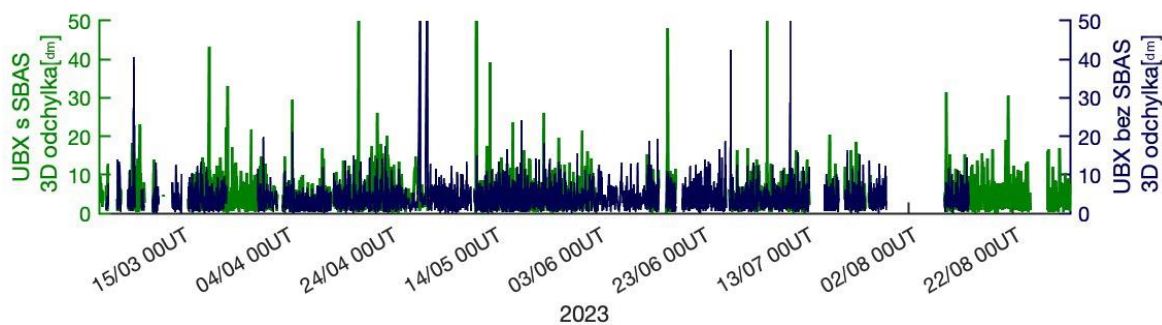
Všechna změřená data byla korektně převedena, vytríděna a zpracována pro následné bližší analyzování. Možné souvislosti, a tedy závislosti a korelace, byly ověřeny mnoha vybranými indikátory – zde diskutované jsou SYM/ASY, AATR, jakožto vhodný indikátor právě pro GNSS s SBASem využívaným v letectví a v neposlední řadě v České republice naměřený Dopplerův posun indikující možné narušení v ionosféře. Následující kapitola této práce, jakožto výsledky analýzy, je věnována odchylkám dvou přijímačů u-Blox.

## 6 Výsledky

### 6.1 Porovnání naměřených chyb pozic U-Blox a Septentrio

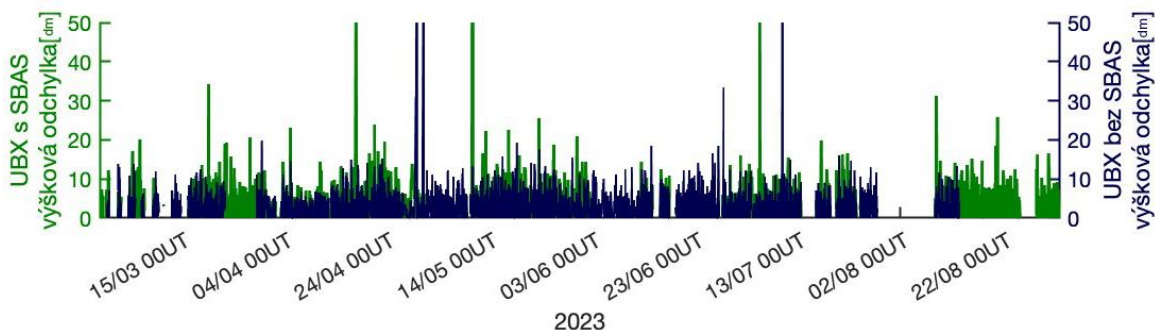
Po konečném zpracování dat na 60-sekundové průměrování v Matlab kódu, který lze nalézt v příloze této práce, bylo pro celý interval celkem 311.494 hodnot v každé proměnné. V případě chybějících hodnot v matici byly tyto hodnoty nahrazeny jako NaN, tedy prázdné. Celkem probíhalo měření více než 216 dní.

Pro přehled dat na celém časovém intervalu je přiložen následující obrázek trojrozměrné chyby pozice každého přijímače.



Graf 1 – časová osa odchylek pozice (3D) pro přijímače U-Blox se zapnutým a vypnutými SBAS opravami

V následujícím grafu pak lze vyčístit chybu výšky pro celý měřený interval a pro oba přijímače s SBAS a bez SBAS.

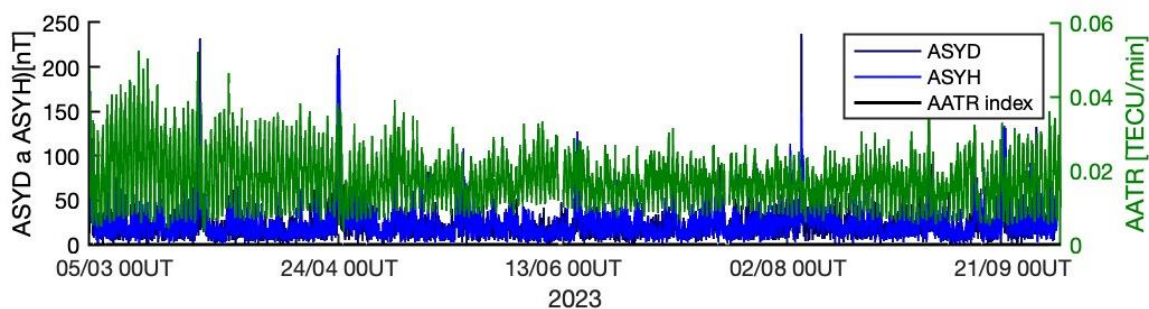


Graf 2 – časová osa odchylek výškové pozice pro přijímače U-Blox se zapnutými a vypnutými SBAS opravami

## 6.2 Analýza zvýšené ionosférické aktivity

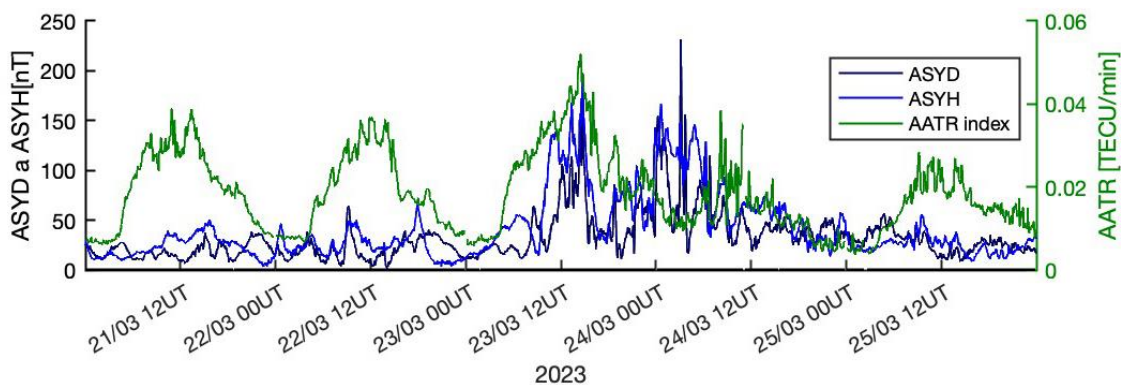
V této části je věnována pozornost samotným indikátorům ionosférické aktivity na časové ose, aby bylo dále možné zhodnotit, zdali se v daném intervalu vyskytovala nějaká zvýšená aktivita ovlivňující právě polohování přijímačů.

Na základě vyobrazení aktivity na časové ose z celého zkoumaného intervalu můžeme pozorovat zvýšenou aktivitu právě v období geomagnetických bouří. Tyto bouře se udály v datech 23-24. března 2023 a 24.dubna, přičemž na levé ose y můžeme vidět indikátory ASYD a ASYH a na pravé AATR.



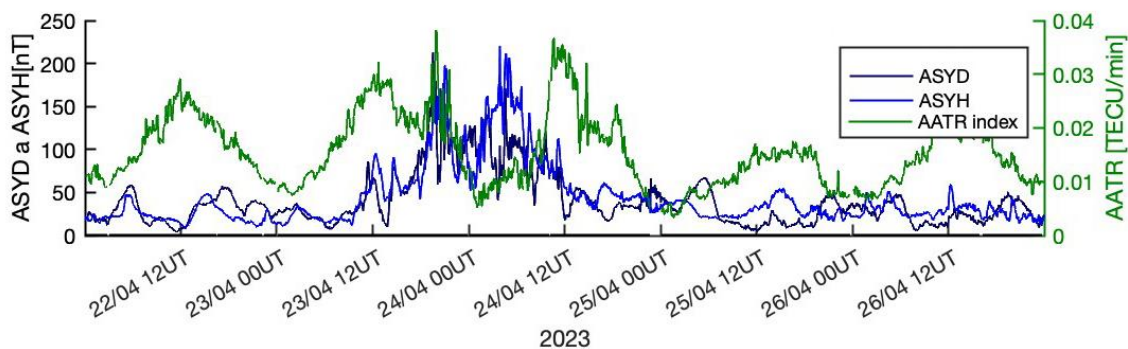
Graf 3 – časová osa s indexy ASY, ASYH a AATR omezená na interval měření přijímačů

Při časovém přiblížení právě na březnovou geomagnetickou bouři lze vidět narušení trendu indikátorů, jak pro ASYD/ASYH, tak pro AATR. V nerušeném období mají indikátory trend ve zvýšené (během dne) a snížené fluktuaci hodnot. Při bouři toto neplatí.



Graf 4 – časová osa s indexy ASY, ASYH a AATR omezená na interval během březnové zvýšené ionosférické aktivity – geomagnetické bouře

V dalším grafu lze pozorovat zúžený interval právě na období zvýšené aktivity během dubnové geomagnetické bouře, kde je obdobné rozrušení jako v případě březnové bouře s následnou depresí v podobě poklesu i během dne.

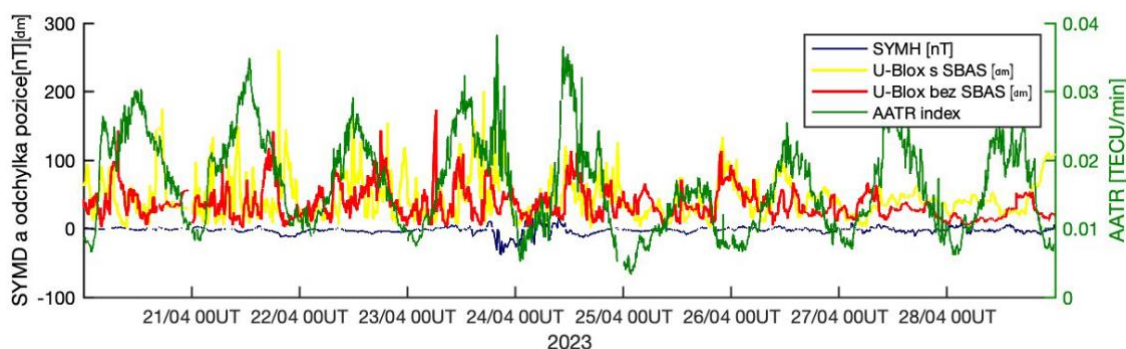


Graf 5 – časová osa s indexy ASY, ASYH a AATR omezená na interval během zvýšené ionosférické aktivity – geomagnetické bouře

### 6.3 Závislosti ionosférické aktivity a odchylek pozice z přijímačů

Tato podkapitola je věnována časovým závislostem odchylek pozic přijímačů na ionosférické aktivitě podle indikátorů. Bylo využito statistických operací mediánů, průměrů, standardních odchylek na základě indexování, a to od dubna do září roku 2023.

Na základě znalosti konkrétní ionosférické aktivity – geomagnetických bouří, můžeme na časové ose vynést získané odchylky pozice přijímačů.



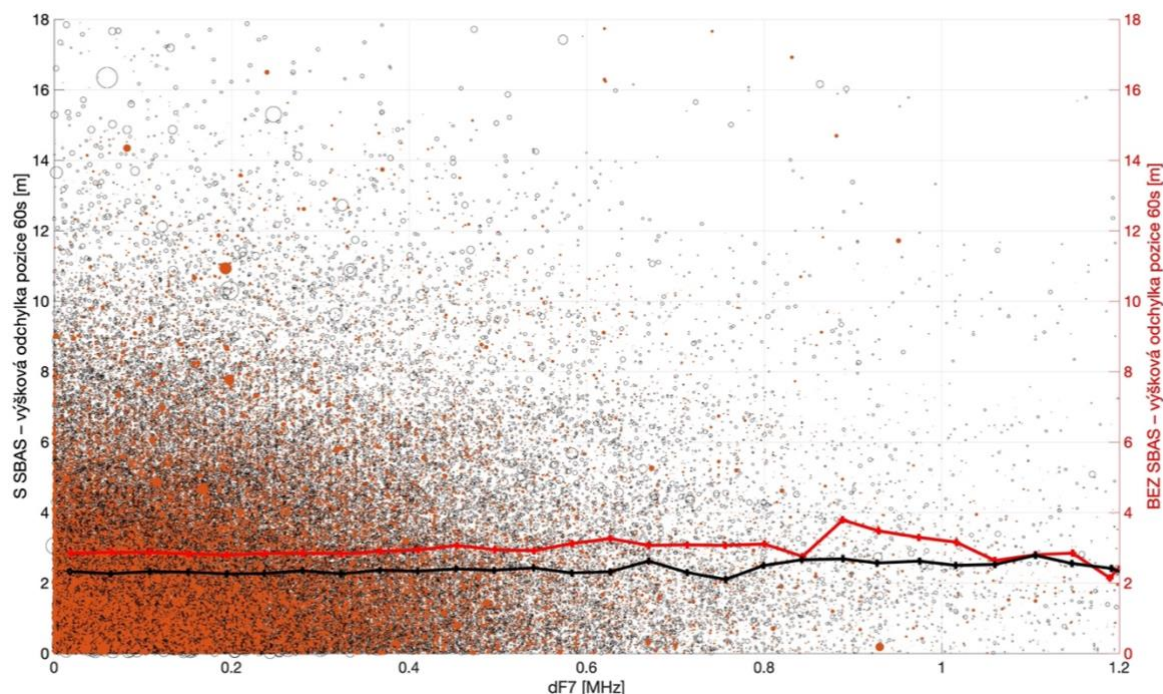
Graf 6 – časová osa s vyobrazením závislostí indexů ionosférické aktivity a odchylek pozic přijímačů U-Blox

Již na tomto grafu je vidět závislost obou přijímačů U-Blox se zvýšenou aktivitou v ionosférické vrstvě. Zelenou barvou je vyznačen AATR index, světle modrou SYMH. Červenou poté U-Blox přijímač bez zapnutého SBAS a žlutou přijímač se zapnutým. Během geomagnetické bouře je též viditelné rozrušení v odchylkách pozic pro obou přijímače, obzvláště na začátku nástupu geomagnetické bouře.

### 6.3.1 Statistické závislosti odchylek pozice na Dopplerově posuvu

V této kapitole analyzuje závislosti odchylek pozic vůči měření Dopplerova posuvu z Českého kontinuálního Dopplerovského systému vyvinutého a provozovaného ÚFA AVČR.

Analýzu chyby výškové pozice U-Blox se zapnutými a vypnutými SBAS opravami vůči naměřenému Dopplerovu posuvu na odraženém 7 MHz signálu o intervalovém průměrování lze vidět na následujícím grafu:



Graf 7 – statistická závislost dF7 s chybou výškové pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS

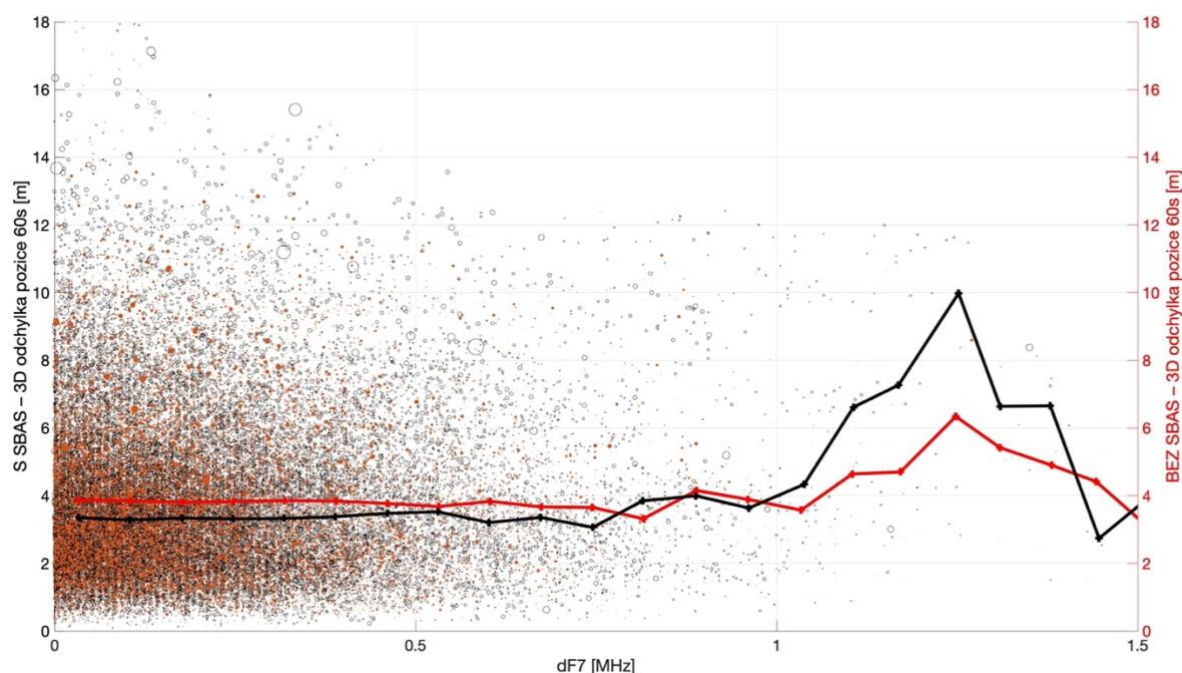
Z grafu 7 je patrná jasná výhoda, tedy menší odchylky, pro přijímač s SBAS (černá – levá osa y) přijímači bez SBAS (červená – pravá osa y) na ose x, která s větší hodnotou vyznačuje větší chybu ionosféry. Avšak při vyšších hodnotách Dopplerova posuvu od 0,8 MHz zde začíná odchylka výšky značně kolísat, ale i při značném rozrušení ionosféry při vyšších hodnotách Dopplerova posuvu si přijímač s SBASem udržuje indikaci výšky téměř



pořád lepší. Pro vyšší hodnoty Dopplerova posunu není dostatek dat, aby bylo možné řádně zhodnotit závislosti.

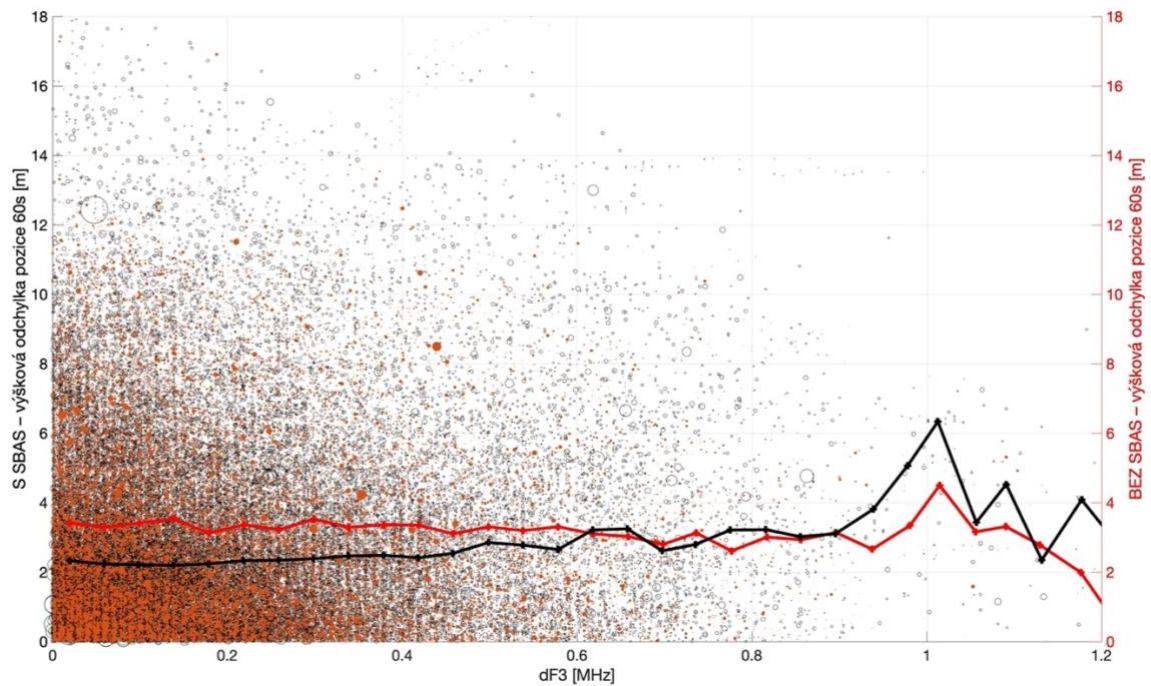
Nejzřetelnější trend je poté vidět na vyhodnocení porovnání přijímačů s SBAS a bez SBAS ve 3D odchylce pozice vůči Dopplerově posunu jak ve 3MHz, tak i v 7MHz.

Jak je patrné z grafu č. 8, největší trend ale nabývá od hodnoty 1.0 posunu a největší je v tomto případě pro přijímač se zapnutým SBASem.



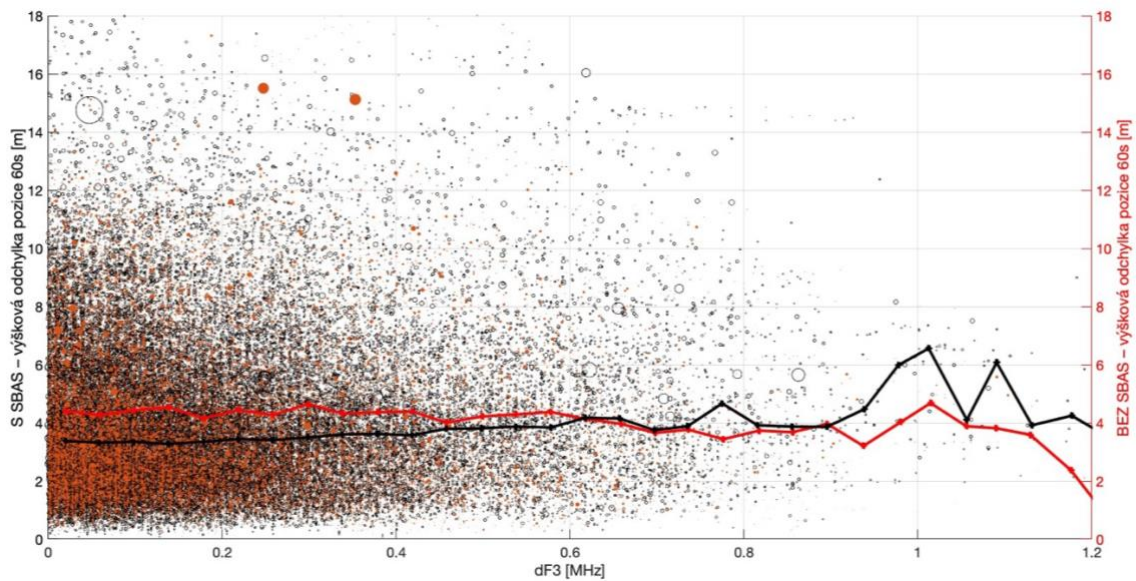
Graf 8 – statistická závislost dF7 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS

U následujícího grafu č. 9s frekvencí sondování o 3 MHz je kolísání výškové odchylky též viditelné, avšak není tak velké jako Dopplerova sondování s 7 MHz. Víceméně zůstává úroveň odchylek stejná a je se mění přesnost v rámci mezí předchozího průměru. Opět statisticky lepší je na tom přijímač se zapnutými SBAS opravami.



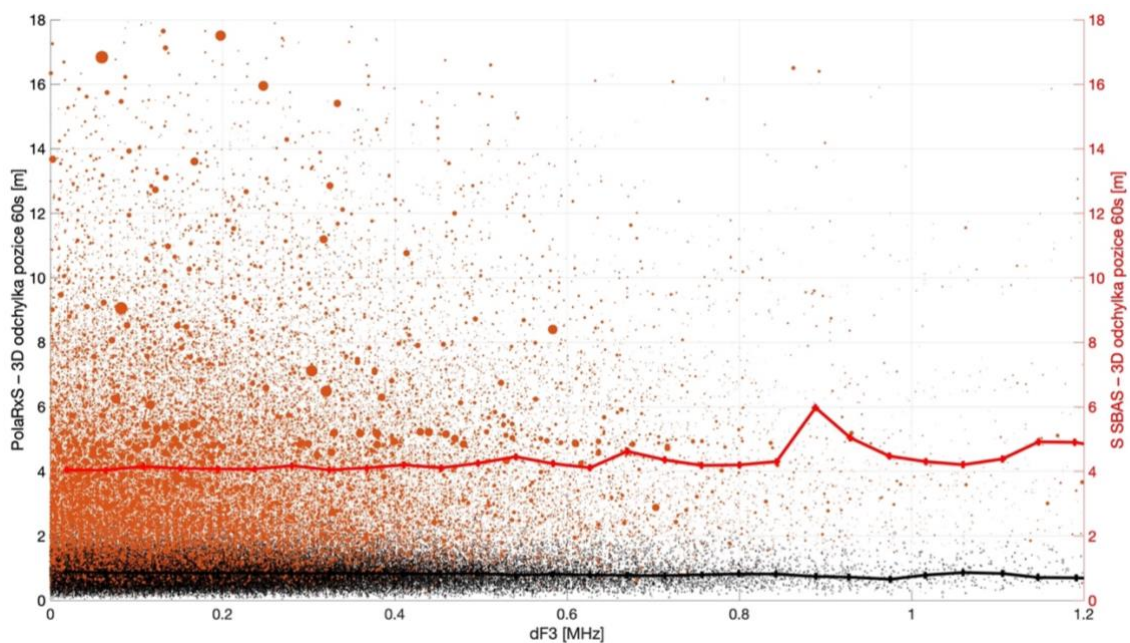
Graf 9 – statistická závislost dF3 s chybou výškové pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS

U posledního obrázku zkoumání závislosti odchylky 3D pozice U-Blox přijímačů na Dopplerova posunu o 7MHz lze vidět podobný trend jako u porovnání výškového, tedy že při vyšších hodnotách Dopplerova posunu přijímač s SBASem nabývá větších odchylek pozice. Trend pro měření S SBAS je pro nízký Dopplerův posuv od střední hodnoty cca 2,2m do hodnot přesahujících 3m.



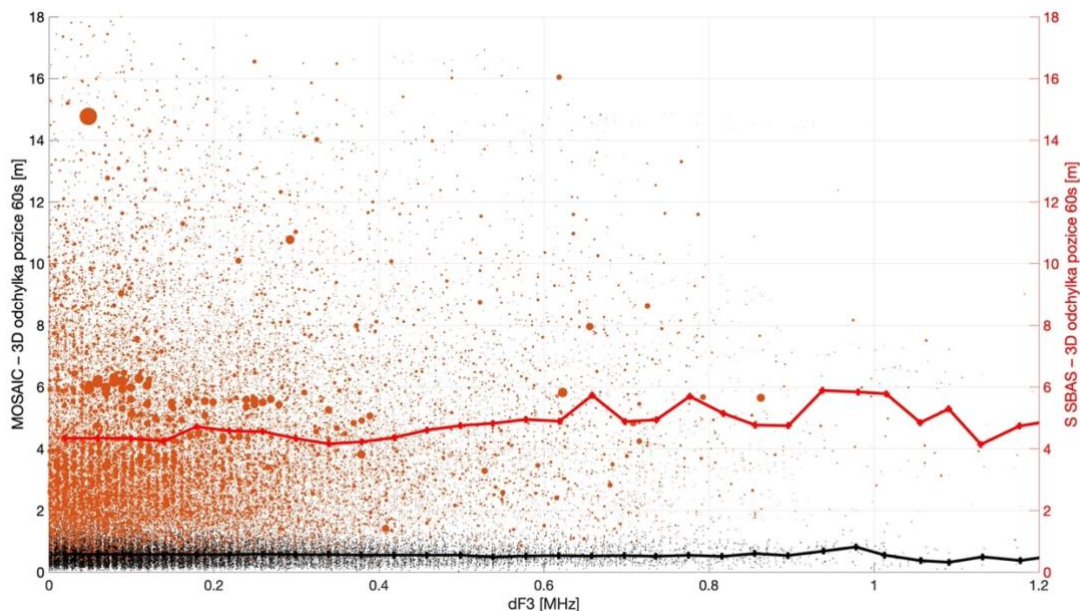
Graf 10 – statistická závislost dF3 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS

V následujících grafech v závislosti na Dopplerovo posunu pak lze vidět jasnou výhodu v případě 7 MHz analyzování, a tedy větší výkonnost, pro přijímače Septentrio PolaRxS vůči přijímači U-Blox se zapnutým SBASem v porovnání 3D pozice.



Graf 11 – statistická závislost dF7 s chybou 3D pozice přijímače Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS

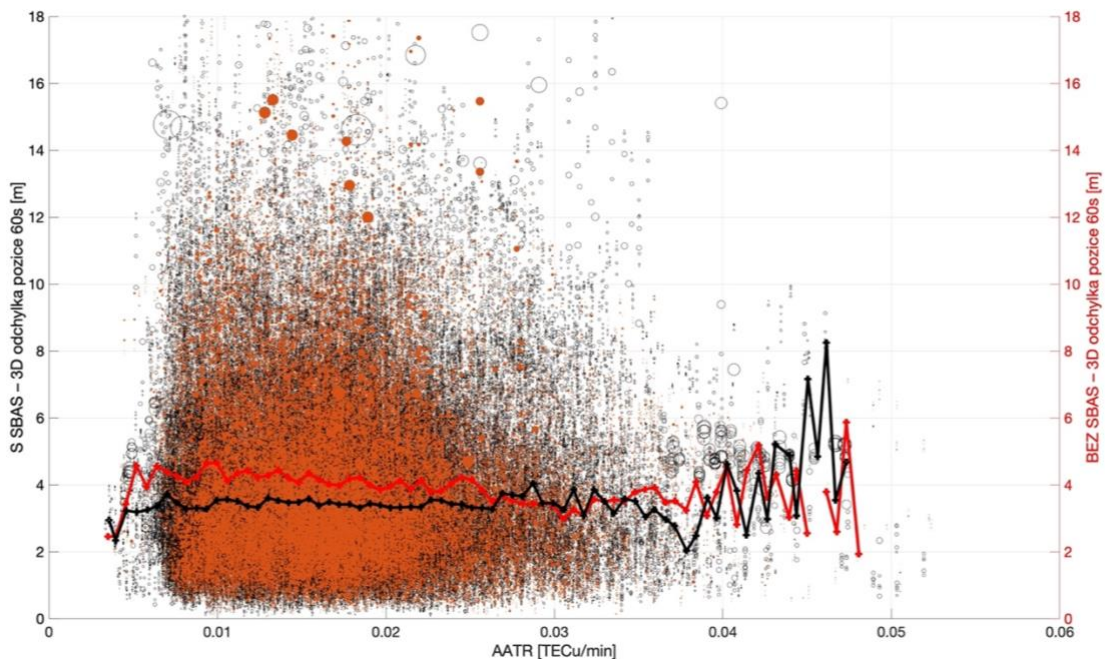
U analyzování v případě dF3 je tomu téměř obdobně, odchylka pozice je viditelná téměř u spodní hranice grafu černou barvou, což značí o jasné výhodě právě pro přijímač s lepšími opravami na ionosférické chyby šíření signálu..



Graf 12 – statistická závislost dF3 s chybou 3D pozice přijímače Septentrio Mosaic a U-Blox se zapnutým SBAS

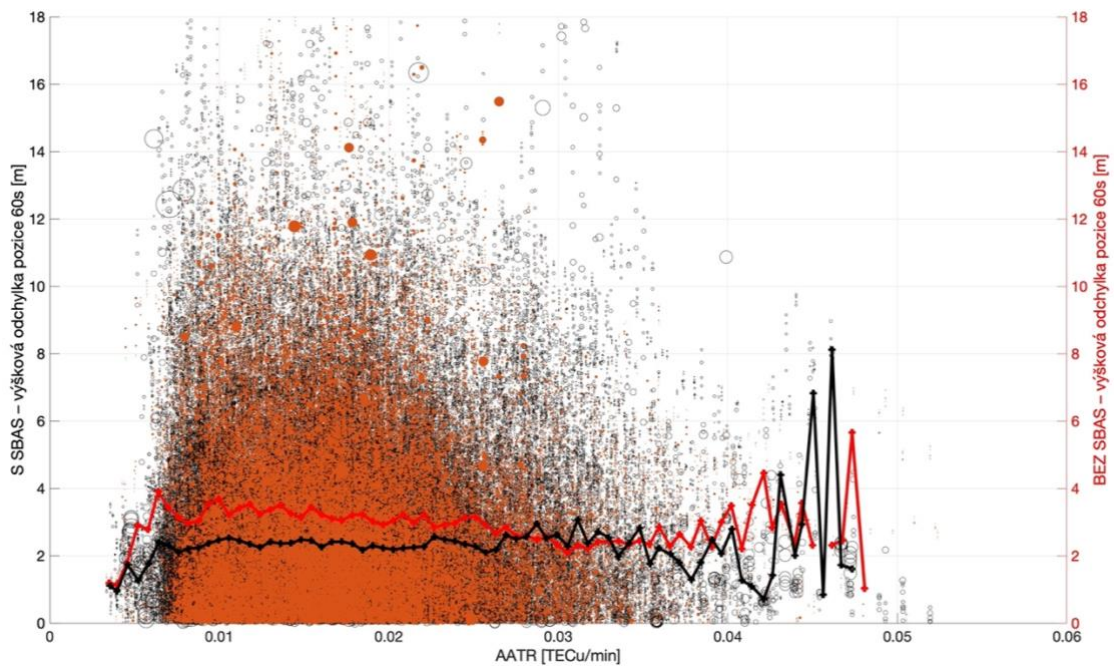
### 6.3.2 Statistické závislosti odchylek pozice na AATR indexu

V následujícím grafu je vyobrazena průměrná závislost odchylky pozice na AATR index. Z grafu je patrné, že při vyšších hodnotách AATR (osa x) dochází ke značnému rozrušení chyby pozice pro oba přijímače, což je způsobeno právě vyšší hodnotou TECu/min. Na levé ose (černá křivka v grafu) opět vidíme přijímač U-Blox se zapnutým SBAS, načež v samotném vykreslení chyby pozice vůči AATR můžeme vidět, že si vede oproti přijímači s vypnutým SBAS (červená křivka v grafu) lépe v průměrných hodnotách AATR index. Při podstatně zvýšené ionosférické aktivitě, viditelné v obrázku nárůstem hodnot na ose x jako AATR, si již lépe nevede a je to pravděpodobně způsobeno nedostatečností oprav na ionosférickou chybu. V průměru hodnot si tyto dva přijímače nad hodnotu 0.031 vedou v stejné, avšak oba s velkými odchylkami.



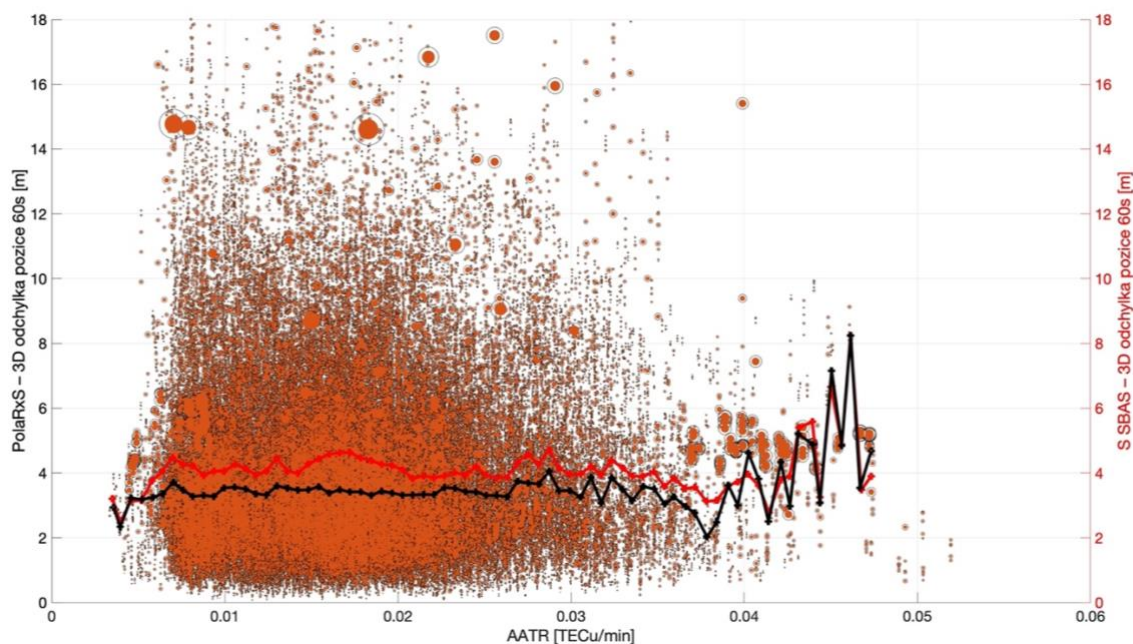
Graf 13 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS

U grafu č. 14 pak lze vidět obdobnou situaci, akorát pro výškovou chybu pozice u obou přijímačů U-Blox se zapnutým (černá křivka) a vypnutým SBAS (červená křivka). Opět zde dochází k zásadnímu rozvrásnění křivky v podobě chyby pozice v závislosti na indikátoru AATR. To značí o problému s vyrovnáváním se s větší ionosférickou aktivitou pro oba přijímače. V případě využití SBAS již pro takto vysoké (v grafu od hodnoty  $\sim 0.037$  TECu/min) není podmínkou, že by se vypořádával s odchylkami pozice lépe než přijímač bez SBAS. Při hodnotách AATR 0.44 TECu/min jde zde dokonce čitelná značná nevýhoda pro přijímač s SBAS.



Graf 14 – statistická závislost AATR s chybou výškové pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS

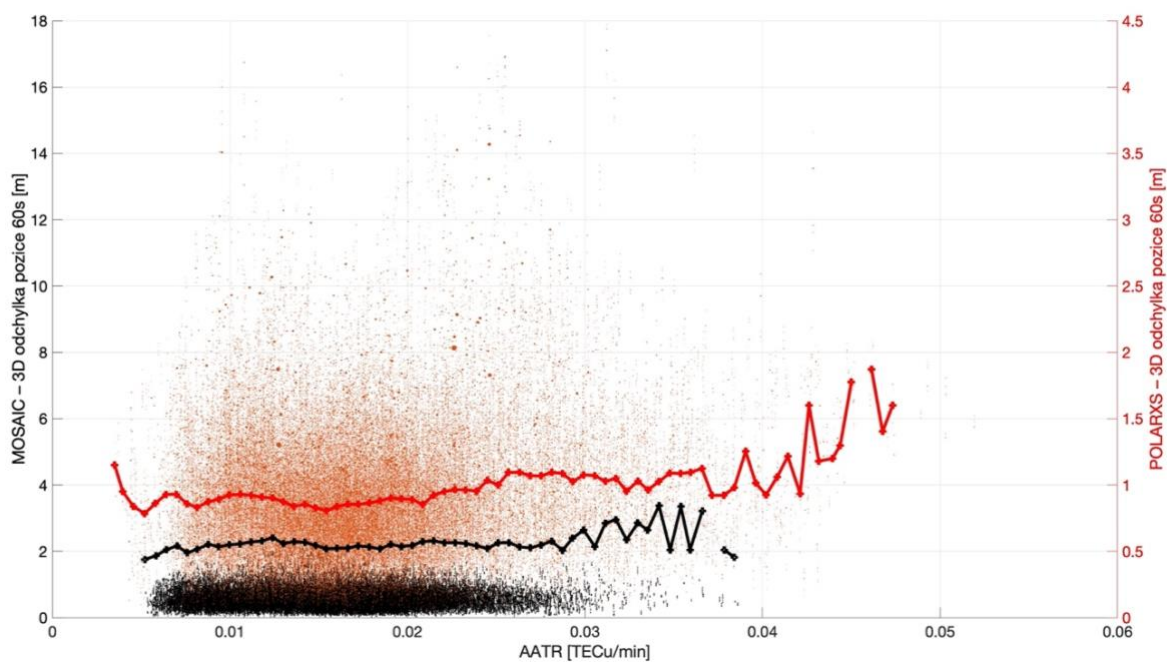
Podobný trend je zřejmý i u následujícího obrázku č. 15, zobrazujícího porovnání statistických hodnot pro PolarXs (levá osa y, černá barva křivky) a přijímač s SBASem (pravá osa y, červená barva křivky). Trend lepšího polohování, a tedy menších trojrozměrných odchylek pozice, si ale udržuje lépe výkonnější přijímač PolarXs v nejširším spektru hodnot indikátoru AATR. Při hodnotách AATR vyšších než 0.443 TECu/min začíná mít značné problémy i profesionální přijímač PolarXs a trend chyby v tomto případě téměř opisuje s low-cost přijímačem U-Blox se zapnutými SBAS opravami.



Graf 15 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů Septentrio Polaris a U-Blox se zapnutým SBAS

V případě porovnání 3D pozice U-Blox se zapnutými SBAS opravami a Septentrio Mosaic v rámci AATR tak můžeme z grafu vyčíst značné rozrušením v závislosti na vyšších hodnotách indikující zvýšenou ionosférickou aktivitu.

Při porovnání závislostí mezi Septentrio Mosaic a Polaris lze poté z grafu č. 16 vyčíst, že Mosaic je ve srovnání s Polaris přesnější, ale že je zde též čitelná závislost ionosférického rozrušení na odchylku pozic, obzvláště pak při vyšších hodnotách AATR přesahující 0.031 TECu/min. Z grafu je též čitelná větší obsáhlost dat pro Polaris a tedy statisticky lepší čitelnost závislostí polohování na chybách v ionosféře, potažmo indikátorů těch poruch.



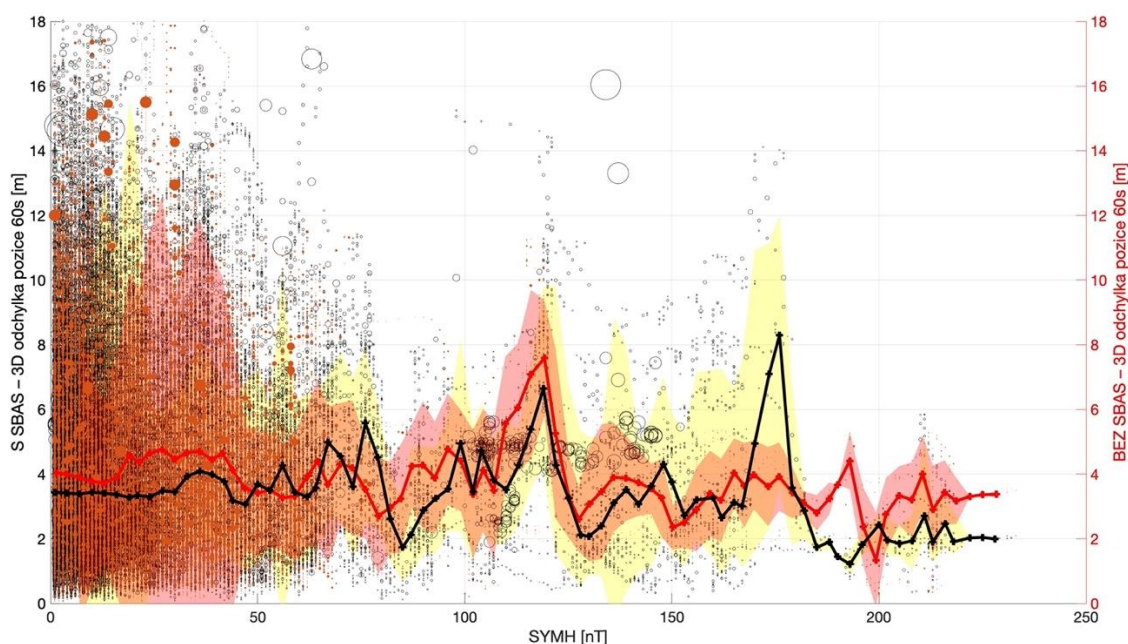
Graf 16 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů Septentrio PolaRxS a Septentrio Mosaic

Závislosti mezi takto výkonnými/profesionálními přijímači můžeme vidět v jiném spektru hodnot na osách hodnot, aby bylo možné odečítat možné závislosti právě na AATR indikátoru.



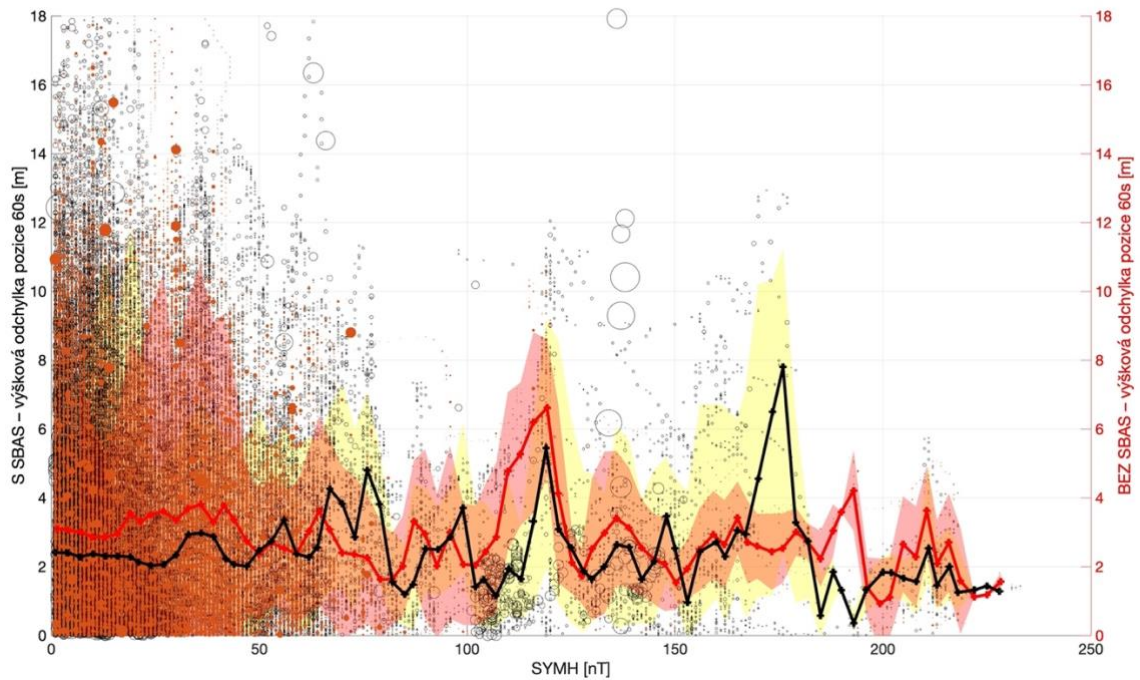
### 6.3.3 Statistické závislosti odchylek na ASY/SYM

Při zkoumání závislostí u indexu SYMH lze vyčíst možnou závislost mezi 3D odchylkou pozice přijímačů jak pro se zapnutým, tak i s vypnutým SBASem, jak je vidět na grafu č. 17 jasnou korelací už od hodnot nad 50 nT, nejvyšší pak 110-120 nT. Obecně se ale statisticky polohování u přijímače s SBASem vypořádává se zvýšenou ionosférickou aktivitou lépe.



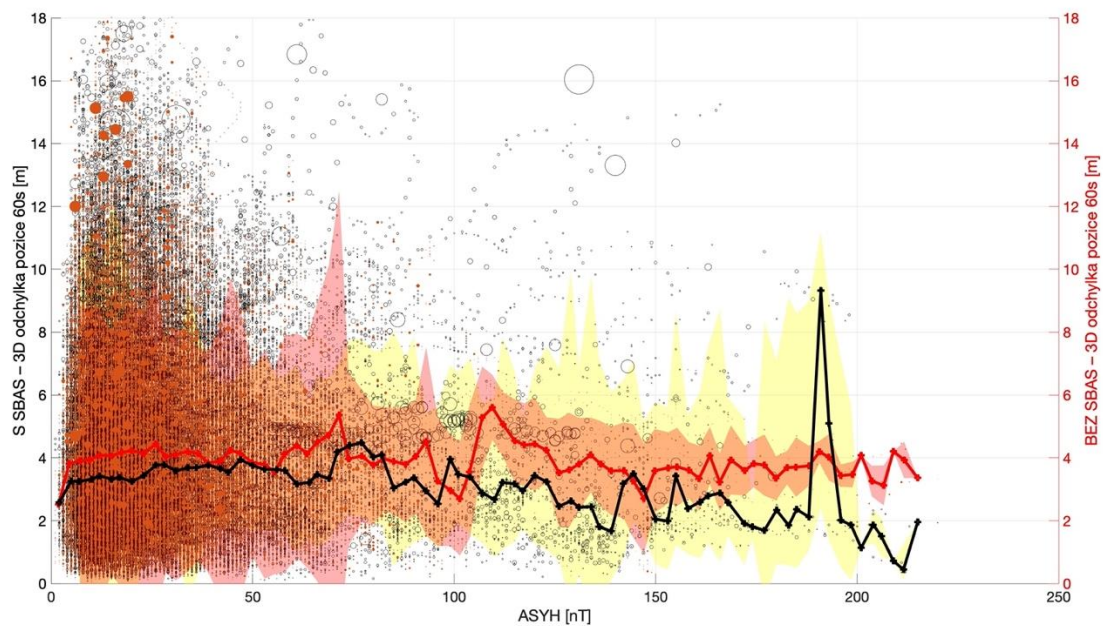
Graf 17 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS

Pro výškovou chybu můžeme vyčíst trend z následujícího obr. 18, též pro U-Blox přijímače se zapnutým a vypnutým SBAS a v porovnání s indexem SYMH. Rozvrásněnost křivek v grafu je čitelná již od hodnot okolo 50 nT, avšak trend odchylek pozic opisují křivky, tedy vyrovnávání se odchylkami, přijímače téměř stejně. Ve většině intervalu SYMH si vede ale opět přijímač s SBAS lépe oproti přijímači bez SBAS. Viditelná je ale i jasná odchylka u hodnot SYMH 165 až 174 nT, kdy přijímač s SBASem počítal odchylky polohování ve vysokých hodnotách.



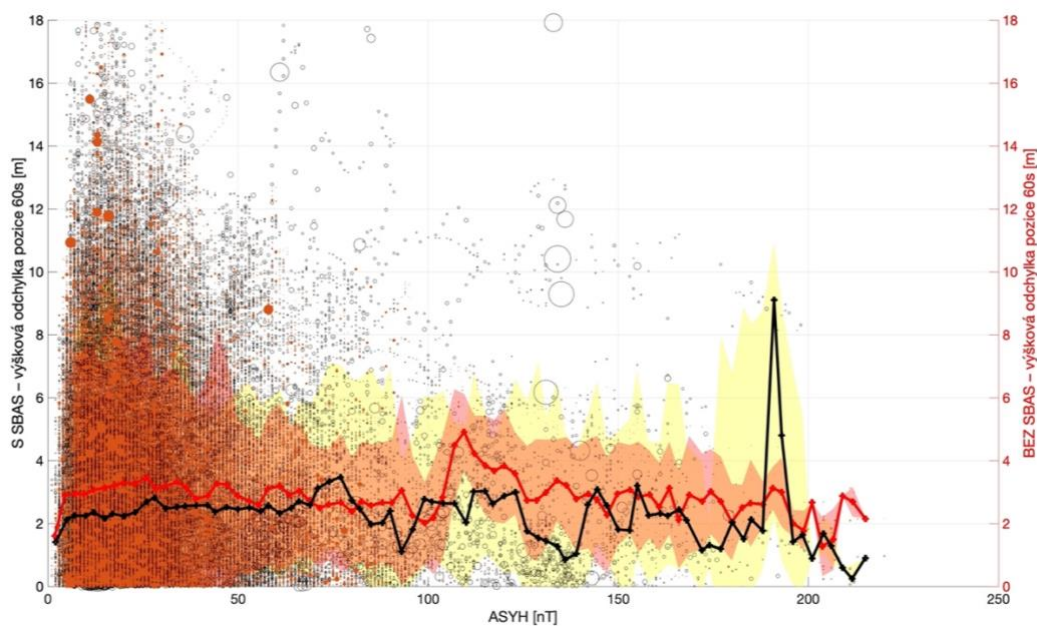
Graf 18 – Graf 17 – statistická závislost SYMH s chybou výškové pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS

U závislosti s ASYH na následujícím grafu č. 19 lze pozorovat obdobný trend, překvapivá je ale nyní pro přijímač se zapnutým SBASem zvýšená odchylka od přesné pozice mezi hodnotou SYMH 193-201, zde je však k dispozici jen několik minut měření. Měření se v tomto intervalu potýkalo s technickými problémy, ale na výsledné statistické zobrazení závislosti to nemá zásadní vliv.



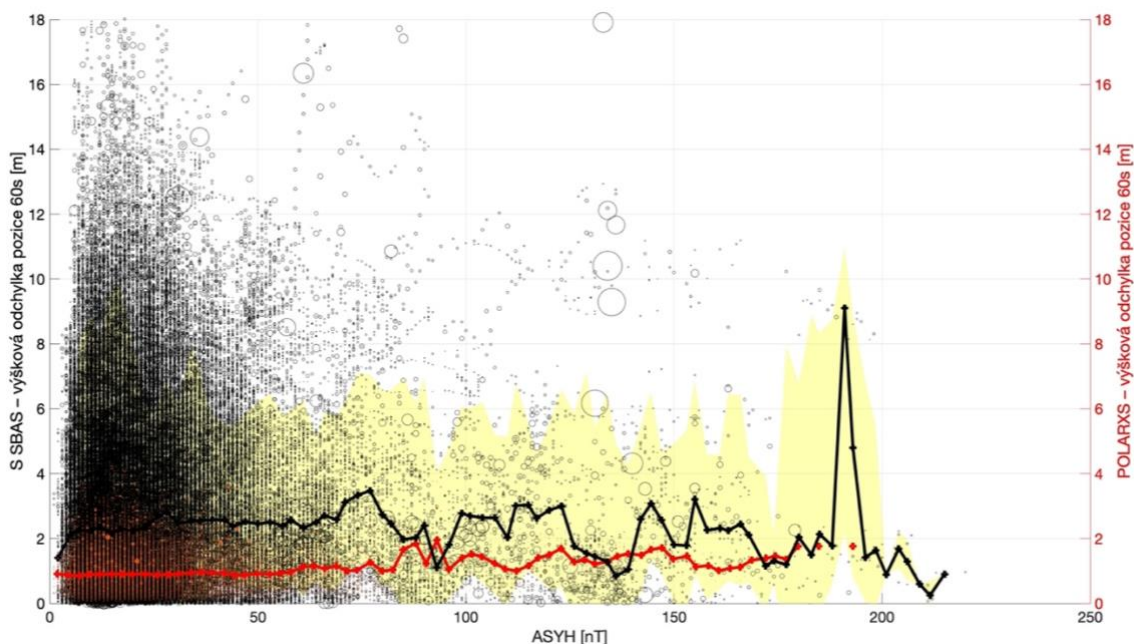
Graf 19 – statistická závislost ASYH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS

V případě zaměření se na chybu výšky pro tyto přijímače můžeme vidět opět podobný stav, kdy při hodnotách vyšších než 92 pro ASYH dochází ke značnému rozrušení chyby pozice pro oba přijímače. Pro přijímač s SBAS platí, že se vypořádává s ionosférickým rozrušením, na základě indikátoru, lépe v téměř celém svém intervalu s osou x, představující ASYH:



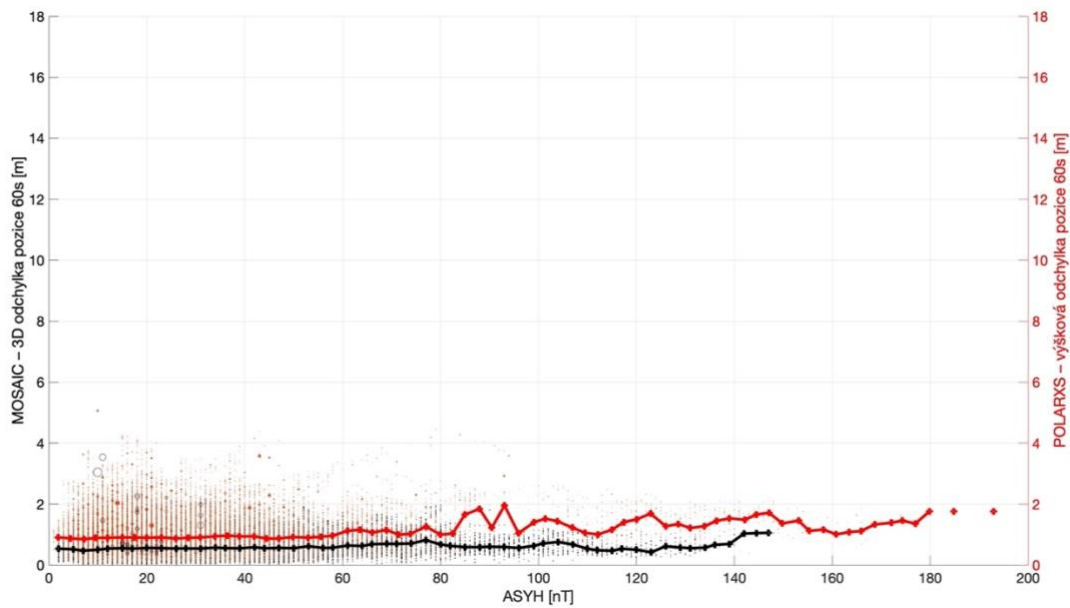
Graf 20 – statistická závislost ASYH s chybou výškové pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS

V případě porovnání přijímačů U-Blox opět se zapnutým SBAS a PolaRxS můžeme vidět, že v případě statistického rozložení vůči ASYH má POLARXS stále výhodu v polohování. Zejména tyto menší výchylky platí pro nižší hodnoty, kdy se oba přijímače nemusí vypořádávat s náhlými ionosférickými poruchami polohování.

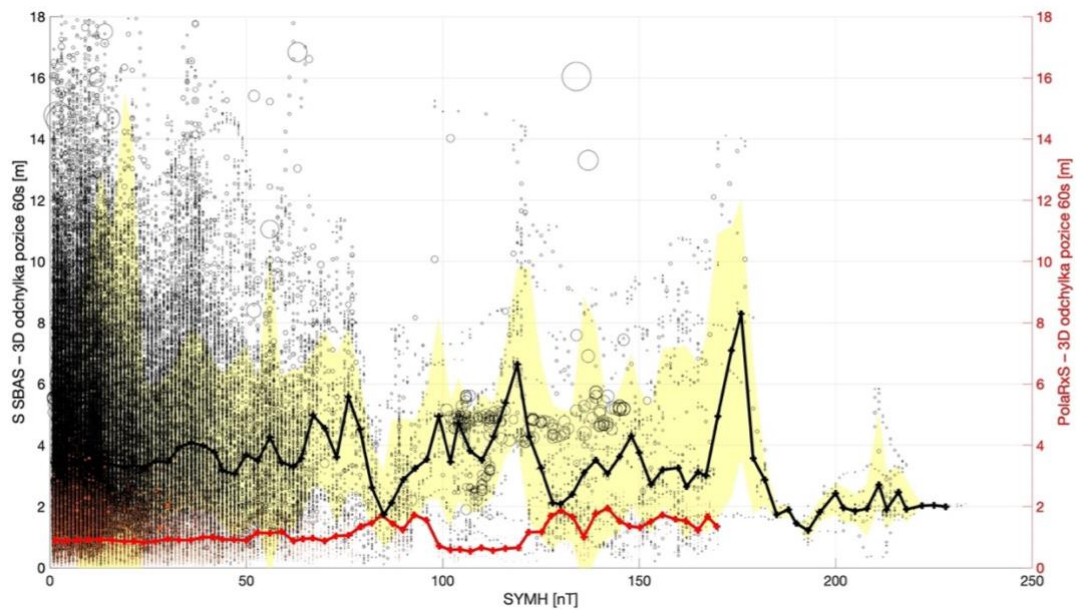


Graf 21 – statistická závislost ASYH s výškovou chybou pozice přijímačů U-Blox se zapnutým SBAS a Septentrio PolaRxS

Na grafu č. 22 vybraného statistického srovnání profesionálních přijímačů vůči indikátoru ASYH lze vyčíst, že vynesené 3D odchylky vůči těmto přijímačům nejsou v takové závislosti, a i při vyšších hodnotách indikátoru ASYH si vedou oba dobře. Při zaměření se na vyšší hodnoty indikátoru ASYH od hodnoty 81 [nT] však vidíme horší polohování pro PolaRxS.



Pro porovnání 3D odchylek pozice s profesionálním přijímačem Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS (černá křivka) v závislosti na SYMH můžeme pozorovat, že si Septentrio (červená křivka) vůči zvýšené ionosférické aktivitě indexované SYMH vede opět poznání lépe. Vůči přijímači U-Blox se zapnutým SBASem můžeme zároveň pozorovat, že měření probíhalo i přes geomagnetickou bouři. Pro přijímač s SBAS je viditelná také jasná problematika korigování ionosférických poruch, což je čitelné i v porovnání s profesionálním PolaRxS.



Graf 22 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox se zapnutým SBAS a Septentrio PolaRxS

V intervalu hodnot SYMH 71 až 99 nT můžeme pozorovat problémy přijímače PolaRxS, avšak odchylky polohování se změnil v depresivní tendenci a přijímač pak od této fáze až do 122 nemá s odchylkami pozice problém. Pro přijímač U-Blox se zapnutým SBASem jsou ale problémy v polohování již v nižších hodnotách indikátoru SYMH, načež jsou vidět vrcholy při určitých intervalech hodnot SYMH (62 až 80 nT, 109 až 125 nT a 162 až 170 nT).



## Diskuse

Analýza této práce měla cíl statisticky i časově určit, zdali existuje závislost mezi sledovanými ionosférickými poruchami a výsledky měření GNSS přijímači s různými specifikacemi nastavení i výkonnostmi. Na začátku tohoto roku byla zároveň uvedeny do provozu 2 přijímače U-Blox F9P s dalšími moduly pro jejich provoz a paralelně s nimi bylo zajištěno měření vysoce výkonných GNSS přijímačů Septentrio Mosaic a PolaRxS. Všechna tato data z přijímačů byla konvertována a zpracována pro následné vyhodnocování v programu Matlab 2023. Relevantní indexy a indikátory ionosférické aktivity AATR, geomagnetické SYM/ASY anebo výsledky Dopplerovského sondování byly zpracovány na stejném minutovém průměrování tak, aby byli ve stejném formátu jako všechna ostatní data měření.

Zkoumané indikátory ionosférické aktivity nabývali mimo geomagnetických bouří standardních očekávaných hodnot. V případě zvýšené ionosférické aktivity byli tyto hodnoty jasně zvýšené a následnou typickou depresí.

Celkově lze konstatovat, že sledované chyby pozic – tedy odchylky, u zkoumaných přijímačů GNSS vykazují zajímavé a rozmanité vzory v závislosti na indikátorech ionosférické aktivity. Ve výsledcích zkoumání mezi přijímači byli porovnány značné rozdíly chyb pozic mezi přijímači U-Blox F9P a Septentrio, kdy Septentrio naprosto předčil polohování oproti přijímačům U-Blox. Tyto výsledky platí nejen pro polohování při standardní ionosférické aktivitě, ale také pro dále zkoumané vlivy zvýšené aktivity v ionosféře. Mezi low-cost přijímači data jasně ukazují, že je zde značná výhoda přijímače se zapnutým SBAS oproti tomu bez SBAS. V analýze porovnání ionosférické aktivity v čase můžeme pozorovat narušení trendu u indikátorů, a dokonce jasně viditelné rozrušení při silné geomagnetické bouři, která se tento rok odehrála více než třikrát. Vzhledem k blížícímu se vrcholu slunečního cyklu, který má vrchol v roce 2025, můžeme tuto aktivitu očekávat ještě ve větší četnosti a měřítku. Statistická závislost odchylek ukazuje na výhodu s využitím přijímače se zapnutým SBAS. Avšak při silné ionosférické





aktivitě, kterou můžeme číst právě z většího Dopplerova posunu, a kdy základní predikce modelů již nemusí dostačovat při využití SBAS korekcí, můžeme pozorovat, že tento trend nemusí být pravidlem a ba naopak může být mít přijímač se zapnutým SBAS v polohování horší, tedy s většími odchylkami pozic. Závislost odchylek při analýze AATR indexu dále ilustruje, že vyšší hodnoty tohoto indexu vyznačují značné rozrušení chyby pozice.

Celkově lze konstatovat, že vlivy ionosférických poruch mají u low-cost přijímačů je komplexnější, než se může zdát a závisí na mnoha proměnných. I díky těmto analýzám přijímačů z kategorie low-cost, ale i paralelně s velice výkonnými, mohou poskytovat důležité informace právě pro možné další experimenty a zkoumání vlivu.

V neposlední řadě je potřeba též zmínit, že pro takto specifické měření dat je interval téměř jednoho roku poměrně krátký. I přes to, že bylo dat nasbíráno poměrně dost a během této doby se udály významné geomagnetické bouře, mající vliv právě na ionosférickou aktivitu, potažmo na signál GNSS, doba měření by měla být ze statistického hlediska podstatně delší. Z toho důvodu je zde prostor pro další zkoumání.



## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo identifikovat možnou závislost ionosférických poruch s odchylkami poloh od přesně geolokované antény. Cíl práce byl splněn. V úvodu této práce proběhla analýza problematiky a rešerše současného stavu. Na základě této analýzy, ale i dalších aspektů byly vybrány indikátory ionosférických poruch, které byly následně použity při vyhodnocování možné závislosti..

Pozorování mezi přijímači U-Blox F9P v roli low-cost a Septentrio odhalilo výrazné rozdíly v chybách pozic, přičemž Septentrio prokázal výrazně lepší polohování, a tedy menší odchylky od přesně geolokované pozice antény. Tato diference byla pozorována nejen při standardní ionosférické aktivitě, ale i při zvýšené aktivitě během geomagnetických bouří. Dle očekávání se prokázala značná výhoda přijímače se zapnutými SBAS opravami, avšak při podstatně zvýšené aktivitě, až při klasifikaci geomagnetických bouří, toto neplatilo, což vypovídá o nedostatku oprav s využitím základních oprav a modelů, které SBAS korekce v této době nabízí.

Na základě výsledků této práce vyvstává prostor pro další výzkumy, které by se mohly zabývat otázkami ve směru predikce a možných dalších analýz pro zdokonalování korekcí pro GNSS indikátory. V současné době se totiž zdá, a to i podle výsledků této práce, že systémy jako SBAS, které vysílají korekce, nedostatečně řeší regionální ionosférické narušení. Případnými přesnějšími regionálními ionosférickými korekcemi v síti bodů SBAS s odstupy přibližně 100 km lze totiž ještě více zpřesnit a zefektivnit přesnosti v polohování a určování polohy. Současný letecký integrovaný indikátor v podobě „Protection Level“ (česky Úroveň ochrany), totiž pouze udává maximální možnou chybu, která ale nepočítá s vlnovými procesy v ionosféře o vlnové délce pouze okolo 100km. Mimo jiné samo ICAO ve svých výzvách doporučuje vyvíjet indikátory, které jasně ukazují očekávané skutečné nepřesnosti s ohledem na data v reálném čase poskytovanými ionosférickými monitorovacími službami. [38]



## Zdroje

- [1] International Civil Aviation Organization. (2005). Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. 1. vydání. Montreal: ICAO. ISBN 978-92-9258-268-5.
- [2] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Vídeň: Springer. ISBN 978-3-211-73012-6.
- [3] PRINCETON UNIVERSITY. Global Navigation Satellite System (GNSS). [Online]. Dostupné z: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf1>.
- [4] EUROPEAN SPACE AGENCY. GNSS Basic Observables - Navipedia. [Online]. Dostupné z: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_Basic\\_Observables](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Basic_Observables). Navštíveno dne 12. 08. 2023.
- [5] NOVATEL. GNSS Ephemerides and Almanacs. [Online]. Dostupné z: [https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/GNSS\\_Ephemerides\\_and\\_Almanacs.htm](https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/GNSS_Ephemerides_and_Almanacs.htm). Navštíveno dne 12. 8. 2023.
- [6] KOVÁŘOVÁ, Lenka. Úvod do Globálních Navigačních Satelitních Systémů: Přednáška 2. Online prezentace.
- [7] EUROPEAN SPACE AGENCY. CDMA FDMA Techniques - Navipedia. [Online]. Dostupné z: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA\\_FDMA\\_Techniques](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques). Navštíveno dne 12. 8. 2023.
- [8] GLOBAL GPS SYSTEMS. Understanding Satellite Frequencies and GNSS Receiver Channels. [Online]. Dostupné z: <https://globalgpsystems.com/gnss/understanding-satellite-frequencies-and-gnss-receiver-channels/>. Navštíveno dne 18. 8. 2023.



- [9] HOSPODKA, Jakub. 7. přednáška – GPS, GNSS, GLONASS. Praha, 21. června 2022, České Vysoké Učení Technické v Praze,
- [10] GPSrChive. GPSrChive - Satellites [online]. [cit. 2023-10-5]. Dostupné z: <https://www.gpsrchive.com/Shared/Satellites/Satellites.html>
- [11] MOLDWIN, Mark. An Introduction to Space Weather. Ilustrované vydání, přepracované vydání. Cambridge University Press, 2022. ISBN 1108791719, 9781108791717.
- [12] BAKER, D.N. What is space weather?: Advances in Space Research. 1998(Volume 22, 1), 7-16. ISSN 0273-1177. Dostupné z: doi: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01095-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01095-8)
- [13] NOAA / NWS SPACE WEATHER PREDICTION CENTER. NOAA Space Weather Scales. [Online]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. Navštíveno dne 23. 11. 2023.
- [14] VANLOMMEL Petra a D'HUYS Elke, Space Weather Data, models and services – eSWAN School [přednáška, kurz]. Toulouse, France 18.-19. listopadu 2023.
- [15] What are the different types, or classes, of flares?. Stanford SOLAR Center [online]. 2022 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <http://solar-center.stanford.edu/SID/activities/flare.html>
- [16] DANG, Zhen; LI, Wenbin; ZHANG, Yiteng; et al. Unveiling the Space Weather During the Starlink Satellites Destruction Event on 4 February 2022. In: Space Weather. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2022SW003152>. Navštíveno dne 27. 11. 2023.
- [17] GUBBINS, David; HERRERO-BERVERA, Emilio (eds.). Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. 1st edition. Springer, 2007. ISBN 978-1-4020-3992-81.
- [18] SCIENCE DIRECT. Plasma Frequency - an overview. [Online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/plasma-frequency>. [Citováno 3. 8. 2023]



- [19] HUM, Sean Victor. Ionospheric Propagation. University of Toronto. [Online]. Dostupné z: <https://www.waves.utoronto.ca/prof/svhum/ece422/notes/20c-ionosphere.pdf>. [Citováno 3. 8. 2023].
- [20] ELECTRONICS NOTES. Ionospheric Propagation: layers, D, E, F1, F2 regions. [Online]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/ionospheric/ionospheric-layers-regions-d-e-f1-f2.php> [Citováno 6. 9. 2023].
- [21] Aol, S., Buchert, S., & Jurua, E. (2020). Ionospheric irregularities and scintillations: a direct comparison of in situ density observations with ground-based L-band receivers. *Earth, Planets and Space*, 72, Article number: 164. Dostupné z: [<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-020-01272-9>] [Citováno 6. 9. 2023]
- [22] Cander, Ljiljana R. (2018). *Ionospheric Space Weather*. 1. vydání. Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-99330-0.
- [23] NOAA / NWS Space Weather Prediction Center. (2023). *Space Weather and GPS Systems*. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/space-weather-and-gps-systems> [Citováno 6. 9. 2023]
- [24] ESA. SBAS coverage [online]. 2023-09-02 [Citováno 11. 3. 2023]. Dostupné z: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2023/09/SBAS\\_coverage](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/09/SBAS_coverage)
- [25] EU Agency for the Space Programme. (2022). *What is SBAS?* Dostupné z: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas> [Citováno 3. 11. 2023]
- [26] “European Space Agency. (2011). *SBAS Systems*. Dostupné z: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Systems](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Systems) [Citováno 3. 11. 2023]
- [27] Sánchez, Daniel Porras & Berges, César Pisonero. (2006). *The EGNOS SBAS Message Format Explained*. Dostupné z:



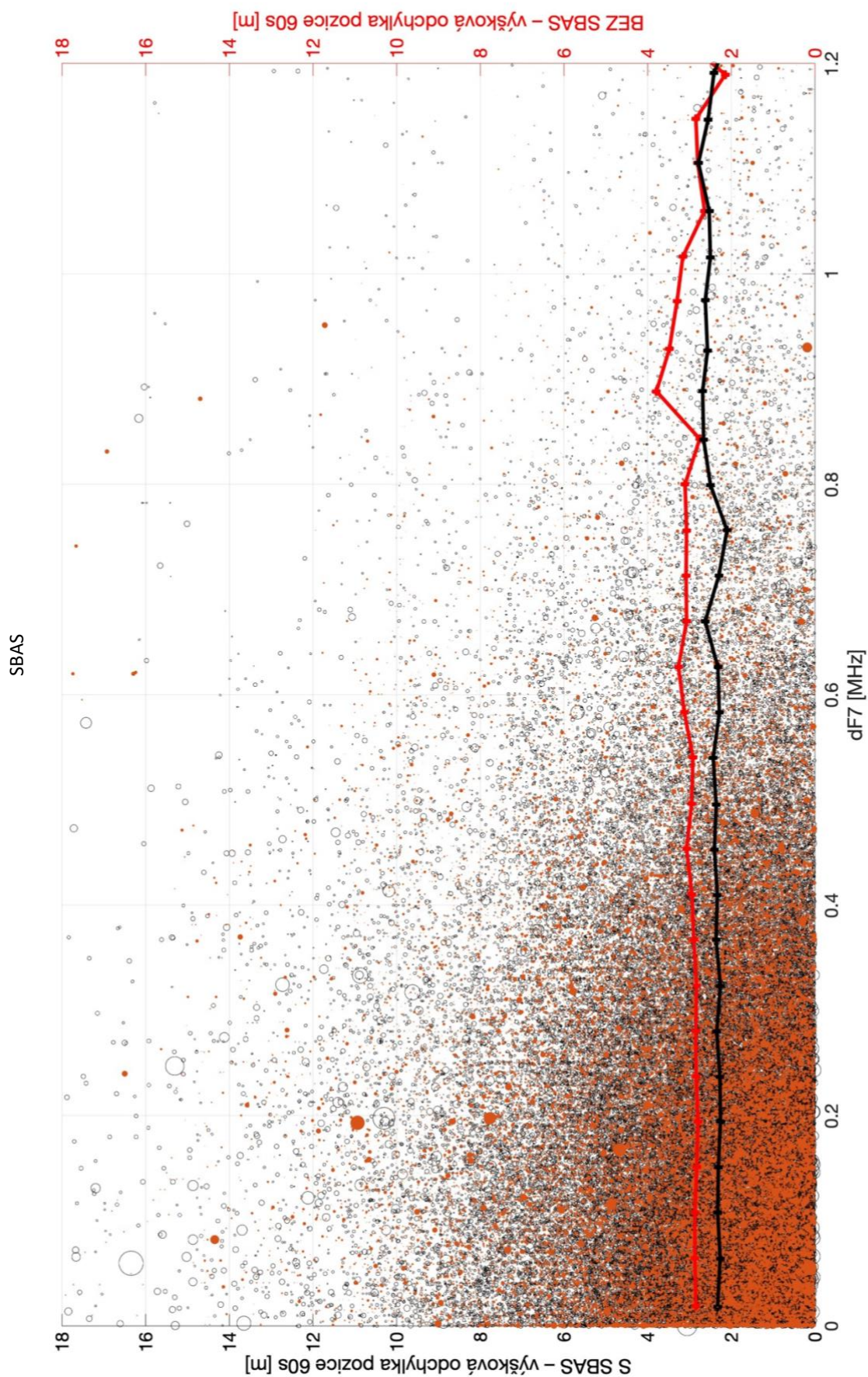
- [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The\\_EGNOS\\_SBAS\\_Message\\_Format\\_Explained](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/The_EGNOS_SBAS_Message_Format_Explained)
- [28] Oliveira, P., Silva, J., & Soares, P. (2020). A Comparative Study between ILS and GBAS Approaches: The Case of Viseu Airfield. *Journal of Airline and Airport Management*. Dostupné z: <https://doi.org/10.3926/jairm.168> [Citováno 6. 9. 2023]
- [29] Septentrio. (2023). Why multi-frequency and multi-constellation matters for GPS/GNSS receivers? Dostupné z: <https://www.septentrio.com/en/learn-more/about-GNSS/why-multi-frequency-and-multi-constellation-matters>
- [30] "National Observatory of Athens. (2023). Methodologies – TechTIDE Project. Dostupné z: [http://techtide.space.noa.gr/?page\\_id=1024](http://techtide.space.noa.gr/?page_id=1024) [Citováno 15. 9. 2023]
- [31] Sanz, J., Juan, J.M., González-Casado, G., Prieto-Cerdeira, R., Schlüter, S., & Orús, R. (2014). Novel Ionospheric Activity Indicator Specifically Tailored for GNSS Users. Dostupné z: [https://server.gage.upc.edu/papers/2014/AATR\\_ION2014.pdf](https://server.gage.upc.edu/papers/2014/AATR_ION2014.pdf), <https://doi.org/10.1051/swsc/2017044> [Citováno 10. 10. 2023]
- [32] Chum, J., & Podolská, K. (2018). Multipoint Continuous Doppler sounding system. Dostupné z: [https://www.ufa.cas.cz/DATA/files/oia/Doppler\\_des\\_365.pdf](https://www.ufa.cas.cz/DATA/files/oia/Doppler_des_365.pdf) [Citováno 15. 9. 2023]
- [33] International Service of Geomagnetic Indices. (2023). ASY/SYM indices. Dostupné z: [https://isgi.unistra.fr/indices\\_asy.php](https://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) [Citováno 15. 9. 2023]
- [34] "Harxon. (2023). Survey GNSS Antenna GPS500. Dostupné z: <https://en.harxon.com/product/detail/129> [Citováno 15. 9. 2023]
- [35] u-blox. (2023). ZED-F9P module. Dostupné z: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ZED-F9P-15B\\_DataSheet\\_UBX-23009090.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ZED-F9P-15B_DataSheet_UBX-23009090.pdf) [Citováno 6. 10. 2023]



- [36] "Septentrio. (2023). PolaRx5S. Dostupné z: <https://www.septentrio.com/en/products/gps/gnss-reference-receivers/polarx5s> [Citováno 6. 10. 2023]
- [37] "Septentrio. (2023). mosaic-X5. Dostupné z: <https://www.septentrio.com/en/products/gps/gnss-receiver-modules/mosaic-x5> [Citováno 6. 10. 2023]
- [38] International Civil Aviation Organization. (2016). SBAS safety assessment guidance related to anomalous ionospheric conditions. Dostupné z: <https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/SBAS%20safety%20assessment%20guidance.pdf> [Citováno 6. 10. 2023]
- [39] Penn State University. (2023). Multipath | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1721> [Citováno 6. 10. 2023]

# Přílohy

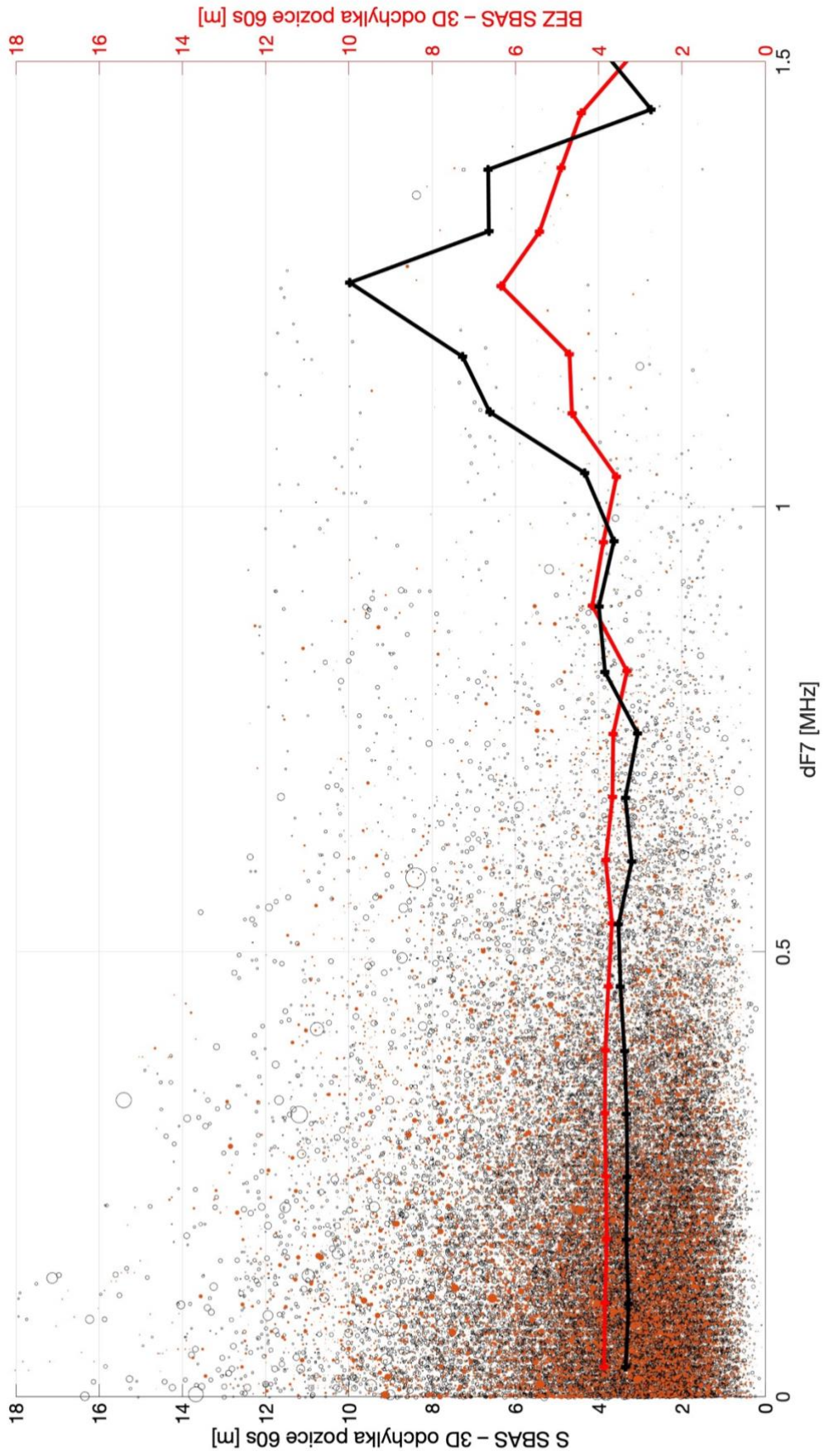
Příloha 1 – statistická závislost dF7 s chybou výškové pozice přijimačů se zapnutým a vypnutým SBAS



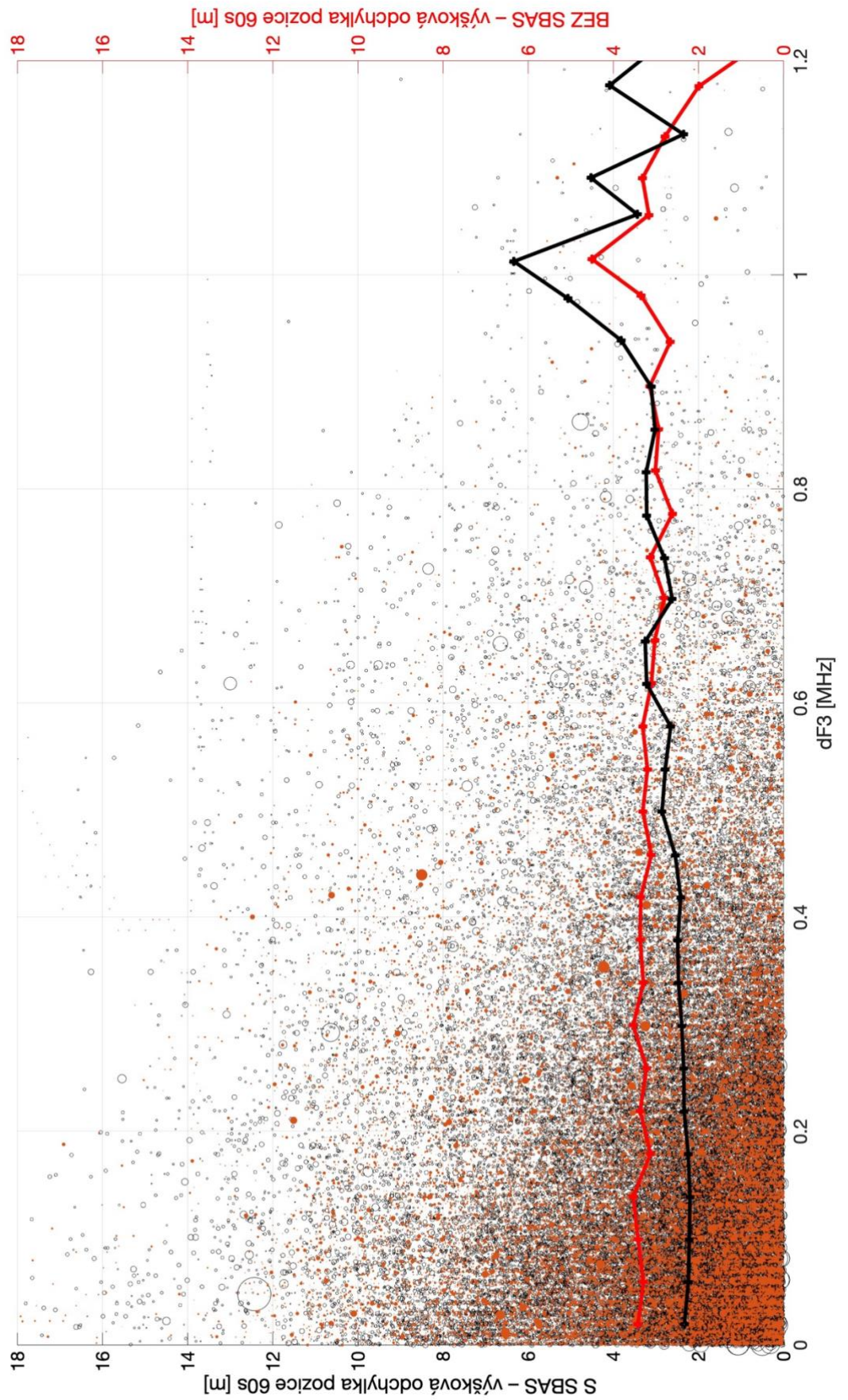




Příloha 2 – – statistická závislost dF7 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS

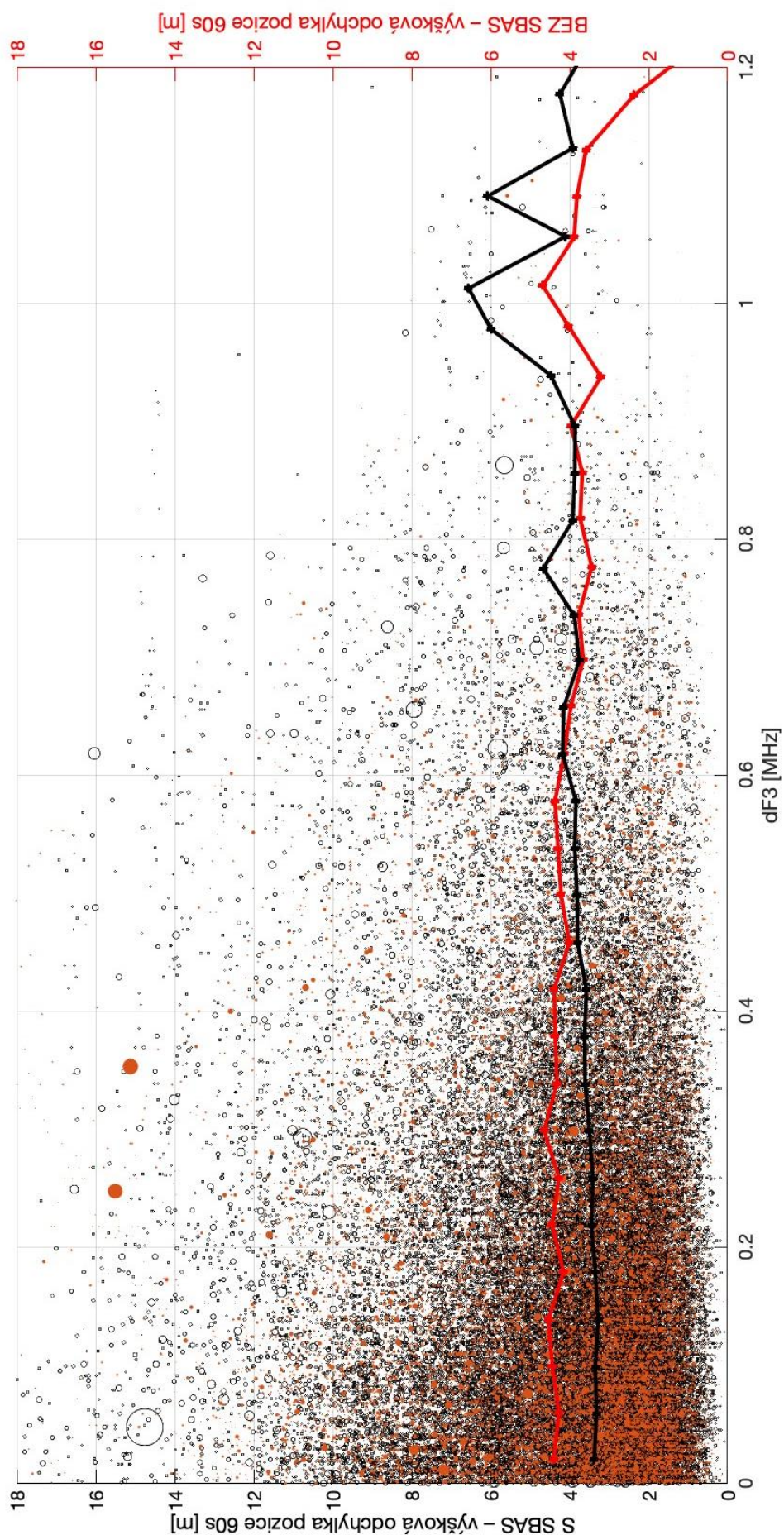


Příloha 3 – statistická závislost  $dF3$  s chybou výškové pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS



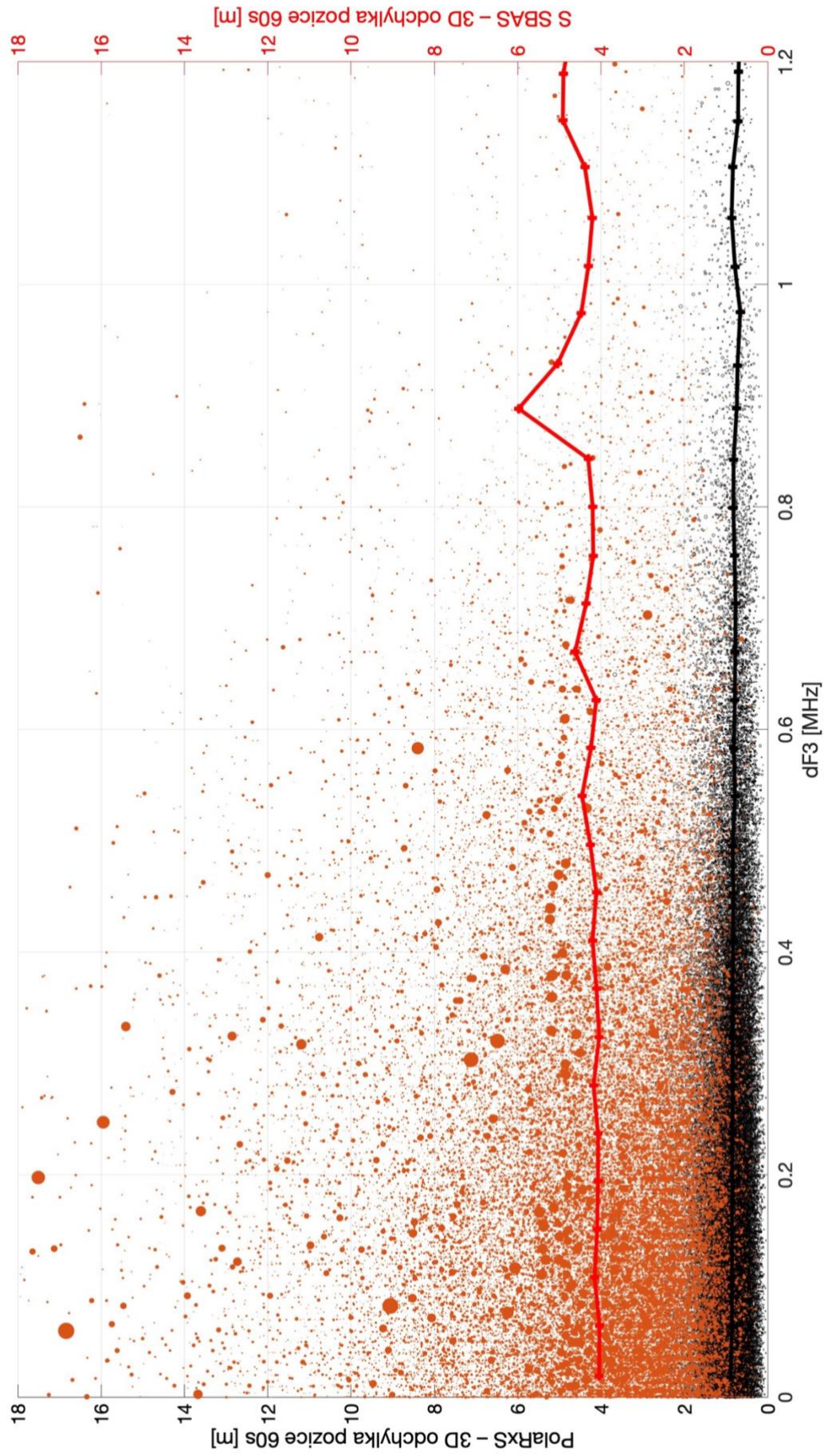


Příloha 4 – statistická závislost dF3 s chybou 3D pozice přijímačů se zapnutým a vypnutým SBAS



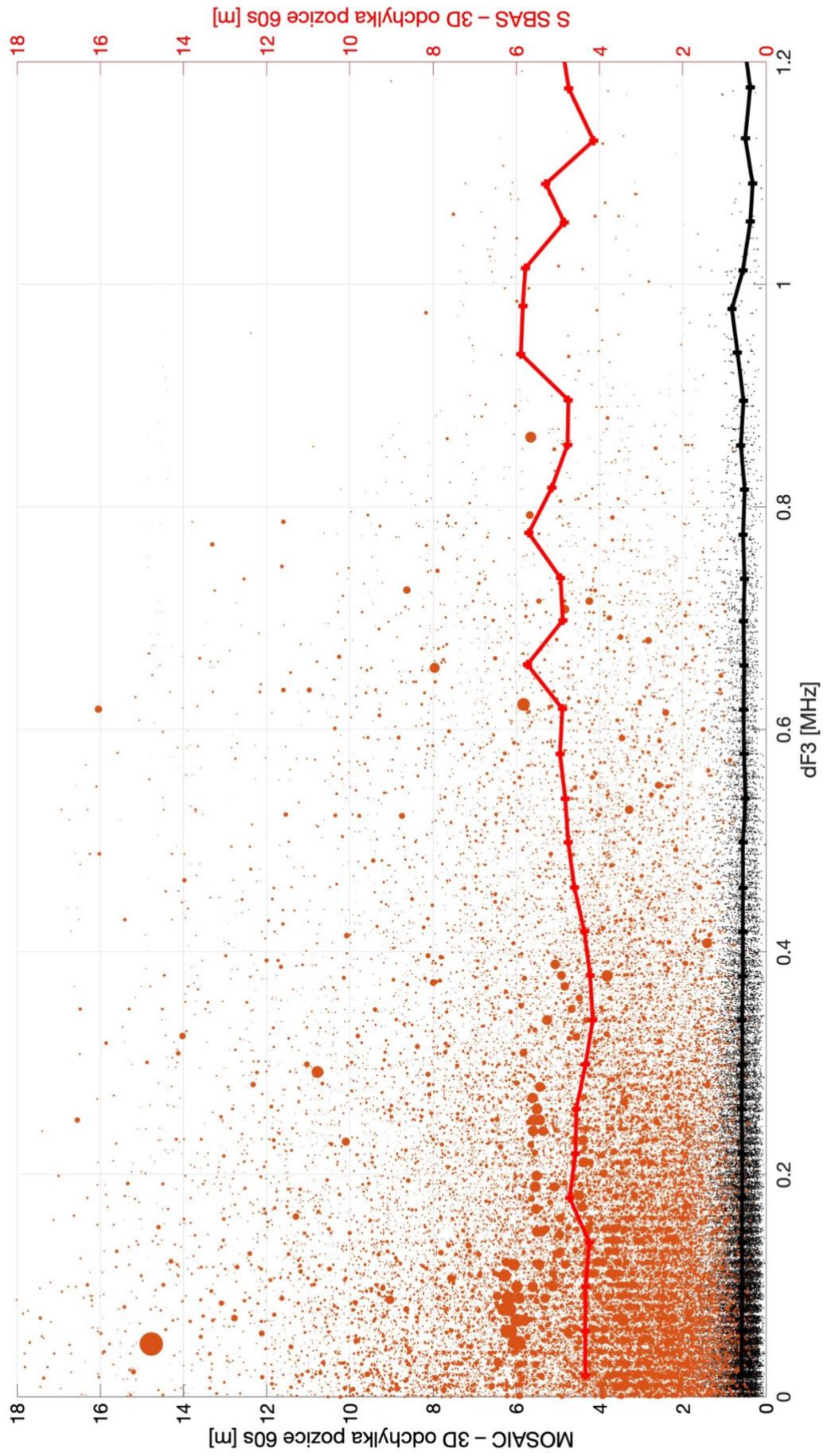


Příloha 5 – statistická závislost dF7 s chybou pozice přijímače Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS



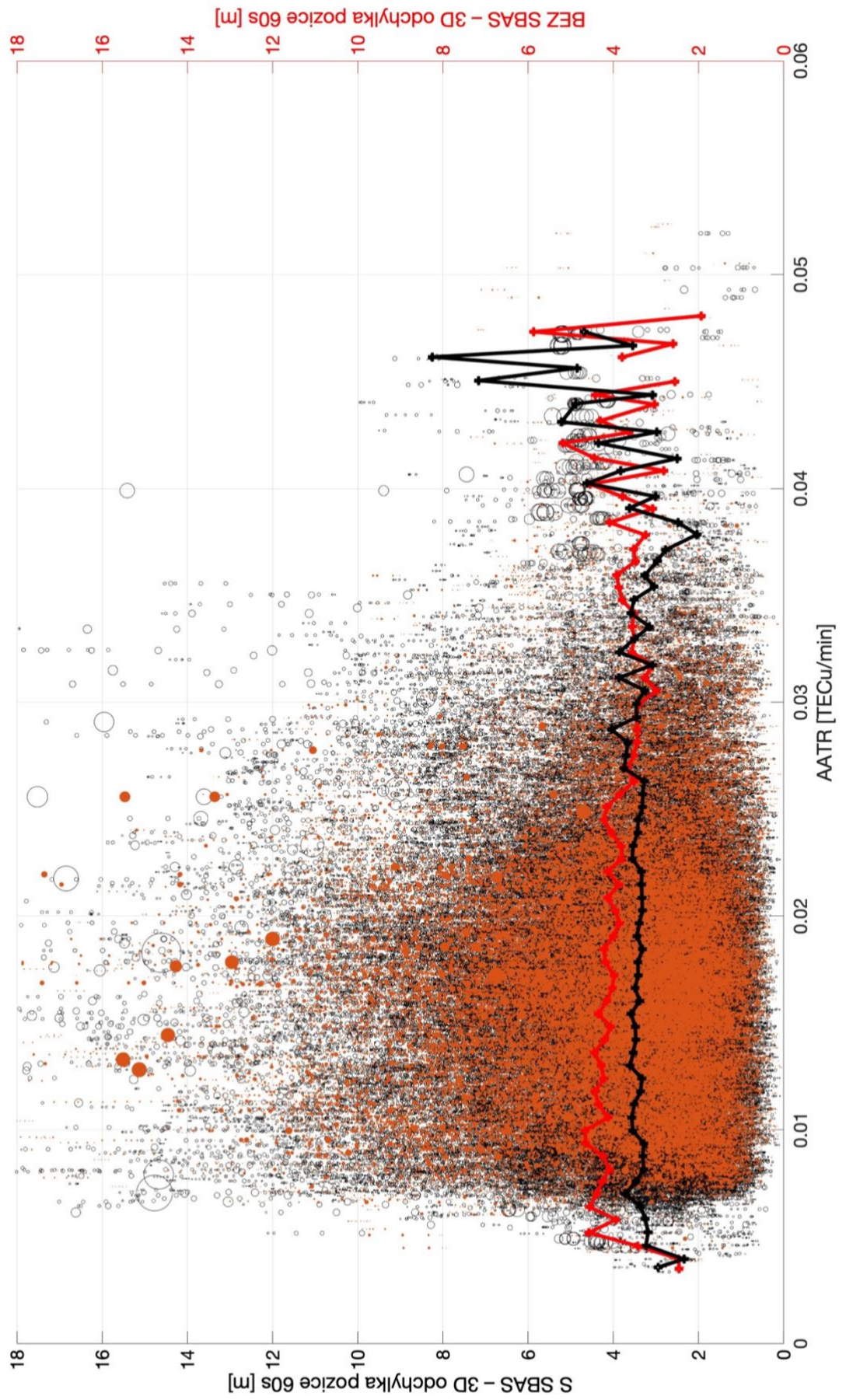
Příloha 6 – statistická závislost dF3 s chybou pozice přijímače Septentrio Mosaic a U-Blox se zapnutým

SBAS

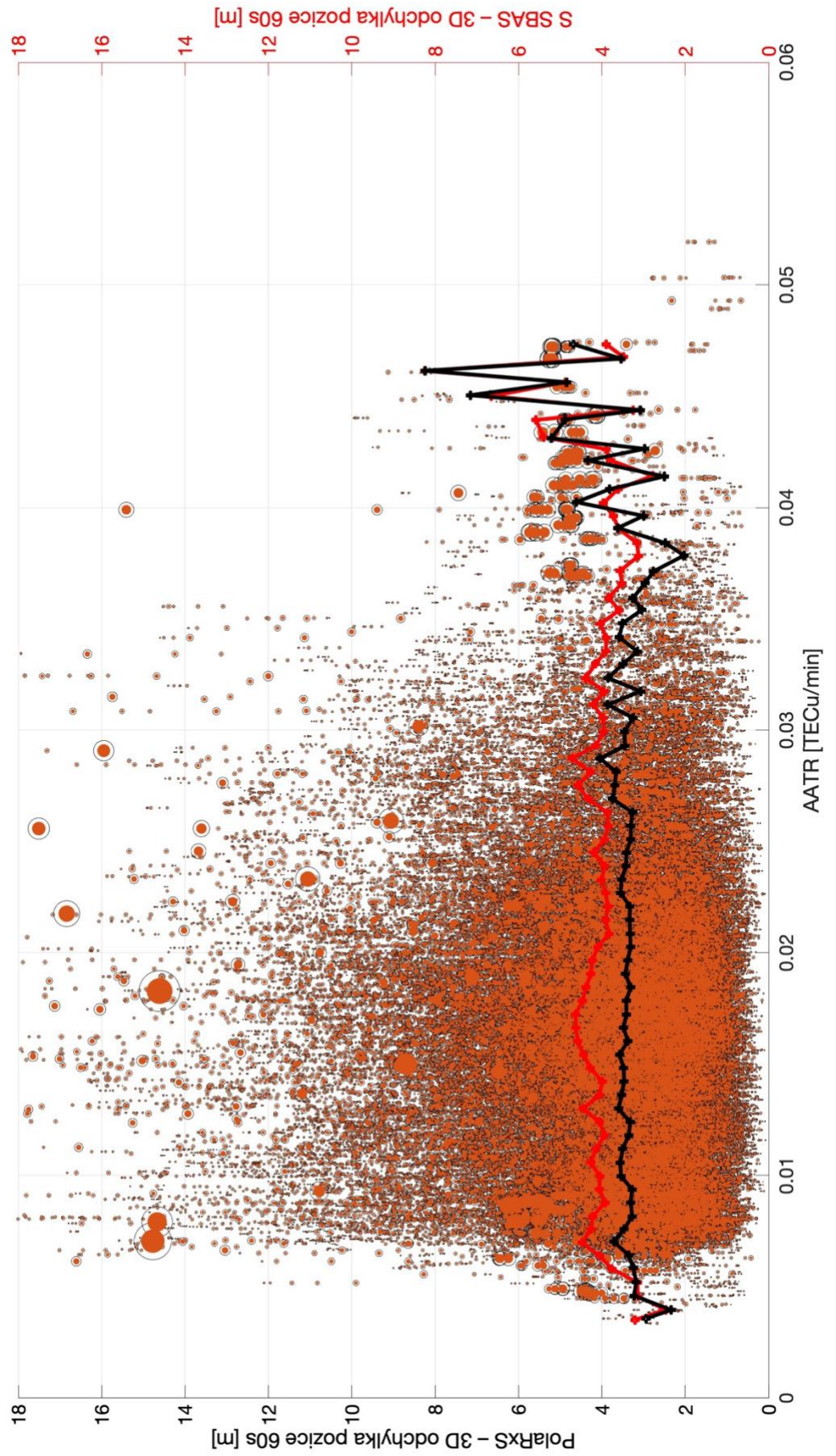




Příloha 7 – statistická závislost AATR s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS

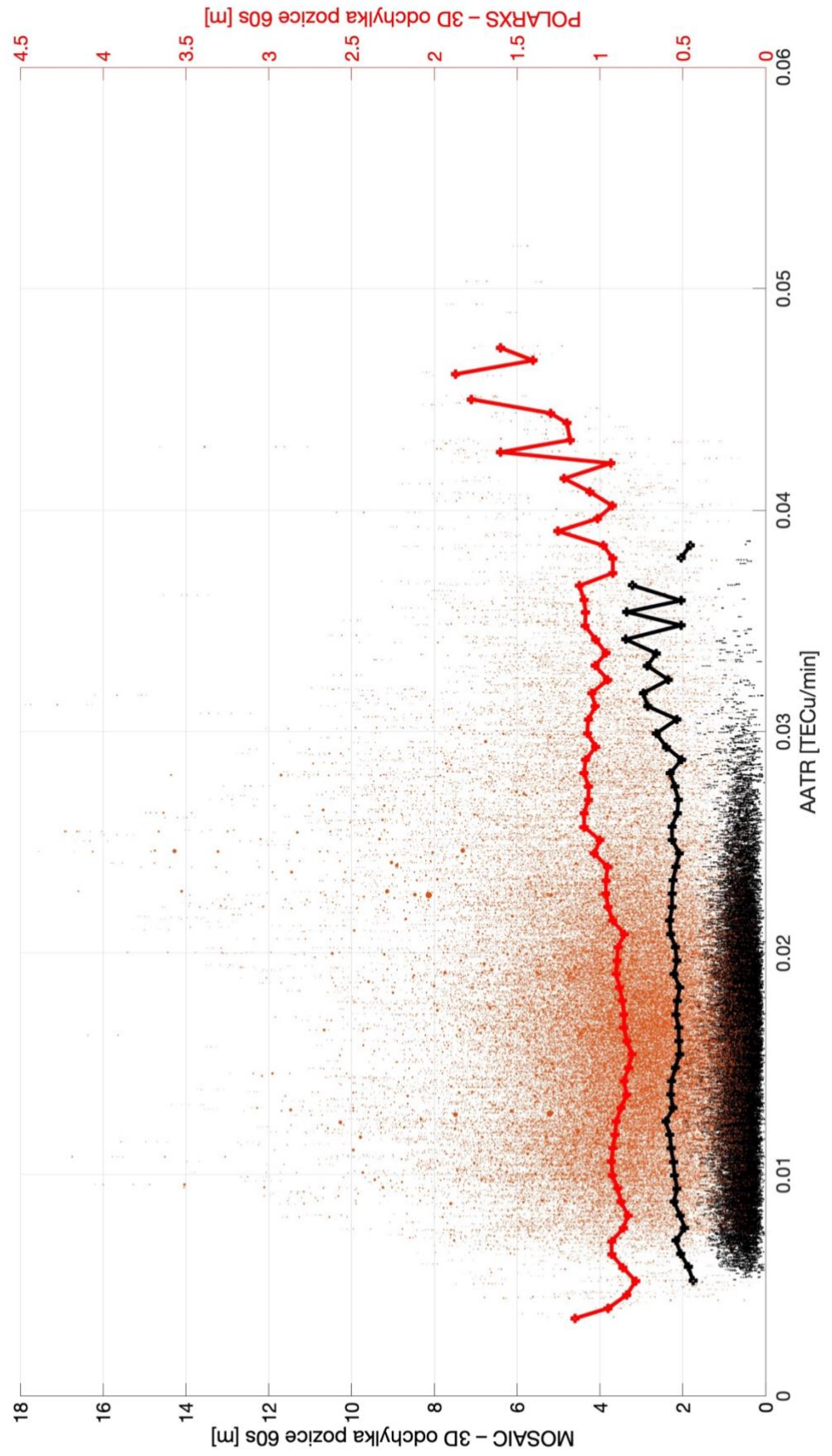


Příloha 8 – statistická závislost AATR s chybou pozice přijímačů Septentrio PolaRxS a U-Blox se zapnutým SBAS





Příloha 9 – statistická závislost AATR s chybou pozice přijímačů Septentrio PolaRxS a Septentrio Mosaic

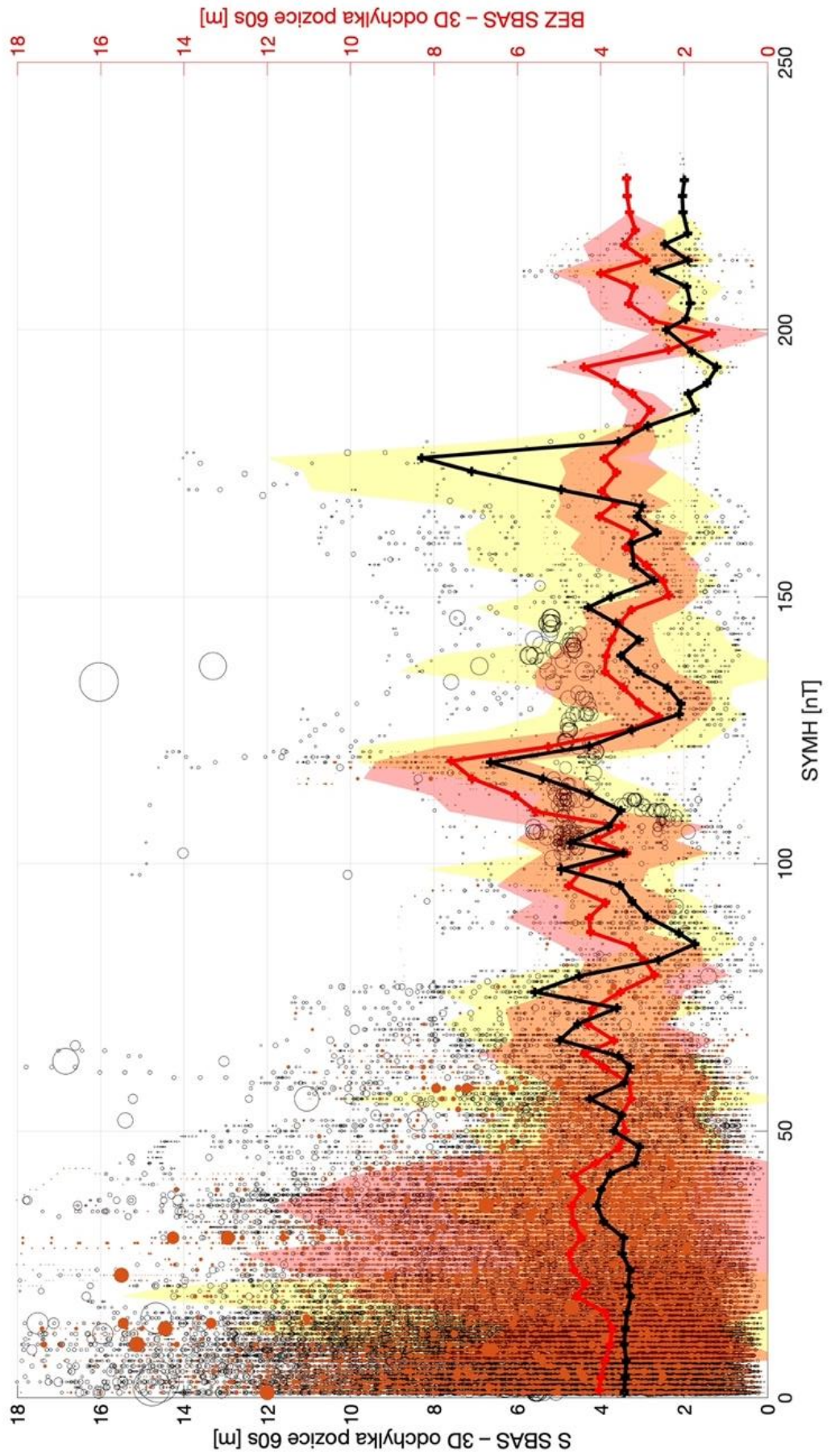




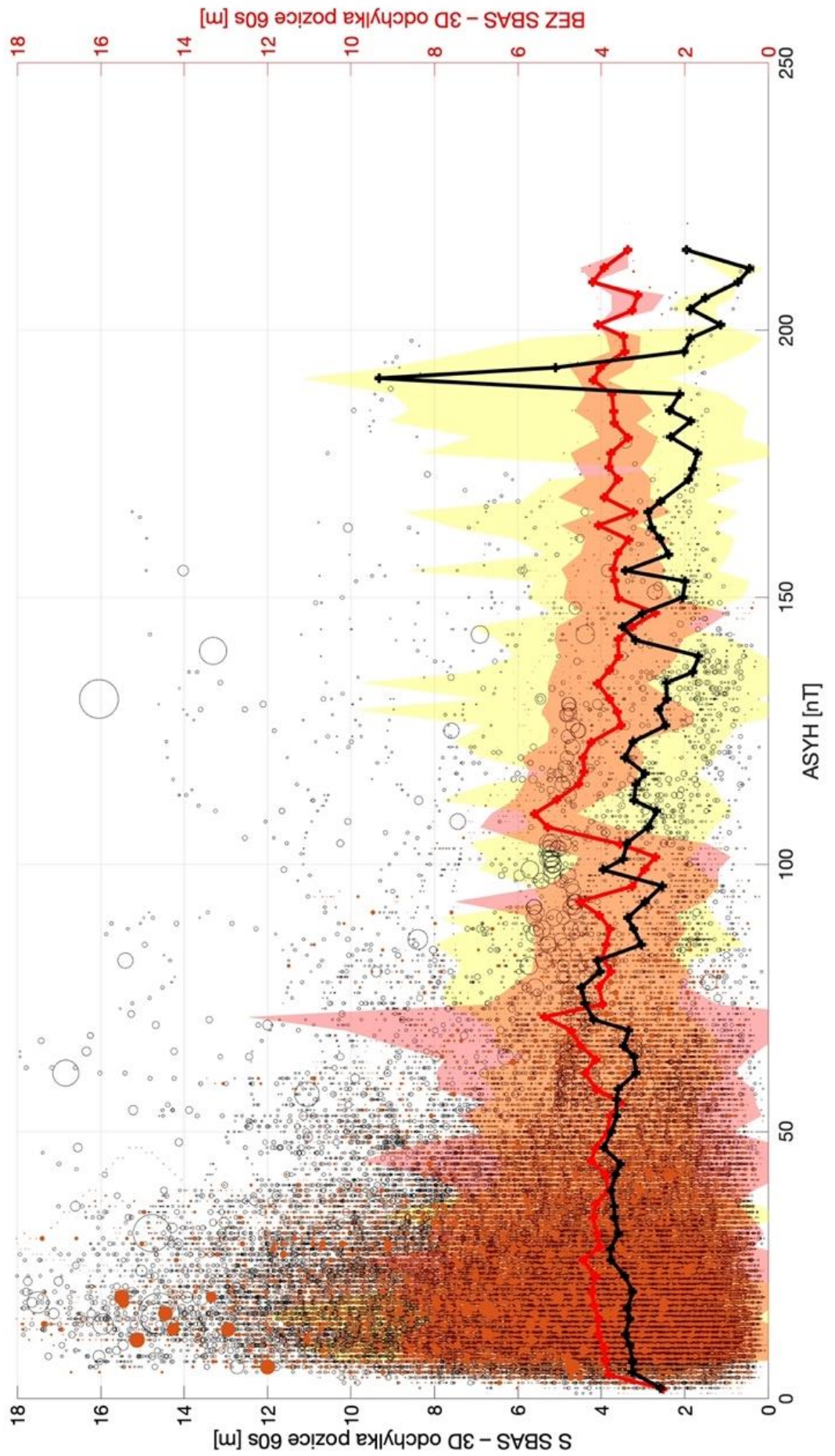


Příloha 10 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým

SBAS



Příloha 11 – statistická závislost ASYH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox s vypnutým a zapnutým SBAS





Příloha 12 – statistická závislost SYMH s chybou 3D pozice přijímačů U-Blox se zapnutým SBAS a Septentrio PolaRxS

