



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

# PRECISE POINT POSITIONING S CELOČÍSELNÝM ŘEŠENÍM AMBIGUIT

PRECISE POINT POSITIONING WITH INTEGER AMBIGUITY RESOLUTION

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Terézia Orviská

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Nosek

BRNO 2023

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav geodézie  
Studentka: **Bc. Terézia Orviská**  
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Nosek**  
Akademický rok: 2022/23  
Studijní program: N0532A260001 Geodézie a kartografie

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Precise Point Positioning s celočíselným řešením ambiguit

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je tematicky zaměřena na aplikaci metody Precise Point Positioning (PPP) v geodézii. V rámci řešení diplomové práce je předpokládána spolupráce s Výzkumným ústavem geodetickým, topografickým a kartografickým, v. v. i (VÚGTK) → zajištění software, odborné konzultace. Rámcový postup řešení DP:

- rešerše současného stavu v oblasti PPP
- seznámení s knihovnou G-Nut
- zpracování souboru dat pro vyhodnocení přesnosti PPP a PPP-AR
- zpracování GNSS dat pořízených během vybraných zemětřesení, výpočet magnitud zemětřesení na základě dat z PPP a PPP-AR

### Cíle a výstupy diplomové práce:

- Porovnat PPP a PPP s celočíselným řešením ambiguit (PPP-AR).
- Přesnost a rychlost konvergence řešení obou metod zhodnotit na reprezentativním vzorku dat.
- Použít PPP a PPP-AR pro zpracování GNSS dat pořízených během vybraných zemětřesení, zhodnotit využitelnost metod pro zpracování dat tohoto typu.

### Seznam doporučené literatury a podklady:

- Springer handbook of global navigation satellite systems. Editor Peter J. G. TEUNISSEN, editor Oliver MONTENBRUCK. Cham [Švýcarsko]: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-42926-7.
- KAPLAN, Elliott D. a Christopher. HEGARTY, ed. Understanding GPS/GNSS: principles and applications. Third edition. Boston: Artech House, 2017. GNSS technology and applications series. ISBN 978-1-63081-058-0.

- VÁCLAVOVIC, Pavel. Comparison and assessment of float, fixed, and smoothed precise point positioning. Acta Geodynamica et Geomaterialia. , 329-340. ISSN 12149705. Dostupné z: doi:10.13168/AGG.2020.0024

- Další učebnice, skripta či odborné články zaměřené na globální navigační satelitní systémy a metodu Precise Point Positioning.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 11. 2022

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.  
vedoucí ústavu

---

Ing. Jakub Nosek  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Cieľom tejto diplomovej práce je porovnanie presnosti a rýchlosti konvergenencie metódy Precise Point Positioning (PPP) a PPP s celočíselným riešením ambiguit a posúdiť využiteľnosť metódy PPP v súvislosti s odhadom magnitúd zemetrasení. V práci sú popísané teoretické základy GNSS metódy PPP a dôležité systematické chyby a spôsoby ich eliminácie. Následne je predstavené riešenie praktickej časti. Dáta sú spracovávané z obdobia roka 2020 na 14 vybratých permanentných staniciach IGS. Výpočtu PPP predchádzalo kvalitatívne hodnotenie dát. Vo výsledku vykazuje metóda PPP s celočíselným riešením ambiguit s nekombinovanými observáciami najkonzistentnejšie a najpresnejšie výsledky s najrýchlejšou konvergenciou. Pre výpočet magnitúd boli vybrané 3 zemetrasenia na Aljaške z obdobia 2020-2021 a boli skúmané 4 kombinácie metód, pričom najlepšie výsledky poskytla znovu metóda PPP s celočíselným riešením ambiguit s nekombinovanými observáciami.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

GNSS, Precise Point Positioning, PPP, PPP-AR, ambiguity, systematické chyby, magnitúda

## **ABSTRACT**

The aim of this diploma thesis is to compare the accuracy and time of convergence of the Precise Point Positioning (PPP) method and PPP with an integer ambiguity resolution and to assess the applicability of the PPP method in estimating earthquake magnitudes. The thesis describes the theoretical foundations of GNSS method PPP, important systematic errors, and methods for their elimination. Subsequently, the solution to the practical part is presented. The data are processed from the period of 2020 using 14 selected permanent IGS stations. The PPP computation was preceded by a quality control. In the results, the PPP method with integer ambiguity resolution using uncombined observation exhibited the most consistent and accurate results with the fastest convergence. For magnitude estimation, three earthquakes from the Alaska region during the period of 2020-2021 were selected, and four combinations of methods were examined, with the best results once again provided by the PPP method with integer ambiguity resolution using uncombined observations.

## **KEYWORDS**

GNSS, Precise Point Positioning, PPP, PPP-AR, ambiguities, systematic errors, magnitude

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ORVISKÁ, Terézia. *Precise Point Positioning s celočíselným řešením ambiguit*. Brno, 2023. 89 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí Ing. Jakub Nosek.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Precise Point Positioning s celočíselným řešením ambiguity* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

---

Bc. Terézia Orviská  
autor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou by som sa chcela poďakovať *Výzkumnému ústavu geodetickému, topografickému a kartografickému, v.v.i* za poskytnutie softwarového vybavenia.

Ďalej ďakujem vedúcemu práce Ing. Jakubovi Nosekovi za čas a cenné rady, ktoré mi venoval. A v neposlednom rade ďakujem všetkým, ktorí ma podporovali na študijnej ceste.

V Brně dne 26. 5. 2023

---

Bc. Terézia Orviská  
autor

# OBSAH

ÚVOD .....	10
<b>1 GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY .....</b>	<b>11</b>
1.1 Všeobecná štruktúra .....	11
1.2 Jednotlivé systémy.....	13
1.3 Základné princípy a metódy .....	20
1.4 Presnosť .....	22
1.4.1 Systematické vplyvy .....	22
1.5 Časové systémy .....	37
1.6 Súradnicové systémy.....	39
1.7 Siete referenčných staníc .....	42
1.8 Štandardné dátové formáty .....	43
<b>2 PRECISE POINT POSITIONING .....</b>	<b>45</b>
2.1 Matematický model.....	45
2.2 Vstupné dáta.....	46
2.2.1 Predspracovanie merania .....	46
2.3 Riešenie celočíselných ambiguit .....	49
2.3.1 Nekombinované riešenie ambiguit.....	49
2.3.2 Ionosphere-free riešenie ambiguit.....	50
2.4 Metódy riešenia neznámych parametrov .....	51
2.5 Sofrware pre spracovanie.....	53
2.5.1 G-nut knižnica tried.....	53
2.6 Medzioborové využitie dát .....	57
2.6.1 Seizmológia .....	57
<b>3 SPRACOVANIE.....</b>	<b>61</b>
3.1 Stratégia spracovania .....	61
3.2 Kontrola kvality dát.....	62
3.3 Nastavenie programu Geb.....	64



4	VÝSLEDKY .....	66
4.1	Kvalitatívne hodnotenie dát .....	66
4.2	Presnosť konvergenzie.....	68
4.3	Rýchlosť konvergenzie .....	69
4.4	Výpočet magnítud .....	72
	ZÁVER.....	75
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	76
	ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV .....	84
	ZOZNAM TABULIEK .....	85
	ZOZNAM VÝPISOV .....	86
	ZOZNAM SKRATIEK .....	87
	ZOZNAM PRÍLOH .....	89

## ÚVOD

*Globálne Navigačné Satelitné Systémy* (GNSS) ako revolučná technológia umožňuje presné určenie polohy a času predovšetkým na zemskom povrchu, na povrchu morí a oceánov a tak isto vo vzduchu. Táto technológia má veľmi významné zastúpenie v navigácii, geodézii, presnom poľnohospodárstve, či v rôznych vedeckých a výskumných oblastiach, v priemysle a v doprave, a mnoho ďalších aplikácií. S rozvojom technológie GNSS sa stala možnou aj absolútna metóda určovania polohy *Precise Point Positioning* (PPP). Tá umožňuje dosiahnuť presnosť v ráde centimetrov až milimetrov. Jej veľkou výhodou oproti relatívnym metódam je nezávislosť na referenčnej stanici. Avšak má svoje nevýhody ako je napríklad nemožnosť eliminácie negatívnych vplyvov diferenčnými metódami. PPP sa v súčasnosti stáva populárnejšou a uplatňuje sa v oblastiach ako navigácia, geodézia či meteorológia.

Zámerom tejto diplomovej práce je objasnenie problematiky GNSS metódy PPP a jej celočíselné riešenie ambiguit. Okrem celočíselného riešenia je časť práce venovaná aj float riešeniu. Cieľom je porovnať PPP (float riešenie) a PPP s celočíselným riešením ambiguit (PPP-AR). Pozorovanými faktormi sú primárne presnosť a rýchlosť konvergencie. Tieto budú vyhodnotené na výberovej množine permanentných staníc siete IGS (*International GNSS Service*). Dáta budú spracované v rámci ročnej časovej rady (rok 2020). V ďalšej časti bude táto výberová množina staníc využitá pre samotný výpočet PPP a PPP-AR pre kombinácie iono-free a nekombinované observácie. V poslednej časti praktického spracovania bude metóda PPP/PPP-AR využitá pre spracovanie dát zaznamenaných počas vybraných zemetrasení na Aljaške. V tejto súvislosti bude posúdená využiteľnosť daných metód pre vyhodnotenie dát v rámci medzioborovej aplikácie (seizmológia).

Obsahom textovej časti sú všeobecné informácie o GNSS, tie plynule prechádzajú k popisu vybraných použitých metód a je priblížená ich samotná praktická aplikácia. Nemožno nespomenúť systematické vplyvy, ktoré ovplyvňujú presnosť metódy PPP. Predstavené sú použité dáta, ich charakteristika, formáty, využiteľnosť, taktiež spracovateľské software. Spomenutá bude taktiež interdisciplinárna spojitost' a kooperácia s ďalšími obormi ako je meteorológia, seizmológia, geofyzika, a iné. V závere budú zhodnotené výsledky praktickej časti spracovania.

Práca vznikala v spolupráci s *Výskumným ústavom geodetickým, topografickým a kartografickým*, v. v. i (VÚGTK). Výskumný ústav zaistil software a taktiež odborné konzultácie.

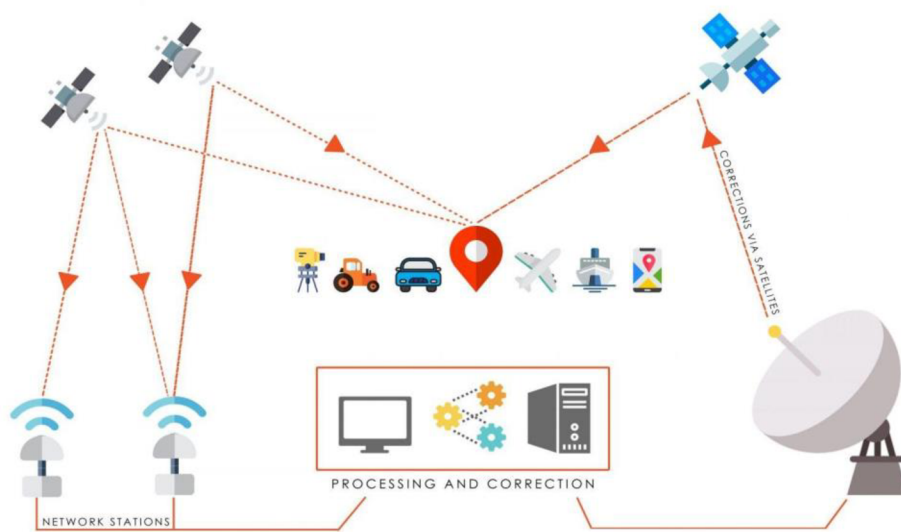
# 1 GLOBÁLNE NAVIGAČNÉ SATELITNÉ SYSTÉMY

Metódy GNSS sú v spojitosti s geodéziou čoraz viac využívané. Ich aplikácia sa s narastajúcou dosiahnuteľnou presnosťou rozširuje aj do oblastí, kde bolo donedávna nemysliteľné využívať iné spôsoby merania, ako klasické. Rôzne metódy merania a spracovania majú za následok rôzne úrovne presnosti. Pre presné geodetické aplikácie sa vo veľkej väčšine využívajú relatívne metódy. Veľkými prednosťami sú pri bežných meraniach časová efektivita a jednoduchá obsluha. Okrem geodetických aplikácií sa GNSS využívajú napríklad aj pri určovaní geodynamických parametrov Zeme, kam spadajú rôzne ťažové misie, z ich meraní a výsledkov vznikajú modely – model ťažového poľa Zeme

## 1.1 Všeobecná štruktúra

Pojem GNSS predstavuje súhrnné označenie všetkých globálnych navigačných satelitných systémov. Celý tento komplex je štruktúrovaný do troch hlavných segmentov. Pozemný riadiaci (kontrolný), užívateľský a vesmírny segment sú navzájom prepojené a predávajú si informácie. Prítomnosť všetkých troch článkov je nevyhnutná pre korektnú funkciu (navigačná, vojenská, geodetická, poľnohospodárska a ďalšie).

1. Kozmický segment tvoria družice pohybujúce sa po svojich obežných dráhach. Súčasťou každej družice sú 3 alebo 4 veľmi presné atómové hodiny, antény pre komunikáciu s pozemným kontrolným segmentom, optické, röntgenové a pulzné-elektromagnetické detektory, rôzne senzory. Ako zdroj energie využívajú solárne panely alebo batérie.
2. Riadiaci a kontrolný segment zabezpečuje monitoring, ovládanie a údržbu kozmického segmentu v podobe zasielania navigačných údajov pre družice, vykonávanie manévrovania, ako aj údržbu atómových hodín. Výsledky týchto činností sú poskytované vo forme navigačnej správy každej družice.
3. Užívateľský segment tvoria všetci tí užívatelia, ktorí pomocou prijímača prijímajú signál vysielaný jednotlivými družicami. Na základe už preddefinovaných parametrov a prijatých informácií je prijímač schopný vypočítať 3D polohu antény, presný dátum a (GPS) čas. [1]



Obr. 1: Schematický princíp fungovania GNSS, prevzaté [2]

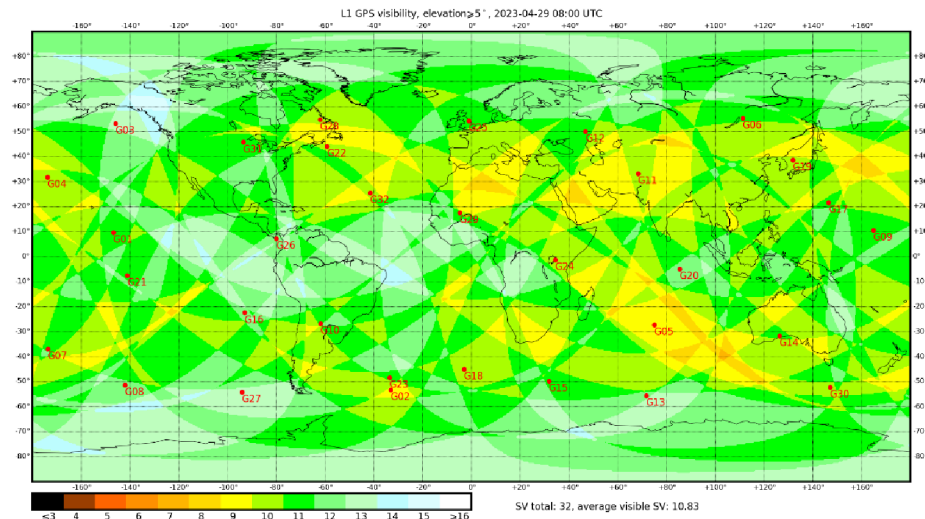
## 1.2 Jednotlivé systémy

Medzi globálne systémy radíme *Global Positioning System (GPS)*, systém *Galileo*, *BeiDou*, a *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)*. Okrem GNSS existujú aj ďalšie regionálne navigačné systémy ako napríklad *Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)*, *Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)*. Pre zaujímavosť možno spomenúť projekt *Xona*, ktorá od roku 2021 pracuje na vývoji a budovaní nového autonómneho navigačného systému s družicami, ktoré sa budú pohybovať na nízkych obežných dráhach.

### GPS

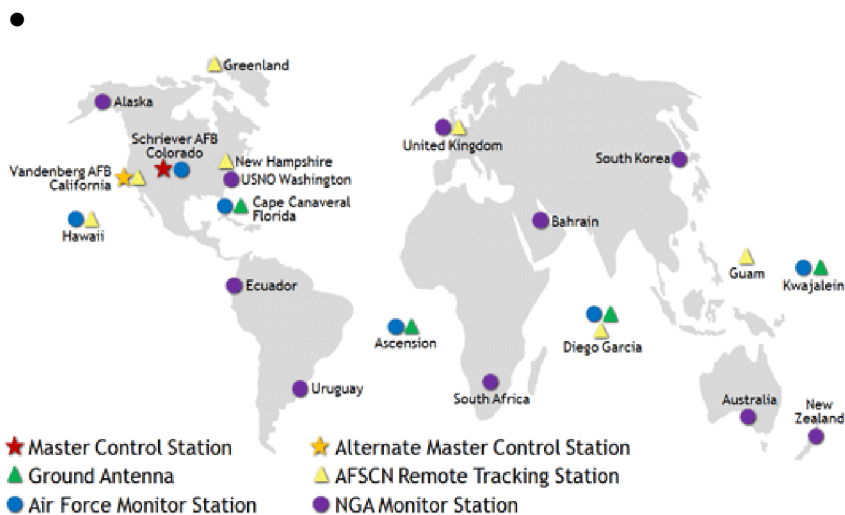
GPS je prvý pôvodný navigačný systém, kedysi označovaný ako GPS NAVSTAR. Je to GNSS nástroj vo vlastníctve Spojených štátov amerických. Systém pôvodne vyvinutý pre vojenské účely je dostupný aj pre civilný sektor. Bežným používateľom poskytuje služby ako navigácia, určovanie polohy a času (PNT – *positioning, navigation and timing*). Služba je voľne dostupná nepretržite a celosvetovo pre civilný sektor. Vojenský sektor je prístupný pre ozbrojené sily USA a ich spojencov. *U.S. Space Force* zabezpečujú chod prevádzky, poskytujú údržbu a pracujú na vývoji kozmického a kontrolného segmentu.

- Kozmický segment zabezpečuje primárne 24 funkčných družíc. Aktuálne sa na 6 obežných dráhach nachádza 32 funkčných satelitov. Systém GPS využíva stredné obežné dráhy (MEO), pričom družice lietajú vo výške 20 200 km. Doba obehu je 11 hodín a 58 minút a ich konštelácia zabezpečuje, že z ktoréhokoľvek miesta v ktorýkoľvek čas je pre užívateľa viditeľných minimálne 6 družíc. Na orbitách sa nachádzajú ako nové, tak aj staré satelity. Aktuálne prevádzkované družice sú z blokov IIR, IIR-M, IIF, III/IIIF. Súčasne s ich postupným vznikom a vývojom boli zavedené do funkcie aj nové frekvencie pre civilné signály. Staré satelity operovali s frekvenciou L1 pre C/A kód a pre vojenské signály P(Y) s frekvenciami L1 a L2. S nástupom prvého bloku modernizovaných satelitov (IIR) bola predstavená druhá frekvencia pre civilné signály L2C. Oblasť vojenskej navigácie bola obohatená o M kódové signály. Blok IIF pracuje už s treťou frekvenciou pre civilný signál L5 a najnovší blok III/IIIF so sebou prináša štvrtú civilnú frekvenciu L1C. [3] [4]



Obr. 2: Viditeľnosť družíc systému GPS, prevzaté [5]

- Pozemný kontrolný a riadiaci segment tvorí hlavná kontrolná stanica v Colorado Springs, jej záložnú kontrolnú stanicu, 16 ďalších monitorovacích staníc a 11 pozemných antén, ktoré sú rozmiestnené rovnomerne po svete. Tieto monitorovacie stanice permanentne zbierajú vysielané dáta všetkých viditeľných družíc v danom okamihu. Následne sa získané dáta posielajú do hlavnej kontrolnej stanice, kde sa z nich počítajú veľmi presné parametre dráh družíc. Údaje sú potom v rámci navigačnej správy zasielané pomocou pozemných antén späť družiciam. Antény sú ako jediné články z pozemného sektoru schopné prijímať a aj vysielat signály. [6]



Obr. 3: Kontrolný a riadiaci segment systému GPS, prevzaté [6]

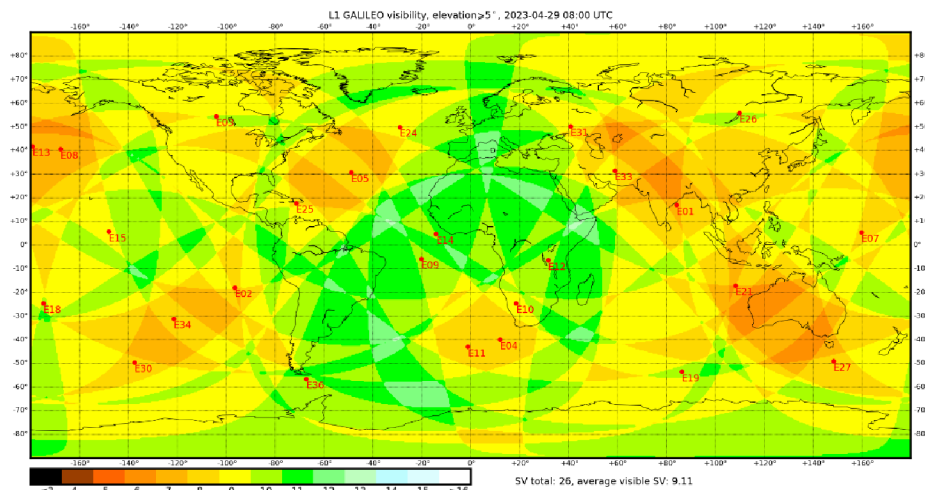
- Užívateľský segment je reprezentovaný všetkými užívateľmi na pevnine, na mori a vo vzduchu, ktorí sú schopní prijímať a spracovať GPS signál. Využívanie systému GPS zvyšuje produktivitu v odvetví poľnohospodárstva, stavebníctva, logistiky a v mnohých ďalších. Taktiež

je prínosným v oblasti výskumu, napríklad poskytovaním údajov pre predpovedanie počasia, monitorovanie zemetrasení a ochranu životného prostredia. GPS aplikácie sú napokon integrované takmer do všetkých aspektov amerického vojenstva zahŕňajúc GPS vybavenie armádnych vozidiel a taktiež munície. [7]

## Galileo

Galileo ako prvý európsky satelitný navigačný systém poskytuje služby civilnému sektoru od konca roku 2016. Samotnému spusteniu systému predchádzalo vypustenie dvoch experimentálnych satelitov GIOVE-A v roku 2005 a GIOVE-B v roku 2008, ktoré testovali kritické technológie systému Galileo, rovnako tak boli skúmané a merané rôzne ďalšie aspekty vesmírneho prostredia. Systémové družice sa začali vynášať na obežné dráhy v roku 2011. Vo finálnej fáze by sa na obežných dráhach malo nachádzať 30 satelitov, pozemné kontrolné a riadiace centrá v Európe a monitorovacie stanice a pozemné antény po celej Zemi. V roku 2023 sa dostala na trh novinka v podobe služby Galileo *High Accuracy Service* (HAS), ktorá poskytuje bezplatný prístup využitím signálu E6-B a internetu ku dátam potrebným pre presné riešenie metódy PPP v reálnom čase. [8], [9]

- Kozmický segment súčasne tvorí 28 satelitov. 26 z nich lieta na troch orbitách vo výške približne 23 200 km, čiže sa jedná o stredné obežné dráhy. Systém Galileo s inklináciou dráh  $56^\circ$  spoľahlivo poskytuje dáta aj v oblastiach nachádzajúcich sa v  $75^\circ$  severnej zemepisnej šírky (najsevernejšia časť Európy) a ďalej. Raritou systému sú dve družice umiestnené na nesprávnu obežnú dráhu, čo vzniklo chybou pri odpale rakety, ktorá mala vyslať tieto družice do kozmu, a tak sa v súčasnosti tieto satelity využívajú na pátracie a záchranné akcie, ale nefigurujú ako operačné družice základnej konštelácie. Počet satelitov, optimalizovaná konštelácia a plánovaná dostupnosť troch aktívnych náhradných satelitov - jeden na každú orbitu by mali zabezpečiť, pohodlné používanie. Strata jednej družice by nemala byť pre užívateľa nijako viditeľne vplyvná. Družice systému Galileo vysielajú signály na dvoch frekvenciách.



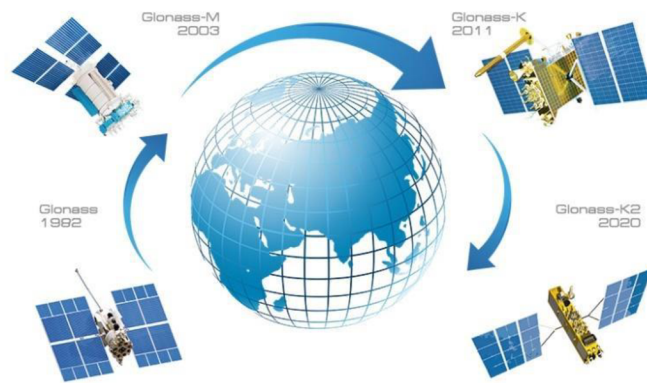
Obr. 4: Viditeľnosť družíc systému Galileo, prevzaté [11]

- Riadiaci a kontrolný segment v sebe zahŕňa dve riadiace centrá v oblasti Európy. Poskytujú kontrolu a riadenie navigácie. Podobne ako pri systéme GPS aj tu sú dáta globálnej siete monitorovacích staníc zasielané do riadiaceho a naopak, z riadiaceho centra získavajú monitorovacie stanice dáta pre korektnú časovú synchronizáciu pozemného segmentu s kozmickým.
- Pre užívateľský segment okrem bežného sprostredkovania 3D polohy, rýchlosti a času, poskytuje Galileo globálnu funkciu vyhľadávania a záchrany (*Search and Rescue – SAR*), ktorá funguje na princípe prenosu tiesňového signálu z užívateľského vysielача do záchranných kooperačných stredísk. Užívateľ zároveň dostane správu o tom, že jeho signál bol prijatý a pomoc je na ceste. Táto skutočnosť poukazuje na fakt, že užívateľ už nie je len pasívny prijímateľ, ale dokáže signál aj odoslať – tzv. užívateľská spätná väzba. [8] [10]

## Glonass

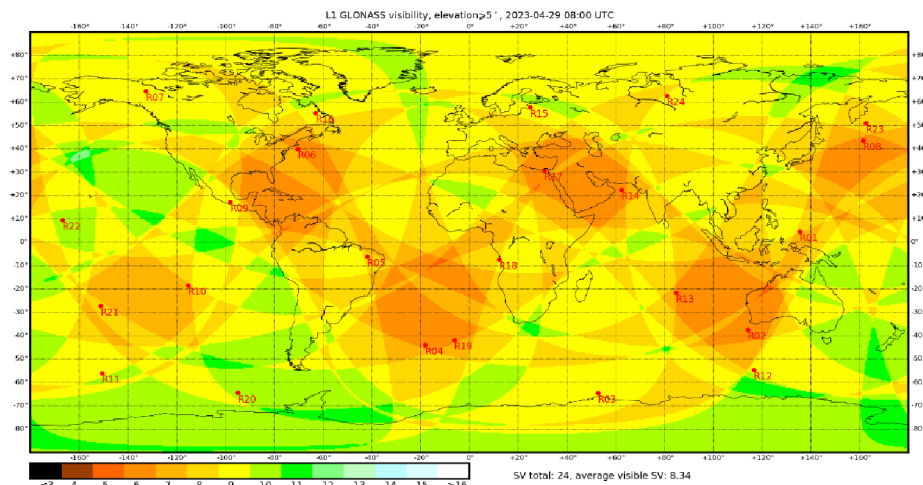
História pôvodne vojenského systému GLONASS siaha už do roku 1957, kedy bol predložený prvý návrh na použitie satelitov pre navigáciu. Výsledky výskumov boli použité pre spustenie výskumu a vývoja prvého sovietskeho nízkoobežného systému *Cicada*. Systém so 4 satelitmi bol uvedený do prevádzky v roku 1979. Od roku 2008 bola prevádzka systémov *Cicada* a *Cicada-M* pozastavená a ich miesto plne preberá systém GLONASS (plne v prevádzke od 1995).





Obr. 5: Historický vývoj kozmického segmentu systému GLONASS, prevzaté [12]

- Kozmický segment predchádzajúcich systémov vykazuje nedostatočnosť plnenia požiadaviek pre užívateľov a tak bolo rozhodnuté o 24 družicovej konštelácii (aktuálne sa na obežných dráhach nachádza 25 satelitov, pričom posledný z nich je v schvaľovacej fáze mimo aktívny stav) na 3 stredných obežných dráhach vo výške 19 100 km nad Zemou. Ich inklinácia  $64.8^\circ$  a obežná doba satelitov 11 hodín 15 minút 44 sekúnd zabezpečujú globálnu dostupnosť na území Ruskej federácie aj pri výpadku niekoľkých družíc.



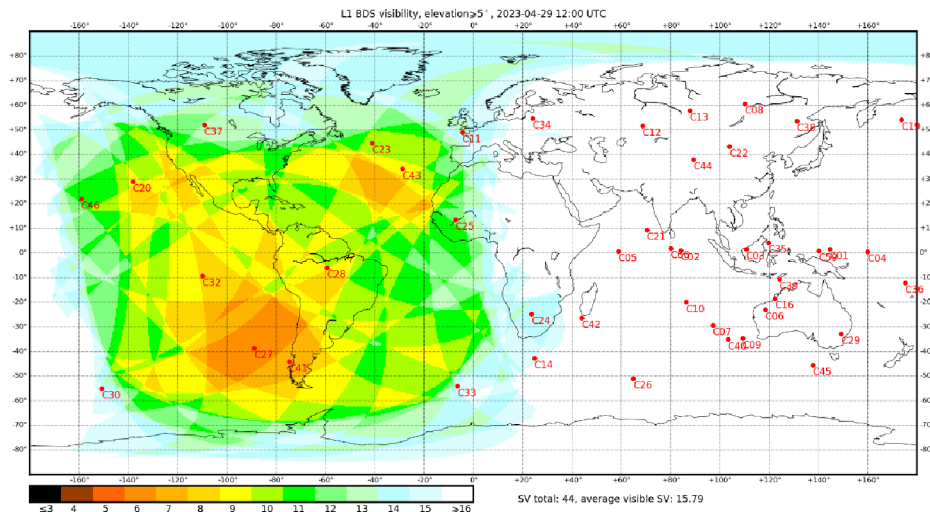
Obr. 6: Viditeľnosť družíc systému GLONASS, prevzaté [13]

- Kontrolný a riadiaci segment bol po roku 2002 modernizovaný a tak bol systém GLONASS schopný dosiahnuť presnosti na úrovni systému GPS.
- GLONASS sa oproti GPS stáva akýmsi záložným plánom aj pre ruských užívateľov. Podobne ako systém GPS aj GLONASS používa 2 typy navigačných signálov – všeobecne dostupný a šifrovaný pre vojenské účely. [14],[12]

## BeiDou

Globálny navigačný satelitný systém nezávisle Čínou skonštruovaný a prevádzkovaný pre potreby národnej bezpečnosti a hospodársky a sociálny rozvoj. Poskytuje služby PNT globálne a nepretržite za každého počasia s vysokou presnosťou. Služby sa široko využívajú najmä v doprave, poľnohospodárstve, lesnom hospodárstve, hydrologickom monitorovaní, meteorologickej predpovedi, komunikácii a slúžia významným národným infraštruktúram. Rovnako prispievajú ku globálnemu vedeckému, technologickému a sociálnemu rozvoju. Čína takisto podporuje medzinárodné výmeny a spoluprácu, aby bola dosiahnutá kompatibilita a inetroperabilita s inými GNSS a tým pádom je možnosť dosiahnutia vyššieho výkonu a spoľahlivosti služieb.

- Vesmírny segment pozostáva zo 49 satelitov, z čoho 5 nie je súčasťou základnej konfigurácie. 8 družíc je umiestnených na geostacionárnej obežnej dráhe Zeme (GEO), 12 na naklonenej geosynchrónnej obežnej dráhe (IGSO) a strednej obežnej dráhe Zeme (MEO) sa nachádza zvyšných 29 z celkového počtu 44.

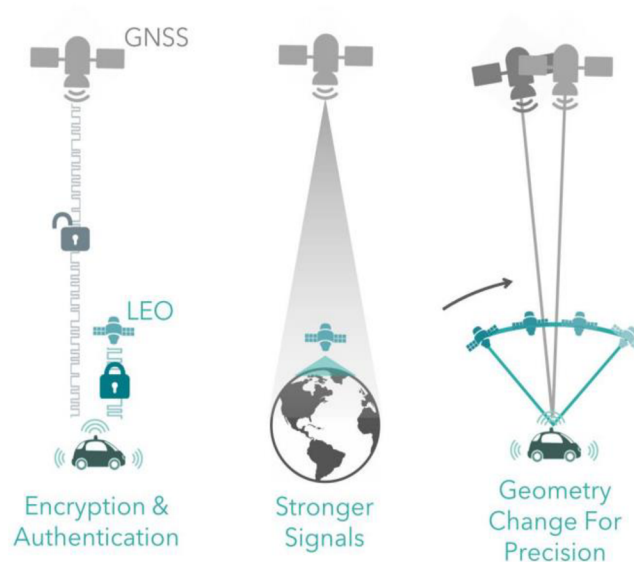


Obr. 7: Viditeľnosť družíc systému BeiDou, prevzaté [16]

- Pozemný segment BeiDou (BDS) pozostáva klasicky z hlavnej riadiacej stanice, z ostatných pozemných monitorovacích staníc, staníc časovej synchronizácie/uplinku a samozrejme antén pre satelitné spojenia.
- Pre používateľský segment BDS sú prístupné rôzne druhy základných produktov, systémov a služieb, ako aj tie, ktoré sú kompatibilné s inými navigačnými systémami, ako napríklad terminály, aplikačné systémy a aplikačné služby a mnoho ďalších. [15] [16]

## Xona

Komerčný satelitný navigačný systém vyvíjaný spoločnosťou *National Aeronautic and Space Administration* (NASA) pre autonómne riadenie vozidiel, prostriedkov leteckej, námornej dopravy. Medzi niektoré charakteristiky tohto systému patria družice na nízkych obežných dráhach (LEO), autonómny monitoring a prijímanie dát družicami z GNSS systémov, tieto dáta sú potom poskytované ako jedna informácia pre konečného používateľa v rámci bezpečného chráneného signálu družíc Xona systému. Rovnako tak vie systém fungovať aj nezávisle na akomkoľvek signáli z ostatných GNSS. Nadbytočnosť meraní je v tomto prípade zaistená počtom viditeľných družíc pre užívateľa. V roku 2021 započala vývojová fáza 0, kedy sa začala vytvárať sieť staníc pozemného sektoru. V roku 2024 by malo byť na orbity vynesene prvých 36 satelitov v prvej fáze. Finálna fáza projektu pozostáva z konštelácie 300 funkčných satelitov, čo zabezpečí 100% globálne pokrytie. [17]



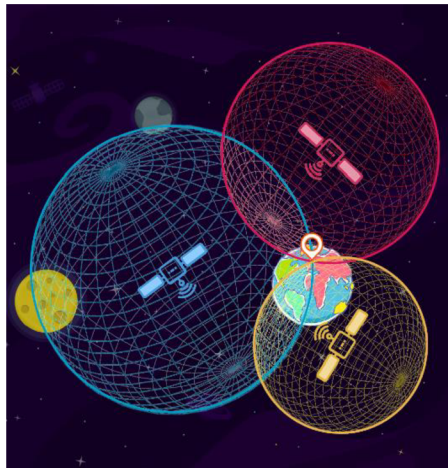
Obr. 8: Charakteristiky systému Xona, prevzaté [17]

### 1.3 Základné princípy a metódy

Kozmická geodézia je založená na pozorovaní umelých vesmírnych telies – družíc – preto sa občas môže táto veda označovať aj ako družicová geodézia. Výsledné parametre sú určované medzi priestorovou polohou na zemskom povrchu a satelitmi na obežných dráhach, alebo medzi satelitmi samotnými (napríklad zrýchlenie). Prínosom do globálnej geodézie je pomoc pri určovaní globálneho referenčného rámca. Z regionálneho hľadiska kozmická geodézia figuruje v riešení lokálnych problémov v rámci geodézie a geoinformatiky. Reverzne platí, že geodetická astronómia a fyzikálna geodézia sú dôležité obory, ktorých poznatky sú nevyhnutné pre správne fungovanie kozmickej geodézie. V porovnaní s klasickými geodetickými metódami je veľkou výhodou možnosť prekonávať veľké vzdialenosti a tak budovať geodeticky previazané siete naprieč kontinentami. [18]

Základné princípy určovania polohy pomocou GNSS možno rozdeliť na:

- a) *Satelitné signály* – príjem signálov z minimálne toľkých družíc, koľko je počet neznámych parametrov (priestorová poloha + korekcie hodín prijímača => minimum 4),
- b) *Časová synchronizácia* – nevyhnutnosť synchronizácie hodín na družici s hodinami prijímača,
- c) *Spracovanie signálu* – prijímač využíva určité výpočtové techniky pre určenie vzdialenosti medzi družicou a samotným prijímačom,
- d) *Výpočet polohy* – prijímač je schopný vypočítať polohu ako priesečník pomyselných gúľ s polomerom rovnajúcim sa meranej vzdialenosti, v ktorých strede je satelit.



Obr. 9: Schéma princípu určovania polohy GNSS, prevzaté [19]

- e) *Zavedenie korekcií* – pretože množstvo vonkajších vplyvov má efekt na výslednú presnosť, je pre prijímač nutné zabezpečiť korekcie napríklad z atmosférických vplyvov, pre elimináciu vplyvu multipath, či redukciu šumu.

Rozličné metódy prijímania GNSS signálov a ich následné spracovanie môžeme deliť z rôznych hľadísk, ako napríklad požadovaná výsledná presnosť určenia polohy, dostupnosť, robustnosť, komplexnosť a iné, inicializačný čas, dostupnosť referenčných staníc a iné.

Bazálne možno metódy určovania polohy GNSS klasifikovať do skupín podľa:

- meraných veličín,
- spôsobu určenia polohy,
- režimu prijímača v priebehu merania.

Z pohľadu meraných veličín sa v geodetickej oblasti využívajú buď kódové alebo fázové merania, alebo aj obe súčasne v RTK a PPP. Primárny rozdiel je v nosiči signálu a danej meranej veličiny. Kódové merania využívajú kód na prenos informácie a pre výpočet pseudovzdialenosti, respektíve vzdialenosti medzi prijímačom a družicou vysielajúcou informáciu, je sprostredkujúcou veličinou tranzitný čas. V závislosti na zavedení či nezavedení korekcií sa presnosť určenia pseudovzdialenosti z kódových meraní pohybuje v rozsahu rádu 0,1 m až 2 m. Pri fázovom meraní ide principiálne o určovanie fázy nosnej vlny ako sprostredkujúcej veličiny pre určenie pseudovzdialenosti a následné počítanie celých cyklov nosnej vlny. Pre stotožnenie fázy prijímaného a generovaného signálu časovou základňou prijímača sa k meraniu fázy nosnej vlny používa tzv. fázový záves. Historicky sa využívalo meranie aj dopplerovského posunu v rámci systému Transit.

Polohové určenie na základe spôsobu určenia je možné rozdeliť do dvoch charakteristických skupín. V prvom rade je to *relatívne určenie polohy*, ktoré sa vo všeobecnosti v klasickej geodézii využíva takmer vždy. Tento spôsob je založený na meraní dvoch prijímačov, pričom jeden z nich má známe súradnice. Relatívna poloha druhého prijímača voči permanentnej stanici je vyjadrená základňovým vektorom, respektíve priestorovou vzdialenosťou medzi oboma prijímačmi. Relatívnou metódou je možné dosiahnuť až milimetrovej presnosti, pričom je potrebné eliminovať systematické vplyvy. To možno dosiahnuť ako lineárnou kombináciou meraní, tak aj diferenciami. Tie môžu byť medzi prijímačmi, družicami, epochami, prípadne ich kombináciami. *Absolútna metóda* využíva pre meranie iba jeden prijímač. Nemožno teda aplikovať diferencie, a tak sú merania zaťažené všetkými systematickými vplyvmi, ktoré pôsobia na merania GNSS. Absolútne metódy merania sú charakteristické pre lacné navigačné prístroje. Avšak absolútnou metódou je aj metóda PPP (presná metóda založená na princípe SPP – *standard point positioning*), ktorej sa táto práca venuje.

V priebehu merania môže byť prijímač aktívny buď v kinematickom režime alebo v režime statickom. Ich primárny rozdiel spočíva v pohyblivosti prijímača. Kinematický mód je využívaný predovšetkým v navigáciách, kedy je prijímač v pohybe a kontinuálne zbiera dáta. Statická metóda je prevažne využívaná v spojitosti s požiadavkami na veľmi vysokú presnosť, napríklad pri vysoko presných geodetických prácach. Prijímač je v tomto prípade umiestnený na jednom bode a počas určitej periódy zbiera dáta. Avšak presnosť metód z pohľadu režimu prijímača je predovšetkým závislá na použitom programovom vybavení a matematickom spracovateľskom aparáte. Ako absolútnu, tak aj relatívnu metódu je možné riešiť v reálnom čase alebo post-processingom. [20]

## 1.4 Presnosť

Určovanie polohy pomocou GNSS je ovplyvnené veľkým množstvom nežiadúcich vplyvov. Pre dosiahnutie požadovanej presnosti je nutné tieto vplyvy čo najviac eliminovať, prípadne odstrániť úplne. Okrem kvality prijímača, čo zahŕňa jeho citlivosť a schopnosť spracovávať dáta, rôznych terénnych, prírodných, či antropogénnych prvkov, ktoré zabraňujú voľnému obzoru je potrebné venovať pozornosť predovšetkým systematickým vplyvom. Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger a Wasle [21] dospeli k jednoduchému záveru, že presnosť určenia polohy bodu pomocou jediného prijímača je v podstate ovplyvnená presnosťou polohy každého satelitu, presnosťou merania pseudovzdialenosti a geometriou satelitov.

### 1.4.1 Systematické vplyvy

Snahou eliminácie systematických chýb je dosiahnutie čo najideálnejšieho výsledku. Pri diferenčných metódach sa vďaka rôznym kombináciám dokážu systematické chyby odhaliť a tak eliminovať. To však neplatí pre absolútne metódy určovania polohy GNSS. V prípade metód SPP je nutné napríklad vytvárať teoretické modely atmosférických vplyvov, prípadne ich namodelovať z meraných dát iných oborov, inými metódami a rôzne ďalšie prístupy.

Zovšeobecnením možno systematické vplyvy rozdeliť do 3 primárnych skupín, kam sú zaradené konkrétne vplyvy:

- atmosférické vplyvy,
- vplyvy dynamiky Zeme,
- chyby súvisiace s družicami a prijímačmi.

Väčšina jednotlivých korekcií systematických vplyvov je poskytovaná analytickými centrami v upravenom formáte RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*). V ďalšom texte budú bližšie predstavené najpodstatnejšie systematické vplyvy z pohľadu metódy PPP.

#### 1.4.1.1 Atmosférické vplyvy

Signál je cestou od vyslania družicou po príjem prijímačom ovplyvnený množstvom vonkajších vplyvov po celej dĺžke dráhy. Na signál negatívne vplyvajú charakteristiky ionosféry, troposféry, voľné elektrónové častice, čiže aj rôzne silné geomagnetické búrky. Pre tieto potreby je nutné rozlišovať fázovú a grupovú rýchlosť. Kde fázová rýchlosť je charakteristická pre fázové merania a pre kódové merania uvažujeme grupovú rýchlosť. Atmosférické vplyvy sa výrazne líšia od miesta pozorovania a od chýb hodín prijímača.

## Vplyv ionosféry

Ionosféra je vrstva atmosférického obalu Zeme, ktorá sa rozprestiera vo výškach 50 km až 1000 km nad je povrchom. Na rozdiel od vrstiev *neutrálnej atmosféry* ionosféra obsahuje elektricky nabité častice a teda je to disperzné prostredie z pohľadu signálov GNSS. Vplyvom slnečného žiarenia sa tu nachádzajú voľné elektróny a ióny a tie zapríčiňujú závislosť indexu lomu na frekvencii signálu.

*Total electron content* (TEC) vyjadruje celkový obsah voľných elektrónov pozdĺž celej dráhy signálu, často sa vyjadruje v jednotkách na  $m^2$  – *total electron content unit* (TECU), kde

$$1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elektrónov na } m^2 \quad (1.1)$$

Využívaný je taktiež parameter *total vertical electron content* (TVEC), ktorý vyjadruje hodnotu TEC pre dráhu v smere k zenitu.

$$TVEC = \cos \cos z' \text{ TEC} \quad (1.2)$$

Vzdialenosť  $l$  medzi družicou  $s$  a prijímačom  $r$  vyjadruje vzťah

$$TEC = \int_s^r n_e dl, \quad (1.3)$$

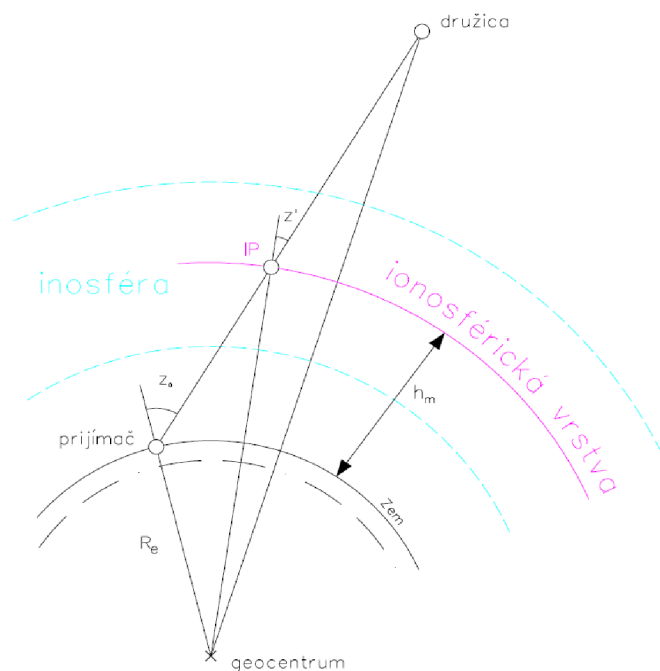
kde  $n_e$  je hustota elektrónov na  $m^3$ . Vplyv ionosféry na meraní vzdialenosť  $\Delta^{iono}$  potom možno vypočítať ako

$$\Delta^{iono} = \frac{1}{\cos \cos z'} \frac{40,3}{f^2} TVEC \quad (1.4)$$

Kde  $f$  je frekvencia signálu a  $z'$  je zenitový uhol vo výške  $h_m$ . Vplyv ionosféry pre kódové merania je  $+\Delta^{iono}$  a pre fázové merania  $-\Delta^{iono}$ .  $h_m$  je výška uvažovanej nekonečne tenkej vrstvy, kde sú sústredené všetky voľné elektróny ionosférickej body (IP). Pre zenitový uhol platí vzťah:

$$\sin \sin z' = \frac{R_e}{R_e + h_m} \sin \sin z_0, \quad (1.5)$$

kde  $R_e$  je stredný polomer Zeme,  $h_m$  je vyššie spomenutá stredná výška ionosféry,  $z'$  zenitový uhol v bode ionosféry a  $z_0$  zenitový uhol na observačnom mieste prijímača.



Obr. 10: Schéma ionoférickej vrstvy, upravené [21]

Pre výpočet efektu TEC sa využívajú rôzne matematické modely, medzi ktoré patrí napríklad *NeQuick*ov model, či *Klobucharov model*, ktorého koeficienty používa navigačná správa systému GPS. Klobucharov model je matematicky vyjadrený nasledovne:

$$\Delta T_v^{iono} = A_1 + A_2 \cos \cos \left( \frac{2\pi(t-A_3)}{A_4} \right), \quad (1.6)$$

kde  $t$  je lokálny čas ionoférického bodu IP.  $A_1$  až  $A_4$  sú koeficienty

$$A_1 = 5 \cdot 10^{-9} s = 5 \text{ ns}, \quad (1.7)$$

$$A_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \varphi_{IP}^m + \alpha_3 \varphi_{IP}^{m2} + \alpha_4 \varphi_{IP}^{m3}, \quad (1.8)$$

$$A_3 = 14^h \text{ miestneho času}, \quad (1.9)$$

$$A_4 = \beta_1 + \beta_2 \varphi_{IP}^m + \beta_3 \varphi_{IP}^{m2} + \beta_4 \varphi_{IP}^{m3}, \quad (1.10)$$

kde  $A_1$  až  $A_3$  sú konštanty a koeficienty  $\alpha_i, \beta_i$  sú hodnoty načítavané družicami a vysielané užívateľom. [20] [21]

Pre fázové i kódové merania je možné aplikovať korekcie pomocou merania na dvoch frekvenciách, tzv. „*iono-free*“ kombinácia, ktorá je prostou lineárnou kombináciou s výsledkom pre meranú fázu nosnej vlny  $\varnothing_{IF}$  a pre meranú pseudovzdialenosť  $P_{IF}$ :

$$\varnothing_{IF} = \frac{f_1^2 \varnothing_{L1} - f_2^2 \varnothing_{L2}}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (1.11)$$

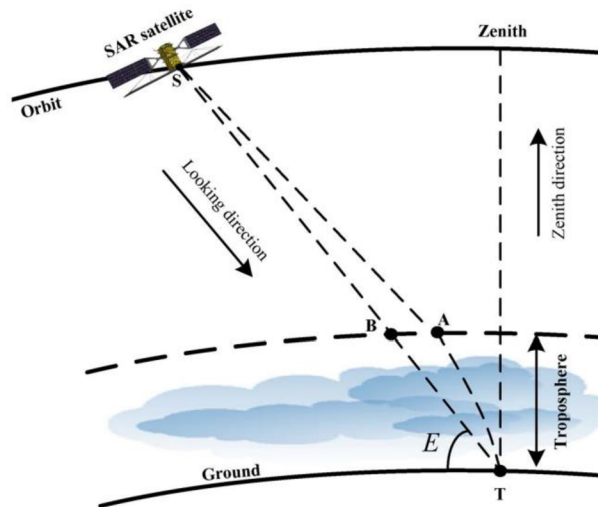


$$P_{IF} = \frac{f_1^2 P_{L1} - f_2^2 P_{L2}}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (1.12)$$

kde  $PR_{L1}$ ,  $PR_{L2}$  sú merané pseudovzdialenosti a  $\varnothing_{L1}$  a  $\varnothing_{L2}$  sú merané fázy nosných vln na frekvenciách  $f_1$  a  $f_2$ . [22]

### Vplyv troposféry

Ionosféra a troposféra sa z hľadiska vplyvu na GNSS signál radikálne líšia. Pričom ionosféra predstavovala disperzné prostredie, troposféra ako najnižšia časť atmosféry s koncentráciou približne 75% všetkej hmotnosti atmosféry sa správa ako prostredie nedisperzné pre signály s vysokou frekvenciou. To znamená, že troposféra má rovnaký vplyv na všetky vlnové dĺžky signálov a preto nemožno jej vplyv eliminovať použitím lineárnych kombinácií. Najspodnejšia vrstva troposféry siaha v závislosti od polohy do 8 až 18 km. Vrchná časť troposféry, nazývaná aj stratosféra, môže siahať miestami až do výšky 50 km nad povrchom Zeme. Avšak tieto hodnoty sa v rôznych literatúrach líšia. Rádiový signál sa v troposférickom prostredí šíri pomalšie ako vo vákuu a počas cesty troposférou sa signál ohýba. Tieto zmeny sa nazývajú troposférická refrakcia a zapríčiňujú spomalenie signálu, ktoré je závislé na indexe lomu. Troposférická refrakcia, alebo aj *Zenith Tropospheric Delay* (ZTD) v smere zenitu je jednou z dominantných chýb v oblasti GNSS. [23]



Obr. 11: Schéma troposférického vplyvu na GNSS merania, prevzaté [23]

Matematická funkcia vyzerá nasledovne:

$$\Delta^{Tro} = \int (n - 1) ds_0, \quad (1.13)$$

kde  $n$  je index lomu. Často je využívané pre vyjadrenie aj lomové číslo  $N^{Tro} = (n - 1)10^6$ , potom je matematická funkcia modelu troposféry nasledovná:

$$\Delta^{Tro} = 10^{-6} \int N^{Tro} ds_0. \quad (1.14)$$

Hopfield definovala, že troposféra sa skladá zo suchej a vlhkej zložky, pričom platí vzťah:

$$N^{Tro} = N_D^{Tro} + N_W^{Tro}, \quad (1.15)$$

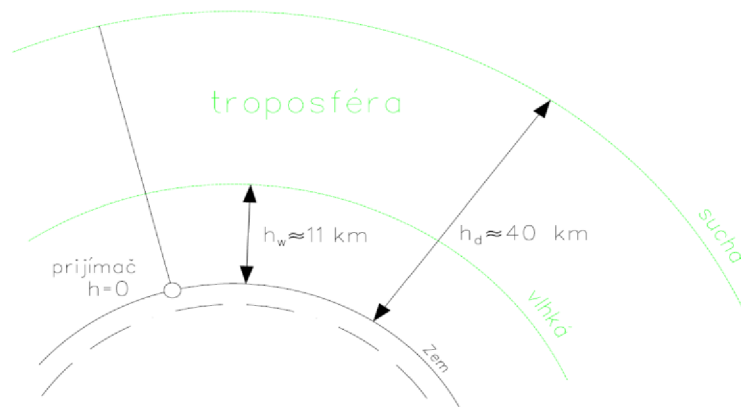
respektíve

$$\Delta^{Tro} = \Delta_D^{Tro} + \Delta_W^{Tro} = 10^{-6} \int N_D^{Tro} ds_0 + 10^{-6} \int N_W^{Tro} ds_0, \quad (1.16)$$

kde

$\Delta_D^{Tro}$  – suchá zložka (dry) – hydrostatická  
 $\Delta_W^{Tro}$  – vlhká zložka (wet) – hydrodynamická.

Suchá zložka predstavuje približne 90% z celkového vplyvu, je závislá na teplote a tlaku a je tak relatívne ľahko a presne určiteľná oproti vlhkej zložke, korekcie suchej zložky dosahujú centimetrovú presnosť, pričom pri vlhkej zložke sa pohybuje v rozmedzí niekoľkých centimetrov a táto zložka je vysoko variabilná. Dosiahnutie korektnějších výsledkov pre určitú oblasť je možné sledovaním meteorologických dát v spojení s použitím empirických modelov. [21], [24],[25]



Obr. 12: Schéma troposférických vrstiev, upravené [21]

Pre popis troposféry existuje niekoľko empirických modelov, kam patrí asi najznámejší Hopfield model, či model Saastamoinena. Modely vznikali na základe pozorovaní vybraných meteorologických veličín. Parametre vlhkej zložky sa pri meraní metódou PPP určujú ako neznáme parametre.

*Hopfield model* závislý na výške cieľa hovorí o tom, že pre troposféru je index lomu funkciou teploty, tlaku, tlaku vodných pár a relatívnej vlhkosti povrchu Zeme.

Suchá zložka je vyjadrená:

$$\Delta_D^{Tro} = [40,136 + 0,148272(T_0 - 273,16)][km] \cdot 77,6 \frac{P_0}{T_0}, \quad (1.17)$$

kde  $T_0$  je teplota v mieste merania [K] a  $P_0$  je prízemný atmosférický tlak [mbar].  
[26]

*Saastamoinen model* a jeho suchá zložka je definovaná:

$$\Delta_D^{Tro} = \frac{0,002277 P_s}{1 - 0,00266 \cos(2\psi) - 0,00028 h_s}, \quad (1.18)$$

kde  $P_s$  je atmosférický tlak,  $\psi$  je zemepisná šírka a  $h_s$  je výška pozorovaného bodu.  
Ďalší používaný model je napríklad *EGNOS model*.

Tabuľka 1: Presnosť použitých modelov na vybraných staniách, prevzaté [28]

Observation station	Hopfield model (m)	Saastamoinen model (m)	EGNOS model (m)
Ankara	0.0740	0.0303	0.0283
Zeck	0.0623	0.0198	0.0261
Thule	0.0139	0.0149	0.0378
Lhasa	0.1525	0.0246	0.0420

Všetky predchádzajúce modely sú založené na observácii meteorologických dát. Pre zaujímavosť, pre zbavenie sa týchto meraní je možnosť využiť ZTD model GPT2w, ktorého ročná odchýlka je 2,15 cm, čo je presnosť lepšia ako presnosť modelu Saastamoinen. Takisto je tu model UNB3m. Tieto modely sa odstránením závislosti na meteorologických meraniach stali veľkou súčasťou navigácie v reálnom čase. [28], [29]

Funkcie ZTD sa vyjadrujú pre smer zenitu. GNSS signály sú však prijímané z rôznych šikmých smerov. Táto šikmá troposférická refrakcia sa v literatúre nazýva *Slant Tropospheric Delay*. Šikmá troposférická refrakcia je z dôvodu prijímania signálu pod rôznymi uhlami vždy funkciou elevačného uhlu danej družice. Pre tvorbu numerických modelov počasia, ktoré poskytujú troposférické informácie o refrakcii sa pre prepočet ZTD na hodnotu šikmej pre každý elevačný uhol využívajú *mapovacie funkcie*.

Troposférickú refrakciu v smere dráhy signálu medzi družicou  $s$  a prijímačom  $r$  pri rôznom elevačnom uhle možno vyjadriť ako

$$T(\varepsilon_r^s) = m_D(\varepsilon_r^s) \Delta_D^{Tro} + m_W(\varepsilon_r^s) \Delta_W^{Tro} + G(\varepsilon_r^s, A_r^s), \quad (1.19)$$

kde  $m_D$  je mapovacia funkcia pre suchú zložku a  $m_W$  je funkcia pre vlhkú zložku vplyvu troposféry, kde

$$G(\varepsilon_r^s, A_r^s) = m(\varepsilon_r^s) (G_{N,r} \cos A_r^s + G_{E,r} \sin A_r^s), \quad (1.20)$$

kde  $m$  je mapovacia funkcia celkovej zložky,  $A_r^S$  je azimut družice a  $G_{E,r}$ ,  $G_{N,r}$  sú horizontálne gradienty troposféry v severnom a východnom smere a v rámci riešenia PPP sú tieto parametre určované ako neznáme spolu s ďalšími.

Chen a Herring definovali gradientnú mapovaciu funkciu, ktorou nahradili predchádzajúcu závislú na výške, a teda výraz pre mapovaciu funkciu je definovaný:

$$m(\varepsilon_r^S) = \frac{1}{\sin \varepsilon \tan \varepsilon + C}, \quad (1.21)$$

kde  $C = 0.0032$ . [30]

Mapovacia funkcia je vo všeobecnosti vyjadrená vzťahom:

$$m(\varepsilon) = \frac{STD}{ZTD}, \quad (1.22)$$

respektíve

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon}, \quad (1.23)$$

kde  $STD$  je šikmá troposférická refrakcia  $\varepsilon$  je elevačný uhol družice. Tento vzťah je príliš jednoduchý a dostatočne nevystihuje lokálne meteorologické podmienky. Je potrebné ho ďalej rozvinúť. Jednou z najznámejších mapovacích funkcií je *Niellova* mapovacia funkcia

$$m(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}}, \quad (1.24)$$

pričom parametre  $a$ ,  $b$  a  $c$  sa líšia pre hydrostatickú a pre vlhkú zložku. Všetky parametre sú buď konštantami alebo funkciami zemepisnej šírky (tá je symetrická podľa rovníka) a dňa v roku a teda sú brané v úvahu len sezónne variácie. [31]

Niellova [31] novšia empirická mapovacia funkcia *IMF* ktorá je založená na numerických modeloch dát počasia a mapovacia funkcia *VMF1* od Boehm et al. sú dátami lokalizované do určitých geografických regiónov s časovým rozlíšením 6 hodín, či sú schopné poskytnúť denné variácie. Avšak rôzne modely využívajú rôzne prístupy a tým pádom poskytujú rôzne odhady súradníc ako z pohľadu presnosti, tak aj rôznou variabilitou v rámci času a preto je vhodné používať jeden model pri spracovávaní dát pre získanie konzistentných výsledkov. Vo výsledku je záujmom vytvoriť takú mapovaciu funkciu, ktorá by bola schopná empiricky vypočítať dáta na akejkoľvek stanici ako je tomu pri NMF ale zároveň aby bola s rozlíšením dát a konzistentná ako funkcia VMF1.

### 1.4.1.2 Chyby súvisiace s prijímačmi a družicami

#### Chyby efemeridových dát družíc

V reálnom svete nemožno dosiahnuť ideálny stav a tvar Keplerovských obežných dráh. Ideálny pohyb je rušený gravitačným pôsobením Slnka a Mesiaca, tlakom slnečného vetra a negravitačnými vplyvmi ako je tepelné vyžarovanie družíc a tzv. y-bias. Vplyv vyšších stupňov gravitačného potenciálu je však vzhľadom k výške obežných dráh na ne len veľmi malý. Tieto vplyvy sú pri relatívnych metódach jednoducho diferencované, avšak pri absolútnej metóde PPP je potrebné ich uvažovať v plnej miere. [32], [18]

Vysielané efemeridy poskytujú presnosť polohy asi 1 m a z toho dôvodu sú nevhodné pre presné spracovanie potrebné pri metóde PPP. Vyššiu presnosť poskytujú dáta z permanentných staníc siete *International GNSS Service* (IGS), ktoré svojou presne známou polohou dokážu rovnakým princípom určovania polohy ako družice určiť korekcie dráh družíc. Korekcie sú súčasťou navigačnej správy. IGS poskytuje produkty v reálnom čase – *Ultra rapid* – ako predikované efemeridy s presnosťou 5 cm. *Rapid* – poskytované s oneskorením 17 – 41 hodín s presnosťou 2,5 cm a najpresnejší produkt *Final*, ktorý dosahuje najvyššiu presnosť 1 – 2 cm ale sú poskytované s najväčším oneskorením, až 12 – 19 dní. [33]

Pomocou protokolu *Radio Technical Commission for Maritime Services* (RTCM) sú poskytované *State Space Representation* (SSR) korekcie, ktoré možno využiť pre spracovanie v reálnom a čase a v kombinácii s vysielanými efemeridmi možno dosiahnuť presnosť 2-4 cm. [34]

#### Chyby hodín družíc

Napriek prítomnosti atómových hodín, ktoré určujú čas s presnosťou na ns, v každej družici je nutné zavádzať korekcie údajov hodín. Prípadná odchýlka 1 $\mu$ s spôsobí chybu vo vzdialenosti medzi družicou a prijímačom približne 300 m. Parametre, ktoré vstupujú do korekčných polynomov (pre systémy GPS, BeiDou, Galileo sú to polynomy druhého radu, pre systém GLONASS polynom prvého rádu), sú súčasťou navigačnej správy a patria sem:

- Systematický časový offset
- Chod hodín
- Chod frekvencie hodín,

Ďalej sú to časové údaje: vzťažný čas pre koeficienty polynomu, súčasná časová epocha a ďalej korekcia relativistických efektov a korekcia refrakcie grupového signálu.

Pri presných aplikáciách je nutná presnosť lepšia než 1 ns. Najpresnejší produkt od IGS *Final* uvádza presnosť lepšiu než 2,5 ps, tieto údaje možno získať pomocou súborov v upravenom formáte *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX). Korekciu hodín v čase  $t$  možno za použitia presných produktov získať zo vzorca:

$$\Delta t_{SV}(t) = \frac{(t_{i+1}-t) \cdot t_{SV}(t_i) + (t-t_{i+1}) \cdot t_{SV}(t_{i+1})}{t_{i+1}-t_i} - 2 \frac{r(t)^T \cdot v(t)}{c^2}, \quad (1.25)$$

kde  $r(t)$  je vektor polohy a  $v(t)$  je vektor rýchlosti družice. Hodnoty sú vypočítané z presných efemeridov. [20]

### Relativistické efekty

Relativistické vplyvy pôsobia na družice, a to z dôvodu, že sa pohybujú veľkou rýchlosťou v gravitačnom poli Zeme. Treba ich uvažovať pri spracovávaní dát GNSS. Relativistické efekty vychádzajú zo špeciálnej teórie relativity (pre štvorrozmerný priestor, kde je ďalším rozmerom čas), pre ktorú platí, že čas plynie pomalšie pre rýchlo sa pohybujúce predmety. Medzi základné relativistické efekty patrí:

- dilatácia času,
- časové rozdiely v dôsledku rôzneho pôsobenia gravitačného poľa,
- relativistický efekt na frekvenciu,
- relativistický efekt na dĺžku dráhy signálu,
- relativistický efekt rotácie Zeme,
- relativistické efekty v dôsledku excentricity obežnej dráhy,
- všeobecná teória relativity z pohľadu zrýchlenia družíc.

Vo všeobecnosti možno relativistické efekty zapísať ako:

$$\frac{\Delta t' - \Delta t}{\Delta t} = \frac{\Delta x' - \Delta x}{\Delta x} = -\frac{f' - f}{f} = \frac{m' - m}{m} = -\frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad (1.26)$$

Časové rozdiely v dôsledku rôzneho pôsobenia gravitačného poľa znamenajú, že družice majú rôznu rýchlosť a gravitačný potenciál v perigeu a apogeu, čo zapríčiňuje zmenu chodu hodín družíc. Elimináciu tohto efektu možno získať zavedením korekcie hodín družíc v čase  $t$  podľa vzťahu

$$\Delta t^s(t) = F \cdot e \cdot \sqrt{a} \cdot \sin E_k, \quad (1.27)$$

kde  $e$  je excentricita dráhy družice,  $a$  je dĺžka hlavnej poloosi dráhy družice a  $E_k$  je excentrická anomália a  $F$  je konštanta vypočítaná zo vzťahu

$$F = -\frac{2 \cdot \sqrt{G}}{c^2}, \quad (1.28)$$

kde  $G$  predstavuje gravitačnú konštantu.[35]

*Dilatácia* času, nazývaná aj transverzný Dopplerovský efekt, podľa Lorentzovej transformácie:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1.29)$$

kde  $\Delta t'$  je časový úsek, pre ktorý sa určuje dilatácia a  $v$  je rýchlosť objektu. Hovorí o tom, že z pohľadu pozorovateľa v pokoji plynie pre pohybujúce sa teleso čas pomalšie alebo rýchlejšie a vice versa. Konkrétnejšie je to dôvodom, prečo pohybujúce sa hodiny zaznamenávajú čas pomalšie ako tie v pokoji. [36]

Všeobecná teória relativity taktiež hovorí o telesách v pokoji a pohybe, kde gravitácia zohráva kľúčovú rolu. A teda časové rozdiely spôsobené vplyvom rôzneho pôsobenia gravitačného poľa v mieste družice a na povrchu Zeme sú charakterizované práve všeobecnou teóriou relativity, ktorá hovorí že tento časový rozdiel je

$$\Delta \tau = \left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right) \Delta t', \quad (1.30)$$

kde  $\Delta U$  je rozdiel gravitačných potenciálov na povrchu Zeme a v mieste družice.

$$U = -\frac{GM}{r}, \quad (1.31)$$

$r$  vyjadruje vzdialenosť družice od povrchu Zeme a  $GM$  je geocentrická gravitačná konštanta. A tak výsledný rozdiel možno zapísať ako

$$\Delta \tau = \Delta \tau_s - \Delta \tau_r = \left(-\frac{GM}{(R_E+h) \cdot c^2} + \frac{GM}{R_E \cdot c^2} - \frac{v_s^2 - v_r^2}{2 \cdot c^2}\right), \quad (1.32)$$

kde  $R_E$  je polomer Zeme,  $h$  je výška družice  $s$  nad povrchom Zeme (v mieste prijímača  $r$ ),  $v_s$  je rýchlosť družice a  $v_r$  je uhlová rýchlosť v mieste prijímača na povrchu Zeme. [36]

### Hardwarové oneskorenie meraní

Ako družice, tak aj prijímače sú ovplyvnené hardwarovým oneskorením. Keďže vysielané signály nie sú dokonalo časovo synchronizované, dochádza k rozdielom vo vyslanom a prijatom signály. Nedokonalosti hardware ovplyvňujú ako kódové, tak aj fázové merania. Označenie *Differential Code Bias* (DCB), ktoré možno preložiť ako „diferenčné posuny kódov“ charakterizuje hardwarové oneskorenia kódových meraní. Tieto posuny sú využiteľné práve za použitia lineárnych kombinácií pre určovanie parametrov ionosféry, presných korekcií času, pri riešení ambiguit a tiež pri výpočte polohy len za použitia C/A kódových meraní. [37]

Presné korekcie hodín sú kompatibilné s observáciami P1/P2. Tie však nie sú bežne podporované s klasickými GNSS prijímačmi, keďže poskytujú voľne prístupné kódové merania C/A na frekvencii L1 a chránené kódové merania P1. Na frekvencii L2 poskytujú

kódové merania P2. GNSS prijímače však bežnejšie pracujú s C1/X2 alebo C1/P2 observáciami. C1/X2 poskytujú C1 a X2 merania, pričom X2 je lineárnou kombináciou P2 a P1 kódov s využitím takzvanej krížovej korelácie. Na tomto princípe fungovali staršie GNSS prijímače. Novšie využívajú kódové merania C1/P2, pričom chránený P1 signál sledujú využitím techniky Z-tracking. [37]

Nedokonalosti hardware sa prejavujú tiež pri fázových meraniach, pričom každá pozorovaná frekvencia je ovplyvnená iným oneskorením. Celočíselné riešenie ambiguit nemožno bez zavedenia korekcií observáciám riešiť priamo. Oddelenie oneskorení od ambiguit a korekcií hodín prijímača je bez korekcií oneskorenia signálu možné riešiť až pri vyrovnaní. [38]

### **Offsets a variácie fázových centier antény**

GNSS observácie nie sú vo všeobecnosti vzťahované k jednému referenčnému bodu, ktorý je pre anténu tzv. *Antena Reference Point* (ARP). Poloha fázového centra, ku ktorému sú tieto merania vzťahované sa však líši v závislosti na meranej frekvencii a druhu použitej antény. Z hľadiska prijímača treba uvažovať taktiež závislosti na azimute a elevácii družice. *Offset fázového centra* (PCO) je tak hodnota definovaná vzt'ahným vektorom ARP a strednej hodnoty fázového centra. *Variácia fázového centra* je model, na základe ktorého je vzťahované aktuálne fázové centrum ku strednej hodnote.

Offsets a variácie fázového centra je pre potreby presných meraní nutné kalibrovať. Kalibráciu poznáme:

- relatívnu a
- absolútnu.

V súčasnej dobe je viac využívaná kalibrácia absolútna, ktorá sa vykonáva buď v laboratóriu za pomoci umelého generátoru GNSS signálu, alebo priamo v teréne využitím signálov z reálnych družíc. GNSS dáta sú v priebehu zaznamenávané v rôznych polohových natočeniach a naklopeniach antény. [39]

Offset fázového centra antény družice je vzťah k hmotnému stredu družice, ku ktorému sú udávané presné efemeridy. Variácie fázového centra družice sú vzťahované k hlavnému fázovému centru, ktoré vykazuje najmenšie variácie v smere k nadiru. [40]

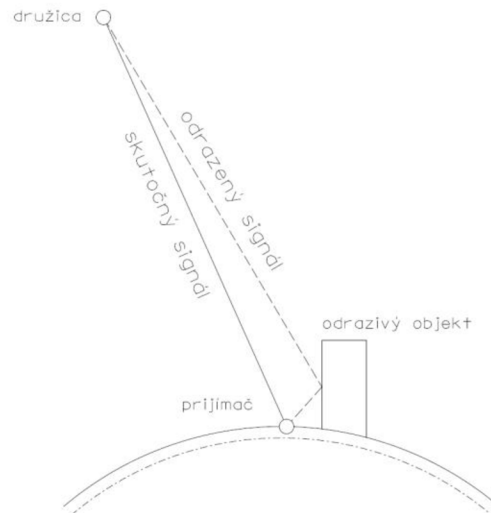
Parametre offsetov a variácií fázových centier a družíc sú poskytované analytickými centrami IGS vo výmennom formáte ANTEX.

### **Viaccestné šírenie signálu**

GNSS signály odrazené od rôznych povrchov či samotnej družice spôsobujú efekt viaccestného šírenia signálu, takzvaný *multipath*. Tieto odrazy predlžujú dráhu signálu a tým pádom aj tranzitný čas. Multipath má vplyv predovšetkým na kódové merania, pričom možná chyba je až desiatky metrov. Na fázové merania je jeho vplyv menší (jednotky centimetrov až decimetrov), avšak je náročnejšie ho odstrániť.



Multipath je nutné detekovať a odstrániť zo spracovania pre kvalitné výsledky. Toto je možné pri dekorelácii kódových meraní. Ďalej bývajú antény pre elimináciu tohto merania bežne vybavené z hardwarového hľadiska clonami proti signálom odrazeným zo Zeme, alebo aj tzv. choke-ringom. Ďalším vhodným krokom je nastavenie elevačnej masky antény pre nízko letiace družice. Avšak kľúčovým je správny výber observačného miesta pre umiestnenie GNSS antény s ohľadom na okolité objekty. [38]



Obr. 13: Schéma efektu multipath

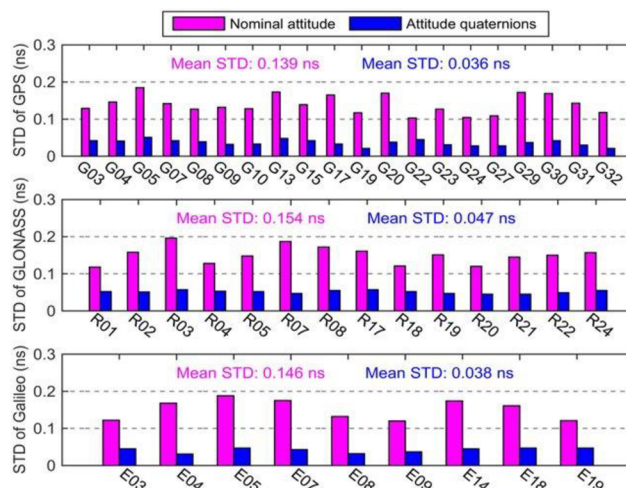
### Fázový wind-up efekt a orientácia družíc

Poloha satelitu na obežnej dráhe, resp. jeho natočenie voči Zemi a Slnku má dve požiadavky:

- vysielačia anténa vždy smeruje do stredu Zeme a
- solárne panely sú vždy natočené priamo k Slnku.

Pri natáčacích manévroch počas poludnia a polnoci, kedy sú Slnko, Zem a družica v jednej rovine, družica rotuje okolo svojej vlastnej osi. Tento manéver trvá približne 30 minút a zapríčiňuje variácie fázy nosnej vlny kruhovo polarizovaného signálu GNSS, ktorú prijímač nesprávne interpretuje ako zmenu vzdialenosti medzi družicou a prijímačom. Tento efekt sa nazýva *wind-up*. [41]

Pre aplikácie PPP je nutné uvažovať efekt *wind-up*. Znalosť orientácie družíc je zásadná taktiež pre určovanie korekcií hodín družíc. Pre tieto účely vznikali tzv. quaterniony. Koncept zahŕňajúci parametre pre modelovanie a určovanie orientácie družíc, pre ktorého distribúciu sa využíva novo vyvinutý formát *ORBit Exchange format* (ORBEX). [42]



Obr. 14: Presnosť určenia tranzitného času bez a s použitím quaternionov, prevzaté [42]

### 1.4.1.3 Vplyv dynamiky zeme

#### Pohyb litosférických dosiek

Vplyv pohybu litosférických dosiek sa prejaví predovšetkým pri dlhotrvajúcich kampaniach, pričom sa v dôsledku tektonických pohybov staniciam GNSS neustále mení poloha v geocentrickom súradnicovom systéme.

Základný model kontinentálneho driftu uvažuje lineárny pohyb, pričom súradnicové zložky polohy stanice sú vyjadrené ako:

$$X(t) = X_0 + v_x(t - t_0), \quad (1.33)$$

$$Y(t) = Y_0 + v_y(t - t_0), \quad (1.34)$$

$$Z(t) = Z_0 + v_z(t - t_0), \quad (1.35)$$

kde  $X_0, Y_0, Z_0$  sú súradnicové zložky polohy stanice vo východzej epoche,  $v_i$  sú rýchlosti zmien súradníc v jednotlivých súradnicových smeroch najčastejšie udávané v jednotkách  $m/rok$ .

Presnejší model

$$x(t) = x_0 + v(t - t_0) + \sum_{i=1}^{n_i} \mathbf{b}_i H(t - t_i), \quad (1.36)$$

uvažuje súradnicové skoky vzniknuté z dôvodu napríklad výmeny antény, či seizmickej aktivity. Pričom vektor  $\mathbf{b}_i$  predstavuje jednotlivé skoky v epoche  $i$  a  $H(t)$  je označenie pre Heavisideovu funkciu jednotkového skoku. Tá môže nadobúdať hodnoty 0,  $\frac{1}{2}$  a 1. [43]

#### Pohyb zemských pólov

Rotácia Zeme je ovplyvnená prerozdelením hmôt v atmosfére, v oceánoch a vo vnútri zemského telesa. Procesy premiestňovania (cirkulácie) hmôt zapríčiňujú variácie osi rotácie a tým pádom samotný periodický pohyb pólov a dĺžky dňa (*lod*). Táto reakcia je založená na Liouvilleovej nelineárnej diferenciálnej rovnici. Ďalším vplyvom, ktorý treba uvážiť sú slapové javy. [44]

Zmeny polohy vyjadrenej súradnicami sa vplyvom pohybu pólov môžu meniť až o niekoľko centimetrov a preto je nutné tieto pohyby uvažovať aj pri presných aplikáciách a taktiež pri spracovaní meraní PPP. Presné produkty IGS poskytujú hodnoty pohybu pólov, respektíve súradnice pólu vo forme parametrov rotácie a orientácie Zeme. Horizontálne (tangenciálne) zmeny polohy bodu možno vyjadriť ako

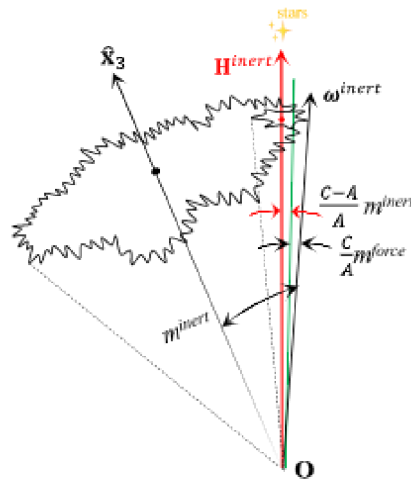
$$\Delta\varphi = -9 \cos 2\varphi [(x_p - \hat{x}_p) \cos \lambda - (y_p - \hat{y}_p) \sin \lambda], \quad (1.37)$$

$$\Delta\lambda = 9 \cos \varphi [(x_p - \hat{x}_p) \sin \lambda + (y_p - \hat{y}_p) \cos \lambda], \quad (1.38)$$

a radiálne zmeny potom

$$\Delta r = -33 \sin 2\varphi [(x_p - \hat{x}_p) \cos \lambda - (y_p - \hat{y}_p) \sin \lambda], \quad (1.39)$$

kde  $x_p$  a  $y_p$  sú súradnice nebeského prechodného (aktuálneho) pólu CIP a  $\hat{x}_p, \hat{y}_p$  sú súradnice referenčného pólu definovaného *International Earth Rotation and Reference systems Service* (IERS). Pričom v horizontálnom smere hodnoty dosahujú 7 mm, ale v radiálnom smere až 25 mm. A samotná poloha pólu sa mení voči referenčnému pólu pohybom v protismere hodinových ručičiek v dvoch periódach (viď obrázok). [45]



Obr. 15: Schéma skutočného pohybu pólu, prevzaté [44]

## Zemské slapy

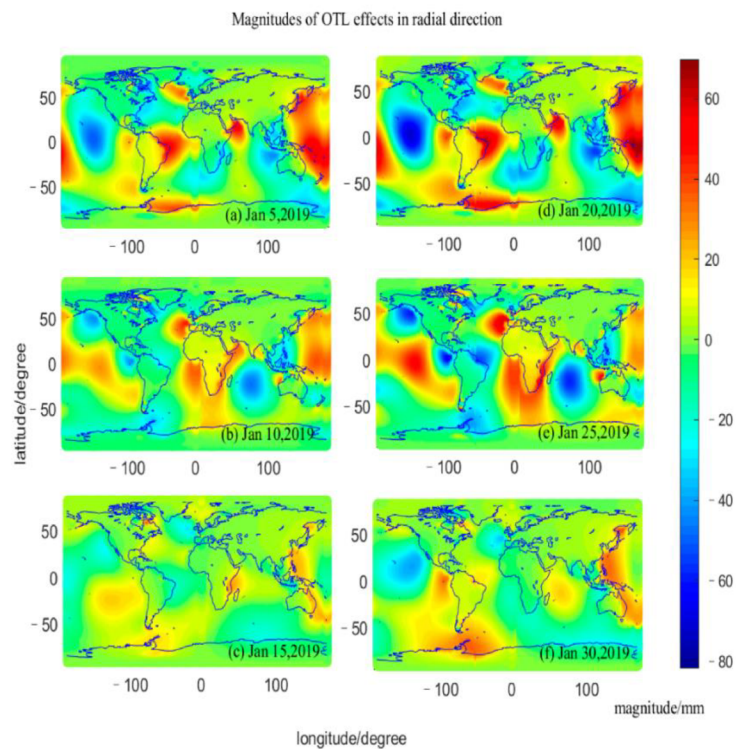
Gravitačné sily Mesiaca a Slnka majú okrem dobre známych oceánskych slapových javov vplyv aj na slapy zemskej pevniny. Tieto gravitačné sily, spolu so silami ostatných planét prejavovaných v malej miere, zapríčiňujú periodické deformácie zemskeho povrchu ako vo vertikálnom, tak aj v horizontálnom smere. Slapové javy sú vyjadrené pomocou sférických harmonických funkcií stupňa  $n$  a rádu  $m$ . Vektor posunu polohy bodu možno vyjadriť s využitím Loveovho čísla  $h_{nm}$  a Sidovho čísla  $l_{nm}$  ako

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_{\oplus} R_j^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left( \frac{3(\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - 1}{2} \right) + 3l_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) [\hat{R}_j - (\hat{R}_j \cdot \hat{r})\hat{r}] \right\}, \quad (1.40)$$

kde  $GM_j, GM_{\oplus}$  je gravitačná konštanta Mesiaca (alebo Slnka) a Zeme,  $\hat{R}_j$  a  $R_j$  je geocentrický vektor Mesiaca (alebo Slnka) a jeho veľkosť,  $R_e$  je polomer Zeme na rovníku a  $\hat{r}, r$  je geocentrický vektor prijímača (bodu) a jeho veľkosť. Zemské slapy nadobúdajú hodnôt 5 cm v horizontálnom smere a až 30 cm vo vertikálnom. [45]

### Slapové zaťaženie oceánskeho dna

Oceánske slapy sú jediný systematický vplyv dynamiky Zeme, ktorý je vizuálne badateľný bez akéhokoľvek merania. Slapové zaťaženie oceánskeho dna je jav vyvolávaný oceánskymi slapmi, kedy pri prílive masa vody zaťažuje oceánske dno. Tento jav je závislý od vzdialenosti od pobrežia a od intenzity oceánskych slapov, pričom masa vody pohybujúca sa buď k alebo od pobrežia spôsobuje periodické deformácie oceánskeho dna a tieto sily sa prenášajú aj do vnútra zemského telesa, resp. sa mení gravitačný potenciál. Deformácie povrchu Zeme môžu vplyvom zaťaženia oceánskeho dna dosahovať vertikálne posuny až desiatky centimetrov, pričom pobrežné oblasti sú deformované viac ako vnútrozemie. VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) a GNSS sú satelitné metódy, ktoré dokážu merať vplyv a deformácie spôsobené slapovým zaťažením oceánskeho dna. Hodnoty deformácií možno tiež čiastočne modelovať a koeficienty jednotlivých modelov sú distribuované vo formáte *BLQ*. Momentálne najpoužívanejším modelom je *FES2014b*. [46] [47]



Obr. 16: Vertikálne posuny zapríčinené zaťažením oceánskeho dna, prevzaté [47]

## Atmosférické slapy

Pred niekoľkými rokmi mnohé štúdie demonštrovali vplyv tzv. *atmospheric pressure loading* (APL), respektíve vplyv tlaku atmosféry na GNSS merania. APL model Petrova a Boya [48] je využívaný predovšetkým v súvislosti s metódou VLBI. Modely vznikali na základe dlhoročného pozorovania periodických sezónnych zmien. Korektné modelovanie atmosférických vplyvov vyžaduje znalosť tlaku na povrchu Zeme v celej jeho ploche. Rozloženie a cirkulácia atmosférickej masy zapríčiňuje horizontálne posuny približne 3 mm a vertikálne 20 mm, najvýraznejšie sa však posuny prejavujú v diurnálnych a semidiurnálnych vlnách (v perióde dennej a poldennej), ktoré majú za následok výkyvy tlaku v jednotkách hPa.

Slnko však na atmosféru nevplyva len svojou gravitačnou silou. Slnko taktiež zahrieva rôzne časti zemského povrchu nerovnomerne a tak vznikajú rozdiely, ktoré zapríčiňujú cirkuláciu atmosférickej masy spravidla východo-západným smerom čo sa nazýva aj *Atmospheric Non-Tidal Pressure Loading*.

## 1.5 Časové systémy

Časové systémy zastupujú nenahraditeľnú pozíciu v oblastiach ako je veda, či navigácia. A preto je ich prítomnosť a znalosť v oblasti GNSS nevyhnutná. Časové systémy zabezpečujú možnú synchronizáciu a meranie času s veľmi vysokou presnosťou. Známe časové systémy možno rozdeliť do dvoch skupín z pohľadu spôsobu definovania časovej jednotky:

- rotačné časy,
- fyzikálne definované časy.

*Rotačný čas* je, ako už z názvu vyplýva, závislý na rotácii Zeme, ktorá je však nerovnomerná a z toho dôvodu nie je vhodné využívať rotačné časové systémy v spojitosti s GNSS.

Naopak *fyzikálne definované časy* sú definované na základe pozorovaní určitých fyzikálnych javov, ktoré sú stabilné. Sekunda bola na krátko v roku 1960 definovaná ako určitý zlomok tropického roka. Dnešné ponímanie sekundy bolo definované v roku 1967 inštitútom *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM – Medzinárodný úrad pre miery a váhy) [49] nasledovne: „*sekunda je základná fyzikálna jednotka sústavy SI, jednotka času. 1 sekunda je čas trvania 9 192 631 770 periód elektromagnetického žiarenia, ktoré zodpovedá prechodu medzi dvoma hladinami veľmi jemnej štruktúry základného stavu atómu cézia (133Cs) pri teplote 0 kelvinov.*“

Medzi časy, ktoré využívajú ako mernú jednotku fyzikálnu sekundu radíme medzinárodný atómový čas (TAI) a časy z neho odvodené:

- koordinovaný svetový čas (UTC)
- časy jednotlivých systémov GNSS

**Medzinárodný atómový čas** – *Temps Atomique International* (TAI) ako referenčný časový štandard, ktorý je odvodený zo sekundy SI je definovaný na základe meraní

veľkého množstva rôzne rozmiestnených atómových hodín. Výsledná hodnota času je potom určená váženým priemerom všetkých jednotlivých meraní. Čas TAI je udávaný v geocentrickom referenčnom rámci realizovanom na rotujúcom geoide. [49]

**Koordinovaný svetový čas** – *Universal Time Coordinated* (UTC) je celosvetovo využívaný ako občiansky čas. UTC je odvodený z TAI, čiže nie je závislý na rotácii Zeme a teda plynie rovnomerne. Ich rozdiel je celočíselný počet takzvaných prestupných sekúnd  $n$  (môžu byť kladné, aj záporné).

$$TAI - UTC = n. \quad (1.41)$$

Hodnoty  $n$  sa môžu každoročne meniť až 2x do roka. A to buď k dátumu 30.6. alebo 31.12. Menia sa vždy vopred, keď je očakávaný rozdiel

$$DUT1 = |UT1 - UTC| > 0,9s, \quad (1.42)$$

kde UT1 je svetový rotačný čas. Z dokumentu od *IERS – Bulletin C* k dátumu 9. januára 2023 je možné sa dozvedieť, že ku koncu júna 2023 nebude zavedená žiadna prestupná sekunda a od 1. januára roku 2017 0h UTC, až doteraz je rozdiel  $TAI - UTC = 37s$ . [50], [51], [52]

### Časy systémov GNSS

*GPS čas* (GPST) je zriadený kontrolným segmentom systému GPS a počiatok časového systému je datovaný k poľnoci z 5. na 6. januára 1980, kedy bol čas definovaný ako

$$GPST = TAI - 19s. \quad (1.43)$$

GPST nie je na rozdiel od UTC korigovaný vzhľadom k TAI, takže plynie rovnomerne a tak sa rozdiel medzi UTC, ktorý sa periodicky koriguje, a GPST mení. [53]

GLONASS má taktiež zriadený vlastný časový rámec pod označením *GLONASST*, ktorý na rozdiel od GPST už pracuje s prestupnými sekundami a teda je vzťahnutý k UTC. Časový systém je definovaný ako

$$GLONASST = UTC(SU) + 3h - \tau, \quad (1.44)$$

kde  $UTC(SU)$  je UTC pre územie Ruska a  $|\tau| < 1\text{ ms}$ . [54]

*Galileo system time* (GST) je vlastným časovým štandardom pre európsky systém Galileo, taktiež spravovaný a zabezpečovaný riadiacim segmentom systému. Čas je synchronizovaný s TAI s chybou menšou než 50 ns, a teda nepracuje s prestupnými sekundami. Nultá epocha sa datuje na poľnoc medzi 21. a 22. augustom 1999. [54]

Rovnako tak má aj systém BeiDou svoj časový štandard obdobne pomenovaný *BeiDou Time* (BDT). Jeho východzia epocha je datovaná do 0h UTC 1. januára 2006. Pre zmenu, BDT je synchronizovaný s časom UTC s chybou do 100 ns. [54]

Ďalším časovým systémom využívajúcim sa v oblasti GNSS je *Juliánsky dátum* a *Modifikovaný juliánsky dátum*. *Juliánsky dátum* (JD) je časový koncept vo veľkej miere využívaný v astronómii a v iných vedách. Pre systém s počiatkom na poludnie 1. januára 4713 p.n.l. využíva ako mernú jednotku tzv. *juliánsky deň*. Juliánsky deň je vyjadrený poradovým číslom dňa ako celočíselná hodnota od počiatkovej epochy, pričom jeden deň má 24 hodín po 60 minútach. Desatinná časť vyjadruje hodinu v dni. V praxi sa však častejšie využíva *modifikovaný juliánsky dátum* (MJD) a to z jednoduchého dôvodu. Jeho počiatková epocha je datovaná ku 0h 17. novembra 1858. A teda hodnota juliánskeho dňa sa líši o 2400000,5 odo dňa v systéme JD

$$MJD = JD - 2\,400\,000,5. \quad (1.45)$$

Vyjadrenie dátumu pomocou MJD sa využíva predovšetkým v astronomických výpočtoch a výskume, napríklad pri sledovaní dráh a polohy planét, hviezd a komét. [55]

## 1.6 Súradnicové systémy

Pre jednoznačné určovanie polohy je nevyhnutné stanoviť referenčný súradnicový systém v ktorom budeme schopný vyjadriť polohu ako družice, tak aj prijímača. Typicky sa ich poloha a zrýchlenie vyjadruje v kartézskych súradnicových systémoch pre navigačné a polohové aplikácie. Kartézske súradnicové systémy môžeme rozlišovať rotačné a inerciálne a ďalej ich môžeme deliť na lokálne alebo globálne – s počiatkom v geocentre, takzvané *Earth – centered*.

Pre určovanie obežných dráh satelitov je v oblasti GNSS výhodné použitie systému *Earth centered inertial* (ECI), pre ktorý platí:

- počiatkom je geocentrum,
- os  $x$  smeruje do určitého pevne fixovaného smeru,
- rovina  $xy$  je položená v rovine rovníka,
- os  $z$  je normálou k ploche  $xy$  v smere k Severnému pólu,
- os  $y$  dopĺňa systém na pravotočivý,
- využíva efemeridový čas.

Avšak je náročné jednoznačne definovať systém z pohľadu roviny  $xy$  z dôvodu precesne nutačných pohybov a pohybov pólov. A teda definícia ECI systému by sa menila v čase. Riešením tohto problému je vytvorenie systému fixovaného k určitej epoche, a tak sa rozhodlo o fixovaní voči 1. januáru 2000 12h, pričom sa tento systém nazýva ako J2000. Os  $x$  smeruje do jarného bodu a ostatné osi rešpektujú zásady vyššie spomenuté. [56]

Pre výpočet polohy prijímača je výhodnejšie využiť systém, ktorý rotuje so Zemou. Tieto systémy sa súhrnne označujú ako *Earth centered – Earth fixed* (ECEF) systémy. Pri práci s týmito súradnicovými systémami je omnoho jednoduchšie transformovať

polohu do geocentrických zemepisných súradníc – zemepisná šírka, dĺžka a výška. Základnými charakteristikami ECEF systému sú:

- rovina  $xy$  je rovnobežná s rovinou rovníka, rotuje spolu so Zemou,
- os  $x$  prechádza priesečníkom rovníka a nultého poludníka,
- os  $y$  prechádza priesečníkom poludníka  $90^\circ$  východnej zemepisnej dĺžky a rovníka,
- os  $z$  predstavuje normálu k rovine  $xy$  prechádzajúcou severným zemepisným pólom – pohyb osi  $z$  je charakterizovaný precesne nutačnými pohybmi a pohybmi pólu. [56]

Primárnym zemepisným referenčným súradnicovým systémom s ktorým pracujú GNSS v oblasti geodézie je *Conventional Terrestrial Reference System* (CTRS). Bol vytvorený a je udržiavaný inštitúciou *International Earth Rotation Service* (IERS) Tento systém má niekoľko základných charakteristík.

- počiatkom CTRS je geocentrum,
- CTRS využíva geocentrický súradnicový čas,
- CTRS nemá žiadne globálne reziduálne rotácie voči zemskej kôre,
- os  $z$  smeruje do medzinárodného konvenčného počiatku (CIO),
- os  $x$  je definovaná priesečníkom nultého poludníka a rovníka,
- os  $y$  dopĺňa systém na pravotočivý.

*International Terrestrial Reference System* (ITRS), alebo aj medzinárodný terestrický referenčný systém je praktickou realizáciou CTRS. ITRS tvorí

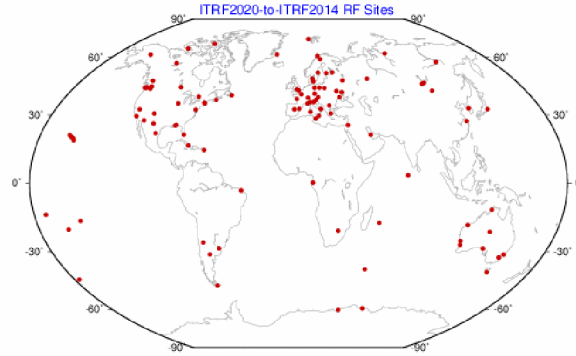
- súbor konštant,
- algoritmov,
- technológií
- a referenčný rámec – *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF).

Referenčný rámec je definovaný ako súbor fyzicky realizovaných bodov. Dnes je používaný referenčný rámec ITRF2014, ktorého referenčným elipsoidom je elipsoid *Geodetic Reference System 1980* (GRS80). Keďže referenčný rámec je globálnym systémom, vplyvom pohybu litosférických dosiek sa poloha jednotlivých staníc voči nemu mení. Zjednotenie súradníc z dlhodobého hľadiska sa vykonáva na základe transformácie do spoločnej epochy. A tak sú poskytované presné efemeridy družíc GNSS vzťahnuté práve k ITRF2014. [56]

Avšak najnovšou realizáciou Medzinárodného terestrického referenčného rámca je ITRF2020. Rovnako ako tomu bolo pri realizácii ITRF2014, aj ITRF2020 používa ako vstupné údaje časové rady polôh permanentných staníc a takisto parametre rotácie Zeme - *Earth Orientation Parameters* (EOP), ktoré sú získané zo 4 kozmických geodetických techník (VLBI, SLR, GNSS a DORIS) zabezpečované technickými centrami. Kombinácia týchto techník je možná práve vďaka kolokačným staniciam, ktoré pracujú aspoň s dvoma technológiami. Očakáva sa, že ITRF2020 bude vylepšenou verziou ITRF2014 aj vďaka použitým inováciám, medzi ktoré patrí uvažovanie tzv. *Post-Seismic*



*Deformation (PSD)* na stanicích, ktoré sú vystavené silnej a/alebo častej seizmickej aktivite, zahŕňajú väzby na dáta aj z lokálnych stanic. A na záver uvažujú aj ročné a polročné zložky (periodické vlny) vyjadrené v systémoch *Center of Mass frame* a *Center of Figure frame*. Orientácia ITRF2020 ostáva rovnaká ako ITRF2014. Referenčnou epochou pre ITRF2020 je  $t_0 = 2015.0$ . [57]



Obr. 17: Schéma referenčných staníc, ktorých dáta sa využívajú pre transformáciu medzi systémami ITRF2020 a ITRF2014, prevzaté [57]

*Lokálny topocentrický systém (NEU -North, East, Up)* sa využíva pre vyjadrovanie takých výsledkov spracovania GNSS, predovšetkým sú to charakteristiky presnosti, pre ktoré je nevhodné vyjadrovanie pomocou použitia geocentrického systému, pretože os  $z$  tohto systému smeruje do pólu. NEU poskytuje jednoduchšiu a prehľadnejšiu interpretáciu výsledkov na jednotlivých stanicích. Súradnice ITRF2014 sa tak často transformujú do lokálneho topocentrického systému, ktorého charakteristiky súradnicových osí sú:

- zvislá os  $U$  smeruje v smere normály k elipsoidu,
- os  $N$  je orientovaná severným smerom v miestnom poludníku,
- os  $E$  je orientovaná východným smerom v miestnom poludníku.

Polohový vektor súradníc v lokálnej topocentrickej sústave získame transformáciou ako:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} n \\ e \\ u \end{pmatrix} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}, \quad (1.46)$$

kde  $\mathbf{X}$  je vektor súradníc v geocentrickom súradnicovom systéme a  $\mathbf{R}$  je matica rotácie vyjadrená ako:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (1.47)$$

pričom  $\varphi$  je zemepisná šírka a  $\lambda$  je zemepisná dĺžka. Súradnicové zložky systému NEU sú potom vypočítané ako

$$n = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi \end{pmatrix}, e = \begin{pmatrix} -\sin \lambda \\ \cos \lambda \\ 0 \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (1.48)$$

[58]

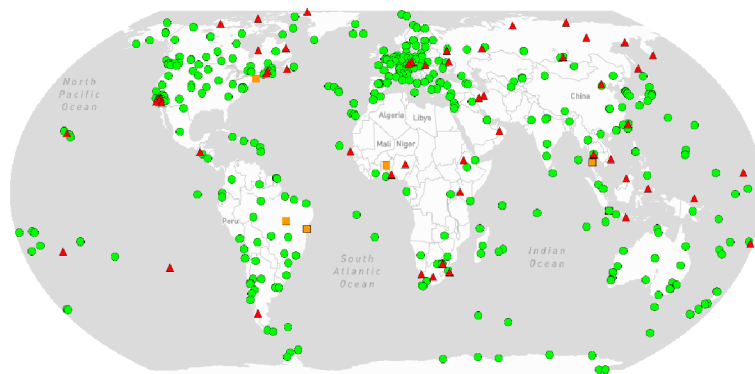
## 1.7 Siete referenčných staníc

Referenčnou sieťou je sieť staníc s presne známou polohou a časom, ktoré sú v ideálnom prípade rovnomerne rozmiestnené v geografickej oblasti, v ktorej majú tieto stanice slúžiť. Referenčné stanice tvoria súčasť kontrolného segmentu ako monitorovacie stanice, ktoré svoje merané údaje odosielajú kontrolnému centru, ktoré tieto údaje analyzuje a spracováva.

Sieť referenčných staníc môže byť ako lokálna, tak aj regionálna a napokon globálna. Medzi lokálne referenčné siete môžeme klasifikovať napríklad národné siete CZEPOS či SKPOS. Regionálnou sieťou je napríklad sieť permanentných staníc EUREF (EPN – *Euref Permanent Network*).

Celosvetovou sieťou je súbor staníc *International GNSS Service* (IGS). IGS zbiera, archivuje a voľne poskytuje observačné a navigačné dáta, rovnako ako ich produkty. Pomocou veľmi presných prijímačov poskytujú dáta nepretržite. Je tvorená súborom viac ako 500 fungujúcich staníc v nepretržitom režime. Prijímajú a pracujú dáta zo všetkých GNSS ako aj niektorých ďalších rozširujúcich vesmírnych systémov, napr. SBAS (*Satellite Based Augmentation System*).

Stanice referenčných sietí sú nevyhnutným článkom pre presné určovanie polohy. Ich úlohou je poskytovať presné referenčné a korekčné dáta pre užívateľov a tak zabezpečiť dostatočnú presnosť merania.



Obr. 18: Rozmiestnenie všetkých staníc IGS ku dňu 20.5.2023(zelený krúžok - dostupné dáta posledných 10 dní, oranžový štvorec - dostupnosť dát spred 30 dní, červený trojuholník - dáta nedostupné viac ako 30 dní), prevzaté [59]

## 1.8 Štandardné dátové formáty

Pre dáta rôzneho typu sú využívané rôzne dátové štandardy pre ich výmenu medzi poskytovateľmi a užívateľmi. IGS poskytuje nasledovné formáty a štandardy:

Tabuľka 2: Štandardne využívané dátové formáty, upravené [60]

Formát/Štandard	Popis
SSR v1.0	<i>State Space Representation</i> - dostupný formát pre šírenie real-time produktov IGS; obsahujú informácie o všetkých GNSS, ďalej zahŕňajú korekcie dráh družíc, hodín družíc, DCB, fázové posuny, inosferické a troposférické oneskorenie. Cieľom je vytvoriť samostatný a škaloateľný štandard pre široké využitie v real-time aplikáciách.
RINEX v. 4.00  a staršie RINEXY	<i>Receiver INdependent EXchange format</i> , obsahuje súbory s: observačnými dátami; navigačnou správou; meteorologickými dátami Konkrétnejšie obsahuje: fázové merania, kódové merania, dopplerovské merania, signal-to-noise ratio merania (SNR), observačný čas; informácie o stanici; informácie o anténe; korekčné dáta; meteorologické dáta; atmosférické korekcie, parametre orientácie Zeme a iné - pre všetky GNSS
GEO SBAS	<i>GEOstationary Satellite-Based Augmentation System</i> zahŕňa korekcie pre satelitné systémy, ktoré využívajú geostacionárne družice na vysielanie korekčných správ medzi GNSS prijímačmi a poskytovateľmi SBAS, obsahuje: korekcie dráh družíc a ich hodín, inosférické a troposférické korekcie, ostatné korekčné parametre
SINEX	<i>Solution INdependent Exchange Format</i> obsahuje vybrané výstupy a vstupy geodetických a geofyzikálnych dát, skladá sa zo: súboru s parametrami - informácie o staniciach, anténach, dráhach signálu; súbor s meraniami - výstupy geodetických a geofyzikálnych meraní - poloha a fázové signály z GPS, GLONASS, Galileo alebo geofyzikálnych meraní
Hatanaka compact RINEX	komprimovaný RINEX - redukovaná veľkosť súboru o viac ako polovicu
sp3 version d	parametre dráh družíc GNSS a SBAS, obsahujú: súradnice polohy a rýchlosť pre každý satelit v každom okamihu

sp3 version c	parametre dráh družíc GPS a GLONASS
erp	<i>Earth Rotation Parameters</i> súbor obsahuje parametre popisujúce rotáciu Zeme a jej zmeny v čase: precesne-nutačný pohyb; pohyb pólov
clock RINEX 3.04  a staršie	riešenie hodín družíc a prijímačov, obsahuje: základné informácie - názov stanice, časová zona, počet satelitov; informácie o hodinách pre jednotlivé satelity - názov satelitu, čas vysielania, hodnoty hodín družice; korekcie relativistických efektov a ďalších faktorov
Bias-SINEX v. 1.00	GNSS kódové a fázové biasy pre družice a prijímače => výmenný formát hodnôt biasov - úprava vypočítaných pseudovzdialeností pre kompenzáciu systematických chýb, obsahuje: bias modely; kódové a fázove oneskorenie
IONEX v. 1.00	<i>IONosphere Map Exchange Format</i> pre výmenu ionosférických modelov; obsahuje informácie o stave ionosféry (TEC): ionosférické modely; kódová a fázová refrakcia; geometria modelov; štatistické informácie
Tropo SINEX v. 2.00	<i>Solution INdependent EXchange formát</i> pre zdieľanie parametrov TROposféry a meteorologických parametrov, obsahuje: zoznamy staníc a ich súradnice; zoznamy vektorov medzi stanicami; matice rotácie a posunu medzi referenčnými rámcami; zoznam systémových kalibrácií
Tropo SINEX	<i>Solution INdependent EXchange formát</i> pre kombinácie určovania TROposféry; informácie o troposférickom oneskorení v smere zenitu
site log	informácie o permanentnej stanici, zahŕňa: identifikáciu stanice; informácie o polohe; o prijímači; o anténe; kolokačné stanice; frekvenčné štandardy; meteorologické vybavenie; informácie o meraní a ďalšie
ANTEX Format Description	výmenný formát pre údaje antény, zahŕňa: verziu formátu; PCV typ; typ referenčnej antény; informácie o type antény - aj prijímača aj družice; informácie o kalibrácii; počet frekvencií pre ktoré sú uložené vzory pre aktuálnu anténu; počiatok a koniec platnosti súboru; SINEX kód; excentricity fázového centra antény v ENU;

## 2 PRECISE POINT POSITIONING

Metóda *Precise Point Positioning* (PPP) sa radí medzi absolútne metódy určovania polohy. A teda využíva GNSS dáta z jediného prijímača a tým pádom poskytuje takmer rovnakú presnosť kdekoľvek na Zemi nezávisle na iných GNSS stanicích. Metóda je charakteristická tým, že pre korekciu systematických vplyvov je nutné zavádzať presné produkty a korekčné modely. Ďalšou výhodou okrem nepotrebnosti existencie ďalších referenčných staníc je možnosť nezávislého spracovania veľkého množstva dát z rozličných GNSS staníc. K veľkej nevýhode tejto metódy patrí pomerne dlhá konvergenčná doba, ktorá sa pohybuje medzi 20 – 30 min. Pri použití klasickej metódy PPP (*float riešenie*) s využitím lineárnej kombinácie „ionosphere-free“ je táto doba konvergenencie typicky 30 minút s využitím observácií v intervale 30 sekúnd. Spôsobuje to fakt, že nie je možné vyriešiť celočíselné ambiguitu pre prítomnosť fázových oneskorení v observáciách (hardwarové oneskorenie). Pokiaľ je znalosť týchto oneskorení, je možnosť využiť PPP *s celočíselným riešením ambiguit* (PPP-AR). V prípade využitia metódy PPP-AR sa konvergenčná doba pri použití lineárnej kombinácie *ionosphere-free* skrúti na menej než 20 min. Metóda má oproti klasickej dve výhody. Prvou je už spomenuté skrátenie doby nutnej k počiatkovej konvergencii a druhou je zlepšenie stability riešenia. [38], [61]

### 2.1 Matematický model

Nekombinovaná rovnica pozorovania medzi prijímačom  $r$  a družicou  $s$  na frekvencii  $j$  pre kódové merania vyzerá nasledovne:

$$P_{rj}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + c_j(d_{rj} - d_j^s) + I_{rj}^s + T_r^s + e_{rj}^s \quad (2.1)$$

a pre fázové

$$\varnothing_{rj}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{rj}^s + T_r^s + \lambda_j(N_{rj}^s + b_{rj} - b_j^s) + \varepsilon_{rj}^s, \quad (2.2)$$

kde  $\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$  je geometrická vzdialenosť medzi družicou a prijímačom opravená o offsety a variácie fázových centier antén družice a prijímača,  $dt_r$  je odchýlka časovej základne prijímača,  $dt^s$  je odchýlka časovej základne družice. Z atmosférických vplyvov sa uvažuje ionosférická refrakcia  $I_{rj}^s$  a troposférická refrakcia  $T_r^s$ . Hardwarové oneskorenia kódových meraní spôsobené prijímačom, respektíve družicou  $d_{rj}, d_j^s$ , hardwarové oneskorenia fázových meraní sú v rovnici označené  $b_{rj}, b_j^s$  a  $\lambda_j, N_{rj}^s$  vyjadruje počiatkovú celočíselnú ambiguitu. Zvyškové systematické vplyvy sú  $e_{rj}^s$ , resp.  $\varepsilon_{rj}^s$ .

Na rozdiel od diferencovaných meraní, metóda PPP je riešená pomocou meraní nediferencovaných a tak nie je možné odstrániť, či eliminovať systematické vplyvy, ako je tomu pri metódach relatívnych. Avšak merania na dvoch frekvenciách umožňujú odstrániť vplyv ionosféry využitím lineárnej kombinácie ionosphere-free.

Rovnice tejto lineárnej kombinácie majú (pre frekvencie L1 a L2 systému GPS) tvar

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 P_{L1} - f_2^2 P_{L2}}{f_1^2 - f_2^2}, \quad \emptyset_{IF} = \frac{f_1^2 \emptyset_{L1} - f_2^2 \emptyset_{L2}}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (2.3)$$

observačné rovnice potom prechádzajú na tvar

$$P_{rIF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + c_{IF}(d_{rIF} - d_{IF}^s) + T_r^s + e_{rIF}^s, \quad (2.4a)$$

$$\emptyset_{rIF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_{IF}(N_{rIF}^s + b_{rIF} - b_{IF}^s) + \varepsilon_{rIF}^s. \quad (2.4b)$$

Výhodou využitia lineárnej kombinácie ionosphere-free je odstránenie frekvenčne závislého členu ionosférickej refrakcie z modelu riešenia, ale naopak ionosphere-free kombinácia so sebou prináša omnoho vyšší šum a tak je riešenie ambiguit náročnejšie.

Taká lineárna kombinácia, ktorá by dokázala eliminovať vplyv troposféry však nie je známa. Troposférická refrakcia tak býva modelovaná ako jeden z určovaných parametrov pri riešení neznámych. Táto hodnota potom býva vyjadrená ako ZTD v mieste prijímača  $Z_r$  s príslušnou mapovacou funkciou  $m_r^s$ . Rovnice pozorovania potom prechádzajú na tvar

$$P_{rIF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + c_{IF}(d_{rIF} - d_{IF}^s) + m_r^s Z_r + e_{rIF}^s, \quad (2.5a)$$

$$\emptyset_{rIF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + m_r^s Z_r + \lambda_{IF}(N_{rIF}^s + b_{rIF} - b_{IF}^s) + \varepsilon_{rIF}^s. \quad (2.5b)$$

[20], [38], [61]

## 2.2 Vstupné dáta

Pre výpočet určovaných parametrov polohy z observačných RINEXov, v rámci ktorého sa určujú aj ostatné neznáme parametre v podobe systematických vplyvov a celočíselných ambiguit je nutné poznať presné parametre dráh družíc a riešenie hodín ako družíc, tak aj prijímačov. Ďalej sa ako vstupné dáta používajú súbory obsahujúce parametre antén \*.atx. Pre elimináciu vplyvu troposféry sú používané rôzne troposférické modely, a ionosférické oneskorenie sa eliminuje zavedením ionosférických modelov alebo dvojfrekvenčným meraním s využitím lineárnej kombinácie ionosphere-free.

### 2.2.1 Predspracovanie merania

Pri spracovaní meraní GNSS metódou PPP je veľmi dôležitým krokom predspracovanie raw dát. To zahŕňa predovšetkým vyhladenie kódových meraní, detekciu fázových skokov a odstránenie skokov hodín prijímača.

### Vyhľadanie kódových meraní

Kódové merania majú oproti fázovým nevýhodu vysokého zašumenia, ale naopak, neobsahujú nejednoznačné parametre vo forme ambiguit.. K vyhľadaniu kódových meraní pri presnom spracovaní možno použiť algoritmus *Hatch filter*, ktorý umožňuje využiť presné fázové merania k docieleniu žiadaného efektu. V rovnici

$$\hat{R}_{r,k}^s = \frac{1}{n} R_{r,k}^s + \frac{n-1}{n} [\hat{R}_{r,k-1}^s + (\Phi_{r,k}^s - \Phi_{r,k-1}^s)] \quad (2.6)$$

$\hat{R}_{r,k}^s$  predstavuje vyhladené kódové meranie medzi prijímačom  $r$  a družicou  $s$  v epoche  $k$ .  $\Phi$  predstavuje meranú fázu nosnej vlny a  $n$  je celočíselný stupeň vyhladenia. [21]

### Modelovanie vplyvu multipath

Modelovanie viaccestného šírenia signálu je výhodné z hľadiska priradenia váh jednotlivým observáciám v následnom spracovaní GNSS dát. Pomocou lineárnej kombinácie *geometry free* v prípade merania na viacerých frekvenciách je tento vplyv na kódové merania ľahko modelovateľný. Multipath potom možno pre všetky dostupné frekvencie vyjadriť ako

$$MP_k = P_k - \emptyset_i - \alpha(\emptyset_i - \emptyset_j) \frac{1}{f_i - f_j} \quad (2.7)$$

kde  $i, j, k$  sú indexy jednotlivých frekvencií  $f$ ,  $P$  je meraná pseudovzdialenosť  $\emptyset$  je meraná fáza nosnej vlny, pričom parameter  $\alpha$ , môžeme zapísať ako

$$\alpha = \frac{(f_i^2 + f_k^2)f_j^2}{(f_i^2 - f_j^2)f_k^2} \quad (2.8)$$

Pri dvojfrekvenčných meraniach môžeme zvoliť indexy  $k=i=1$  a  $j=2$  a veľkosť efektu na frekvencii  $k=1$  potom vyjadríme ako

$$MP_1 = P_1 - \emptyset_1 - \frac{2f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)}(\emptyset_1 - \emptyset_2). \quad (2.9)$$

[20], [62], [63]

### Fázové skoky

Pre detekciu fázových skokov, takzvaných cycle slips sa najbežnejšie používajú metódy založené na meraní na viacerých frekvenciách: *polynomické fittovanie*, *Dopplerovská integračná metóda*, *Melbourn-Wubben kombinačná metóda* alebo *metóda lineárnej kombinácie geometry free*. Softvrware *Anubis* použitý pre spracovanie dát využíva práve posledné dve metódy.

*Geometry free kombináciu* (GF) možno využiť nie len pri modelovaní efektu multipath, ale taktiež má uplatnenie aj pri odstraňovaní geometrickej závislosti observácií a pri odstraňovaní vplyvu chýb hodín ako prijímača, tak aj družíc. Použitím GF kombinácie pre odstránenie týchto vplyvov ostáva v rovnici pozorovania zo systematických vplyvov len vplyv ionosféry, ambiguita a zvyškové chyby. Rovnicu lineárnej kombinácie  $\Phi_{GF}$  možno potom vyjadriť ako

$$\Phi_{GF} = \Phi_1 - \Phi_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 - I_1 + I_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 - I_1 \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}\right), \quad (2.10)$$

kde  $\Phi$  je meraná fáza nosnej vlny 1 a 2 sú indexy označujúce jednotlivé frekvencie  $f$ ,  $N$  je počiatková ambiguita,  $\lambda$  je vlnová dĺžka a  $I$  je ionosférická refrakcia. Pre detekciu cycle slips je nutné podrobiť merania medzi epochami  $t$  testovaciemu kritériu:

$$\Phi_{GF}(t) - \Phi_{GF}(t - 1) > k \cdot \sigma_{\Phi_{GF}} + \Delta I_{max}, \quad (2.11)$$

kde  $\sigma_{\Phi_{GF}}$  je predpokladaná smerodajná odchýlka,  $\Delta I_{max}$  je maximálna zmena ionosférického oneskorenia a  $k$  je súčiniteľ konfidencie (často volený ako  $k = 4$ ). Kombinácia GF využíva len fázové merania. [63]

Ak je možnosť využiť dvojfrekvenčné dáta fázové aj kódové, používa sa lineárna kombinácia *Melbourne-Wubenna* (MW), ktorá dokáže konzistentne eliminovať vplyv ionosféry, troposféry, geometrie a hardwarové oneskorenie hodín, veľkou výhodou je aj to, že pracuje s ‚dlhými‘ vlnovými dĺžkami, avšak za cenu zvýšenia šumu vplyvom kódových meraní. MW kombinácia pracuje s lineárnou kombináciou *wide-lane* na úrovni fázových meraní  $\Phi_w$  a pre kódové merania využíva kombináciu *narrow-lane*  $P_N$ . Rovnica MW kombinácie má potom tvar

$$\Phi_{MW} = \Phi_w - P_N = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2) - \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 P_1 - f_2 P_2) = \lambda_w N_w, \quad (2.12)$$

kde  $\lambda_w = \frac{c}{f_1 - f_2}$  a  $N_w = N_1 - N_2$  sú *wide-lane* vlnová dĺžka a ambiguita. Testovacie kritérium pre detekciu fázových skokov potom medzi epochami je vyjadrené nasledovne:

$$\Phi_{MW}(t) - \Phi_{MW}(t - 1) > k \cdot \sigma_{\Phi_{MW}}, \quad (2.13)$$

kde koeficient  $k$  značí rovnako ako pri GF kombinácií súčiniteľ konfidencie a  $\sigma_{\Phi_{MW}}$  je taktiež uvažovaná smerodajná odchýlka. Obe tieto metódy dokážu detekovať fázové skoky, avšak nie sme schopní určiť, na ktorej frekvencii ku nim došlo, prípadne či na oboch. [63]



Pre určenie konkrétne dotknutej frekvencie je podľa Zhao, Q. et al. [64] nutné použiť trojfrekvenčné meranie s využitím kombinácie MW, wide-lane a narrow-lane nezávisle za aplikácie kaskádovitého postupu a následnej rekonštrukcie fázových skokov na jednotlivých frekvenciách.

### Skoky hodín prijímača

Skoky hodín prijímača sa prejavujú podobne ako by došlo k fázovým skokom na všetkých observáciách. Skok hodín prijímača sa prejavuje predovšetkým pri spracovaní metódy PPP a nie je možné ho odhaliť klasickými kombináciami ako napr. GF. Metóda na odhalenia skoku hodín prijímača je založená na vytváraní prvých diferencií medzi observáciami, respektíve medzi družicami pomocou lineárnej kombinácie MW. Odhalené skoky hodín prijímača na základe porovnania MW a GF kombinácie možno potom zahrnúť do modelu riešenia ako ďalšie z určovaných neznámych parametrov a tak určiť ich presnú hodnotu. [20], [65]

## 2.3 Riešenie celočíselných ambiguit

Tradičný model PPP, v ktorom nie je možné riešenie celočíselných ambiguit, vychádza zo všeobecného matematického modelu, pričom tieto rovnice možno substitúciou

$$cdt_{r,IF,P} = cdt_r + d_{r,IF}, \quad (2.14a)$$

$$cdt_{IF,P}^s = cdt^s + d_{r,IF}^s, \quad (2.14b)$$

prepísať na tvar

$$P_{rIF}^s = \rho_r^s + cdt_{r,IF,P} - cdt_{IF,P}^s + m_r^s Z_r + e_{rIF}^s, \quad (2.15a)$$

$$\begin{aligned} \emptyset_{rIF}^s = \rho_r^s + cdt_{r,IF,P} - cdt_{IF,P}^s - d_{r,IF} + d_{r,IF}^s \\ + m_r^s Z_r + \lambda_{IF}(N_{rIF}^s + b_{rIF} - b_{IF}^s) + \varepsilon_{rIF}^s. \end{aligned} \quad (2.15b)$$

PPP býva často z dôvodu nemožnosti riešenia celočíselných ambiguit vplyvom pôsobenia nekalibrovaných kódových a fázových oneskorení riešené nad ambiguitami v podobe reálnych čísel (float riešenie). Avšak vďaka určitým metódam, ktoré budú popísané v tejto kapitole, je napokon možné abiguty riešiť v celých číslach. [66]

### 2.3.1 Nekombinované riešenie ambiguit

V prvom kroku riešenia nekombinovaných ambiguit sú kódové aj fázové merania opravené o hodnoty hardwarových oneskorení (biasov) hodín družíc

$$P = P + d^s, \quad \emptyset = \emptyset + b^s. \quad (2.16)$$

Ďalej je vybratá jedna referenčná družica, na základe ktorej dát sú vypočítané prvé diferencie ambiguít medzi družicami

$$N_{r,SD}^s = \bar{N}_r^{REFs} - \bar{N}_r^s. \quad (2.17)$$

Po vykonaní tohto kroku je možné hľadať celočíselné riešenie jednotlivých float ambiguít.

$$\bar{N}_{r,SD}^s = method(N_{r,SD}^s), \quad (2.18)$$

kde *method* značí použitú metódu hľadania, napríklad metóda *LAMBDA (Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment)*. Následne je vykonané ďalšie váhové vyrovnanie, kedy sú maximálne váhy priradené celočíselným ambiguítam. Riešenie možno ešte urýchliť takzvaným predvyrovnaním, kedy sa najskôr spraví vyrovnanie s využitím celočíselných wide-lane ambiguít a až následne sú hľadané celočíselné ambiguít pre jednotlivé frekvencie. [38]

### 2.3.2 Ionosphere-free riešenie ambiguít

Pri riešení ionosphere-free metódou sú rovnako merania kódové aj fázové opravené o hodnoty hardwarových oneskorení (biasov) hodín družíc

$$P_{IF} = P_{IF} + d_{IF}^s, \quad \emptyset_{IF} = \emptyset_{IF} + b_{IF}^s. \quad (2.19)$$

Po tomto kroku je možné vykonať float riešenie ambiguít, kedy sú v rámci riešenia neznámych parametrov vypočítané aj hodnoty float ambiguít  $\bar{N}_{r,IF}^s$ , ktoré sú ovplyvnené oneskorením ako družíc, tak aj prijímačov.

Pri celočíselnom riešení ambiguít sa v prvom kroku snažíme vypočítať celočíselné hodnoty wide-lane ambiguít  $\bar{N}_{r,WL}^s$ , ktorú možno pomocou lineárnej kombinácie MW vypočítať ako

$$MW = \emptyset_{WL} - P_{NL} = \frac{f_1 \emptyset_1 - f_2 \emptyset_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 - f_2 P_2}{f_1 + f_2}, \quad (2.20)$$

pričom sú z dôvodu odstránenia oneskorení spôsobených prijímačom najskôr vypočítané prvé diferencie medzi družicami, z čoho jedna, spravidla s najväčšou eleváciou, je zvolená ako referenčná (podobne ako pri nekombinovanom riešení). Avšak MW kombinácia využíva aj kódové merania, ktoré sú menej presné a tak nie je dostatočné odhad wide-lane ambiguít získať diferenciami len z jednej epochy, a preto sú MW kombinácie priemerované z meraní vo viacerých epochách.

Wide-lane ambiguít majú relatívne dlhú vlnovú dĺžku a tak je možné ich celočíselnú hodnotu vyhľadávať zaokrúhlením na najbližšiu celočíselnú hodnotu, pričom

sú často z dôvodu obmedzenia šumu a nepresnosti pri zaokrúhľovaní uvažované pre ďalší výpočet len tie ambiguity, ktorých desatinná časť je menšia než  $\frac{1}{4}$  cyklu a zároveň spĺňajú testovacie kritérium

$$P > 1 - \alpha, \quad (2.21)$$

kde  $P$  je pravdepodobnostná funkcia a  $\alpha$  je hladina významnosti (napr.  $\alpha = 0,1\%$ ).

Ak sú celočíselné wide-lane ambiguity vyriešené, ďalším krokom je riešenie narrow-lane ambiguity  $\bar{N}_{r,NL,SD}^s$ , kde

$$N_{r,NL,SD}^s = \bar{N}_{r,IF,SD}^s \frac{f_1+f_2}{\lambda_1 f_1} - \bar{N}_{r,WL,SD}^s \frac{f_2}{f_1-f_2}, \quad (2.22)$$

pričom  $N_{r,NL,SD}^s$  je označenie pre neceločíselné diferencované narrow-lane ambiguity. Narrow-lane ambiguity majú podstatne kratšiu vlnovú dĺžku ako wide-lane, a preto nie je možné ich celočíselnú hodnotu získať prostým zaokrúhlením. Využívajú sa algoritmy ako napríklad *LAMBDA*, podobne ako pri nekombinovanom riešení

$$\bar{N}_{r,NL,SD}^s = \text{LAMBDA}(N_{r,NL,SD}^s). \quad (2.23)$$

Posledným krokom pre úspešné vyriešenie celočíselných hodnôt ambiguity je znovu-vykonanie vyrovnaní s kritériom, kedy celočíselné hodnoty ambiguity dostávajú maximálnu váhu.

V prípade, že nie je možné určiť celočíselné hodnoty všetkých ambiguity, kedy je niektorá napríklad príliš nepresná a tá môže ohroziť celé celočíselné riešenie a bolo by nutné použiť výsledky z float riešenia, je možno využiť čiastočné riešenie ambiguity (*PAR – Partial Ambiguity Resolution*). *PAR* umožňuje nájsť celočíselné hodnoty len pre výber ambiguity, pričom cieľom je odhaliť tých, ktoré nie sú možné s dostatočnou presnosťou určiť celočíselne a tie z riešenia vyradiť. [38], [66]

## 2.4 Metódy riešenia neznámych parametrov

Určovanie neznámych parametrov, medzi ktoré radíme polohu prijímača vyjadrenú v súradniciach a celočíselné ambiguity, je podstatou spracovania GNSS meraní. Spolu s týmito parametrami bývajú pre presné výsledky určované aj ďalšie neznáme parametre v podobe systematických vplyvov z pôsobenia atmosféry, či vzniknuté na družici alebo prijímači. Pre riešenie neznámych parametrov sú využívané dve primárne metódy, z ktorých sú odvodzované ich rôzne ďalšie podoby pre špecifické typy spracovania.

### Metóda najmenších štvorcov

Aproximačná metóda najmenších štvorcov (MNS) je jednou z najznámejších metód so širokým uplatnením v rôznych oblastiach. Vstupná podmienka metódy MNS hovorí, že suma štvorcov má byť minimálna

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v} = \min, \quad (2.24)$$

kde  $\mathbf{v}$  je vektor opráv a  $\mathbf{P}$  je matica váh. Cieľom je získať vektor určovaných parametrov  $\mathbf{x}$ , ktorý je vyjadrený vzťahom

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{dx}, \quad (2.25)$$

kde  $\mathbf{x}_0$  je vektor približných hodnôt hľadaných neznámych parametrov a  $\mathbf{dx}$  je vektor ich prírastkov. Vzťah pre výpočet opráv je definovaný nasledovne:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{l}', \quad (2.26)$$

kde  $\mathbf{A}$  je matica parciálnych derivácií, alebo takzvaná matica plánu a  $\mathbf{l}'$  je vektor redukovaných meraní, pričom

$$\mathbf{l}' = \mathbf{l} - \mathbf{l}_0, \quad (2.27)$$

pričom  $\mathbf{l}$  sú merané veličiny a  $\mathbf{l}_0$  je vektor približných hodnôt vypočítaných z približných neznámych. Vstupná podmienka je splnená, keď

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}' = \mathbf{0}. \quad (2.28)$$

Substitúciou

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A}, \quad (2.29)$$

pričom  $\mathbf{N}$  je symetrická matica, získame odvodený vzťah pre výpočet prírastkov neznámych

$$\mathbf{dx} = -\mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}'. \quad (2.30)$$

Presnosť vyrovnania je charakterizovaná aposteriornou strednou jednotkovou chybou, ktorá sa vypočíta ako

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v}}{n-k}}, \quad (2.31)$$

kde  $n$  je počet meraných veličín a  $k$  je počet určovaných veličín. [67]

Kvôli výpočtovej náročnosti sprostredkujúceho vyrovnania MNS, ktorá rastie s pribúdajúcim množstvom meraných dát a určovaných parametrov je výhodné použiť tzv. *sekvenčné vyrovnanie*, ktorého výsledky a charakteristiky presnosti sú rovnaké, ako tie, ktoré by boli dosiahnuté pri klasickom vyrovnaní všetkých dát naraz. [67]

### **Kalmanov filter**

Ďalším algoritmom, ktorý je široko využívaný ako v navigácii, tak aj v ostatných aplikáciách GNSS. Algoritmus je založený na predikcii určovaných neznámych parametrov a ich následnom spresnení pomocou reálne meraných veličín. Pôvodne je navrhnutý pre spracovanie lineárnych dát. Rozšírený Kalmanov filter sa využíva pre nelineárne systémy, ktoré je však nutné prvotne linearizovať. Jeho výhodou je, že dokáže po určitú dobu poskytovať korektné výsledky aj v prípade, kedy je počet meraných veličín menší ako počet určovaných parametrov. [68]

### **Riešenie v opačnom smere**

Obe vyššie spomenuté metódy poskytujú v každej epoche iné výsledky, pričom časom (s rastúcimi iteráciami) postupne konvergujú ku svojimi skutočným hodnotám. Z pohľadu času je riešenie v opačnom smere technikou, ktorá umožňuje spresňovať riešenie, respektíve sa môže stať, že sa podarí ambiguitu vyriešiť v takých časových úsekoch, kedy to pri klasickom *„doprednom“* riešení nebolo možné. Kombinovaním klasického riešenia (forward) a spätného riešenia (backward) možno dosiahnuť presnejšie výsledky a takmer eliminovať čas konvergencie riešenia.

Podobné výsledky, ako je možné získať pri spätnom riešení je možné dosiahnuť aj metódou vyhladzovania (*smoothing*), ktorá umožňuje odstrániť konvergenciu v priebehu riešenia. Tento spôsob sa využíva napríklad k presnejšiemu určovaniu parametrov troposféry v priebehu celého riešenia PPP. [69]

## **2.5 Sofware pre spracovanie**

V tejto kapitole budú predstavené softwarové aplikácie, ktoré boli poskytnuté VÚGTK v podobe knižnice tried *G-nut* a boli použité pre spracovanie GNSS dát metódou PPP a PPP-AR. Pre grafickú interpretáciu bolo mimo iné využité aj prostredie Matlabu.

### **2.5.1 G-nut knižnica tried**

Knižnica tried a jej ďalšie odvodené aplikácie, ktoré od roku 2011 vyvíja tím odborníkov pod vedením Ing. Jana Douši, Ph.D. na Geodetickej observatórii Pecný v rámci VÚGTK. Programy, ktoré sú súčasťou G-Nut majú široké aplikácie v GNSS odvetví. Program G-Nut/Anubis umožňuje kontrolovať kvalitu dát, pre určovanie polohy prijímača v post-processingu a taktiež aj v reálnom čase metódou PPP sa využíva G-Nut/Geb, G-nut/Tefnut umožňuje určovať troposférické oneskorenie, s numerickými

modelmi počasia pracuje G-Nut/Shu a analýzu časových radov poskytuje G-Nut/Apep. Knižnica je určená predovšetkým pre operačný systém LINUX. [70]

### G-Nut/Anubis

G-Nut/Anubis je software určený pre kontrolu hlavičiek súborov, kvalitatívne a kvantitatívne hodnotenie a komplexnú kontrolu (QC – quality control) údajov z jedného alebo viacerých prijímačov GNSS. Software poskytuje nasledovné dáta:

- štatistiky observácií, signálov, frekvenčných pásiem, satelitov, a iné,
- štandardné určovanie polohy (SPP) systémov GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou,
- predspracovanie v podobe detekcie skokov hodín prijímača a cycle slips a iných rušivých vplyvov,
- viditeľnosť satelitov nad obzorom a užívateľské obmedzenie maskou,
- eleváciu a azimut satelitov,
- dostupnosť navigačných dát družíc a ich zdravotný stav,
- očakávaný počet observácií, elevačne závislé štatistiky,
- prítomnosť výpadku dát,
- multipath a šum kódových meraní,
- podiel signal-to-noise fázových meraní,
- korekcie hodín prijímača,
- metadáta hlavičky a overenie formátu,
- úprava metadát a filtrovanie údajov.

Software podporuje ako vstupné dátové formáty (vrátane CRX a gz a Z kompresie) dátové súbory observačné RINEX 2/3 a BNC OBS a navigačný RINEX 2/3, presné efemeridy vo formáte SP3 a metadáta SINEX. Dátové toky pre observačné a navigačné dáta RTCM 3 a BNC OBS pre observačné dáta.

Anubis dokáže pracovať v niekoľkých operačných módoch. Pomocou jediného argumentu je možné prednastavenie pre vybratý prevádzkový režim, kam patria:

- **Help** možnosti konfigurácie a predvolené nastavenia,
- **Thin** kontrola metadát a hlavičky,
- **Edit** úprava metadát a filtrovanie dát,
- **Lite** kvalitatívna kontrola s voliteľnými navigačnými dátami,
- **Full** kvalitatívna a komplexná kontrola s povinnými navigačnými dátami,
- **Summ** podporuje kvalitatívnu a komplexnú kontrolu ale s minimom výstupov,
- **KPIs** horizontálna a vertikálna poloha a indikátory kľúčových parametrov DOP<sup>1</sup> (KPIs – key-parameter indicators).

---

<sup>1</sup> DOP – dilution of precision (geometrická presnosť určovania polohy pomocou GNSS)

Kvalitatívne hodnotenie teda možno vykonávať v módoch *lite*, *full*, *summ* a *kpis*. Pričom sa líšia vo vyššie spomenutých prednastaveniach, ktoré je možno dodatočne meniť buď priamo v konfiguračnom súbore alebo cez príkazový riadok. V rámci tejto práce bol využívaný mód *full*. [71]

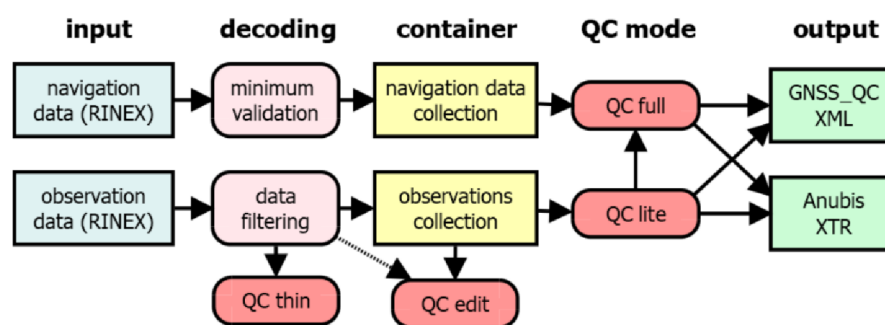
Tabuľka 3: Prednastavenia Anubis pre rôzne operačné módy, prevzaté [71]

Operating mode	Thin	Edit	Lite	Full	Summ	KPIs
XML-setting	(quality control)					
<i>:qc:sec_sum=</i>	0	0	1	2	2	3
<i>:qc:sec_hdr=</i>	0	0	1	1	1	1
<i>:qc:sec_obs=</i>	0	0	1	1	1	1
<i>:qc:sec_gap=</i>	0	0	1	1	-1	1
<i>:qc:sec_bnd=</i>	0	0	1	1	-1	1
<i>:qc:sec_pre=</i>	0	0	1	1	-1	0
<i>:qc:sec_est=</i>	0	0	0	1	0	0
<i>:qc:sec_ele=</i>	0	0	0	1	0	0
<i>:qc:sec_mpx=</i>	0	0	0	1	-1	-1
<i>:qc:sec_snr=</i>	0	0	0	1	0	0
<i>:qc:sec_sat=</i>	0	0	0	1	0	0
<i>:qc:sec_kpi=</i>	0	0	0	0	0	9

V tabuľke 2.1 jednotlivé nastavenia znamenajú:

- *sec\_sum=* sekcia pre zhrnutie,
- *sec\_hdr=* sekcia pre metadátové informácie (hlavička),
- *sec\_obs=* sekcia pre observačné štatistiky,
- *sec\_gap=* sekcia pre dátové medzery a malé časti,
- *sec\_bnd=* sekcia pre dostupnosť frekvenčných pásiem,
- *sec\_pre=* sekcia pre detekciu cycle slips a skoky hodín,
- *sec\_est=* časť pre určované parametre,
- *sec\_ele=* sekcia pre azimuty a elevácie viditeľných družíc,
- *sec\_mpx=* sekcia pre určovanie kódového multipath a signálového šumu,
- *sec\_snr=* sekcia pre signal-to noise pomer,
- *sec\_sat=* sekcia pre zdravotný stav družíc a navigačné záznamy,
- *sec\_kpi=* sekcia pre ukazovatele presnosti určenia polohy.

Pre kontrolu kvality dát sú výstupy vo vlastnom formáte *XTR*, formát *JSON* pre špecifické satelitné a epochové dáta, a výstupy poskytuje software aj vo formáte *XML*. [71]



Obr. 19: Anubis operačné módy a vzťahy ku vstupným, výstupným údajom a interným procesom, prevzaté [71]

### G-Nut/Geb

Pre samotný výpočet metódou PPP a PPP-AR bol využitý software G-Nut/Geb, ktorý je však ešte vo vývoji a pri riešení PPP funguje principiálne veľmi podobne ako G-Nut/Tefnut.

Softwary riešia metódu PPP použitím nediferencovaných meraní z jedného alebo z viacerých prijímačov. Všetky systematické vplyvy, ktoré vplývajú na meranie musia byť buď známe z externých produktov alebo sa určujú počas procesu alebo sú odstránené lineárnymi kombináciami signálov vysielaných na rôznych frekvenciách. Známosť celočíselných ambiguit je možná len pri získaní satelitných fázových biasov z externých zdrojov.

Externé produkty podporované softwarom sú:

- presné dráhy družíc,
- presné hodiny družíc,
- družicové biasy.

Implementované modelové dáta v softwari sú:

- pevne dané modely,
  - zemské slapy,
  - fázový wind-up efekt,
  - relativistické efekty na hodiny družíc,
- modely s dodatočnými vstupnými dátami,
  - zaťaženie oceánskeho dna ,
  - pohyb pólov,
  - offsety a variácie fázových centier antén prijímačov a vysielateľov.

Určované parametre potom sú:

- polohové súradnice prijímača,
- korekcie hodín prijímača,
- vlhká zložka ZTD,
- horizontálne troposférické gradienty,
- medzi systémové biasy ( medzi GPS a ostatnými GNSS),
- počiatkové ambiguita, [72]



Tabuľka 4: Vstupné formáty programu Geb, [72]

VSTUPNÉ FORMÁTY
SINEX
ATX
BLQ
SP3
RINEX 2/3
RTCM 3

Tabuľka 5: Výstupné formáty programu Geb a ich obsah, [72]

VÝSTUPNÉ FORMÁTY	obsah
LOG	bežný záznam
PPP	záznam spracovania
FLT	výsledky z dopredného filtra
SMT	výsledky z vyhladzovania v opačnom smere
COST-716	určené troposférické produkty
SINEX_TRO v2	určené troposférické produkty

## 2.6 Medzioborové využitie dát

S vývojom metódy PPP sa rozširuje aj oblasť uplatnenia získaných výsledkov použitím tejto metódy. Kedysi metóda PPP slúžila predovšetkým k veľmi presnému určeniu súradníc bodov, čo malo za prínos zrýchlenie ďalšieho spracovania. V posledných 20 rokoch vývoja sa od prvotného určovania korekcií hodín prijímačov metóda prepracovala až k určovaniu zenitovej troposférickej refrakcie. Postupne sa metóda PPP stala základom takzvanej GNSS meteorológie, nakoľko umožňuje určovanie vlhkej zložky troposféry, prispieva ku spresňovaniu numerických modelov počasia. Okrem toho sa využívanie GNSS metód začína vo veľkej miere uplatňovať aj pri presnom poľnohospodárstve. Metóda PPP-RTK (PPP v reálnom čase) sa využíva pri presnej navigácii strojov s plne dostačujúcou decimetrovou presnosťou. [73]

### 2.6.1 Seizmológia

PPP však nachádza využitie aj v oblasti seizmológie vo forme detekcie zemetrasení. Pomocou absolútnej metódy PPP sú horizontálne aj vertikálne posuny zemskej kôry ľahšie detekovateľné, oproti relatívnym metódam, aj napriek tomu, že dôjde k pohybu veľkej časti zemskej kôry. Z výsledkov výskumov bolo zistené, že pomocou GNSS meraní možno odhadnúť silu zemetrasenia už po 100s od jeho začiatku. [74]

Samotná činnosť zemetrasenia so sebou prináša druhotné ničivé prejavy vo forme tsunami, zosuvov pôdy, prípadne sopečnej činnosti. Samotný moment magnitúdy zemetrasenia, ktorý je väčší ako 7 často spôsobuje veľké majetkové škody a straty na životoch. A tak je pre ochranu ľudí nevyhnutné včasné zaznamenanie a informovanie o sile zemetrasenia.

Zemetrasenie možno charakterizovať jeho silou, ktorá sa udáva stupňom magnitúdového momentu  $M_w$ . Kedysi sa jeho sila udáva na Richterovej stupnici. Klasické seizmologické metódy, ktoré zahŕňajú užitie seizmometrov a akcelerometrov môžu pri silných zemetraseniach poskytovať skreslené výsledky. Aj preto sa dáta z GNSS stali dôležitou súčasťou pri detekcii a monitoringu zemetrasení za posledných 20 rokov. S dostupnosťou dát v posledných rokoch, ktoré sú poskytované v intervale 1Hz v reálnom čase môžu byť výsledky z GNSS meraní zahrnuté do systémov včasného varovania pred zemetrasením a tsunami.

Avšak magnitúda predstavuje celkový charakter zemetrasenia, zatiaľ čo intenzita zemetrasenia je parameter premenlivý v závislosti od samotnej magnitúdy, vzdialenosti od epicentra, od hĺbky hypocentra, lokálnej geologickej štruktúry, čo periódy seizmických vln. V tejto súvislosti sa často využíva *Modifikovaná Mercalliho stupnica intenzity* (MMI), ktorá závisí od faktorov ako ľudia vnímajú silu zemetrasenia, pohyb nábytku či poškodenie budov. MMI je vyjadrená rímskymi číslicami od I (neciteľné chvenie) až po X (extrémne chvenie). [75]

*Did You Feel It?* (DYFI) je koncept *U.S. Geological Survey* (USGS), ktorý pod záštitou vlády Spojených štátov amerických zbiera informácie od ľudí, ktorí zaznamenali v nejakej miere zemetrasenie, pričom títo ľudia hodnotia vnímanú silu a rozsah škôd napáchaných zemetrasením na základe určitých parametrov a tieto dáta potom umožňujú lepšie modelovať mapy vplyvu zemetrasenia. [76]

### Výpočet magnitúdy

Postup pre výpočet odhadu magnitúdy zemetrasenia počína transformáciou ITRF2014 súradníc do lokálneho topocentrického systému NEU. Pre odhad magnitúdy na tej GNSS stanici je nutné najskôr vypočítať takzvaný *peak ground displacement* (PGD), čo možno voľne preložiť ako *maximálna polohová odchýlka spôsobená seizmickými vlnami*.

$$PGD_i = \max \left( \sqrt{E_i^2 + N_i^2 + U_i^2} \right). \quad (2.32)$$

Pre zabránenie falošnej detekcie PGD na vzdialených stanicích pred tým, ako seizmická vlna zasiahne toto miesto sa používa maska doby pohybu s rýchlosťou šírenia 3 km/s so smerom von od hypocentra. Vzťah medzi PGD a magnitúdovým momentom (magnitúdou)  $M_w$  potom možno podľa Crowella et al. zapísať ako

$$\log PGD = A + B \cdot M_w + C \cdot M_w \cdot \log D, \quad (2.33)$$

kde  $D$  je vzdialenosť od hypocentra v kilometroch a  $A$ ,  $B$ ,  $C$  sú regresné koeficienty.  $M_w$  potom možno inverzne vypočítať ako

$$M_{wi} = \frac{\log PGD_i - A}{B + C \cdot \log D} \quad (2.34)$$

Výsledná magnitúda zemetrasenia sa vypočíta na záver ako priemer magnitúd vypočítaných z dát jednotlivých staníc. [77]

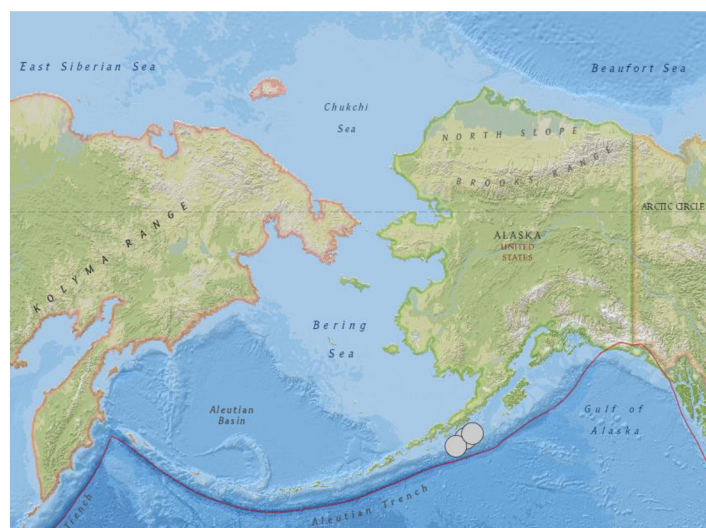
$MMI$  možno s využitím PGD (v centimetroch) vypočítať ako

$$MMI = A + B \cdot \log PGD, \quad (2.35)$$

kde  $A$  a  $B$  sú opäť regresné koeficienty. V rámci tejto práce  $MMI$  však počítané nebudú. Predmetom výpočtu sú len magnitúdy. [78]

### Charakteristika oblasti zemetrasení

Zaujímavými udalosťami sú 3 zemetrasenia, ktoré sa udiali na Aljaške v rozmedzí rokov 2020 a 2021. Časová a priestorová lokácia je charakterizovaná v tabuľke 6. Ako môžeme vidieť na obrázku 20., Aljaška sa nachádza pri pomedzí dvoch tektonických platní – toto rozhranie je vizualizované červenou čiarou. Prebieha tu subdukcia tichooceánskej tektonickej platne pod severoamerickú, pričom sa tu tichooceánska platňa pohybuje relatívne voči severoamerickej rýchlosťou 5,5 cm/rok a ako výsledok tejto aktivity sa tu nachádza Aljaško-Aleutský tektonický zlom. Primárnym dôsledkom pohybu tektonických platní je potom výskyt zemetrasení, ktoré sekundárne môžu vyvolávať vlny tsunami, či nebezpečné zosuvy pôdy. [79]



Obr. 20: Vybraté zemetrasenia pre výpočet magnitúd - sivé bodky, prevzaté [80]

Tabuľka 6: Charakteristiky vybraných zemetrasení. Magnitúda, polohová a časová lokácia, hĺbka hypocentra, upravené [80]

Earthquake			
$M_w$	Location (Alaska)	Start Time (UTC)	Depth [km]
8.2	- 99 km SE of Perryville	2021-07-29 6:15:49	35.0
7.6	- 99 km SE of Sand Point	2020-10-19 20:54:38	28.4
7.8	- 99 km SSE of Perryville	2020-07-22 6:12:44	28.0

### 3 SPRACOVANIE

#### 3.1 Stratégia spracovania

Spracovanie meraní GNSS metódou PPP umožňuje dnes už množstvo programov a rovnako tak aj online služby. Avšak v rámci spolupráce s VÚGTK bola poskytnutá knižnica G-Nut pre spracovanie, z čoho boli využité softwary *Anubis* pre overenie kvality dát a *Geb* pre samotný výpočet PPP. Software *Geb* je momentálne vo vývoji a tak nie je zatiaľ verejne dostupný.

Pred vlastným spracovaním či už kontroly kvality dát, alebo použitia metódy PPP k výpočtu polohy bolo nutné získať navigačné a observačné RINEXy a rovnako tak sú dôležité aj podporné súbory, ktoré sú nevyhnutné pre korekciu systematických vplyvov.

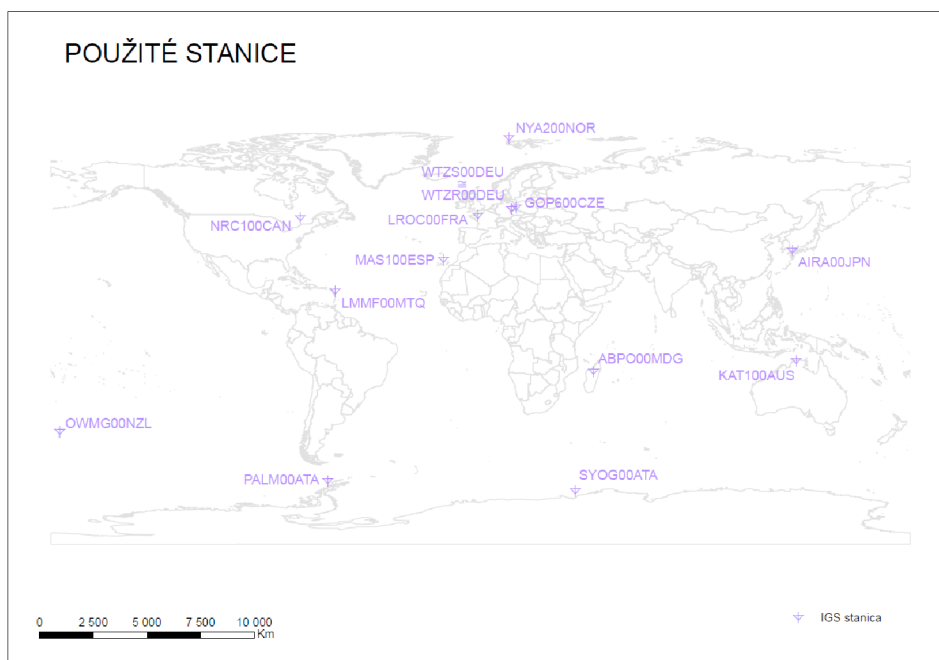
Tabuľka 7: Použité typy súborov, ich formát a poskytovateľ

TYP SÚBORU	FORMÁT	POSKYTOVATEĽ
navigačná správa	RINEX	Pecný
observačný súbor	Hatanaka compact RINEX	CODE
korekcie hodín družíc	clock RINEX/30s	CODE
efemeridy družíc	SP3	CODE
finálne biasy	Bias-SINEX	CODE
kalibrácie fázových centier	ANTEX	IGS

Navigačné správy boli získané prostredníctvom observatória Pecný, dostupné na odkaze <https://www.astro.oma.be/doi/GOP-BRDC/GOP-BRDC-ARCH.html>. Observačné súbory boli získané pre tieto stanice:

- ABPO00MDG,
- AIRA00JPN,
- GOP600CZE,
- KAT100AUS,
- LMMF00MTQ,
- LROC00FRA,
- MAS100ESP,
- NRC100CAN,
- NYA200NOR,
- OWMG00NZL,
- PALM00ATA,
- SYOG00ATA,
- WTZR00DEU,
- WTZS00DEU.

Dáta *repro3* poskytované *Center for Orbit Determination in Europe (CODE)*, ktorý je súčasťou Astronomického inštitútu bernskej univerzity a je zároveň jedným z analytických centier IGS, možno získať zo serveru <https://boris.unibe.ch/135946/>. Tieto súbory možno nájsť pod označením kombinácie poradového čísla GPS týždňa a GPS dňa. Súbor *ANTEX* možno získať od poskytovateľa IGS na adrese <https://files.igs.org/pub/station/general/igs14.atx>



Obr. 21 Schéma použitých IGS staníc vo vlastnom spracovaní PPP

### 3.2 Kontrola kvality dát

Kontrola kvality dát je dôležitá pre rozhodovanie o použiteľnosti dát. Boli vybraté dáta z roku 2020, na ktorých bola prevedená kontrola kvality dát a následne PPP. Pre kontrolu kvality dát bol využitý program *Anubis*, v rámci ktorého boli testované jednotlivé GNSS. Pre prácu boli testované systémy GPS, GLONASS a Galileo (systém BeiDou bol z ďalšieho grafického spracovania vynechaný).

*Anubis* bol spustený vo Full mode, ktorý poskytuje rozsiahle kontrolné súhrnné štatistické dáta s povinnými vstupnými navigačnými dátami. Hlavička pre súhrnnú štatistiku zo súboru XTR vyzerá nasledovne:

## Výpis 1: Hlavička pre súhrnnú štatistiku QC

```
#===== Summary statistics
#TOTSUM First_Epoch_----- Last_Epoch_----- Hours_ Sample MinEle #_Expt #_Have %Ratio o/slps woElev Exp>10 Hav>10 %Rt>10
=TOTSUM 2020-12-31 00:00:00 2020-12-31 23:59:30 24.00 30.00 0.02 148580 120525 81.12 161 6201 114833 104528 91.03
```

príčom jednotlivé indikátory sú

- First Epoch prvá observácia,
- Last Epoch posledná observácia,
- Hours dĺžka dátového okna vyjadrená v hodinách/deň,
- Sample interval záznamu,
- MinEle minimálny elevačný uhol,
- # Expt počet očakávaných pozorovaní,
- # Have počet existujúcich pozorovaní,
- %Ratio pomer existujúcich a očakávaných pozorovaní,
- o/slps počet observácií na jeden cycle slip,
- woElev počet pozorovaní bez dostupného elevačného uhla,
- Exp>10 počet očakávaných pozorovaní s elevačnou maskou viac ako nastavená,
- Hav>10 počet existujúcich pozorovaní s elevačnou maskou viac ako nastavená,
- %Rt>10 pomer existujúcich a očakávaných pozorovaní s elevačnou maskou viac ako nastavená.

,=TOTSUM' poskytuje základné charakteristiky cez všetky GNSS, z ktorých boli vybraté pre štatistické hodnotenie *Hours*, *MinEle* a *%Ratio*. Dodatočné riadky hlavičky s prefixom napríklad pre GPS,=GPSSUM' v podobe:

## Výpis 2: Indikátory pre jednotlivé GNSS

```
#GNSSUM 2020-12-31 00:00:00 Epoch_Statistics_ Excl_Epochs&Satellites_ CycleSlips/Interruptions_And_Other_Discontinuities Code_Multipath_Mean_...
#GNSSUM 2020-12-31 00:00:00 ExpEp HavEp UseEp xCoEp xPhEp xCoSv xPhSv csAll csEpo csSat csSig nSlp nJmp nGap nPcs mp1 mp2 mp3 ...
=GPSSUM 2020-12-31 00:00:00 2880 2880 2880 0 0 360 400 471 0 171 271 29 0 0 0 26.0 24.3 - ...
=GALSUM 2020-12-31 00:00:00 2880 2880 2880 0 0 15 15 228 0 200 22 6 0 0 0 19.7 - - ...
=GLOSUM 2020-12-31 00:00:00 2880 2880 2880 0 0 2997 3016 639 0 254 118 267 0 0 0 30.1 34.7 - ...
=BDSSUM 2020-12-31 00:00:00 2880 2880 2880 0 0 2435 2488 3471 0 790 491 2190 0 0 0 - 46.8 - ...
```

poskytujú dáta pre jednotlivé GNSS, z čoho záujmovou hodnotou pre túto diplomovú prácu boli hodnoty *nSlp*, ktoré vyjadrujú počet identifikovaných fázových skokov počas prebiehajúceho merania. Výstupné údaje sú vo formáte XTR, pričom ďalšími možnosťami výstupu sú formáty XML, či JSON. [71]

Dáta z observačných súborov boli spracovávané denne v dobe 24 hodín s 30 sekundovým intervalom záznamu. Automatizáciu spracovania dát zabezpečil konfiguračný súbor *00QC*, ktorý môžeme vidieť ako prílohu na CD. Konfiguračný súbor zahŕňa všetky potrebné vstupné nastavenia, pričom do príkazového riadku je pri spustení nutné zadať počiatkovú epochu a konečnú epochu a zoznam permanentných staníc. Čiastočné skripty boli vyhotovované v rámci aplikácie Ubuntu, ktorá tvorí Windows

subsystém pre Linux. Pre množstvo dát a časovú náročnosť spracovania prebiehali samotné výpočty na serveroch VÚGTK.

### 3.3 Nastavenie programu Geb

Pre spracovanie v programe *G-Nut/Geb* boli využité 4 kombinácie konfigurácií, pričom pre riešenie PPP aj PPP-AR boli využité nekombinované merania a taktiež kombinácia ionosphere-free. Vybrané z nastavení možno vidieť v nasledujúcich tabuľkách. Celý konfiguračný súbor *00PPPAR\_RA* pre metódu PPP-AR s nekombinovanými observáciami, pomocou ktorého je spúšťaný výpočet pre deň 1.1.2020, je možné vidieť v prílohách.

Tabuľka 8: Nastavenie programu Geb pre metódu PPP

Parameter	Hodnota	Parameter	Hodnota
Software	G-Nut/Geb	Software	G-Nut/Geb
Metóda spracovania	PPP	Metóda spracovania	PPP
Kombinácia	nekombinované	Kombinácia	iono-free
Efemeridy	CODE MGEX	Efemeridy	CODE MGEX
Riešenie neznámych	square root covariance filter	Riešenie neznámych	square root covariance filter
GNSS	GPS, Galileo	GNSS	GPS, Galileo
Sampling	30s	Sampling	30s
Ionosféra	VTEC	Ionosféra	VTEC
Váhy	P = 0,3m L = 3mm	Váhy	P = 2m L = 1cm
Troposféra	ZTD: Saastamoinen	Troposféra	ZTD
Mapovacie funkcie	GMF gradienty: CHEN_HERRING	Mapovacie funkcie	GMF gradienty: CHEN_HERRING
Elevačná maska	7°	Elevačná maska	7°
Ambiguity	float	Ambiguity	float
Slapy	IERS2010	Slapy	IERS2010

Tabuľka 9: Nastavenie programu Geb pre metódu PPP-AR

Parameter	Hodnota	Parameter	Hodnota
Software	G-Nut/Geb	Software	G-Nut/Geb
Metóda spracovania	PPP-AR	Metóda spracovania	PPP-AR
Kombinácia	nekombinované	Kombinácia	iono-free
Efemeridy a hodiny	CODE MGEX	Efemeridy	CODE MGEX
Riešenie neznámych	square root covariance filter	Riešenie neznámych	square root covariance filter
GNSS	GPS, Galileo	GNSS	GPS, Galileo
Sampling	30s	Sampling	30s
Ionosféra	VTEC	Ionosféra	VTEC
Váhy	P = 0,3m L = 3mm	Váhy	P = 2m L = 1cm
Troposféra	ZTD: Saastamoinen	Troposféra	ZTD
Mapovacie funkcie	GMF gradienty: CHEN_HERRING	Mapovacie funkcie	GMF gradienty: CHEN_HERRING
Elevačná maska	7°	Elevačná maska	7°
Ambiguity	celočíselné	Ambiguity	celočíselné
Slapy	IERS2010	Slapy	IERS2010



System GLONASS nebol použitý z dôvodu, že program Geb nepodporuje pri tomto systéme fixovanie celočíselných ambiguit. Aby boli výsledky konzistentné ako pre PPP tak aj pre PPP-AR a aby bolo možné výsledky porovnať, boli využité len systémy GPS a Galileo. Taktiež je táto kombinácia presnejšia ako GLONASS, ktorý by mal negatívny vplyv na výsledky.

Douša a Václavovič [69] pri použití rozšíreného Kalmanovho filtra a implementácií Rauch-Tung-Striebel vyhladenia (RTS) zistili, že RTS trpí významnou numerickou nestabilitou pri určovaní kovariančnej matice. Preto vylepšili spracovanie pomocou algoritmov na základe *Singular Value Decomposition* (SVD), ktorý je robustnejší. Z výsledkov dát sa zistilo, že numerická stabilita bola zlepšená vo všetkých prípadoch pozorovaní z množstva permanentných staníc. Navyše (re)konvergencia parametrov bola vždy úspešne eliminovaná. A preto je pri riešení neznámych použitý *square root covariance filter*.

Dáta zo súboru vybraných permanentných staníc boli spracované v dennom režime cez dáta pre celý rok 2020 v intervale záznamu 30 sekúnd. Pre transformáciu výsledných súradníc do lokálneho topocentrického systému NEU pre vhodnejšiu reprezentáciu dát a pre získanie charakteristík presnosti, bol použitý program G-Nut/Apep, kde boli ako vstupné dáta použité buď \*.flt alebo \*.smt súbory získané ako výstup zo spracovania dát v G-Nut/Geb. Podobne ako pri QC bolo spracovanie zautomatizované definovaním prvej a poslednej epochy a zoznamu staníc v rámci konfiguračného súboru. Aplikácia G-Nut/Apep je taktiež stále vo vývoji a primárne slúži na analýzu časových radov. Ukážka konfiguračného súboru Apep pre analýzu konvergencie nekombinovaných meraní metódou PPP-AR pre vybranú stanicu GOP6 a deň 1.1.2020 je možné vidieť v prílohách ako 00APEPAR\_RA.

Pre výpočet magnitúd zemetrasení sa konfigurácia líši a to z dôvodu, že 30 sekundové observácie nie sú poskytované v dostatočnej frekvencii. Pre tento prípad je nutné využiť dáta so vzorkovaním 1Hz. Ďalšou zmenou je identifikátor *crd\_white* ktorému bola nastavená hodnota „100“, čo indikuje výslednú presnosť súradníc pre kinematický režim. Konfiguračný súbor z programu Geb pre výpočet magnitúd zemetrasení je v prílohách pod označením EEPPPAR\_RA pre metódu PPP-AR s nekombinovanými observáciami pre deň 22.07.2020, pričom zoznam staníc bol definovaný pri spustení programu Geb z externého súboru.

## 4 VÝSLEDKY

Z nasledujúcich grafických výsledkov možno vo všeobecnosti konštatovať, že najpresnejšou absolútnou metódou určovania polohy je metóda Precise Point Positioning s celočíselným riešením ambiguít bez použitia lineárnej kombinácie ionosphere-free, ktorá do výsledkov zanáša šum, resp. nepoužíva sa žiadna lineárna kombinácia.

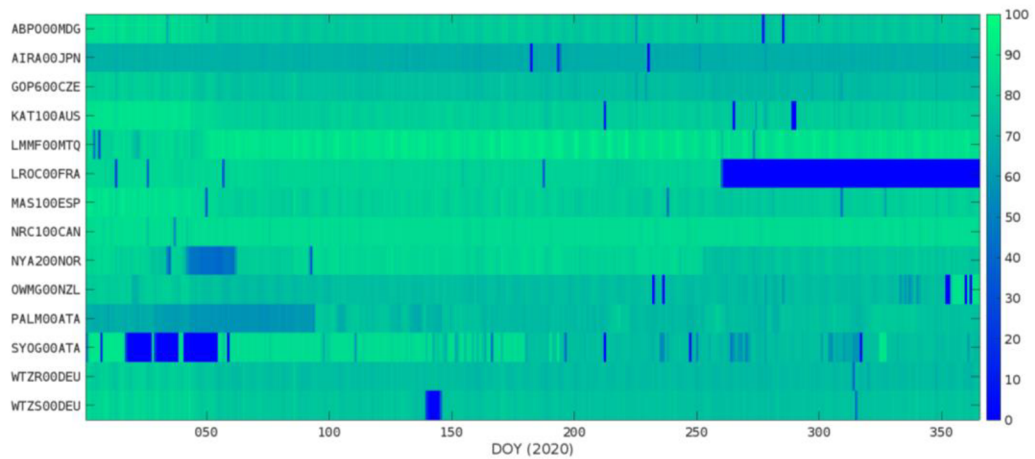
### 4.1 Kvalitatívne hodnotenie dát

Z hľadiska kvalitatívneho hodnotenia dát boli vybraté ukazovatele hodín, respektíve doby, počas ktorej bol signál prijímaný, ďalej hodnota minimálnej elevácie, pričom priemerné hodnoty týchto indikátorov sú pre každú stanicu zhrnuté v nasledovnej tabuľke 10.

Tabuľka 10: Výsledky QC - hodiny, minimálna elevácia

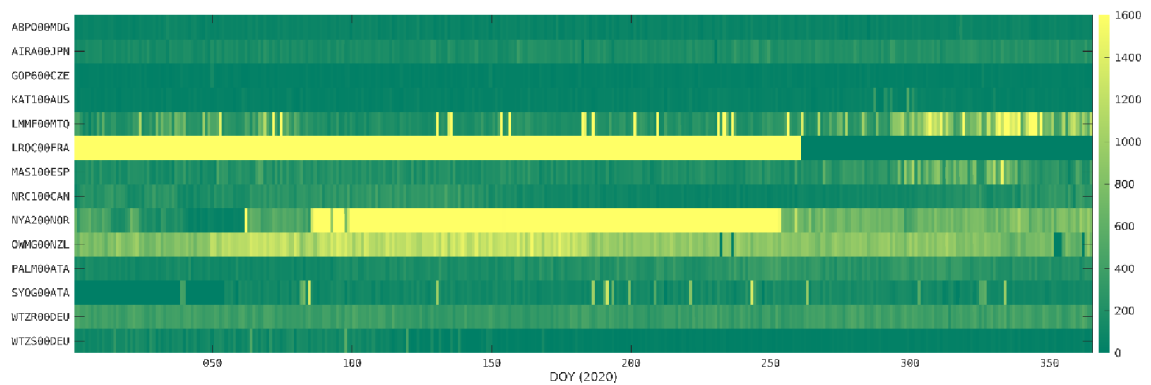
STATION NAME	AVERAGE VALUE	
	Hours [hrs]	minEle [°]
ABPO00MDG	23,86	0
AIRA00JPN	23,80	4,88
GOP600CZE	23,96	0
KAT100AUS	23,73	0,01
LMMF00MTQ	23,91	0,03
LROC00FRA	16,93	0,22
MAS100ESP	23,90	0
NRC100CAN	23,97	2,81
NYA200NOR	23,88	0,51
OWMG00NZL	23,52	0,03
PALM00ATA	23,99	0,37
SYOG00ATA	20,86	4,27
WTZR00DEU	23,96	0,01
WTZS00DEU	23,62	0,02

Všetky stanice vykazujú približne rovnaký čas, až na stanicu LROC vo Francúzsku, ktorá od dátumu 18.9.2020 do konca roka neposkytovala dáta a to odzrkadlilo na priemernej hodnote a ďalej je tento fakt viditeľný aj z ostatných kvalitatívnych výsledkov. Takisto nižšiu hodnotu možno vidieť aj pri stanici SYOG na Antarktíde. V obrázku 22 0% v pomere očakávaných a existujúcich observácií v tomto prípade znamená, že neboli existujúce žiadne observácie.

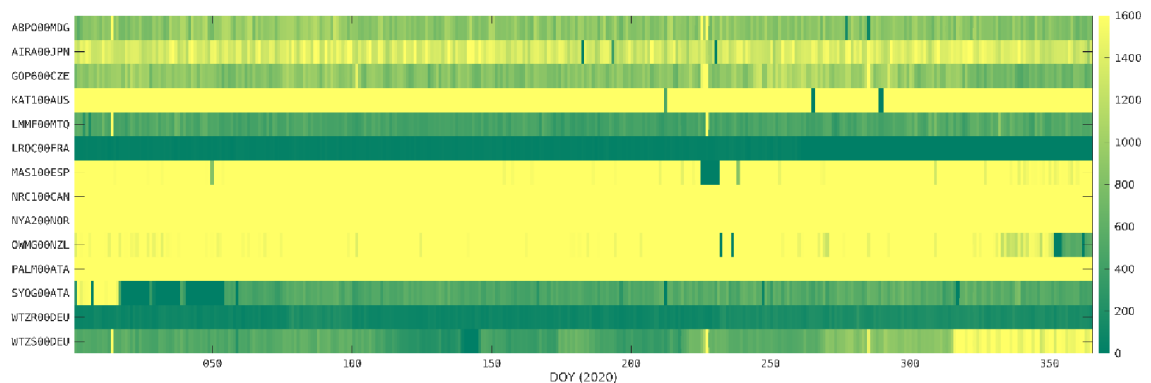


Obr. 22: Pomer existujúcich a očakávaných observácií v %

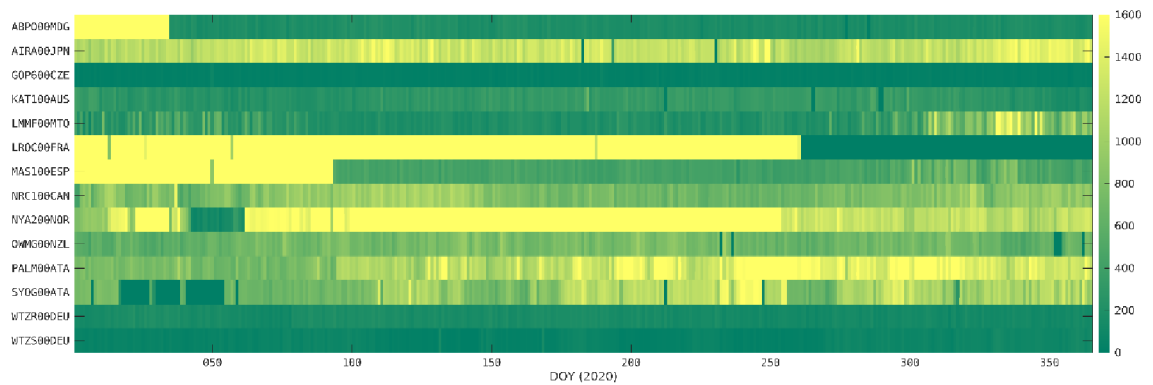
Z obrázkov 23, 24, 25 možno konštatovať pri dlhšie trvajúcej nulovej hodnote počtu cycle slips taktiež neprítomnosť dát. Zelené – nulové hodnoty viditeľne korešpondujú pre obe vyššie spomenuté stanice v prípade systému GPS (obrázok 25). Pre francúzsku stanicu je viditeľná neprítomnosť údajov aj pre systéme Galileo.



Obr. 23: Počet cycle slips pre systém Galileo



Obr. 24: Počet cycle slips pre systém GLONASS



Obr. 25: Počet cycle slips pre systém GPS

## 4.2 Presnosť konvergencie

Zo súboru \*.dat.1d pre každú stanicu boli pre grafické znázornenie vybraté údaje o štandardnej odchýlke, tieto grafy sú súčasťou príloh na CD. V tabuľke sú uvedené maximálne, minimálne a priemerné hodnoty *root mean square* (RMS). Zaujímavé hodnoty boli vybraté z riadka # Repeatability, pričom RMS patria stĺpce 7 (N) 8 (E) 9 (U) a STD patria stĺpce 10 (N) 11 (E) 12 (U). Hodnoty v riadku # CRD+VEL model vyjadrujú hodnoty posunu voči epoche definovanej v tomto riadku a hodnoty rýchlosti tohto posunu.

Výpis 3: Výsledné štatistiky v súbore \*.dat.1d

```
#-----
# Data modeling: 1 sites
#-----
# CRD+VEL model: WTZS00DEU 2010-01-01 00:00:04 0.0498 0.0673 -0.3429 | 0.0153 0.0249 -0.0028
# Statistics 0: WTZS00DEU 0.0001 0.0001 -0.0001 | 0.0022 0.0023 0.0061 | 0.0022 0.0023 0.0061 | 360 / 0
# Repeatability: WTZS00DEU 0.0001 0.0001 -0.0001 | 0.0022 0.0023 0.0061 | 0.0022 0.0023 0.0061 | 360 / 0
```

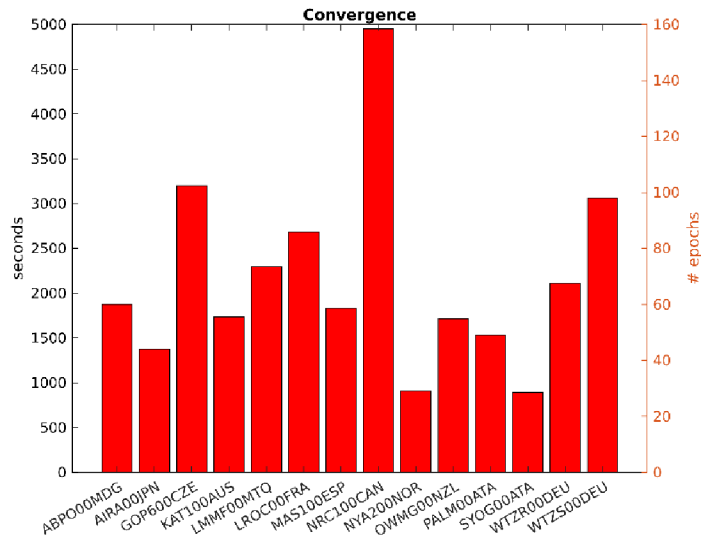
Tabuľka 11: Výsledné charakteristiky presnosti jednotlivých metód

KOMBINÁCIA	iono-free		nekombinované	
METÓDA RMS [mm]	PPP	PPP-AR	PPP	PPP-AR
MAX <sub>N</sub>	3,9	3,8	3,8	3,7
MAX <sub>E</sub>	4,7	3,2	4,9	3,2
MAX <sub>U</sub>	10,0	9,5	9,8	9,4
MIN <sub>N</sub>	2,0	1,9	2,0	1,8
MIN <sub>E</sub>	2,0	1,5	2,0	1,5
MIN <sub>U</sub>	4,1	3,8	4,1	3,7
AVG <sub>N</sub>	2,6	2,4	2,5	2,4
AVG <sub>E</sub>	2,9	2,0	2,9	2,0
AVG <sub>U</sub>	6,7	6,4	6,7	6,4

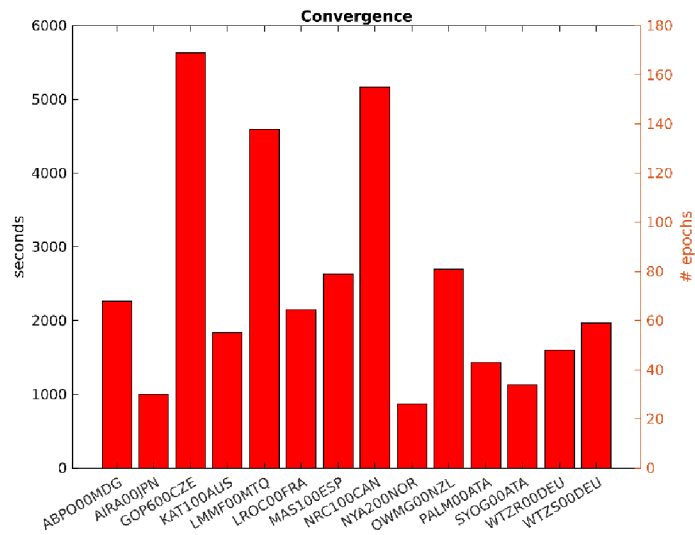
Z tabuľky je viditeľné, že hodnoty charakteristiky presnosti v podobe RMS sú najmenšie pre metódu spracovania PPP s celočíselným riešením ambiguit bez lineárnej kombinácie, avšak v priemere je zrovnateľná s rovnakou metódou za použitia lineárnej kombinácie ionosphere-free. Naopak najväčšie hodnoty dosahuje klasická metóda PPP s použitou ionosphere-free lineárnou kombináciou. Toto je dôsledkom faktov, že PPP s celočíselným riešením ambiguit poskytuje presnejšie výsledky a vplyvom presnejšieho nekombinovaného riešenia oproti lineárnej kombinácii ionosphere-free je PPP-AR s nekombinovaným riešením najvhodnejšia a najpresnejšia voľba. Chyby vo výškovej zložke vykazujú vo všeobecnosti väčšie hodnoty ako v polohovej zložke.

### 4.3 Rýchlosť konvergenzie

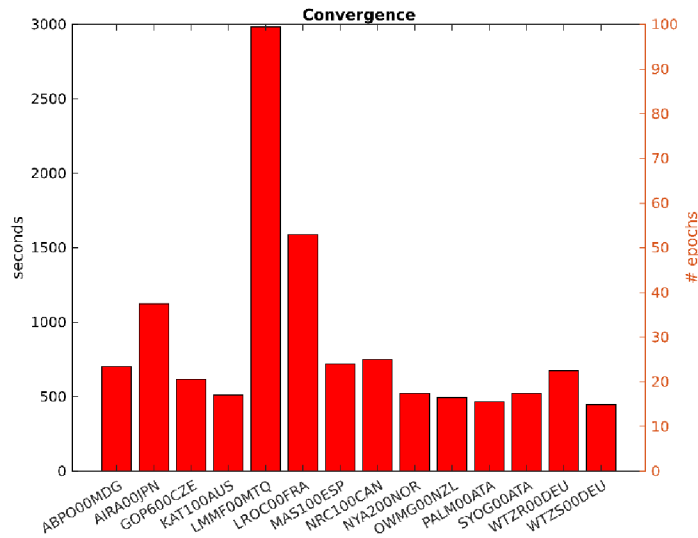
Nasledujúce grafy vyjadrujú rýchlosť konvergenzie ako v sekundách, tak aj v počte epoch. Konvergenzia sa považuje za úspešnú, ak vstupnú podmienku  $conv\_hpe = "0.03"$  a  $conv\_vpe = "0.03"$ , respektíve horizontálna a vertikálna presnosť dosiahne 3 cm a zároveň podmienku splní aspoň 10 po sebe nasledujúcich epoch.



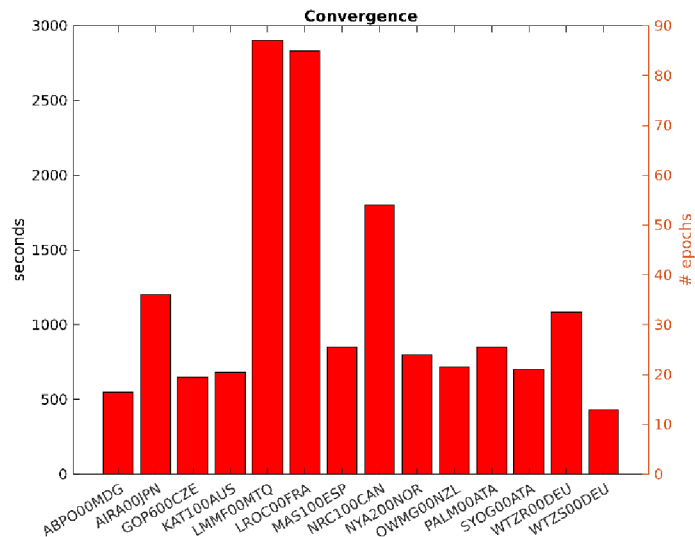
Obr. 26: Rýchlosť konvergenie – metóda PPP bez kombinácie



Obr. 27: Rýchlosť konvergenie – metóda PPP s ionosphere-free kombináciou

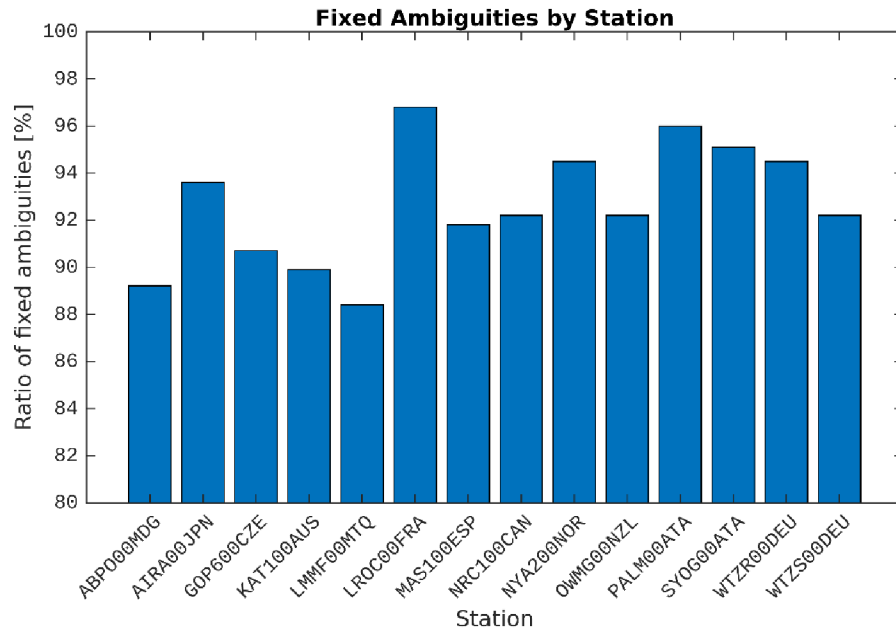


Obr. 28: Rýchlosť konverencie – metóda PPP-AR bez kombinácie



Obr. 29: Rýchlosť konverencie – metóda PPP-AR s ionosphere-free kombináciou

Opäť možno z grafov vidieť a konštatovať, že metóda PPP-AR konverguje vo všeobecnosti rýchlejšie, respektíve rýchlejšie dosahuje požadovanej presnosti ako metóda PPP. Avšak pri metóde PPP-AR bez kombinácie si môžeme všimnúť dlhú dobu konverencie na stanici LMMF00MTQ, čo mohlo zapríčiniť menšie percento epoch so zafixovanými ambiguitami, vid' obrázok 30. Kde je možné taktiež vidieť, že stanice s L1X a L5X observáciami pre systém Galileo (prijímače Trimble a Javad) vykazujú oproti prijímačom typu L1C a L1Q (Leica, Septentrio prijímače) menej fixovaných epoch.



Obr. 30: Percentuálny podiel fixovaných ambiguit pre metódu PPP-AR bez kombinácie (medián z hodnôt pre celý rok)

#### 4.4 Výpočet magnitúd

Tabuľky 12 a 13 zobrazujú výsledky vypočítaných magnitúd s ich odchýlkami, ktoré boli vypočítané ako

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta M_{wi}^2}{n}}, \quad (4.1)$$

kde  $\Delta M_{wi}$  je rozdiel referenčnej hodnoty (hodnota z USGS) a hodnoty určenej z danej stanice,  $n$  je počet staníc, z ktorých boli magnitúdy určované (v tabuľke je tento počet označený #S).

V ľavej časti tabuliek je charakterizované samotné zemetrasenie. pričom hodnota magnitúdy v tejto časti je referenčná hodnota z USGS, voči ktorej sú dáta vyhodnocované. Priemerný rozdiel vypočítaných hodnôt a referenčnej pre metódu PPP s ionosphere-free kombináciou je 0,043  $M_w$  a pre metódu PPP bez lineárnej kombinácie je táto hodnota 0,023  $M_w$ . Pre metódu PPP-AR bez kombinácie je rozdiel 0,013  $M_w$  a pre rovnakú metódu s lineárnou kombináciou ionosphere-free je to hodnota 0,27  $M_w$ . Z čoho možno opäť konštatovať, že najpresnejšou voľbou je nekombinovaná metóda PPP-AR.



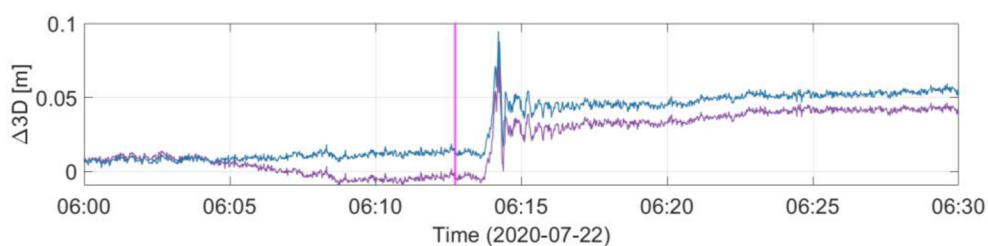
Tabuľka 12: Výsledné určované magnitúdy metódou PPP s ich odchýlkami a počtom staníc, z ktorých boli tieto hodnoty určované

Earthquake			PPP					
			ionosphere-free			uncombined		
			$M_w$	RMS	#S	$M_w$	RMS	#S
$M_w$	8.2	- 99 km SE of Perryville	8,22	0,18	42	8,21	0,16	42
$M_w$	7.6	- 99 km SE of Sand Point	7,64	0,25	34	7,62	0,21	34
$M_w$	7.8	- 99 km SSE of Perryville	7,87	0,23	40	7,84	0,20	40

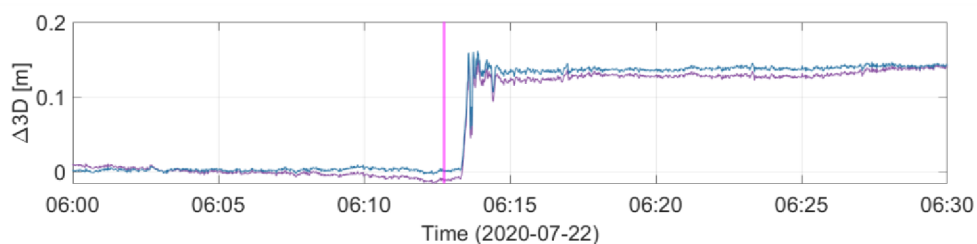
Tabuľka 13: Výsledné určované magnitúdy metódou PPP-AR s ich odchýlkami a počtom staníc, z ktorých boli tieto hodnoty určované

Earthquake			PPP-AR					
			ionosphere-free			uncombined		
			$M_w$	RMS	#S	$M_w$	RMS	#S
$M_w$	8.2	- 99 km SE of Perryville	8,21	0,16	42	8,2	0,15	42
$M_w$	7.6	- 99 km SE of Sand Point	7,63	0,20	34	7,61	0,21	34
$M_w$	7.8	- 99 km SSE of Perryville	7,84	0,20	40	7,83	0,18	40

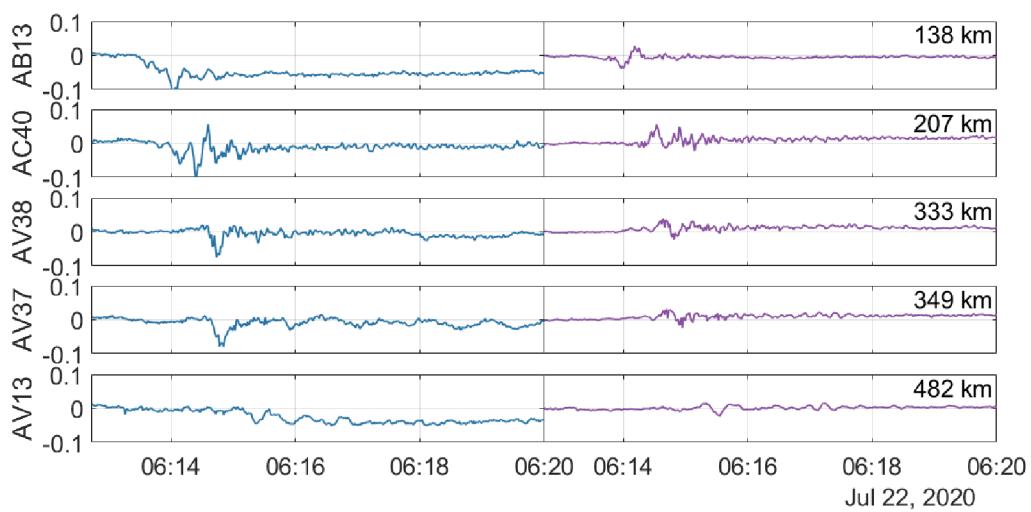
Obrázky 31 až 33 odkazujú na zemetrasenie  $M_w = 7.8$  – 99 km SSE of Perryville, pričom obrázky 31 - stanica AC25 a 32 – stanica AC28 ukazujú priebeh polohových odchýlok na vybraných staniaciach a obrázok 33 vyjadruje priebeh seizmických vln v smere east (modrá farba) a v smere north (fialová farba).



Obr. 31: Porovnanie určenia odchýlok 3D polohy metódou PPP (fialová) a PPP-AR (modrá) na stanici AC25



Obr. 32: Porovnanie určenia odchýlok 3D polohy metódou PPP (fialová) a PPP-AR (modrá) na stanici AC28



Obr. 33: Priebeh seizmických vln na staniciach AB13, AC40, AV38, AV37 a AV13

## ZÁVER

Zámerom tejto diplomovej práce bolo objasnenie problematiky GNSS metódy PPP a jej celočíselné riešenie ambiguit. Okrem celočíselného riešenia bola časť práce venovaná aj float riešeniu. Samotnému praktickému riešeniu predchádzal teoretický úvod do problematiky, ktorý zahŕňa predovšetkým dôležité systematické vplyvy a ich spôsoby eliminácie. Cieľom práce bolo porovnať PPP (float riešenie) a PPP s celočíselným riešením ambiguit (PPP-AR). Pozorovanými faktormi boli primárne presnosť a rýchlosť konvergenencie. Tieto boli vyhodnotené na výberovej množine permanentných staníc siete IGS (*International GNSS Service*). Dáta boli spracované v rámci časového úseku celého roka 2020. V ďalšej časti boli táto výberová množina staníc využitá pre samotný výpočet PPP a PPP-AR pre kombinácie iono-free a nekombinované observácie. V poslednej časti praktického spracovania bola metóda PPP/PPP-AR využitá pre spracovanie dát zaznamenaných počas vybraných zemetrasení na Aljaške. V tejto súvislosti je posúdená využiteľnosť daných metód pre vyhodnotenie dát v rámci aplikácie metódy PPP v seizmológii.

Navigačné a observačné dáta a ostatné podporné produkty boli získané od rôznych inštitúcií a boli spracované v rámci softwarovej knižnicei G-Nut. Pre kontrolu kvality dát bola využitá aplikácia Anubis a pre výpočet metódy PPP a PPP-AR aplikácia Geb, ktorá je stále vo vývoji a následne boli tieto výsledky pomocou aplikácie Apep spracované a boli získané výsledky súradnicových odchýlok v systéme NEU pre vyjadrenie lokálnych dát pre každú stanicu. Dáta boli spracovávané využitím podporných skriptov a ostatných programov pre automatizáciu spracovania a grafické vyhodnotenie.

Z dosiahnutých výsledkov možno konštatovať využiteľnosť metódy PPP v klasických geodetických aplikáciách s dostatočnou presnosťou (do 1 cm), síce s dlhším konvergenčným časom ako je pri diferenčných metódach bežné. V porovnaní vykazovala metóda PPP s celočíselným riešením ambiguit konzistentnejšie a presnejšie výsledky oproti metóde PPP. Presnejšie dáta ako pri kombinácii ionosphere-free boli v oboch prípadoch získané použitím nekombinovaných observácií.

Pri odhadovaní magnitúdy zemetrasenia je zahrnutie GNSS metódy PPP-AR s intervalom záznamu 1 sekunda ku konvenčným seizmografickým a akcelerometrickým meraniam s priemernou výslednou presnosťou určenia magnitúdy  $RMS = 0,18 M_w$  výhodná a môže mať pozitívny vplyv pri prevencii a včasnej detekcii a varovaní pred zemetrasením. Výsledné hodnoty získané výpočtom z GNSS meraní na vybraných staniach sa pri tejto metóde líšili od hodnoty referenčnej maximálne o  $0,03 M_w$ .

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] ORVISKÁ, T. *Zaměření a vyhotovení účelové mapy velkého měřítka v k. ú. Malhostovice - lokalita Zlámaniny část A*. Brno, 2021. 50 s., 22 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Jiří Vondrák, Ph.D.
- [2] Positioning by GNSS, GPS, Galileo satellites.. How does it work?. In: Teria [online]. 20.12.2021 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://www.research-teria.com/wp-content/uploads/2020/03/sch%C3%A9ma\\_TERIA-SAT\\_2018\\_EN-scaled-1536x952.jpg](https://www.research-teria.com/wp-content/uploads/2020/03/sch%C3%A9ma_TERIA-SAT_2018_EN-scaled-1536x952.jpg)
- [3] GPS Constellation. United States Coast Guard: Navigation Center [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.navcen.uscg.gov/gps-constellation>
- [4] Space Segment. GPS.gov [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [5] Оценка технических характеристик GPS. In: Прикладной потребительский центр Госкорпорации "Роскосмос" [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://glonass-iac.ru/images/pdop/COUNT1\\_G\\_LAST.png?d0a3eff01f6c903f1b53e1d93d24dc72](https://glonass-iac.ru/images/pdop/COUNT1_G_LAST.png?d0a3eff01f6c903f1b53e1d93d24dc72)
- [6] Control Segment. In: GPS.gov [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- [7] GPS Applications. In: GPS.gov [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.gps.gov/applications/>
- [8] What Is Galileo?. In: The European Space Agency [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What\\_is\\_Galileo](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo)
- [9] Galileo High Accuracy Service (HAS). In: European Union Agency for the Space Programme [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>
- [10] Galileo system. In: Defence Industry and Space [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/galileo/galileo-system\\_en](https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/galileo/galileo-system_en)
- [11] Оценка технических характеристик Galileo. In: Прикладной потребительский центр Госкорпорации "Роскосмос" [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://glonass-iac.ru/images/pdop/COUNT1\\_E\\_LAST.png?22ccb4dce979a0c9a1eeca94002bfa6f](https://glonass-iac.ru/images/pdop/COUNT1_E_LAST.png?22ccb4dce979a0c9a1eeca94002bfa6f)

- [12] About GLONASS. In: Прикладной потребительский центр Госкорпорации "Роскосмос" [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://glonass-iac.ru/en/about\\_glonass/](https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/)
- [13] Оценка технических характеристик ГЛОНАСС. In: Прикладной потребительский центр Госкорпорации "Роскосмос" [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: [https://glonass-iac.ru/images/pdop/COUNT1\\_R\\_LAST.png?b85374abc41d863c34eb043bd15666a9](https://glonass-iac.ru/images/pdop/COUNT1_R_LAST.png?b85374abc41d863c34eb043bd15666a9)
- [14] Glonass alebo GPS - klady a zápory. GPS a glonass: čo to je, ako to funguje a aký je rozdiel. In: Hddrecover [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://hddrecover.ru/sk/browsers/glonass-ili-gps-plyusy-i-minusy-gps-i-glonass-chto-eto-kak-rabotaet/>
- [15] System. In: BeiDou Navigation Satellite System [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>
- [16] Состав и состояние орбитальной группировки Beidou. In: Прикладной потребительский центр Госкорпорации "Роскосмос" [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://glonass-iac.ru/beidou/sostavOG/>
- [17] Commercial Satellite Navigation For Autonomy. In: NASA Ames Research Center [online]. 5.5.2021 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/space\\_portal\\_tyler\\_reid.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/space_portal_tyler_reid.pdf)
- [18] SEEBER, G., 2003. *Satellite Geodesy*. 2nd completely revised and extended edition. Berlin: Walter de Gruyter. ISBN 3-11-017549-5.
- [19] Positioning by GNSS, GPS, Galileo satellites.. How does it work?. In: Teria [online]. 20.12.2021 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.reseau-teria.com/wp-content/uploads/2019/04/POSITIONNEMENT-GNSS-SPHERE.png>
- [20] NOSEK, J. *Testování metody Precise Point Positioning*. Brno, 2020. 95 s., 5 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
- [21] HOFMANN-WELLENHOF, B. , LICHTENEGGER, H. , WASLE, E., 2008. *GNSS—global navigation satellite systems*. 2nd completely revised and extended edition. Springer. ISBN 978-3-211-73012-6.
- [22] SRINIVAS, V. S., YEDUKONDALU, K., 2019. Code-phase based combined GPS-Galileo positioning using Ionosphere-free linear combination *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, New Delhi, India, 2019, s. 1-4, doi: 10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738477. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8738477>
- [23] YU, Z., LI, Z. and WANG S., 2015. An Imaging Compensation Algorithm for Correcting the Impact of Tropospheric Delay on Spaceborne High-Resolution SAR. in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 9, s. 4825-

4836. doi: 10.1109/TGRS.2015.2411261. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7067423>
- [24] XIE, X., ZENG, D. and LONG T., 2013. Regional accuracy analysis of tropospheric delay error models. *IET International Radar Conference 2013*, Xi'an, 2013, s. 1-6, doi: 10.1049/cp.2013.0522. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6624686>
- [25] DONG, X., YANG, L., ZHU, Q., GUO, C., ZHAO, Z. and LIN, L., 2018. A Method of Retrieving Tropospheric Refractivity Above Ocean Surface using GNSS. *12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, Hangzhou, China, 2018, s. 1-4, doi: 10.1109/ISAPE.2018.8634353. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8634353>
- [26] X. Zhou, L. Yan, W. Pan, B. Luo, X. Zou and Y. Peng, 2013. Tropospheric error correction in passive location systems based distributed fiber sensor array. *12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, Chengdu, China, 2013, s. 1-3, doi: 10.1109/ICOON.2013.6617245. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6617245>
- [28] YANG, Y., XU, T. and REN, L., 2017. A new regional tropospheric delay correction model based on BP neural network. *Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS)*, Harbin, China, 2017, s. 96-100, doi: 10.1109/CPGPS.2017.8075104. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8075104>
- [29] YU, Z., LI, Z. and WANG, S., 2015. An Imaging Compensation Algorithm for Correcting the Impact of Tropospheric Delay on Spaceborne High-Resolution SAR, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 9, s 4825-4836. doi: 10.1109/TGRS.2015.2411261. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7067423>
- [30] KAČMAŘÍK, M., et al., 2017. Inter-technique validation of tropospheric slant total delays, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2183–2208. doi: 10.5194/amt-10-2183-2017. Dostupné z: <https://amt.copernicus.org/articles/10/2183/2017/amt-10-2183-2017.pdf>
- [31] BÖHM, J., NIELL, A., TREGONING P., SCHUH, H., 2006. Global mapping function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys Res Lett*, doi:10.1029/2005GL025546. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL025546>
- [32] ROTHACHER, R., 1995. *The Perturbation of the Orbital Elements of GPS Satellites through Direct Radiation Pressure and Y-bias*. In IGS workshop

- [33] Products. IGS: International GNSS Service [online]. 2020 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8738477>
- [34] PELC-MIECZKOWSKA, R.; TOMASZEWSKI, D., 2020. Space State Representation Product Evaluation in Satellite Position and Receiver Position Domain. *Sensors* 20, 3791, doi: 10.3390/s20133791. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/13/3791>
- [35] FYFE, P., KOVACH, K.L., 1991. *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces* ICD-GPS-200B-PR, s 72-73 <https://typeset.io/papers/navstar-gps-space-segment-navigation-user-interfaces-public-3vck2asdpv>
- [36] HEĆIMOVIĆ, Z., 2013. Relativistic Effects On Satellite Navigation. *Tehnički vjesnik*. 20, 1, s. 195–203. ISSN 1848-6339.
- [37] WOO, K. T., 2000. *Optimum Semicodeless Carrier-Phase Tracking of L2. Navigation*. 47, 2, s. 82–99. ISSN 00281522. doi: 10.1002/j.2161-4296.2000.tb00204.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/j.2161-4296.2000.tb00204.x>
- [38] NOSEK, J., *Precise Point Positioning s rychlým řešením ambiguit*, Brno, 2023, Pojednání o tématu Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Školitel doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
- [39] EL-HATTAB, A. I., 2013. Influence of GPS antenna phase center variation on precise positioning. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2, 2, s. 272–277. ISSN 2090-9977. doi: 10.1016/j.nrjag.2013.11.002. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1016/j.nrjag.2013.11.002>.
- [40] Schmid, R. , Rothacher, M., 2003. Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *Journal of Geodesy*. 77, 7-8, s. 440–446. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-003-0339-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00190-003-0339-0>
- [41] Bar-Sever, Y. E., 1996. A new model for GPS yaw attitude. *Journal of Geodesy*. 70, 11, s. 714–723. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/BF00867149. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00867149>
- [42] LOYER, S. et al., 2021. Exchanging satellite attitude quaternions for improved GNSS data processing consistency. *Advances in Space Research*. 68, 6, s. 2441–2452. ISSN 02731177. doi: 10.1016/j.asr.2021.04.049. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0273117721003720>
- [43] BEVIS, M. , BROWN, A., 2014. Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal of Geodesy*. 88, 3, s. 283–311. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-013-0685-5. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00190-013-0685-5>

- [44] FANG, et al., 2020. Revisit the Theory of Earth Rotation — Anatomy of the Liouville Equation. *Geophysical Journal International*, 229. doi: 10.1093/gji/ggac039. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/358343783\\_Revisit\\_the\\_Theory\\_of\\_Earth\\_Rotation\\_-\\_Anatomy\\_of\\_the\\_Liouville\\_Equation](https://www.researchgate.net/publication/358343783_Revisit_the_Theory_of_Earth_Rotation_-_Anatomy_of_the_Liouville_Equation)
- [45] PETIT, G., LUZUM, B. (eds.), 2010. *IERS Conventions*, (IERS Technical Note ; 36) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. 179 pp., ISBN 3-89888-989-6. Dostupné z: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>
- [46] JENTZSCH, G., 1996. *Earth tides and ocean tidal loading*. In: Wilhelm, H., Zürn, W., Wenzel, HG. (eds) *Tidal Phenomena. Lecture Notes in Earth Sciences*, 66. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/BFb0011461. Dostupné z: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/bfb0011461>
- [47] ZHANG, J.; WANG, X.; LI, Z.; LI, S.; QIU, C.; LI, H.; ZHANG, S.; Li, L., 2020. The Impact of Different Ocean Tide Loading Models on GNSS Estimated Zenith Tropospheric Delay Using Precise Point Positioning Technique. *Remote Sens.* 12, 3080, doi: 10.3390/rs12183080. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/18/3080>
- [48] PETROV L., BOY JP., 2004. *Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations*. *J Geophys Res* 109:B03405. doi:10.1029/2003JB002500. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228790659\\_Study\\_of\\_the\\_atmospheric\\_pressure\\_loading\\_signal\\_in\\_VLBI\\_observations\\_J\\_Geophys\\_Res\\_109\\_B03405](https://www.researchgate.net/publication/228790659_Study_of_the_atmospheric_pressure_loading_signal_in_VLBI_observations_J_Geophys_Res_109_B03405)
- [49] BIPM, 2019. *Le Système international d'unités / The International System of Units ('The SI Brochure')*. Bureau international des poids et mesures, ninth edition. ISBN 978-92-822-2272-0. Dostupné z: <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>.
- [50] MILTON, J. B., 1974. *Standard Time and Frequency: Its Generation, Control, and Dissemination by the National Bureau of Standards*. Spojené štáty americké: U.S. Government Printing Office. s. 1-18
- [51] *Modified Julian Date*. Precise Time Dept., U.S. Naval Observatory [online]. Washington, DC [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20191001174527/https://tycho.usno.navy.mil/leapsec.html>
- [52] *Bulletin C 65*. In: INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS) [online]. Paris, 09.01.2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://datacenter.iers.org/data/16/bulletinc-065.txt>



- [53] *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*, 2012. Global Positioning Systems Directorate. IS-GPS 200G. Dostupné z: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200G.pdf>
- [54] ROMERO, I. 2021. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format* [online]. Version 4.00. Dramstadt, Germany [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: [https://files.igs.org/pub/data/format/rinex\\_4.00.pdf](https://files.igs.org/pub/data/format/rinex_4.00.pdf)
- [55] WEBER, B. *Julian Day* [online]. *Orbital Mechanics & Astrodynamics* [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://orbital-mechanics.space/reference/julian-date.html#julian-day>
- [56] KAPLAN, E.D. a Ch. HEGARTY, 2017. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Third Edition. Boston|London: Artech House. ISBN -13: 973-1-63081-058-0.
- [57] ALTAMIMI, Z., REBISCHUNG, P., COLLILIEUX, X., MÉTIVIER, L., CHANARD, K. 2022 [online] *ITRF2020* [cit. 2023-05-09] IERS ITRS Center Hosted by IGN and IPGP, doi: 10.18715/IPGP.2023.LDVI0BNL. Dostupné z: <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>
- [58] ESA, 2011, *ESA navipedia* [online]. European Space Agency. Dostupné z: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations\\_between\\_ECEF\\_and\\_ENU\\_coordinates](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Transformations_between_ECEF_and_ENU_coordinates)
- [59] IGS, 2023, *IGS Network* [online]. Dostupné z: <https://network.igs.org/>
- [60] *Formats and Standards*. IGS: International GNSS Service [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://igs.org/formats-and-standards/>
- [61] VACLAVOVIC, P., 2020. Comparison and assessment of float, fixed, and smoothed precise point positioning. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. s. 329–340. ISSN 12149705. doi: 10.13168/AGG.2020.0024.
- [62] CUI, H., ZHANG, S., LI, J., 2023. An improved phase-smoothed-code algorithm using GNSS dual-frequency carrier epoch-difference geometry-free combination observations. *Advances in Space Research* 71, 8, s. 3433-3443, ISSN 0273-1177, doi: 10.1016/j.asr.2022.11.056. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117722010882>
- [63] VACLAVOVIC, P., DOUSA, J. ANUBIS- A tool for quality check of multi-GNSS observation and navigation data.
- [64] ZHAO, Q. et al., 2015. Real-time detection and repair of cycle slips in triple-frequency GNSS measurements. *GPS Solutions*. 19, 3, s. 381– 391. ISSN 1080-5370. doi: 10.1007/s10291-014-0396-2. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10291-014-0396-2>.

- [65] XU, S.; LONG, J.; WANG, J.; ZHANG, W., 2022. An Efficient Method to Compensate Receiver Clock Jumps in Real-Time Precise Point Positioning. *Remote Sens.* 14, 5222. doi: 10.3390/rs14205222. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/20/5222>
- [66] JIANGHUI G., 2022. 2 - PPP ambiguity resolution, *GNSS Seismogeodesy*, Elsevier, s. 21-105, ISBN 9780128164860, doi: 10.1016/B978-0-12-816486-0.00008-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128164860000089>.
- [67] KRATOCHVÍL, V. a J. FIXEL, 2001. *Globální systém určování polohy - GPS, Využití v geodézii*. Vojenská akademie v Brně.
- [68] MERVART, L., 1994. Sekvenční vyrovnání, kolokace, Kalmanův filtr. *Geodetický a kartografický obzor*. 40 (82), 8, s. 155–157.
- [69] VACLAVOVIC, P., DOUSA, J., 2015. Backward smoothing for precise GNSS applications. *Advances in Space Research*. 56, 8, s. 1627–1634. ISSN 02731177. doi: 10.1016/j.asr.2015.07.020. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273117715005220>
- [70] G-Nut software [online]. G-Nut Software, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://gnutsoftware.com/software>
- [71] DOUŠA, J., VÁCLAVOVIC, P. G-Nut/Anubis: User manual, 2023. Version 3 (4). G-Nut Software.
- [72] VÁCLAVOVIC, P., DOUŠA, J. G-Nut/Tefnut: User manual, 2022. Version 3 (4). G-Nut Software.
- [73] GUO, J. et al., 2018. Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*. 19, 5, s. 895–911. ISSN 1385-2256. doi: 10.1007/s11119-018-9563-8. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11119-018-9563-8>.
- [74] KOUBA, J., 2003. Measuring Seismic Waves Induced by Large Earthquakes With GPS. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 47, 4, s. 741–755. ISSN 00393169. doi: 10.1023/A:1026390618355. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1026390618355>
- [75] NOSEK, J., VÁCLAVOVIC, P. 2021, Earthquake Magnitude Estimation using Precise Point Positioning, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 906 012107, doi:10.1088/1755-1315/906/1/012107. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/906/1/012107/pdf>

- [76] Did You Feel It?. USGS: science for a changing world [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi/>
- [77] CROWELL, B.W., MELGAR, D.,BOCK, Y.,HAASE, J.S. and J. GENG, 2013. Earthquake magnitude scaling using seismogeodetic data. *Geophysical Research Letters*, 40, 23, s. 6089-6094. doi:10.1002/2013GL058391. Dostupné z: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013GL058391>
- [78] WORDEN, C.B., GERSTENBERGER, M.C., RHOADES, D.A. and D. J. WALD. 2012. Probabilistic Relationships between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 102, 1, s. 204-221. doi: 10.1177/875529302110302. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/87552930211030298>
- [79] Active Tectonics Program, 2023. The Great State of ALASKA: Department of Natural Resources [online]. State of Alaska: Division of Geological Geophysical Surveys [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://earthquake.usgs.gov/data/dyfi/>
- [80] Latest Earthquakes: Version 1.3.1. USGS: science for a changing world [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>

## ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV

Obr. 1: Schematický princíp fungovania GNSS .....	12
Obr. 2: Viditeľnosť družíc systému GPS .....	14
Obr. 3: Kontrolný a riadiaci segment systému GPS .....	14
Obr. 4: Viditeľnosť družíc systému Galileo .....	16
Obr. 5: Historický vývoj kozmického segmentu systému GLONASS .....	17
Obr. 6: Viditeľnosť družíc systému GLONASS .....	17
Obr. 7: Viditeľnosť družíc systému BeiDou .....	18
Obr. 8: Charakteristiky systému Xona .....	19
Obr. 9: Schéma princípu určovania polohy GNSS .....	20
Obr. 10: Schéma ionosférickej vrstvy .....	24
Obr. 11: Schéma troposférického vplyvu na GNSS merania .....	25
Obr. 12: Schéma troposférických vrstiev, upravené .....	26
Obr. 13: Schéma efektu multipath .....	33
Obr. 14: Presnosť určenia tranzitného času bez a s použitím quaternionov .....	34
Obr. 15: Schéma skutočného pohybu pólu .....	35
Obr. 16: Vertikálne posuny zapríčinené zaťažením oceánskeho dna .....	36
Obr. 17: Schéma referenčných staníc, ktorých dáta sa využívajú pre transformáciu medzi systémami ITRF2020 a ITRF2014 .....	41
Obr. 18: Rozmiestnenie všetkých staníc IGS ku dňu 20.5.2023(zelený krúžok - dostupné dáta posledných 10 dní, oranžový štvorec - dostupnosť dát spred 30 dní, červený trojuholník - dáta nedostupné viac ako 30 dní) .....	42
Obr. 19: Anubis operačné módy a vzťahy ku vstupným, výstupným údajom a interným procesom, prevzaté .....	56
Obr. 20: Vybraté zemetrasenia pre výpočet magnitúd - sivé bodky .....	59
Obr. 21 Schéma použitých IGS staníc vo vlastnom spracovaní PPP .....	62
Obr. 22: Pomer existujúcich a očakávaných observácií v % .....	67
Obr. 23: Počet cycle slips pre systém Galileo .....	67
Obr. 24: Počet cycle slips pre systém GLONASS .....	67
Obr. 25: Počet cycle slips pre systém GPS .....	68
Obr. 26: Rýchlosť konvergenencie – metóda PPP bez kombinácie .....	70
Obr. 27: Rýchlosť konvergenencie – metóda PPP s ionosphere-free kombináciou .....	70
Obr. 28: Rýchlosť konvergenencie – metóda PPP-AR bez kombinácie .....	71
Obr. 29: Rýchlosť konvergenencie – metóda PPP-AR s ionosphere-free kombináciou ....	71
Obr. 30: Percentuálny podiel fixovaných ambiguit pre metódu PPP-AR bez kombinácie (medián z hodnôt pre celý rok) .....	72
Obr. 31: Porovnanie určenia odchýlok 3D polohy metódou PPP (fialová) a PPP-AR (modrá) na stanici AC25 .....	73
Obr. 32: Porovnanie určenia odchýlok 3D polohy metódou PPP (fialová) a PPP-AR (modrá) na stanici AC28 .....	73
Obr. 33: Priebeh seizmických vln na staniciach AB13, AC40, AV38, AV37 a AV13 ..	74

## ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Presnosť použitých modelov na vybraných staniach .....	27
Tabuľka 2: Štandardne využívané dátové formáty .....	43
Tabuľka 3: Prednastavenia Anubis pre rôzne operačné módy .....	55
Tabuľka 4: Vstupné formáty programu Geb .....	57
Tabuľka 5: Výstupné formáty programu Geb a ich obsah.....	57
Tabuľka 6: Charakteristiky vybraných zemetrasení. Magnitúda, polohová a časová lokácia, hĺbka hypocentra .....	60
Tabuľka 7: Použité typy súborov, ich formát a poskytovateľ .....	61
Tabuľka 8: Nastavenie programu Geb pre metódu PPP .....	64
Tabuľka 9: Nastavenie programu Geb pre metódu PPP-AR .....	64
Tabuľka 10: Výsledky QC - hodiny, minimálna elevácia .....	66
Tabuľka 11: Výsledné charakteristiky presnosti jednotlivých metód .....	69
Tabuľka 12: Výsledné určované magnitúdy metódou PPP s ich odchýlkami a počtom staníc, z ktorých boli tieto hodnoty určované.....	73
Tabuľka 13: Výsledné určované magnitúdy metódou PPP-AR s ich odchýlkami a počtom staníc, z ktorých boli tieto hodnoty určované.....	73

## ZOZNAM VÝPISOV

Výpis 1: Hlavička pre súhrnnú štatistiku QC .....	63
Výpis 2: Indikátory pre jednotlivé GNSS.....	63
Výpis 3: Výsledné štatistiky v súbore *.dat.1d.....	68

## ZOZNAM SKRATIEK

<b>APL</b>	Atmospheric Pressure Loading
<b>ARPP</b>	Antena Reference Point
<b>BDS</b>	BeiDou system
<b>BDT</b>	BeiDou Time
<b>BIMP</b>	Bureau International des Poids et Mesures
<b>CIO</b>	Conventional International Origin
<b>CIP</b>	Celestial Intermediate Pole
<b>CODE</b>	Center for Orbit Determination in Europe
<b>CTRS</b>	Conventional Terrestrial Reference System
<b>DCB</b>	Differential Code Bias
<b>DOP</b>	Dilution of Position
<b>DORIS</b>	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
<b>DYFI</b>	Did you feel it?
<b>ECEF</b>	Earth Centered-Earth Fixed
<b>ECI</b>	Earth Centered Inertial
<b>EOP</b>	Earth Orientation Parameters
<b>EPN</b>	Euref Permanent Network
<b>GEO</b>	Geosynchronous Equatorial Orbit
<b>GF</b>	Geometry-free
<b>GLONASS</b>	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
<b>GLONASST</b>	GLONASS Time
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GPST</b>	GPS Time
<b>GRS80</b>	Geodetic Reference System 1980
<b>GST</b>	Galileo System Time
<b>HAS</b>	High accuracy service
<b>IERS</b>	International Earth rotation and Reference systems Service
<b>IF</b>	Ionosphere-free
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>IGSO</b>	Inclined Geosynchronous Orbit
<b>IP</b>	Ionospheric Point
<b>IRNSS</b>	Indian Regional Navigation Satellite system
<b>ITRF</b>	International Terrestrial Reference Frame
<b>JD</b>	Julian Date
<b>LAMBDA</b>	Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
<b>LEO</b>	Low Earth Orbit

<b>MEO</b>	Medium Earth Orbit
<b>MJD</b>	Modified Julian Date
<b>MMI</b>	Modified Mercalli Intensity
<b>MNŠ</b>	Metóda Najmenších Štvorcov
<b>MW</b>	Melbourne-Wubenna
<b>NASA</b>	National Aeronautic and Space Administration
<b>NEU</b>	North, East, Up
<b>ORBEX</b>	Orbit Exchange format
<b>PAR</b>	Partial Ambiguity Resolution
<b>PCO</b>	Phase Center Offset
<b>PGD</b>	Peak Ground Displacement
<b>PNT</b>	Positioning, navigation and timing
<b>PPP</b>	Precise Point positioning
<b>PPP-AR</b>	Precise Point positioning with Ambiguity Resolution
<b>PSD</b>	Post-Seismic Deformation
<b>QC</b>	Quality Control
<b>QZSS</b>	Quasi-Zenith Satellite System
<b>RINEX</b>	Receiver Independent Exchange Format
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>RTCM</b>	Radio Technical Commission for Maritime Services
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>RTS</b>	Rauch-Tung-Striebel
<b>SAR</b>	Search and rescue
<b>SBAS</b>	Satellite Based Augmentation System
<b>SLR</b>	Satellite Laser Ranging
<b>SPP</b>	Standard Point Positioning
<b>SSR</b>	State Space Representation
<b>STD</b>	Standard Deviation
<b>SVD</b>	Singular Value Decomposition
<b>TAI</b>	Temps Atomique International
<b>TEC</b>	Total Electron Content
<b>TECU</b>	Total Electron Content Unit
<b>TVEC</b>	Total Vertical Electron Content
<b>USGS</b>	U.S. Geological Survey
<b>UTC</b>	Universal Time Coordinated
<b>VLBI</b>	Very Long Baseline Interferometry
<b>VÚGTK</b>	Výzkumní ústav geodetický, topografický a kartografický, v. v. i
<b>ZTD</b>	Zenith Tropospheric Delay



## ZOZNAM PRÍLOH

### Zoznam digitálnych príloh:

1. Konfiguračný súbor Anubis (00QC)
2. Konfiguračný súbor Geb (00PPPAR\_RA)
3. Konfiguračný súbor Apep (00APEPAR\_RA)
4. Konfiguračný súbor Geb – zemetrasenia (EEPPPAR\_RA)