



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

TESTOVÁNÍ METODY PRECISE POINT POSITIONING

TESTING OF PRECISE POINT POSITIONING METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Nosek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADOVAN MACHOTKA, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie a kartografie (N)
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jakub Nosek
Název	Testování metody Precise Point Positioning
Vedoucí práce	doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Seeber G.: Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, Berlin/New York 2003

Kaplan E. D., Hegarty C. J.: Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Artech House, Norwood 2017

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

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Seznamte se a otestujte metodu Precise Point Positioning, tedy metodu přesného určování polohy z GNSS měření bez užití dat referenčních stanic.

Provedte testování přesnosti výsledné polohy v závislosti na zvoleném Globálním navigačním satelitním systému (GPS, Glonass, ...) a době observace. Pro testování použijte data z delšího časového úseku, proveďte jejich statistické vyhodnocení.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá testováním metody Precise Point Positioning (PPP) v různých variantách. V práci jsou popsány teoretické základy metody PPP a nejdůležitější systematické chyby, které ovlivňují její přesnost. Přesnost metody byla vyhodnocována na datech z permanentní GNSS stanice CADM, která je součástí výzkumného centra AdMaS. Zpracovány byly data z období 2018 – 2019. Porovnávány byly výsledky kombinací různých GNSS a výsledky různě dlouhých observací. Na závěr bylo provedeno ověření přesnosti na 299 GNSS stanicích IGS.

KLÍČOVÁ SLOVA

GNSS, Precise Point Positioning, PPP, testování přesnosti, systematické chyby

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the Precise Point Positioning (PPP) method in various variants. The thesis describes the theoretical foundations of the PPP method and the most important systematic errors that affect accuracy. The accuracy of the PPP method was evaluated using data from the permanent GNSS station CADM, which is part of the AdMaS research center. Data of the period 2018 – 2019 were processed. The results of combinations of different GNSS and the results of different observation periods were compared. Finally, the accuracy was verified at 299 IGS GNSS stations.

KEYWORDS

GNSS, Precise Point Positioning, PPP, accuracy testing, systematic errors

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jakub Nosek *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.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Testování metody Precise Point Positioning* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 3. 6. 2020

Bc. Jakub Nosek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Testování metody Precise Point Positioning* zpracoval samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 6. 2020

Bc. Jakub Nosek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval doc. Ing. Radovanu Machotkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a konzultace, které ve velké míře přispěly ke vzniku této diplomové práce. Dále děkuji rodině za podporu po celou dobu mého studia

Obsah

Úvod	10
1 GNSS	11
1.1 Metody určování polohy GNSS	14
1.2 Souřadnicové systémy	15
1.3 Časové systémy	16
2 Systematické vlivy	19
2.1 Atmosférické vlivy	19
2.2 Chyby související s družicemi a přijímači	23
2.3 Vliv dynamiky Země	29
3 Precise Point Positioning	33
3.1 Předzpracování měření	33
3.2 Matematický model PPP	36
3.3 Metody řešení neznámých parametrů	39
3.4 Software pro zpracování <i>Precise Point Positioning</i> (PPP)	43
3.5 PPP v reálném čase	48
3.6 Využití metody PPP	50
4 Zpracování	53
4.1 Výběr software	53
4.2 CADM	53
4.3 Strategie zpracování	55
4.4 Předzpracování výsledků řešení PPP	59
5 Výsledky	61
5.1 Porovnání různých GNSS	61
5.2 Porovnání podle délky observace	69
5.3 Ověření výsledků hodnocení přesnosti PPP	76
Závěr	79
Seznam použitých zdrojů	81
Seznam obrázků	92
Seznam symbolů, veličin a zkratk	94

Seznam příloh	95
A Ukázka konfiguračního souboru RTKLib	96
B Ukázka dávkového souboru pro různé GNSS	98
C Ukázka dávkového souboru pro různě dlouhé observace	99
D Obsah přiloženého CD	100

Úvod

Globální navigační satelitní systémy (GNSS) jsou stále rozvíjející se metodou kosmické geodézie. Miliony uživatelů na Zemi je používají v každodenním životě nejenom pro navigaci. Přesnost, kterou umožňují levné GNSS přijímače (například ty v mobilních telefonech), je dostačující pro většinu uživatelů. Pro přesné aplikace v geodézii jsou v současné době nejvíce využívány relativní metody, které poskytují vysokou relativní přesnost vektorů mezi jednotlivými přijímači. Nevýhodou je, že přesnost určení polohy pomocí těchto metod se snižuje s rostoucí délkou vektorů.

Metoda PPP se řadí k absolutním metodám, které umožňují určení polohy s téměř stejnou přesností kdekoliv na Zemi. Metoda využívá přesných fázových měření, různých technik a korekcí pro eliminaci systematických vlivů a také v mnohých případech nových matematických postupů. Výhoda metody PPP tkví i v možnosti snadné paralelizace výpočtů pro velké množství stanic, kdy není oproti relativním metodám nutno data jednotlivých stanic zpracovávat společně.

Vývoj metody PPP lze datovat až do 70. let 20. století, kdy byl termín „precise point positioning“ zmíněn v souvislosti s určováním polohy pomocí dopplerovských měření (Anderle, 1976). První výsledky zpracování PPP, jako metody GNSS, byly publikovány až 90. letech 20. století (Zumberge et al., 1997b), (Zumberge et al., 1997a).

Metodě PPP a problematice její přesnosti se věnovalo už mnoho odborných publikací, článků i závěrečných prací studentů. Kouba – Héroux (2001) hodnotí rychlost konvergence a opakovatelnost určení souřadnic. Abou-Galala et al. (2018) komplexně ověřuje globální přesnost PPP s využitím stanic *International GNSS Service* (IGS). V rámci České republiky je metodě PPP věnována pozornost zejména v souvislosti s určováním parametrů troposféry a modelování počasí (Ahmed et al., 2016), (Kačmařík, 2017). Zajímavým tématem využitelnosti metody PPP pro mapování se zabývá (Ríčný, 2016).

V této práci bude nastíněna jak samotná metoda PPP, tak i systematické vlivy, které ovlivňují její přesnost. Hlavním cílem této práce je testování přesnosti metody PPP na datech z delšího časového úseku. Zvláště budou testovány varianty kombinace různých GNSS i varianty závislé na délce observace. Na základě statistického testování bude posouzena přesnost jednotlivých variant.

1 GNSS

GNSS jsou, jako jediná z metod kosmické geodézie, využívány i v každodenním životě běžných lidí. Největší zastoupení zde mají navigační aplikace, ale neocenitelné zastoupení mají GNSS i ve vojenství, geodézii, zemědělství a dalších oborech. Mezi hlavní výhody GNSS patří možnost měření v kteroukoliv denní dobu nezávisle na meteorologických podmínkách téměř kdekoli na Zemi. V současné době patří mezi nejpoužívanější GNSS americký *Global Positioning System* (GPS), ruský *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), čínský BeiDou a evropský systém Galileo.

GPS

GPS (NAVSTAR GPS) je družicový systém řízený Ministerstvem obrany Spojených států Amerických. Jeho vývoj začal v 70. letech 20. století jako náhrada za dopplerovský navigační systém TRANSIT. Systém GPS se skládá ze tří částí:

- kosmický segment,
- řídicí segment,
- uživatelský segment.

Kosmický segment je tvořen družicemi, které jsou umístěny na šesti oběžných drahách se sklonem přibližně 55° vůči rovníku. Družice Zemi obíhají ve výšce přibližně 20 000 km. Na začátku roku 2020 obíhalo Zemi celkem 31 družic GPS, přičemž maximální možný počet aktivních družic je 32. Oběžná doba jedné družice je 11 hodin 58 minut. Družice jsou z hlediska konstrukce a vybavení členěny do tzv. bloků. Nejstarší v současné době aktivní družice na oběžné dráze patří do bloku IIR. Nejnovější družice na orbitě patří do bloku III. Ukázkou družice systému GPS můžeme vidět na obrázku 1.1. Běžný uživatel může s využitím družic GPS provádět kódová a fázová měření na 3 frekvencích (L1, L2 a L5). Družice na nosných vlnách modulují běžný civilní kód (C/A) a chráněný vojenský kód (P/Y), který je šifrovaný. Družice bloku III umožňují také vysílání nových kódů – civilního C kódu a šifrovaného vojenského M kódu. Každá z družic je kromě přijímacích a vysílacích antén vybavena také přesnými atomovými hodinami, solárními panely a gyroskopy, které umožňují stabilizaci družice na oběžné dráze Země. Systém GPS využívá, podobně jako většina GNSS, kódové modulace (CDMA). Efemeridy vysílané družicemi v navigační zprávě jsou vztahy k *World Geodetic System 1984* (WGS84).

Řídicí segment GPS se skládá z hlavní řídicí stanice, monitorovacích stanic a pozemních antén. Hlavní řídicí stanice v Colorado Springs shromažďuje data z jednotlivých monitorovacích stanic a určuje parametry drah družic a offsety jejich hodin od systémového času GPS (GPST). Predikované efemeridy a korekce hodin předává pozemním vysílacím anténám. Každá z 16 monitorovacích stanic (6 US Air Force;



Obr. 1.1: Družice bloku IIR-M na oběžné dráze; převzato z (ESA, 2020)

10 National Geospatial-Intelligence Agency) je vybavena atomovými hodinami a permanentně provádí měření na viditelné družice, jehož výsledky pak následně posílá hlavní řídicí stanici. Pozemní antény předávají predikované efemeridy a offsety hodin družic jednotlivým družicím. Družice jsou zároveň při výpadku schopny fungovat v autonomním režimu.

Uživatelský segment se skládá z jednotlivých přijímačů, které umožňují příjem a vyhodnocení signálu GPS. Vzhledem k tomu, že GPS je z hlediska uživatele pasivní systém, tak může být na Zemi umístěn neomezený počet přijímačů.

GLONASS

GLONASS je družicový systém provozovaný agenturou Roskosmos. Vývoj systému začal už za dob SSSR v roce 1976. Plné pokrytí Země bylo dosaženo v roce 2011. Družice systému GLONASS obíhají Zemi na 3 kruhových drahách ve výšce 19 100 km (Obr. 1.2). Podobně jako systém GPS se skládá systém GLONASS z kosmického, řídicího a uživatelského segmentu. Oproti ostatním GNSS nejsou vysílané efemeridy systému GLONASS vyjádřeny pomocí Keplerovských parametrů, ale pomocí vektorů polohy, rychlosti a zrychlení. Efemeridy jsou vztaženy k systému Parametry Zemli 1990 (PZ 90). Nevýhodou oproti ostatním družicovým systémům je, že systém GLONASS využívá tzv. frekvenční modulaci (FDMA), která znesnadňuje řešení ambiguit jako celých čísel. Nové generace družic GLONASS budou umožňovat také CDMA (IAC, 2020).

Galileo

Evropský GNSS Galileo je civilní obdoba systémů GPS a GLONASS provozovaná Evropskou kosmickou agenturou (ESA). Po dobudování bude mít systém Galileo



Obr. 1.2: Kosmický segment GLONASS; převzato z (ESA, 2020)

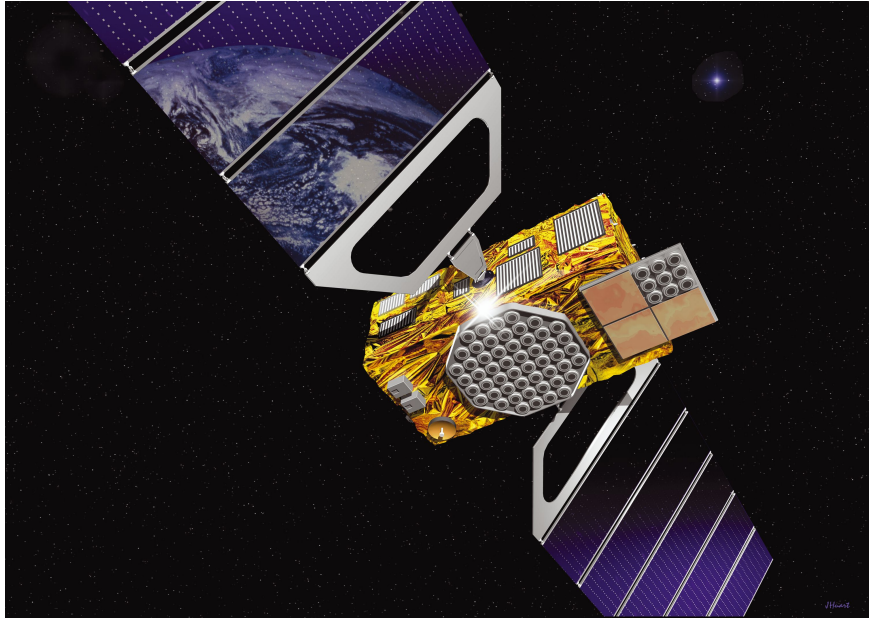
celkově 30 družic na oběžných drahách. Jednotlivé družice obíhají Zemi ve třech rovinách po kruhových drahách ve výšce přibližně 23 200 km. Ukázku navigační družice systému Galileo můžeme vidět na obrázku 1.3. Větší počet družic systému Galileo by měl mít příznivý vliv na přesnost určení polohy, která by měla být lepší než 1 m. Kromě standardních navigačních služeb (Open Service) bude Galileo také poskytovat přesnější zpoplatněnou službu (Commercial Service). Služba Safety of Life Service bude určena zejména pro nasazení v řízení letového provozu a s ním související bezpečnosti. Zajímavostí je, že Galileo bude také poskytovat přesnější korekce efemerid a hodin družic, které umožní určovat polohu metodou PPP v reálném čase bez nutnosti připojení k internetu.

BeiDou

Družicový systém BeiDou je provozovaný Čínskou lidovou republikou. Historie tohoto systému sahá do roku 2000, kdy byla na oběžnou dráhu vynesena první družice. Oproti ostatním zmíněným GNSS se systém BeiDou skládá z tří typů družic umístěných na různých drahách:

- střední oběžná dráha (MEO),
- geostacionární dráha (GEO),
- geosynchronní dráha (GSO).

Signály BeiDou jsou modulovány metodou CDMA a některé signály jsou vysílány na stejných frekvencích, jako vysílají družice GPS a Galileo.



Obr. 1.3: Družice systému Galileo; převzato z (ESA, 2020)

1.1 Metody určování polohy GNSS

Metody určování polohy GNSS můžeme v zásadě rozdělit do několika skupin podle:

- měřených veličin, použitých pro výpočet polohy,
- způsobu určení polohy,
- režimu přijímače v průběhu měření.

Pro geodetické aplikace bývají obvykle využívána *kódová* a *fázová* měření. Kódová měření využívají pro výpočet pseudovzdálenosti mezi anténou přijímače a anténou družice tranzitní čas. Přesnost určení pseudovzdálenosti se pohybuje v řádu 0,1 m až 2 m. Fázová měření prováděná přijímačem jsou založena na určování fáze nosné vlny a počítání celých cyklů nosných vln. K měření fáze nosné vlny se používá tzv. fázového závěsu, který ztotožňuje fázi signálu přijímaného a signálu generovaného časovou základnou přijímače. Přesnost fázových měření dosahuje až 1 % vlnové délky nosné vlny signálu (tedy v případě GNSS v řádu jednotek mm).

Metody pro určování polohy pomocí GNSS lze rozdělit do dvou skupin – absolutní a relativní metody. *Absolutní metoda* využívá pro měření pouze jeden přijímač a měření jsou tak zatěžována všemi systematickými vlivy, které na měření GNSS působí (kapitola 2). Absolutní metody využívají zejména levné přijímače pro navigaci. Absolutní metodou je i metoda PPP (kapitola 3).

Relativní metody využívají měření dvou přijímačů, z nichž jeden je umístěn na bodě o známých souřadnicích. Relativní poloha těchto dvou přijímačů je vyjádřena pomocí základnového vektoru. Pro eliminaci systematických vlivů se při relativní

metodě využívá, kromě lineárních kombinací měření, také diferencí, které mohou být tvořeny mezi přijímači, družicemi a epochami. S využitím relativních metod lze dosahovat až milimetrové přesnosti.

Při určování polohy může být přijímač ve statickém i kinematickém režimu. Přesnost a korektnost určení polohy pak závisí na použitém programovém vybavení a matematickém aparátu. Absolutní i relativní metody lze řešit v post-processingu (následné zpracování), nebo v reálném čase.

1.2 Souřadnicové systémy

Výsledkem zpracování GNSS jsou ve většině případů souřadnice, které jsou vztažené k některému souřadnicovému systému. Pro GNSS je základní konvenční terestrický systém – *Conventional Terrestrial Reference System* (CTRS), pro který platí:

1. počátkem CTRS je geocentrum,
2. CTRS využívá geocentrický souřadnicový čas,
3. CTRS nemá žádné globální reziduální rotace vůči zemské kůře,
4. osa z systému CTRS směřuje do mezinárodního konvenčního počátku (CIO),
5. osa x systému CTRS je definována jako průsečík roviny rovníku s nultým (greenwichským) poledníkem,
6. osa y doplňuje systém na pravotočivý.

Praktickou realizací CTRS je mezinárodní terestrický referenční systém – *International Terrestrial Reference System* (ITRS) (Seeber, 2003). ITRS se skládá ze souboru konstant (např. parametry referenčního elipsoidu, rychlost světla, apod.), algoritmů (výpočet precese a nutace, apod.), technologií a z referenčního rámce – *International Terrestrial Reference Frame*. Referenční rámec je tvořen souborem fyzicky realizovaných bodů (Petit – Luzum, 2010). V současné době je využíván *International Terrestrial Reference Frame 2014* (ITRF2014), který byl vytvořen pomocí čtyř technologií kosmické geodézie:

- *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI),
- *Satellite Laser Ranging* (SLR),
- *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS),
- GNSS.

Kombinace jednotlivých technologií je umožněna díky tzv kolokačním stanicím, tj. stanice, kde jsou využívány alespoň dvě technologie. Referenčním elipsoidem pro ITRF2014 je *Geodetic Reference System 1980* (GRS80) (Altamimi – Dick, 2020). Vlivem pohybu litosférických desek se jednotlivé stanice neustále pohybují vůči systému ITRF2014. Pro sjednocení dlouhodobých měření je třeba souřadnice transformovat

do společné epochy (viz podkapitola 2.3.1). Přesné efemeridy družic GNSS, které jsou poskytovány různými analytickými centry IGS jsou vztaženy právě k ITRF2014.

Při vyjadřování výsledků zpracování GNSS, zejména charakteristik přesnosti, může být použití geocentrického systému (ITRF2014), poněkud nevhodné, protože osa z tohoto systému směřuje do pólu. Pro snadnější interpretaci výsledků je tedy vhodné transformovat geocentrické souřadnice do lokálního topocentrického systému (NEU – North, East, Up), jehož svislá osa směřuje ve směru normály k elipsoidu. Vektor souřadnic lokální topocentrické soustavy \mathbf{P} získáme ze vztahu

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} n \\ e \\ u \end{pmatrix} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}, \quad (1.1)$$

kde n, e, u jsou souřadnicové složky topocentrické soustavy NEU vypočtené jako

$$n = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad e = \begin{pmatrix} -\sin \lambda \\ \cos \lambda 0 \end{pmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (1.2)$$

přičemž φ je geodetická šířka bodu a λ je geodetická délka. Rotační matici \mathbf{R} můžeme zapsat jako

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & \sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

Tento postup bude použit i v této práci pro interpretaci výsledků zpracování metody PPP (viz kapitola 4).

1.3 Časové systémy

Přesné určování času je zcela zásadní pro práci s GNSS. Družicové systémy využívají různé časové standardy, a proto je důležitá znalost jejich přesných vztahů. Historicky se časy v astronomii (tedy i kosmické geodézii) dělí na:

- rotační časy,
- fyzikálně definované časy.

Rotační časy jsou odvozené z nerovnoměrné rotace Země. Z tohoto důvodu jsou rotační časy nevhodné pro využití v souvislosti s GNSS.

Fyzikálně definované časy využívají sekund, které jsou definované na základě pozorování některého z fyzikálních jevů. Podle Mezinárodní soustavy měrových jednotek SI je atomová sekunda definována jako doba, za kterou provede cesium 133

přesně 9 192 631 770 kmitů (BIPM, 2019). Na základě atomové sekundy je definováno několik časů, například:

- mezinárodní atomový čas (TAI),
- koordinovaný světový čas (UTC),
- časy jednotlivých GNSS.

Mezinárodní atomový čas

Mezinárodní atomový čas – *Temps Atomique International* (TAI) je definovaný na základě více než 200 atomových hodin, jejichž časy jsou z důvodu dilatace času transformovány na geoid. Výsledný TAI je počítán váženým průměrem z časů jednotlivých pracovišť. TAI je základním časem pro kosmickou geodézii.

Koordinovaný světový čas

Koordinovaný světový čas – *Universal Time Coordinated* (UTC) plní celosvětově funkce občanského času. Čas UTC je navázán na TAI a je tedy časem rovnoměrným. Rozdíl

$$\text{TAI} - \text{UTC} = n, \quad (1.4)$$

kde n je počet celých (kladných nebo záporných) tzv. přestupných sekund. Hodnoty n se mění s předstihem vždy, když má přestat platit podmínka

$$\text{DUT1} = |\text{UT1} - \text{UTC}| < 0,9 \text{ s}, \quad (1.5)$$

kde UT1 je světový čas, který je časem rotačním. V dnešní době (2020) se TAI a UTC liší o +27 s.

Časy jednotlivých GNSS

Systém GPS využívá vlastní družicový čas *GPS Time* (GPST) (Directorate, 2013). GPST je realizován pomocí řídicího segmentu GPS. Výchozí epochou GPST byla půlnoc mezi 5. a 6. lednem 1980 a čas byl definován jako

$$\text{GPST} = \text{TAI} - 19 \text{ s}. \quad (1.6)$$

Řídicí středisko systému GLONASS vytváří vlastní časový rámec (GLONASST), který je definován jako

$$\text{GLONASST} = \text{UTC}(\text{SU}) + 3 \text{ h} - \tau, \quad (1.7)$$

kde UTC(SU) je UTC pro území Ruska a $|\tau| < 1 \text{ ms}$. Můžeme vidět, že na rozdíl od GPST pracuje GLONASST s přestupnými sekundami (Roscosmos, 2008).

Evropský systém Galileo využívá také vlastní časový standard – Galileo System Time (GST), který je zabezpečován pomocí řídicího segmentu Galileo a je synchronizován s TAI s chybou menší než 50 ns. Výchozí epocha pro GST byla půlnoc mezi 21. a 22. srpnem 1999 (ESA, 2015).

Výchozí epochou pro čínský družicový systém BeiDou byl 1. leden 2006 (0:00) UTC. Časový standard BeiDou je synchronizován s UTC s odchylkou do 50 ns. Informace o platném počtu přestupných sekund jsou součástí navigační zprávy (CNSA, 2017).

1.3.1 Juliánské datum

V astronomii často využívá tzv. juliánské datum (JD) o periodě 7980 let, které je vhodné pro sledování dlouhých a periodických časových úseků. Časovou jednotkou je juliánský den, který se skládá z 24 hodin po 60 minutách. Počátkem juliánského data je 1. leden 4713 př. n. l. ve 12:00. Juliánské datum lze s výhodou využít při převodech mezi různými letopočty a érami. Největší využití nachází Juliánské datum v astronomii pro určování specifických okamžiků pohybu kosmických těles a pro určování periody proměnných hvězd.

V praxi bývá často využíváno *Modifikované juliánské datum* (MJD), které lze z juliánského data odvodit jako

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2\,400\,000,5. \quad (1.8)$$

Konstanta 2 400 000,5 představuje Juliánské datum odpovídající půlnoci 17. 11. 1858.

2 Systematické vlivy

Jak již bylo zmíněno, na měření s využitím GNSS působí velké množství systematických vlivů, které je třeba pro přesné určování polohy a další aplikace vhodně redukovat. Systematické vlivy můžeme rozdělit do několika skupin:

- atmosférické vlivy,
- chyby související s družicemi a přijímači,
- vlivy dynamiky Země.

V následujícím textu budou nastíněny nejdůležitější systematické vlivy, se kterými je třeba při zpracování měření metodou PPP počítat.

2.1 Atmosférické vlivy

2.1.1 Vliv ionosféry

Část zemské atmosféry, kterou nazýváme ionosféra, se nachází ve výšce 50 km až 1000 km nad zemským povrchem. Díky slunečnímu záření se zde nacházejí volné elektrony a ionty, které z této vrstvy vytvářejí disperzní prostředí pro frekvence na kterých fungují GNSS. V tomto disperzním prostředí závisí index lomu (rychlost šíření elektromagnetického signálu) na frekvenci signálu.

Celkový obsah volných elektronů v ionosféře podél dráhy elektromagnetického signálu bývá vyjádřen parametrem TEC (Total Electron Content), který udáváme v jednotkách TECU (1 TECU = 10^{16} elektronů na m^2). Pro vzdálenost l mezi družicí s a přijímačem r platí vztah

$$\text{TEC} = \int_s^r n_e dl, \quad (2.1)$$

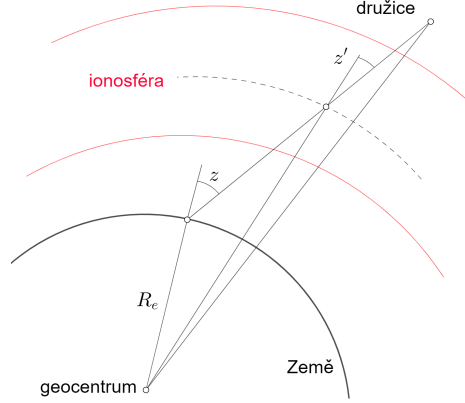
kde n_e je hustota elektronů na m^3 . Běžně bývá také využíván parametr TVEC, kterým označujeme obsah volných elektronů pro dráhu ve směru zenitu. Vliv ionosféry na měřenou vzdálenost Δ^{Iono} pak lze vypočítat jako

$$\Delta^{iono} = \frac{1}{\cos z'} \frac{40,3}{f^2} \text{TVEC}, \quad (2.2)$$

kde f je frekvence signálu a z' je zenitový úhel přijímaného signálu ve výšce ionosférické vrstvy vypočtený na základě obrázku 2.1 jako

$$\sin z' = \frac{R_e}{R_e + h_{iono}} \sin z, \quad (2.3)$$

kde R_e je poloměr Země, h_{iono} je výška ionosféry a z je zenitový úhel družice v místě přijímače (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).



Obr. 2.1: Geometrie modelu ionosféry

Pro modelování ionosféry je používáno několik druhů matematických modelů. Pravděpodobně nejznámější je *Klobucharův model* (Klobuchar, 1987), jehož koeficienty jsou obsažené ve vysílané navigační zprávě družic GPS. Korekci ionosférického zpoždění lze pomocí tohoto modelu vypočítat jako

$$\Delta T^{iono} = A_1 + A_2 \cos \left(\frac{2\pi(t - A_3)}{A_4} \right), \quad (2.4)$$

přičemž $A_1 = 5\text{ns}$ a $A_3 = 14^h$ jsou konstanty a A_2, A_4 lze vypočítat jako

$$\begin{aligned} A_2 &= \alpha_1 + \alpha_2 \varphi_{IP} + \alpha_3 \varphi_{IP}^2 + \alpha_4 \varphi_{IP}^3, \\ A_4 &= \beta_1 + \beta_2 \varphi_{IP} + \beta_3 \varphi_{IP}^2 + \beta_4 \varphi_{IP}^3, \end{aligned} \quad (2.5)$$

kde α_i, β_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) jsou koeficienty obsažené v navigační zprávě. Ionosférické modely jsou také vytvářeny na základě měření sítí permanentních stanic GNSS a v podobě tzv. globální ionosférické mapy jsou distribuovány ve formátu IONEX.

Lineární kombinace L3

Jiným přístupem k řešení problému ionosférické refrakce je využití dvoufrekvenčních kódových a fázových měření a jejich vhodná kombinace. Lineární kombinaci, která zásadně eliminuje vliv ionosféry prvního řádu, nazýváme „ionosphere free“ – lineární kombinace prostá ionosféry (L3) a lze ji pro měřenou pseudovzdálenost PR_{L3} a měřenou fázi nosné vlny ϕ_{L3} zapsat jako

$$\begin{aligned} \phi_{L3} &= \frac{f_1^2 \phi_{L1} - f_2^2 \phi_{L2}}{f_1^2 - f_2^2}, \\ PR_{L3} &= \frac{f_1^2 PR_{L1} - f_2^2 PR_{L2}}{f_1^2 - f_2^2}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

kde PR_{L1} , PR_{L2} a ϕ_{L1} , ϕ_{L2} jsou měřené pseudovzdálenosti, respektive fáze nosné vlny na frekvencích f_1 a f_2 (Brunner – Gu, 1991).

2.1.2 Vliv troposféry

Troposféra je, z hlediska vlivů na signály GNSS, prostředí zcela odlišné od ionosféry. Pro vysoké frekvence GNSS signálů se chová jako nedisperzní prostředí. Na všechny observované frekvence, ale i kódová a fázová měření má troposféra stejný vliv, a proto nelze její vliv eliminovat vytvářením lineárních kombinací, jako je tomu u ionosféry. Troposférické zpoždění Δ^{Trop} lze pak definovat jako

$$\Delta^{Trop} = \int (n - 1) ds_0, \quad (2.7)$$

kde n je index lomu, přičemž časté je též vyjádření pomocí lomového čísla $N^{Trop} = (n - 1)10^6$ jako

$$\Delta^{Trop} = 10^{-6} \int N^{Trop} ds_0. \quad (2.8)$$

Troposférickou refrakci můžeme dělit na dvě složky:

- Δ_D^{Trop} – suchou (hydrostatickou) složku,
- Δ_W^{Trop} – vlhkou (nehydrostatickou) složku.

Platí vztah

$$\Delta^{Trop} = \Delta_D^{Trop} + \Delta_W^{Trop}, \quad (2.9)$$

přičemž suchá složka představuje přibližně 90 % celkového troposférického zpoždění. Suchá složka je relativně snadno a přesně určitelná oproti složce vlhké, která je vysoce variabilní. Celkové troposférické zpoždění bývá v anglické literatuře označováno jako *Zenith Total Delay* (ZTD) (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Suchá složka

Pro popis suché složky troposférické refrakce existuje několik empirických modelů, které ji umožňují stanovovat na základě vybraných meteorologických veličin. Mezi nejpoužívanější patří model Hopfieldové a model Saastamoinenův.

Hopfieldové model byl empiricky odvozen na základě celosvětových dat. Suchou složku troposférické refrakce ve směru zenitu můžeme pomocí tohoto modelu vyjádřit jako

$$\Delta_D^{Trop} = \frac{77,64 * 10^{-6}}{5} [40136 + 148,72(T_S - 273,15)] \frac{P_S}{T_S}, \quad (2.10)$$

kde P_S je přízemní atmosférický tlak v místě měření a T_S je teplota v místě měření.

Saastamoinenův model vychází z teorie ideálního plynu, která je aplikována na podmínky zemské atmosféry. Suchou složku troposférického zpoždění v zenitovém

směru lze pak vyjádřit jako

$$\Delta_D^{Trop} = 0,0022779 \frac{P_S}{1 - 0,00266 \cos 2\varphi - 0,00028H}, \quad (2.11)$$

kde φ je zeměpisná šířka a H je elipsoidická výška, přičemž výraz ve jmenovateli představuje korekci gravitačního zrychlení. V porovnání jsou modely Hopfieldové a Saastamoinena v dobré shodě a směrodatná odchylka rozdílů těchto modelů dosahuje úrovně 1 mm.

Vlhká složka

Z důvodu velkých variací obsahu vody v zemské atmosféře je vlhkou složku troposférického zpoždění velice obtížné modelovat pouze na základě pozemních meteorologických měření. Empirické modely lze využít pouze pro méně přesná měření. Při zpracování PPP je proto vlhká složka troposférického zpoždění určována společně s dalšími neznámými parametry při zpracování GNSS měření a odhadu souřadnic přijímače.

Mapovací funkce

Dosud uváděné varianty troposférického zpoždění byly uvažovány pouze pro směr zenitu v místě přijímače. Obecně však signály GNSS přicházejí do antény přijímače pod různými úhly, a proto je vždy vliv troposférického zpoždění při měření na konkrétní družici funkcí elevačního úhlu této družice. V zahraniční literatuře bývá toto „šikmé“ troposférické zpoždění označováno jako *Slant Total Delay* (STD). Pro přepočítání zenitových troposférických zpoždění bývá proto užíváno tzv. mapovacích funkcí.

Hodnotu troposférického zpoždění $T(\varepsilon_r^s)$ mezi přijímačem r , družicí s o určitém elevačním úhlu ε můžeme vyjádřit jako

$$T(\varepsilon_r^s) = m_D(\varepsilon_r^s)\Delta_D^{Trop} + m(\varepsilon_r^s)\Delta_W^{Trop}, \quad (2.12)$$

kde m_D je mapovací funkce pro suchou složku a m je mapovací funkce pro celkové troposférické zpoždění. Vlhkou složku troposférického zpoždění ve směru zenitu můžeme vypočítat jako rozdíl celkového zpoždění a suché složky

$$\Delta_W^{Trop} = \Delta^{Trop} - \Delta_D^{Trop}. \quad (2.13)$$

Mapovací funkci pro celkové troposférické zpoždění $m(\varepsilon_r^s)$ můžeme vypočítat jako

$$m(\varepsilon_r^s) = m_W(\varepsilon_r^s)[1 + \cot \varepsilon_r^s (G_{N,r} \cos A_r^s + G_{E,r} \sin A_r^s)], \quad (2.14)$$

kde $m_W(\varepsilon_r^s)$ je mapovací funkce pro vlhkou složku, A_r^s je azimut družice a $G_{N,r}$, $G_{E,r}$ jsou horizontální gradienty troposféry v severním a východním směru, které jsou určovány společně s dalšími neznámými parametry při řešení PPP (Kačmařík et al., 2017).

Nejjednodušší lze mapovací funkci $m(\varepsilon)$ zapsat pomocí aproximace

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon} . \quad (2.15)$$

Vlivem proměnlivých meteorologických podmínek a zakřivení Země však tento vztah neposkytuje dostatečnou přesnost, a proto musí být dále rozvíjen.

Niellova mapovací funkce (Niell, 1996) je jednou z neznámějších mapovacích funkcí a lze zapsat jako

$$m(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}}} , \quad (2.16)$$

kde koeficienty a , b , c představují geografické a temporální korekce. Výhoda Niellovy mapovací funkce tkví v tom, že na rozdíl od jiných mapovacích funkcí nevyžaduje informace o teplotě vzduchu v místě GNSS přijímače.

Z Niellovy mapovací funkce vychází také izobarická mapovací funkce a mapovací funkce *Vienna* (VMF), ve které je využito techniky „ray-tracking“, která umožňuje rekonstruovat dráhu 3D paprsku zemskou atmosférou (Boehm – Schuh, 2003). Koeficienty VMF byly dále zpřesněny a mapovací funkce založená na numerickém globálním modelu počasí ECMWF pak bývá označována zkratkou VMF1 (Kouba, 2008). Z VMF1 znikla tzv. globální mapovací funkce, která vyžaduje, podobně jako mapovací funkce Niellova, pouze znalost souřadnic přijímače a dne v roce (Boehm et al., 2006). Qiu et al. (2020) komplexně srovnává jednotlivé mapovací funkce s výsledkem, že nejpřesnější je VMF1.

2.2 Chyby související s družicemi a přijímači

2.2.1 Chyby drah družic

Na rozdíl od relativních metod, kdy jsou měření jednotlivých přijímačů mezi sebou diferencovány, se u metody PPP uplatní chyby v určení drah družic plnou mírou. Vzhledem k velké výšce družic GNSS jsou jejich oběžné dráhy jen velice málo ovlivňovány vyššími stupni rozvoje gravitačního potenciálu Země a povrchovými silami. Do výpočtu drah družic je třeba zahrnovat nejenom gravitační působení Měsíce a Slunce, ale také tlak slunečního záření a negravitační poruchy jako je tepelné vyzařování družic a tzv. y-bias (Rothacher, 1995).

Vysílané efemeridy jsou s přesností přibližně 1 m nevhodné pro využití ve zpracování metody PPP. Při využití služeb IGS, případně jeho zpracovatelských center, lze využívat produkty o přesnosti 5 cm (*Ultra-Rapid*; predikované efemeridy poskytnuté v reálném čase), 2,5 cm (*Rapid*; poskytované se zpožděním 17 – 41 hodin). Nejpresnější produkt *Final* dosahuje přesnosti 2,5 cm (pro systém GLONASS 3 cm) a je poskytován se zpožděním 11 – 17 dní (IGS, 2020a).

2.2.2 Chyby hodin družic

Důležitým předpokladem pro úspěšné určování polohy pomocí GNSS je kvalitní časový rámeček. Případná odchylka 1 μs způsobí ve vzdálenosti mezi družicemi a příjemcem chybu přibližně 300 m. Každá z družic GNSS je vybavena několika atomovými hodinami, které umožňují určovat čas v řádu jednotek ns. Systémy GPS, Galileo a BeiDou zavádějí pro korekci údajů hodin družic na systémový čas polynom druhého řádu, jehož koeficienty jsou součástí navigační zprávy vysílané družicemi. Vztah pro korekci času $\Delta t_{SV}(t)$ má tvar

$$\Delta t_{SV}(t) = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{0c}) + a_{f2}(t - t_{0c})^2 + \Delta t_r(t) - \Delta t_g, \quad (2.17)$$

kde a_{f0} je systematický časový offset, a_{f1} je chod hodin, a_{f2} je chod frekvence hodin, t_{0c} je vztažný čas pro koeficienty polynomu, t je současná časová epocha, $\Delta t_r(t)$ je korekce relativistických efektů (viz 2.2.3) a Δt_g je korekce skupinového zpoždění signálu. Systém GLONASS využívá pro korekci hodin družic stejný vztah jako (2.17), ale ovšem pouze první řád tohoto polynomu.

Pro přesné aplikace je třeba určovat čas s přesností lepší než 1 ns. IGS poskytuje korekce hodin družic v několika různých variantách podle jejich přesnosti. Nejpresnější produkt „final“ deklaruje přesnost korekcí hodin družic lepší než 2,5 ps a je distribuován se zpožděním přibližně 14 dní formou souborů upraveného formátu *Receiver Independent Exchange Format* (RINEX) (IGS, 2020a). Korekce hodin družic pro další systémy produkují také další zpracovatelská centra – např. *Astronomical Institute of the University of Bern* (AIUB). Při využití přesných produktů se korekce hodin $\Delta t_{SV}(t)$ v čase t vypočte jako

$$\Delta t_{SV}(t) = \frac{(t_{i+1} - t)t_{SV}(t_i) + (t - t_{i+1})t_{SV}(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i} - 2 \frac{\mathbf{r}(t)^T \mathbf{v}(t)}{c^2}, \quad (2.18)$$

kde $\mathbf{r}(t)$ a $\mathbf{v}(t)$ jsou vektory polohy a rychlosti družice, vypočtené z přesných efemerid (Kouba, 2009).

2.2.3 Relativistické efekty

Družice GNSS se pohybují vysokou rychlostí v gravitačním poli Země, a proto je třeba při zpracování uvažovat relativistické vlivy, které na družice působí. Ze speciální teorie relativity vyplývá, že pro rychle pohybující se objekt plyne čas pomaleji. Tento efekt nazýváme *dilatace času* t_s a můžeme ho vyjádřit z rovnice Lorentzovy transformace jako

$$t_s = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2.19)$$

kde t_0 je délka časového úseku, pro který dilataci času určujeme a v je rychlost objektu (Einstein, 1905). Pro družice GPS dosahuje dilatace času hodnoty $7,2 \mu\text{s}$ během jednoho dne.

Časové rozdíly vlivem rozdílného gravitačního pole v místě družice a na povrchu Země vyplývají z obecné teorie relativity. Tento rozdíl $\Delta\tau$ můžeme pro časový interval Δt zapsat jako

$$\Delta\tau = \left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right) \Delta t, \quad (2.20)$$

kde ΔU je rozdíl gravitačních potenciálů na povrchu země a v místě družice, přičemž

$$U = -\frac{GM}{r}. \quad (2.21)$$

GM představuje v rovnici geocentrickou gravitační konstantu a r je vzdálenost mezi družicí a Zemí (Hećimović, 2013). Společný účinek těchto vlivů $\Delta\tau_D - \Delta\tau_Z$ můžeme vypočítat jako

$$\Delta\tau_D - \Delta\tau_Z = \left(-\frac{GM}{(R_Z + h)c^2} + \frac{GM}{R_Z c^2} - \frac{v_D^2 - v_Z^2}{2c^2}\right), \quad (2.22)$$

kde je R_Z poloměr Země, h výška družice nad povrchem Země, v_D rychlost družice a v_Z je úhlová rychlost na povrchu Země. Po dosazení do tohoto vztahu vychází pro systém GPS časový ofset přibližně $38,5 \mu\text{s}$. Tato hodnota by během jednoho dne způsobila chybu v určení pseudovzdálenosti přibližně 11 km. Změna frekvence na družici od nominální hodnoty 10,23 MHz je v důsledku působení tohoto relativistického efektu rovna přibližně 4,556 Hz. Pro eliminaci tohoto efektu musí družice vysílat na frekvenci 10,22999999545 MHz.

Družice mají různou rychlost a gravitační potenciál v perigeu a apogeu. Tyto změny se projevují jako změna chodu hodin družic. Pro eliminaci tohoto efektu zavádíme podle Directorate (2013) korekci hodin družic Δt_r v čase t

$$\Delta t_r(t) = Fe\sqrt{A} \sin E_k, \quad (2.23)$$

kde e je excentricita dráhy družice, A je délka hlavní poloosy dráhy družice, E_k je

excentrická anomálie a F je konstanta vypočtená ze vztahu

$$F = -\frac{2\sqrt{\mu}}{c^2}, \quad (2.24)$$

ve kterém μ představuje gravitační konstantu.,

2.2.4 Hardwarová zpoždění kódových a fázových měření

Signály vysílané družicemi nejsou dokonale časově synchronizované. Vlivem hardware dochází ke zpožděním a vznikají rozdíly mezi jednotlivými frekvencemi i složkami vysílaného signálu. V případě kódových měření označujeme tato hardwarová zpoždění anglickým termínem *Differential Code Bias* (DCB), který lze volně přeložit jako „diferenční kódové bias“, případně Puchrik (2013) navrhuje termín „diferenční posuny kódů“. DCB mají využití při stanovování parametrů ionosféry, výpočtu polohy pouze na základě C/A kódových měření, přesných korekcích času a také při řešení ambiguit za využití lineární kombinace Melbourne-Wubbena.

GNSS přijímače (dvoufrekvenční) se dělí na tři skupiny podle druhu poskytovaných kódových měření:

- P1/P2
- C1/X2
- C1/P2

Přijímače skupiny P1/P2 poskytují na frekvenci L1 volně přístupná C/A (C1) kódová měření a „chráněná“ kódová měření P1. Na frekvenci L2 poskytují kódová měření P2. Tyto přijímače jsou v zásadě vojenské. Skupina přijímačů C1/X2 poskytuje C1 měření a měření X2, které je vytvářeno pomocí lineární kombinace $X2 = C1 + (P2 - P1)$ s využitím tzv. křížové korelace. Do této skupiny patří dnes už zastaralé přijímače (např. Trimble 4000). Moderní přijímače Leica a Trimble patří do skupiny C1/P2. Tyto přijímače využívají metodu nazývanou *Z-tracking*, která má oproti křížové korelaci nižší šum (Woo, 2000).

Vysílané korekce hodin družic a přesné produkty jsou v souladu s P1/P2 měřeními. Pro korektní využití přijímačů skupiny C1/P2 a C1/X2 je třeba jejich observace opravit. Hardwarová zpoždění družic B_i jsou v přesných produktech vyjádřena jako DCB, které můžeme zapsat jako

$$\begin{aligned} B_{P1-P2} &= B_{P1} - B_{P2}, \\ B_{P1-C1} &= B_{P1} - B_{C1}, \\ B_{P2-C2} &= B_{P2} - B_{C2}, \end{aligned} \quad (2.25)$$

přičemž hodnoty B_{P1-C1} dosahují jednotek ns a B_{P1-P2} dosahují až desítek ns. DCB jsou poskytovány jednotlivými zpracovatelskými centry IGS v upraveném formátu

RINEX. Soubory DCB poskytované AIUB můžeme získat z FTP serveru `ftp://ftp.aiub.unibe.ch` (AIUB, 2020).

Hardwarová zpoždění v družicích a v přijímači také ovlivňují fázová měření. Tato tzv. nekalibrovaná fázová zpoždění, která jsou v anglické literatuře označována jako *Uncalibrated Phase delay* (UPD) znemožňují řešení ambiguit v oboru celých čísel (řešení fixed). V případě relativních metod bývají UPD zcela eliminovány pomocí dvojitých diferencí. Při využití metody PPP (viz kapitola 3), kdy jsou fázová měření nediferencovaná (případně jsou vytvářeny pouze první diference) způsobují UPD časové posuny v měřených datech a ambiguitu lze tak řešit pouze v oboru reálných čísel (řešení float). V poslední době se objevují techniky, které umožňují UPD modelovat a odstraňovat (Ge et al., 2008), (Zhang et al., 2017).

2.2.5 Ofsety a variace fázových center antén

Veličiny získané měřením GNSS nejsou obecně vztaženy k jednoznačnému geometrickému bodu antény, kterým bývá nejčastěji referenční bod antény (ARP). Poloha fázového centra antény přijímače je závislá na měřené frekvenci, druhu antény a azimutu a elevaci družice. Offset fázového centra (PCO) je definován jako vztahový vektor ARP a střední hodnoty fázového centra. Aktuální fázové centrum je k této střední hodnotě vztaženo pomocí modelu tzv. variací fázového centra.

Pro přesná měření je třeba offsety a variace fázových center antén kalibrovat. Metody kalibrace dělíme v zásadě na dva druhy:

- relativní kalibrace,
- absolutní kalibrace.

Relativní kalibrace se provádí za využití dvou antén na krátké základně, kdy je jedna z antén považována za referenční (Mader, 1999). Variace fázového centra této referenční antény musejí být známé, nebo jsou považovány za nulové.

Absolutní kalibraci lze provádět laboratorně v bezodrazné komoře za využití umělého generátoru signálů GNSS, nebo měřením v terénu s využitím signálu z reálných družic. V průběhu kalibrace jsou zaznamenávána GNSS data s různým natočením a naklopením antény (EL-Hattab, 2013). Tento způsob kalibrace je v dnešní době nejběžnější.

Offsety fázových center antén družic GNSS udávají vztah k hmotnému středu družice pro který jsou vztaženy přesné efemeridy. Variace fázového centra družice se vztahují k hlavnímu fázovému centru, které vykazuje nejmenší variace ve směru k nadiru (Schmid – Rothacher, 2003). Parametry offsetů a variací fázových center družic a přijímačů jsou poskytovány IGS ve výměnném formátu ANTEX (IGS, 2020c).

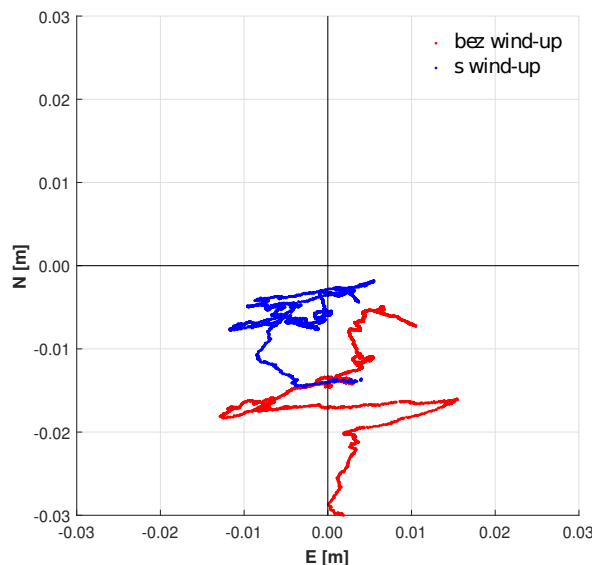
2.2.6 Vícecestné šíření signálu

Efekt vícecestného šíření signálu (multipath) je způsobený GNSS signály odraženými od různých povrchů, budov, či od samotné družice. Tyto odrazy prodlužují tranzitní čas signálu. Zásadní vliv má efekt multipath na kódová měření (až desítky metrů). Vliv na fázová měření je v jednotkách centimetrů až decimetrů, ale je složitější ho odstranit.

Multipath lze detekovat při dekorelaci kódových měření nebo pomocí hardwarových řešení, které redukuje množství odraženého signálu. Běžně bývají antény odstíněny proti signálům odraženým ze země. Existují i speciální typy antény označované jako choke-ring. K eliminaci multipath efektu je možno využít i elevační masky přístroje. Nejúčinnějším řešením je ovšem správný výběr místa pro umístění GNSS antény, které by mělo poskytovat vhodné observační podmínky.

2.2.7 Fázový wind-up efekt

Elektromagnetické vlnění vysílané družicemi GNSS je kruhově polarizované. Rotace družice (případně také přijímače v kinematických aplikacích) kolem svislé osy způsobuje variace fáze nosné vlny, které přijímač nesprávně interpretuje jako změnu vzdálenosti ke družici (wind-up efekt). Družice GNSS musí během obletu Země natáčet solární panely ke Slunci a zároveň směřovat vysílací antény ke středu Země. Při natáčecích manévrech, prováděných družicí v době „poledne“ (družice se nachází na spojnici mezi Zemí a Sluncem) a v době „půlnoci“ (Země se nachází na spojnici mezi družicí a Sluncem), rotuje družice v době kratší než 30 minut kolem celé své osy (Bar-Sever, 1996). Družice bloku II a IIA, se kterými se můžeme ještě setkat při zpracování starších měření, byly více náchylnější k působení skokového wind-up efektu při výstupu ze zemského stínu zhruba po dobu 30 minut a Bar-Sever (1996) doporučuje data z těchto družic nepoužít v tomto časovém intervalu k výpočtu polohy. Při zpracování diferencovaných dat při relativním určování polohy se wind-up efekt uplatňuje ve velice malé míře – Wu et al. (1992) uvádí, že na vektoru o délce 4000 km se wind-up efekt uplatní chybou 4 cm. Pro aplikace, jako je PPP je tento jev ovšem nezanedbatelný. Ukázkou vlivu wind-up efektu na určení polohy můžeme vidět na obrázku 2.2, který znázorňuje 24hodinové řešení metodou PPP s uvažováním a bez uvažování efektu wind-up ve výpočtu.



Obr. 2.2: Vliv wind-up efektu na určení polohy

2.3 Vliv dynamiky Země

2.3.1 Pohyb litosférických desek

Stanice GNSS umístěné na zemském povrchu jsou v neustálém pohybu způsobeném slapovými jevy, seismickými vlivy a tektonickými pohyby. Při dlouhotrvajících kampaních GNSS je třeba uvažovat pohyb jednotlivých částí zemského povrchu (nejčastěji v důsledku kontinentálního driftu – pohybu litosférických desek).

Základní model pohybu stanice uvažuje její lineární pohyb. Souřadnice stanice $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$, v epoše t můžeme vyjádřit jako

$$\begin{aligned} X(t) &= X_R + v_X(t - t_R), \\ Y(t) &= Y_R + v_Y(t - t_R), \\ Z(t) &= Z_R + v_Z(t - t_R), \end{aligned} \quad (2.26)$$

kde X_R , Y_R , Z_R jsou souřadnice stanice ve výchozí epoše R a v_X , v_Y , v_Z jsou rychlosti změn souřadnic (obvykle v m/rok).

Poněkud přesnější je modifikace tohoto modelu uvažující skoky souřadnic, které mohou být způsobené výměnou GNSS antén, nebo k nim může docházet například v důsledku zemětřesení. Model lze vektorově zapsat jako

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_R + \mathbf{v}(t - t_R) + \sum_{j=1}^{n_j} \mathbf{b}_j H(t - t_j), \quad (2.27)$$

kde vektor \mathbf{b}_j představuje jednotlivé skoky v epoše j a $H(t)$ představuje Heavisideovu funkci (jednotkový skok), která může nabývat hodnot 0, 1/2 a 1. Další modely mohou uvažovat také periodické pohyby stanic (Bevis – Brown, 2014).

2.3.2 Pohyb zemských pólů

Změny souřadnic stanic způsobené pohybem pólů dosahují až několika centimetrů. Tyto pohyby jsou zahrnuty i v přesných produktech IGS, a proto je musíme uvažovat i při zpracování měření metodou PPP při využití těchto přesných produktů. Změny polohy stanice v horizontálním (tangenciálním) směru $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$ a ve směru radiálním Δr lze zapsat jako

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= -9 \cos 2\varphi [(x_p - \hat{x}_p) \cos \lambda - (y_p - \hat{y}_p) \sin \lambda], \\ \Delta\lambda &= 9 \cos \varphi [(x_p - \hat{x}_p) \sin \lambda + (y_p - \hat{y}_p) \cos \lambda], \\ \Delta r &= -33 \sin 2\varphi [(x_p - \hat{x}_p) \cos \lambda - (y_p - \hat{y}_p) \sin \lambda],\end{aligned}\tag{2.28}$$

kde x_p, y_p jsou souřadnice nebeského přechodného pólu (CIP) a \hat{x}_p, \hat{y}_p jsou souřadnice referenčního pólu *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS) (Petit – Luzum, 2010). Změny souřadnic dosahují velikosti 7 mm v horizontálním směru a 25 mm ve směru radiálním. Souřadnice pólu jsou poskytovány ve formě parametrů rotace a orientace Země (rotační čas UT1, CIP vzhledem k referenčnímu pólu IERS a offsety nebeského pólu).

2.3.3 Zemské slapy

Zemské slapy jsou, podobně jako slapy oceánské, způsobené gravitačními silami Měsíce a Slunce. Periodické horizontální a vertikální deformace zemského povrchu jsou vyjádřeny pomocí sférických harmonických funkcí stupně n a řádu m , s využitím Loveova h_{nm} a Shidova čísla l_{nm} . Výsledné hodnoty závisí na zeměpisné šířce a přílivové frekvenci. Vektor posunu přijímače (stanice) vlivem zemských slapů druhého stupně Δ můžeme vyjádřit jako

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_{\oplus} R_j^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left(\frac{3(\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - 1}{2} \right) + 3l_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) [\hat{R}_j - (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \hat{r}] \right\},\tag{2.29}$$

kde GM_j a GM_{\oplus} jsou gravitační konstanty Země a Měsíce, \hat{R}_j a R_j je geocentrický vektor Měsíce nebo Slunce a jeho velikost, R_e je poloměr Země na rovníku, \hat{r}_j a r_j je geocentrický vektor přijímače (stanice) a jeho velikost (Petit – Luzum, 2010). Korekce zemských slapů dosahují velikosti 5 cm v horizontálním směru a 30 cm ve

směru vertikálním. V této korekci je zahrnuta jak periodická semidiurnální složka, tak permanentní deformace závislá na zeměpisné šířce φ . Tenzer et al. (2011) uvádí, že tato deformace dosahuje až 14 cm a její radiální složku Δ_{perm} lze se subcentimetrovou přesností vypočítat jako

$$\Delta_{perm} \approx -0,198 \left(\frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right). \quad (2.30)$$

Deformace Δ_{perm} se uplatní při převodu výšek „mean-tide“ $H_{mean-tide}$ na výšky „tide-free“ $H_{tide-free}$. Tento vztah lze zapsat jako

$$H_{mean-tide} = H_{tide-free} - 1(1 + k - h)\Delta_{perm}, \quad (2.31)$$

kde h a k jsou Loveovy čísla (Petit – Luzum, 2010).

2.3.4 Slapové zatížení oceánského dna

Slapové zatížení oceánského dna (anglicky Ocean Tide Loading) je efekt podobný zemským slapům, kdy jsou dominantní diurnální a semidiurnální periody. Tento jev je závislý na vzdálenosti od pobřeží a velikosti oceánských slapů. Voda v oceánech, pohybující se při přílivu směrem k pobřeží a při odlivu směrem od pobřeží, způsobuje periodické zatížení dna oceánu, které se deformuje a způsobuje deformace i ve vnitrozemí. Deformace povrchu Země způsobené tímto vlivem mohou dosahovat až 10 cm v radiálním směru.

Deformace způsobené slapovým zatěžováním oceánského dna jsou měřitelné pomocí technik VLBI (Petrov – Ma, 2003) a GNSS (Allinson, 2004) a lze je také částečně modelovat. Vertikální deformaci u způsobenou slapovým zatížením oceánského dna v bodě r můžeme vyjádřit jako

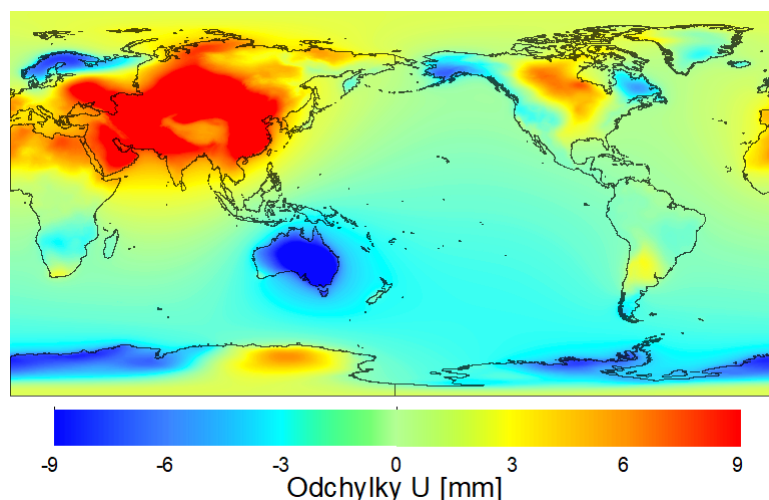
$$u(r) = \int_{\Omega} \rho G(|r - r'|) Z(r') d\Omega, \quad (2.32)$$

kde ρ je hustota mořské vody, Z je velikost přílivu a G je Greenova funkce závislá na vzdálenosti bodu r a bodu r' (vzdálenost od pobřeží). Integrál je počítán globálně přes všechny oceány – oblast Ω (Penna et al., 2008). Mezi nejpoužívanější modely slapového zatížení oceánského dna patří model FES2004 (Lyard et al., 2006). Jednotlivé modely bývají distribuovány ve formátu BLQ. Chalmers University of Technology v Gothenburgu poskytuje online službu pro vytvoření souboru BLQ pro jednotlivé stanice na adrese <http://holt.oso.chalmers.se/loading/index.html>.

2.3.5 Atmosférické slapy

Slapové síly Měsíce a Slunce působí, kromě samotné Země a oceánů, také na zemskou atmosféru. Nejvýrazněji na atmosféru působí semidiurnální a diurnální vlny, které zapříčiňují pohyb vzdušných mas a mají za následek oscilace barometrického tlaku v jednotkách hektopascalů (Wilhelm et al., 1997).

Mnohonásobně výraznější vliv, než jsou gravitační slapové vlivy, má na zemskou atmosféru Slunce, které ji zahřívá. Nerovnoměrné zahřívání různých míst na Zemi Sluncem způsobuje globální cirkulace atmosféry, kdy se vzduchové masy pohybují zpravidla ve východozápadním směru. Tento jev byl poprvé popsán v Darwin (1882) a bývá v zahraniční literatuře označován jako *Atmopheric Pressure Loading* (zatížení vlivem tlaku atmosféry). Tlak vzdušných mas na povrch Země způsobuje deformace zemské kůry až o 3 mm v horizontálním směru a 20 mm ve směru vertikálním (Petrov, 2004). Ukázkou vertikálních deformací, způsobených zatěžováním atmosférou, můžeme vidět na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Vlivu zatěžování atmosférou – 1. 7. 2018 12:00 UTC

Známými modely pro atmosférické slapy jsou MERRA (Rienecker et al., 2011) a GEOS-FPIT (Rienecker, 2008). Posuny stanice způsobené atmosférickými slapy je možné modelovat s využitím online služby <http://massloading.net/atm/>.

3 Precise Point Positioning

Jak bylo zmíněno již v úvodu, metoda PPP se v průběhu posledního desetiletí těší stále větší oblíbenosti a v rámci odborné veřejnosti je jí věnována velká pozornost. V následujícím textu budou popsány základní principy a fáze zpracování PPP, programy umožňující výpočet PPP a některé možné aplikace této metody.

3.1 Předzpracování měření

Velmi důležitou součástí zpracování měření GNSS je jeho předzpracování, které spočívá zejména ve vyhlazení kódových měření, detekci fázových skoků a odstranění skoků hodin přijímače. K fázovým skokům (cycle slip) dochází při dočasné ztrátě signálu GNSS, způsobené například díky překážce v dráze družicového signálu. Při znovuzískání signálu může vzniknout diskontinuita ve sledování nosné vlny, která znemožňuje další řešení ambiguit.

3.1.1 Vyhlazování kódových měření

Kódová měření jsou oproti fázovým silně zašumělá, ale neobsahují nejednoznačnosti (ambiguity). Algoritmus nazývaný Hatch filtr umožňuje využít přesná fázová měření k vyhlazení měření kódových (Hofmann-Wellenhop et al., 2008). Pokud označíme vyhlazené kódové měření mezi přijímačem r a družicí s v epoše k jako $\hat{R}_{r,k}^s$, můžeme napsat že

$$\hat{R}_{r,k}^s = \frac{1}{n} R_{r,k}^s + \frac{n-1}{n} \left[\hat{R}_{r,k-1}^s + (\Phi_{r,k}^s - \Phi_{r,k-1}^s) \right], \quad (3.1)$$

kde (Φ) představuje měřenou fázi nosné vlny a n je celočíselný parametr, kterým se volí stupeň vyhlazení. V první epoše pak platí $\hat{R}_{r,k}^s = R_{r,k}^s$.

3.1.2 Fázové skoky

K detekci fázových skoků lze s výhodou využít měření na více frekvencích. Při zpracování dvoufrekvenčních měření se často využívá lineární kombinace prostá geometrie (geometry free) Φ_4 , která odstraňuje geometrii observace a chyby hodin (příjímače i družic), přičemž zůstávají pouze vliv ionosféry, ambiguita a zbytkové chyby (multipath, hardwarová zpoždění a šum). Lineární kombinaci Φ_4 můžeme vyjádřit jako

$$\begin{aligned} \Phi_4 &= \Phi_1 - \Phi_2 = \lambda_1 - N_1 - \lambda_2 - N_2 - I_1 + I_2 \\ &= \lambda_1 - N_1 - \lambda_2 - N_2 - I \left(1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \right), \end{aligned} \quad (3.2)$$

kde indexy 1 a 2 označují jednotlivé frekvence f , L je měřená fáze nosné vlny, N je počáteční ambiguita, λ je vlnová délka a I je ionosférické zpoždění. Detekce fázového skoku mezi epochami měření t je pak založena na testovacím kritériu

$$\Phi_4(t) - \Phi_4(t-1) > k \cdot \sigma_{\Phi_4} + \Delta I_{max}, \quad (3.3)$$

kde σ_{Φ_4} je předpokládaná směrodatná odchylka lineární kombinace Φ_4 , k je součinitel konfidence (často volený jako $k = 4$) a parametr I_{max} je maximální změna ionosférického zpoždění v m/h (například 0,5 m/h) (Vaclavovic – Dousa, 2016).

Druhým způsobem pro detekci fázových skoků je aplikace lineární kombinace Melbourne-Wubenna (Wübbena, 1985). Tato lineární kombinace kombinuje kódová a fázová měření. Kombinace Melbourne-Wubenna Φ_{MW} je tvořena kombinací lineární kombinace wide-lane pro fázová měření Φ_W (vlnová délka pro GPS L1 a L2 $\lambda = 86$ cm) a kombinací narrow-lane pro kódová měření P_N (vlnová délka pro GPS L1 a L2 $\lambda = 11$ cm).

$$\begin{aligned} \Phi_{MW} = \Phi_W - P_N &= \frac{1}{f_1 - f_2}(f_1 L_1 - f_2 L_2) - \frac{1}{f_1 + f_2}(f_1 P_1 + f_2 P_2) \\ &= \lambda_W N_W = \frac{c}{f_1 - f_2}(N_1 - N_2) \end{aligned} \quad (3.4)$$

je základní rovnice lineární kombinace Melbourne-Wubenna, kde λ_W a N_W je wide-lane (širokopásmová) vlnová délka, respektive ambiguita. Oproti lineární kombinaci prosté geometrie má kombinace Melbourne-Wubenna výhodu v eliminaci ionosféry a troposféry a hlavně v „dlouhé“ vlnové délce, avšak za cenu zvýšení šumu vlivem kódových měření. Detekce fázového skoku mezi epochami t je pak založena na kritériu

$$\Phi_{MW}(t) - \Phi_{MW}(t-1) > k \cdot \sigma_{MW}, \quad (3.5)$$

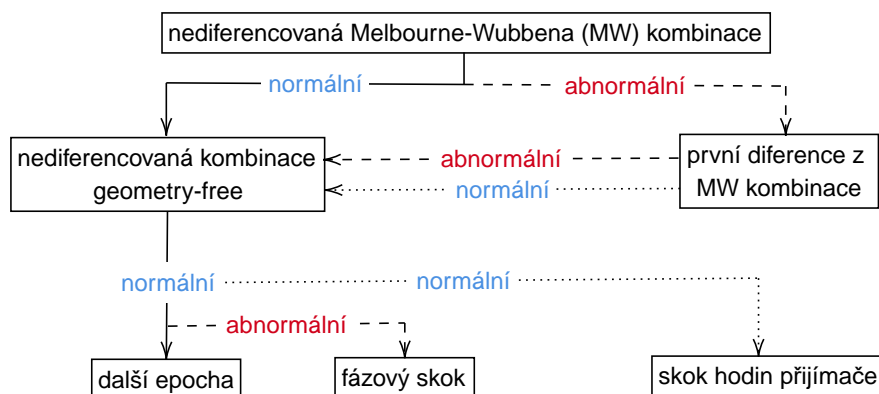
kde k je součinitel konfidence a σ_{MW} je uvažovaná apriorní směrodatná odchylka lineární kombinace Melbourne-Wubenna. Obě dvě zmíněné metody umožňují fázový skok detekovat, ale nevíme jestli k fázovému skoku došlo na frekvenci L1, L2, nebo na obou frekvencích (Vaclavovic – Dousa, 2016).

Zhao et al. (2015) představil metodu, která umožňuje detekovat fázové skoky na jednotlivých frekvencích při využití třífrekvenčních měření. Metoda je založena na nezávislém použití kombinací Melbourne-Wubenna, wide-lane a narrow-lane a kaskádovitým postupem a následně rekonstrukci fázových skoků na jednotlivých frekvencích.

3.1.3 Skoky hodin přijímače

Přesnost interních oscilátorů, kterými jsou běžné geodetické přijímače GNSS vybaveny, nemůže konkurovat přesnosti atomových hodin. Přijímače synchronizují své vnitřní hodiny se systémovým časem (GPST) při dosažení určité odchylky od systémového času (běžně 1 ms). Tento posun se projeví podobně, jako by došlo k fázovému skoku na všech observacích. Skok hodin přijímače nelze odhalit pomocí běžných technik používaných na detekci fázových skoků (například lineární kombinace geometry-free) a projeví se zejména při zpracování metody PPP v kinematickém režimu (Guo – Zhang, 2014).

Zhang et al. (2013) uvádí metodu odhalení skoku hodin přijímače založenou na vytváření prvních diferencí (mezi družicemi) mezi observacemi zpracovanými pomocí lineární kombinace Melbourne-Wubenna (Obr. 3.1). V případě, kdy by došlo ke skoku hodin přijímače, první diference tento efekt odstraní a v porovnání těchto diferencí s kombinacemi Melbourne-Wubenna a geometry-free lze tyto skoky hodin odhalit. Skoky hodin přijímače lze pak zahrnout do modelu řešení metody PPP jako další z určovaných neznámých parametrů a určit tak jeho přesnou hodnotu.



Obr. 3.1: Detekce skoku hodin přijímače; upraveno (Zhang et al., 2013)

3.1.4 Modelování vlivu multipath

Efekt vícecestného šíření signálu neboli multipath byl popsán již v kapitole 2. Modelování multipath v rámci předzpracování měření GNSS je výhodné pro následné přiřazení vah jednotlivým observacím. V případě vícefrekvenčního měření lze vliv multipath na kódová měření snadno modelovat pomocí lineární kombinace geometry free. Pro všechny dostupné frekvence můžeme podle Vaclavovic – Dousa (2015)

vyjádřit multipath MP jako

$$MP_k = P_k - \Phi_i - \beta(\Phi_i - \Phi_j) = P_k + \alpha\Phi_i + \beta\Phi_j, \quad (3.6)$$

kde i, j, k jsou indexy jednotlivých frekvencí f , P je měřená pseudovzdálenost, Φ je měřená fáze nosné vlny a parametry α a β můžeme zapsat jako

$$\alpha = -\frac{(f_j^2 + f_k^2)f_i^2}{(f_i^2 - f_j^2)f_k^2}, \quad (3.7)$$

$$\beta = \frac{(f_i^2 + f_k^2)f_j^2}{(f_i^2 - f_j^2)f_k^2}. \quad (3.8)$$

Při zpracování dvoufrekvenčních měření pak můžeme například zvolit indexy $k = i = 1$ a $j = 2$ a určit velikost multipath na první frekvenci (MP_1) jako

$$MP_1 = P_1 - \Phi_1 - \frac{2f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)}(\Phi_1 - \Phi_2). \quad (3.9)$$

3.2 Matematický model PPP

Rovnice měřené pseudovzdálenosti R a měřené fáze nosné vlny Φ jsou shodné pro všechny metody GNSS včetně PPP. V základním tvaru, s uvažováním systematických vlivů, můžeme rovnice pozorování GNSS (nediferencované) pro družici s přijímač r a frekvenci j zapsat jako

$$P_{r,j}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c_j(d_{r,j} - d_j^s) + I_{r,j}^s + T_r^s + e_{r,j}^s, \quad (3.10a)$$

$$\Phi_{r,j}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \lambda_j(b_{r,j} - b_j^s) - I_{r,j}^s + T_r^s + \lambda_j N_{r,j}^s + \varepsilon_{r,j}^s, \quad (3.10b)$$

kde δt_r a δt^s jsou chyby hodin přijímače a družice, $I_{r,j}^s$ je ionosférické zpoždění, T_r^s je troposférické zpoždění, λ_j je vlnová délka, $N_{r,j}^s$ je celočíselná ambiguita. Členy $d_{r,j}$ a d_j^s můžeme souhrnně nazvat jako diferenční kódové bias (viz podkapitola 2.2.4). Člen ρ_j^s představuje skutečnou geometrickou vzdálenost mezi družicí a přijímačem vypočtenou ze vztahu

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}, \quad (3.11)$$

kde X^s, Y^s, Z^s a X_r, Y_r, Z_r jsou geocentrické souřadnice družice a přijímače. Členy $e_{r,j}^s$ a $\varepsilon_{r,j}^s$ v rovnicích (3.10a) a (3.10b) obsahují další systematické vlivy; například vliv multipath, wind-up efekt, slapové vlivy (blíže popsáno v kapitole 2) (Li et al., 2015).

Při zpracování měření relativními metodami jsou vytvářeny difference, které umožň-

ňují většinu členů z rovnic (3.10a) a (3.10b) odstranit, či výrazně eliminovat. Metoda PPP je však řešena pomocí nediferencovaných měření, a tak se systematické vlivy uplatňují v celé své velikosti. Měření prováděná na dvou frekvencích umožňují odstranit vliv ionosférického zpoždění $I_{r,j}^s$ pomocí lineární kombinace ionosphere-free (2.6). Poté lze rovnice pozorování GNSS pro kódové $P_{r,IF}^s$ a fázové $\Phi_{r,IF}^s$ měření zbavené vlivu ionosféry zapsat jako

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c_j(d_{r,IF} - d_{IF}^s) + T_r^s + e_{r,IF}^s, \quad (3.12a)$$

$$\Phi_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \lambda_{IF}(b_{r,IF} - b_{IF}^s) + T_r^s + \lambda_{IF}N_{r,IF}^s + \varepsilon_{r,IF}^s. \quad (3.12b)$$

Troposférické zpoždění, jak bylo popsáno v podkapitole 2.1.2, nelze eliminovat pomocí vhodné lineární kombinace. Místo toho bývá modelováno jako jeden z určovaných parametrů při řešení neznámých. Člen T_r^s pak bývá nahrazen pomocí hodnoty zenitového troposférického zpoždění v místě přijímače Z_r a jemu příslušné mapovací funkce m_r^s . Rovnice pozorování GNSS poté přechází na tvar

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c_j(d_{r,IF} - d_{IF}^s) + m_r^s \cdot Z_r + e_{r,IF}^s, \quad (3.13a)$$

$$\Phi_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + \lambda_{IF}(b_{r,IF} - b_{IF}^s) + m_r^s \cdot Z_r + \lambda_{IF}N_{r,IF}^s + \varepsilon_{r,IF}^s. \quad (3.13b)$$

3.2.1 Řešení ambiguít PPP

Z rovnic (3.13a) a (3.13b) je zřejmé, že vlivem působení nekalibrovaných kódových $d_{r,IF}$, d_j^s a fázových $b_{r,IF}$, b_j^s zpoždění nebude možné v dalších fázích zpracování řešit celočíselné ambiguity (fixed). Z těchto důvodů bývá PPP často řešeno nad ambiguitami v podobě reálných čísel (float). Existuje však několik metod, které i přes tyto obtíže dokáží celočíselné ambiguity řešit. Korekční produkty, které se v následujících metodách uplatňují, bývají poskytovány sítěmi permanentních stanic GNSS – například IGS.

Tradiční model PPP

Tradiční model PPP, popsáný například v (Zumberge et al., 1997a), vychází z rovnic (3.13a) a (3.13b), které lze pomocí substitucí

$$c\delta t_{IF,P}^r = c\delta t_r + d_{r,IF}, \quad (3.14a)$$

$$c\delta t_{IF,P}^s = c\delta t^s + d_{IF}^s, \quad (3.14b)$$

přepsat na tvar

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c\delta t_{IF,P}^r - c\delta t_{IF,P}^s + m_r^s \cdot Z_r + e_{r,j}^s, \quad (3.15a)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{r,IF}^s = & \rho_r^s + c\delta t_{IF,P}^r - c\delta t_{IF,P}^s + m_r^s \cdot Z_r + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + (b_{r,IF} - d_{r,IF}) \\ & - (b_{IF}^s - d_{IF}^s) + \varepsilon_{r,IF}^s \end{aligned} \quad (3.15b)$$

Chyba hodin přijímače $constc\delta t_{IF,P}^r$ je určována společně s parametry troposféry a ambiguitou $\lambda_{IF} N_{r,IF}^s + (b_{r,IF} - d_{r,IF}) - (b_{IF}^s - d_{IF}^s)$, která představuje lineární kombinaci celočíselné ambiguit, kódových a fázových zpoždění na straně přijímače a družice. Řešení celočíselných ambiguit není tedy v tomto modelu možné.

Model oddělených hodin

Model oddělených hodin pracuje s chybami přijímače a družic odděleně pro kódová a fázová měření. Tento model byl představen poprvé v (Collins, 2008). Chyby hodin přijímače a družic pro fázová měření zjednodušíme opět pomocí substituce

$$c\delta t_{IF,\Phi}^r = c\delta t_r + b_{r,IF}, \quad (3.16a)$$

$$c\delta t_{IF,\Phi}^s = c\delta t^s + b_{IF}^s. \quad (3.16b)$$

Model PPP prostý ionosféry pak přejde soustavu tří rovnic:

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c\delta t_{IF,P}^r - c\delta t_{IF,P}^s + m_r^s \cdot Z_r + e_{r,j}^s, \quad (3.17a)$$

$$\Phi_{r,IF}^s = \rho_r^s + c\delta t_{IF,\Phi}^r - c\delta t_{IF,\Phi}^s + m_r^s \cdot Z_r + \lambda_{IF}(17N_1 + 60N_W) + \varepsilon_{r,IF}^s \quad (3.17b)$$

a

$$\Phi_{MW} = \Phi_W - P_N = (b_{r,MW} - b_{MW}^s) - \lambda_W N_W + \varepsilon_{MW}, \quad (3.18)$$

kde N_1 je celočíselná ambiguita na frekvenci $L1$ a N_W je celočíselná ambiguita wide-lane. Rovnice (3.18) představuje lineární kombinaci Melbourne-Wubenna (podkapitola 3.1), členy $b_{r,MW}$, b_{MW}^s představují fázová zpoždění na straně přijímače a družice v rámci kombinace Melbourne-Wubenna a ε_{MW} jsou další zbytkové chyby. Tento postup umožňuje řešení celočíselných ambiguit.

První diference mezi družicemi

Metoda, využívající prvních diferencí mezi družicemi pro řešení celočíselných ambiguit PPP, byla poprvé popsána v (Ge et al., 2008). Z pohledu uživatele jsou u této metody zásadní korekce fázových zpoždění, které bývají anglicky označovány jako *Fractional Code Bias* (FCB). V první fázi jsou vypočteny první diference Δ mezi

družicemi i a j jako

$$\Delta\Phi_{M,W}^{i,j} = \Phi_{MW}^j - \Phi_{MW}^i = -\lambda_W \Delta N_W^{i,j} - \Delta b_{MW}^{s,i,j} + \varepsilon_{MW}^{i,j}, \quad (3.19)$$

kde všechny členy odpovídají lineární kombinaci Melbourne-Wubenna z rovnice (3.18). Následně se využije wide-lane FCB $\Delta b_{MW}^{s,i,j}$, který se dosadí do rovnice (3.19)

$$\Delta\Phi_{M,W}^{i,j} + \Delta b_{MW}^{s,i,j} = -\lambda_W \Delta N_W^{i,j}, \quad (3.20)$$

Díky tomuto postupu lze získat diferencovanou wide-lane ambiguitu $\Delta N_W^{i,j}$.

Model celočíselných fázových hodin

Tuto metodu lze volně přeložit jako „model celočíselných fázových hodin“. Poprvé byla popsána v (Laurichesse et al., 2008). První fáze spočívá ve vytvoření lineární kombinace Melbourne-Wubenna

$$\Phi_{MW} = -\lambda_W N_W + (b_{r,MW} - b_{MW}^s) \quad (3.21)$$

a následněm dosazení wide-lane fázového zpoždění družice b_{MW}^s , které může být získáno například z IGS; tedy

$$\Phi_{MW} + b_{MW}^s = -\lambda_W N_W + (b_{r,MW} - b_{MW}^s) + b_{MW}^s = -\lambda_W N_W + b_{r,MW}. \quad (3.22)$$

Můžeme vidět, že v rovnici stále zůstává wide-lane fázové zpoždění přijímače $b_{r,MW}$. Toto fázové zpoždění je shodné pro všechny družice, a proto můžeme vypočítat průměrnou hodnotu tohoto zpoždění

$$\bar{b}_{r,MW} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[(\Phi_{MW} + b_{MW}^s) - \lambda_W \left\{ \frac{\Phi_{MW} + b_{MW}^s}{\lambda_W} \right\}_i \right], \quad (3.23)$$

kde n je počet družic. Celočíslné řešení ambiguit pak poskytuje vztah

$$\Phi_{MW} + b_{MW}^s - \bar{b}_{r,MW} = -\lambda_W N_W. \quad (3.24)$$

3.3 Metody řešení neznámých parametrů

Jednou z hlavních částí zpracování měření GNSS je odhad neznámých parametrů, kterými jsou nejčastěji souřadnice antény přijímače a celočíselné ambiguita. Často bývají určovány i další parametry jako například hodnoty troposférického zpoždění a jejich gradienty. V této podkapitole budou stručně popsány dva základní nástroje pro řešení neznámých parametrů – metoda nejmenších čtverců a Kalmanův filtr. Z těchto metod bývají odvozovány další varianty pro konkrétní typ zpracovávaných

dat (například v relativním určování polohy známá metoda Least Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment – LAMBDA).

3.3.1 Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců (MNČ) je známá aproximační metoda široce užívaná nejen v geodézii. MNČ je dána podmínkou

$$\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v} = \min, \quad (3.25)$$

kde \mathbf{v} je vektor oprav a \mathbf{P} je matice vah. Vektor určovaných parametrů \mathbf{x} lze získat ze vztahu

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{dx}, \quad (3.26)$$

kde \mathbf{x}_0 je vektor přibližných hodnot hledaných neznámých parametrů a \mathbf{dx} je vektor jejich přírůstků. Opravy je možno vypočítat ze vztahu

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{dx} + \mathbf{l}', \quad (3.27)$$

kde \mathbf{A} je tzv. matice plánu a \mathbf{l}' je vektor redukováných měření vypočtený jako rozdíl měřených veličin \mathbf{l} a jejich přibližných hodnot \mathbf{l}_0 vypočtených z přibližných neznámých. Podmínka (3.25) je pak splněna když

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}' = \mathbf{0}. \quad (3.28)$$

Z tohoto vztahu lze následně odvodit vztah pro výpočet přírůstků neznámých

$$\mathbf{dx} = -\mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}', \quad (3.29)$$

kde \mathbf{N} je symetrická matice a je substitucí vztahu $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A}$. Přesnost vyrovnání je pak charakterizována aposteriorní střední jednotkovou chybou m_0 vypočtenou jako

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{v}}{n - k}}, \quad (3.30)$$

kde n je počet měřených veličin a k je počet určovaných veličin (Hampacher – Štroner, 2015).

Sekvenční vyrovnání MNČ

Výpočetní náročnost zprostředkujícího vyrovnání MNČ roste s přibývajícím množstvím měřených dat a určovaných parametrů. Z hlediska dostupného výpočetního výkonu některých zařízení může být pak takové vyrovnání až neuskutečnitelné. Z tohoto důvodu bývá výhodné využít tzv. sekvenčního vyrovnání, které dává stejné

výsledky a charakteristiky přesnosti, jakých by bylo dosaženo při vyrovnání všech dat naráz. Tohoto postupu lze s výhodou využít i při zpracování měření v reálném čase, kdy každou epochu přibývají nové měření.

Zjednodušeně lze výpočet vektoru přírůstků neznámých \mathbf{dx} při sekvenčním vyrovnání zapsat jako

$$\mathbf{dx} = -(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{N})^{-1}(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{l}' + \mathbf{W}), \quad (3.31)$$

kde \mathbf{N} a \mathbf{W} jsou stávající normální rovnice (Fu et al., 2019).

3.3.2 Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je algoritmus, který je v široké míře užíván v navigaci, bankovníctví a samozřejmě také v aplikacích GNSS. Algoritmus byl vytvořen matematikem Rudolfem Emilem Kalmanem v roce 1960 (Kalman, 1960). Algoritmus je založen na predikci určovaných neznámých parametrů a jejich následném zpřesnění pomocí reálně měřených veličin. Ve své původní podobě je Kalmanův filtr určen pro zpracování lineárních systémů. Pro řešení nelineárních systémů je třeba rovnice linearizovat a následně pracovat s tzv. rozšířeným Kalmanovým filtrem (extended Kalman filter). Tyto vztahy lze zjednodušeně zapsat jako

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^+ - \mathbf{x}^- &= \mathbf{v}_x, \\ \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{x}^+ - \ell^+ &= \mathbf{v}, \end{aligned} \quad (3.32)$$

kde symbol $-$ označuje moment predikce (před pro zpřesněním), $+$ je moment výpočtu po aktualizaci (zpřesnění), \mathbf{x} je vektor neznámých, \mathbf{A} je matice plánu a ℓ je vektor měření (redukovaných). Samotnou fází predikce, kdy jsou určeny výchozí hodnoty vektoru neznámých \mathbf{x} a jejich kovarianční matice \mathbf{Q} v epoše t na základě výsledků z epochy $t - 1$, můžeme zapsat jako

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t^- &= \mathbf{x}_{t-1}^+, \\ \mathbf{Q}_t^- &= \mathbf{Q}_{t-1}^+ + \mathbf{Q}_s, \end{aligned} \quad (3.33)$$

kde \mathbf{Q}_s je stochastická kovarianční matice (kovarianční matice šumu). Následnou fází aktualizace pak můžeme zapsat jako

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t^+ &= \mathbf{x}_t^- - \mathbf{K}_t(\ell_t), \\ \mathbf{Q}_t^+ &= \mathbf{Q}_t^- - \mathbf{K}_t \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}_t^-, \end{aligned} \quad (3.34)$$

kde matici \mathbf{K} můžeme vyjádřit jako

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{Q}_t^- \cdot \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}_t^- \cdot \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_\ell)^{-1}, \quad (3.35)$$

kde \mathbf{Q}_ℓ je kovarianční matice měřených veličin (Mervart, 1994).

Výhoda Kalmanova filtru je, že po určité době dokáže dávat korektní výsledky i v situacích, kdy je počet měřených veličin menší než počet neznámých. V případě vysoce přesných měření ovšem trpí Kalmanův filtr numerickou nestabilitou¹ (Mervart, 2003). Tento nedostatek lze odstranit pomocí úpravy rovnice kovarianční matice Kalmanova filtru na algoritmus označovaný jako „square root covariance filter“. Algoritmus je tedy řešen pomocí „odmocnin“ matic, které získáme Choleskyho rozkladem (informace o přesnosti jsou šířeny pomocí „odmocnin“ kovarianční matice). Zavedeme-li substituce

$$\mathbf{Q}^- = \mathbf{S}^T \mathbf{S}^-, \quad \mathbf{Q}^+ = \mathbf{S}^T \mathbf{S}^+, \quad \mathbf{Q}_\ell = \mathbf{S}_\ell^T \mathbf{S}_\ell, \quad \mathbf{H} = \mathbf{S}_h^T \mathbf{S}_h,$$

kde matice \mathbf{H} je substitucí vztahu z rovnice (3.35)

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Q}_t^- \cdot \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_\ell. \quad (3.36)$$

pak je rovnice (3.34) nahrazena vztahem

$$\begin{pmatrix} \mathbf{S}_\ell & \mathbf{0} \\ \mathbf{S}^- \mathbf{A}^T & \mathbf{S}^- \end{pmatrix} = \mathbf{G} \begin{pmatrix} \mathbf{S}_h & \mathbf{K} \mathbf{S}_h^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}^+ \end{pmatrix}, \quad (3.37)$$

kde \mathbf{G} je ortogonální matice, tedy platí

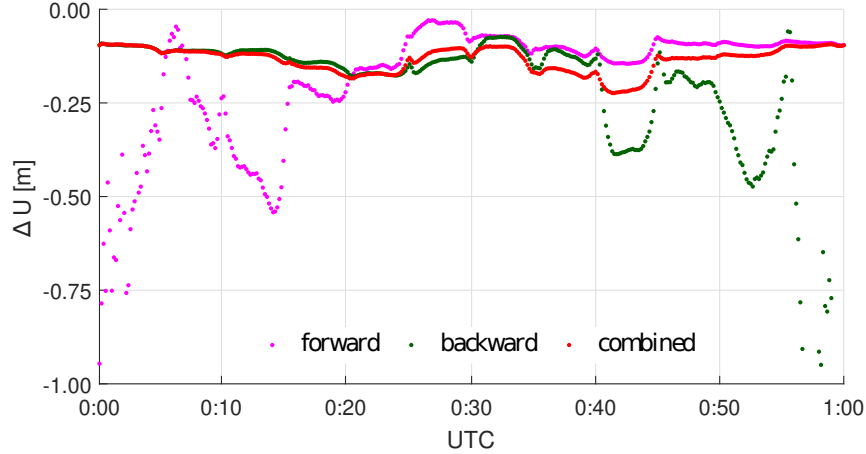
$$\mathbf{G}^T \mathbf{G} = \mathbf{I}. \quad (3.38)$$

Algoritmus je tedy řešen za pomoci metody QR rozkladu (Hampacher – Štroner, 2015).

3.3.3 Řešení v opačném směru

Kalmanův filtr a sekvenční MNČ dávají v každé epoše jiné výsledky. Vypočtené souřadnice postupem času konvergují ke svým skutečným hodnotám. Jednou z technik, která umožňuje zpřesňovat řešení, je výpočet v opačném směru ve smyslu času. Systematické vlivy se při takovémto postupu uplatní v poněkud jiné míře a může se stát, že se podaří vyřešit ambiguitu v časových úsecích, kde to při klasickém „dopředném“ zpracování nebylo možné. Kombinace klasického „dopředného“ zpracování (forward) a zpětného zpracování (backward) umožňuje dosáhnout přesnějších výsledků a téměř odstraňuje konvergenci řešení. Ukázkou porovnání výsledků zpracování metodou PPP programem RTKLib ve variantách forward, backward a combined můžeme vidět na obrázku 3.2 (zobrazeny odchylky svislé složky U od referenčních souřadnic bodu CADM; viz kapitola 4.

¹Kalmanův filtr nezaručuje pozitivně definitní kovarianční matici



Obr. 3.2: Porovnání řešení forward, backward a combined

Podobných výsledků může být dosaženo pomocí metody vyhlazování (smoothing), která umožňuje odstranit konvergenci v průběhu řešení. V prvním kroku jsou neznámé vypočteny běžným způsobem například pomocí Kalmanova filtru. V druhém kroku jsou na základě přesných (konvergovaných) neznámých parametrů postupně vypočteny parametry v jednotlivých epochách. Příkladem vyhlazovacího algoritmu je Rauch-Tung-Striebel smoother (RTS), který je založen na zpracování výsledků v jednotlivých epochách, které byly získány pomocí klasického Kalmanova filtru. Při zachování označení z podkapitoly 3.3.2 lze tuto metodu zapsat jako

$$\hat{\mathbf{Q}}_j = \mathbf{Q}_j^+ \cdot \mathbf{G}^T \cdot (\mathbf{Q}_{j+1}^-)^{-1}, \quad (3.39)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \mathbf{x}_j^+ + \hat{\mathbf{Q}}_j(\hat{\mathbf{x}}_{j+1} - \mathbf{G} \cdot \mathbf{x}_j^+), \quad (3.40)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_j^+ = \mathbf{C}_j^+ + \hat{\mathbf{Q}}_j(\hat{\mathbf{C}}_{j+1}^+ - \mathbf{Q}_{j+1}^-)\hat{\mathbf{Q}}_j^T, \quad (3.41)$$

kde $\hat{\mathbf{Q}}_j$, $\hat{\mathbf{C}}_j^+$, $\hat{\mathbf{x}}_j$ jsou vyhlazené kovarianční matice a vektor neznámých a \mathbf{G} je matice parciální derivací funkcí neznámých parametrů (Zhang – Li, 1996). Takový postup lze využít například k přesnějším určování parametrů troposféry v průběhu celého řešení PPP (Vaclavovic – Dousa, 2015)

3.4 Software pro zpracování PPP

Pro zpracování GNSS měření metodou PPP existuje řada komerčních i volně dostupných programů a online služeb. Ty se mezi sebou liší zejména v možnostech řízení zpracování uživatelem (větší počet volitelných parametrů ve vědeckých softwarech), možnostmi automatizace zpracování a také v podpoře různých produktů pro zpracování PPP. V následujícím textu budou shrnuty některé programy a nástroje pro

3.4.1 Online Služby

CSRS-PPP

Canadian Spatial Reference System-PPP (CSRS-PPP) je služba poskytovaná kanadským analytickým centrem Natural Resources Canada. Jedná se o bezplatnou online službu pro zpracování měření PPP. CSRS-PPP umožňuje zpracovávat statické i kinematické observace. Výsledkem zpracování jsou souřadnice stanice v systému ITRF2014 a UTM (v patřičné zóně). Troposférické zpoždění modeluje služba CSRS-PPP s využitím globální mapovací funkce. Kromě souřadnic poskytuje CSRS-PPP i mnoho dalších informací v průběhu výpočtu (informace o fázových skocích, wind-up efektu, odlehlých hodnotách a přesnosti jednotlivých měření) a také grafy (konvergence přesnosti určení souřadnic, vývoj troposférického zpoždění, inicializace ambiguit). Aplikace CSRS-PPP je dostupná na adrese <http://www.geod.nrcan.gc.ca> (NRC, 2020).

APPS

Automatic Precise Point Positioning Service (APPS) je služba provozovaná výzkumným centrem Jet Propulsion Laboratory, které je součástí Kalifornského technologického institutu. Pro neautorizované uživatele umožňuje tato služba zpracovávat dvoufrekvenční měření metodou PPP ve statickém režimu s využitím přesných produktů IGS. Troposférické zpoždění je modelováno s využitím globální mapovací funkce. Aplikace APPS je dostupná na adrese http://apps.gdgps.net/apps_file_upload.php.

magicGNSS

MagicGNSS je online služba poskytovaná firmou GMV Aerospace and Defense. Služba umožňuje zpracovávat statická i kinematická data pomocí relativní metody a metodou PPP. MagicGNSS podporuje systémy GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou. Po registraci může uživatel volit metodu zpracování a další parametry (například elevační masku a počet iterací). Troposférické zpoždění je v rámci této služby modelováno s využitím globální mapovací funkce. Kromě observačních souborů lze do aplikace nahrát také soubory s absolutními kalibracemi GNSS antén. Aplikace MagicGNSS je dostupná na adrese <https://magicgnss.gmv.com/>.

3.4.2 Desktopové aplikace

RTKLib

RTKLib je volně dostupný program (knihovna) vytvořený Tomojiem Takasu (Tokyo University of Marine Science and Technology). Program je šířený pod licenci BSD 2. RTKLib je primárně určen pro operační systém Windows, ale lze ho používat i v rámci operačního systému Linux a Android. Samotná aplikace RTKLib se skládá z několika podružných programů, které jsou stručně popsány v tabulce 3.1. Jednotlivé aplikace lze ovládat pomocí grafického uživatelského rozhraní (GUI). Některé aplikace dále umožňují práci z příkazového řádku (CUI). Pro tuto práci je stěžejní aplikace RTKPOST, a proto zde bude blíže popsána.

Tab. 3.1: Přehled programů knihovny RTKLib

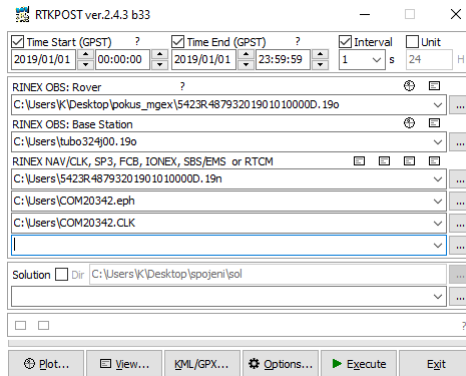
Program	Popis
RTKGET	stahování podpůrných a observačních dat GNSS (například z IGS)
RTKCONV	konverze do formátu RINEX (například z RTCM)
RTKNAVI	zpracování měření GNSS v reálném čase různými metodami
RTKPOST	zpracování měření GNSS v post-processingu různými metodami
RTKPLOT	vizualizace výsledků zpracování GNSS měření

RTKPOST umožňuje zpracování GNSS měření v post-processingu. Pro výpočet polohy jsou k dispozici jak relativní metody (statický i kinematický režim přijímače, DGPS/DGNSS), tak i absolutní metody (PPP ve statickém i kinematickém režimu, *Single Point Positioning* (SPP)). Zpracování lze řídit pomocí velkého množství nastavitelných parametrů:

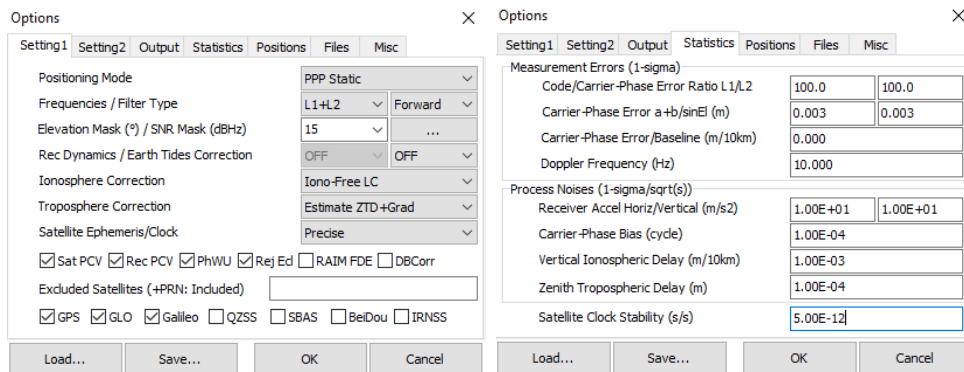
- práce se systémy GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS,
- práce s vysílanými i přesnými efemeridami a hodinami družic,
- zpracování měření na jedné i více frekvencích,
- uvážení zemských slapů, model slapového zatížení oceánského dna
- využití přesného modelu ionosféry, lineární kombinace iono-free,
- práce s modely troposféry, určování troposférického zpoždění a gradientu,
- využití souborů ATX, uvážení wind-up efektu,
- určování celočíselných hodnot ambiguit různými metodami,
- nastavení apriorních charakteristik přesnosti měřených veličin.

Ukázku hlavního okna programu RTKPOST můžeme vidět na obrázku 3.3. Ukázka oken s nastavením programu je vyobrazena na obrázcích 3.4 a 3.5.

RNX2RTKP je CUI obdoba programu RTKPOST a lze ji ovládat z příkazového řádku. Toho lze s výhodou využít při automatizaci zpracování měření GNSS. Syntaxe vstupu a nastavení pro program RNX2RTKP je uvedena ve výpisu 3.1.



Obr. 3.3: Hlavní okno programu *RTKPOST*



Obr. 3.4: RTKPOST - nastavení 1 Obr. 3.5: RTKPOST - nastavení 2

Výpis 3.1: Syntaxe programu RNX2RTKP

```
1 rnx2rtkp [option ...] file file [...]
```

Do části [option ...] vstupují například klíčové znaky:

- k file cesta ke konfiguračnímu souboru
- o file cesta k výstupnímu souboru
- b řešení v opačném směru (backward)
- c kombinované řešení (backward/forward)
- h řešení ambiguit „fix and hold“
- e výstup v pravoúhlých souřadnicích (ECEF)

Do části [...] se vkládají cesty k souborům s měřeními daty, efemeridami a hodinami družic. Ukázkou vstupu do programu *RNX2RTKP* můžeme vidět ve výpisu 3.2, kde `set.conf` představuje konfigurační soubor, `ADM.pos` výstupní soubor, `ADM20342.19o` soubor s měřeními daty, `ADM20342.19n` soubor s vysílanými efemeridami GPS, `ADM20342.19g` soubor s vysílanými efemeridami GLONASS, `COM20342.eph` soubor s přesnými efemeridami a konečně `COM20342.c1k` soubor s přesnými korekcemi hodin družic.

Výpis 3.2: Ukázka vstupu programu RNX2RTKP

```
1 rnx2rtkp -k set.conf -o ADM.pos ADM20342.19o  
2 ADM20342.19n ADM20342.19g COM20342.eph COM20342.c1k
```

Oproti dříve zmíněným programům a službám modeluje program *RTKLib* troposférické zpoždění s využitím Niellovy mapovací funkce. Podrobný popis programu *RTKLib* je uveden v (Takasu, 2013) a na adrese <http://www.rtklib.com/>.

BNC NTRIP Client

BKG Ntrip Client (BNC) je program pro zpracování GNSS dat zejména v reálném čase. Program je volně dostupný pod licencí GNU General Public Licence (GPL). BNC umožňuje přijímat, zpracovávat a kombinovat GNSS data z internetu, zpracovávat soubory RINEX a určovat polohu metodou PPP (BKG, 2020). Program *BNC* je určen zejména pro zpracování PPP v reálném čase. Pro zpracování v post-processingu je třeba mít v souboru uloženy korekce efemerid a hodin družic, které jsou poskytovány v reálném například IGS. BNC obsahuje užitečnou funkci, pomocí níž může uživatel porovnávat soubory s efemeridami a korekcemi hodin družic od různých zpracovatelských center. Program je volně ke stažení na adrese <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>.

Bernese GNSS Software

Bernese GNSS Software (aktuální verze 5.2) je komerční vědecký program vyvíjený AIUB. Program je primárně zaměřen na síťové řešení GNSS metodou dvojitéch diferencí, ale umožňuje i zpracování nediferencovaných observací metodou PPP (primárně pro určení přesných apriorních souřadnic pro síťové řešení), měření přijímačů na nízkoleticích družicích (LEO), určování parametrů troposféry a zpracování měření technologiemi SLR a DORIS. Více informací o programu Bernese lze získat například na adrese <http://www.bernese.unibe.ch/>.

G-nut

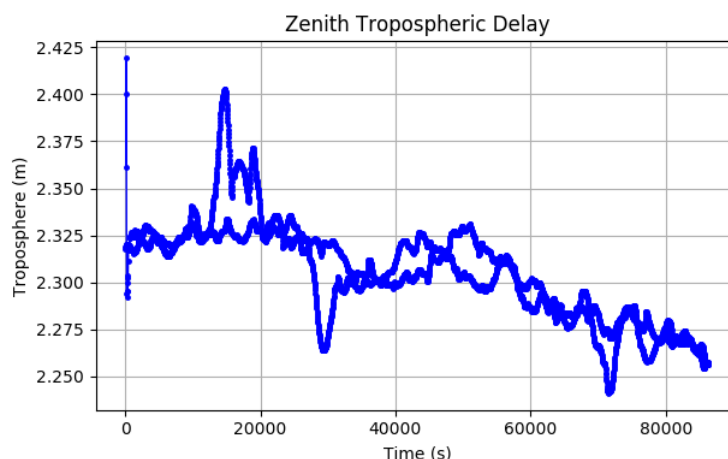
Knihovna tříd *G-nut* a další odvozené aplikace jsou od roku 2011 vyvíjeny týmem pod vedením Ing. Jana Douši, Ph.D. na Geodetické observatoři Pecný. Jednotlivé programy umožňují kontrolovat kvalitu GNSS dat (G-Nut/Anubis), určovat polohu přijímače v post-processingu i reálném čase metodou PPP (G-Nut/Geb), určovat troposférické zpoždění (G-Nut/Tefnut), pracovat s numerickými modely počasí (G-Nut/Shu) a analyzovat časové řady (G-Nut/Apep). Některé aplikace jsou volně šířeny pod licencí GNU GPL 3 (GOP, 2020). *G-nut* je určený zejména pro operační systém LINUX.

gLAB

gLAB je volně dostupný program vyvíjený Evropskou kosmickou agenturou (ESA) ve spolupráci s výzkumnou skupinou gAGE, která je součástí Polytechnic University of Catalonia (Barcelona). Program *gLAB* slouží ke zpracování GNSS měření různými metodami (SPP, PPP, relativní metody), analýze efemerid a korekcí hodin družic a vizualizaci výsledků (Sanz et al., 2012). Program nabízí širokou možnost uživatelských nastavení a práci s mnoha typy souborů s přesnými produkty. Po provedení výpočtu je k dispozici podrobný protokol s mnoha užitečnými informacemi o zpracování, které lze následně vizualizovat (Obr. 3.6). Program *gLAB* je včetně podrobné dokumentace volně ke stažení na stránce <https://gage.upc.edu/gLAB/>.

3.5 PPP v reálném čase

Dosud byla metoda PPP prezentována zejména v souvislosti s post-processingovými aplikacemi. V případě post-processingu jsou pro zpracování PPP využívány přesné produkty, které bývají publikovány s odstupem několika hodin až dní. Pro zpracování



Obr. 3.6: Parametry ZTD z řešení v programu *gLAB*

v reálném čase je nutné, aby se k uživateli tyto produkty dostaly s co nejmenším časovým zpožděním. Od roku 2013 začala přesné produkty v reálném čase poskytovat organizace IGS (Hadas – Bosy, 2015).

Produkty pro PPP v reálném čase sestávají z korekcí efemerid a hodin družic, o které jsou před samotným výpočtem PPP opravovány vysílané efemeridy. Korekce bývají zpravidla vysílány pomocí protokolu *Radio Technical Commission for Maritime Services* (RTCM) verze 3. Korekce pro PPP bývají v rámci tohoto protokolu označovány jako *State Space Representation* (SSR). Korekce jsou k jednotlivým uživatelům distribuovány pomocí internetu s využitím protokolu *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol* (NTRIP).

IGS poskytuje tři základní služby pro PPP v reálném čase (Tab. 3.2). Data pro vytváření produktů IGS jsou získávána z jednotlivých zpracovatelských center a následně kombinována pomocí programu BNC. Zpoždění dodání PPP produktů v reálném čase je přibližně 25 sekund z pohledu uživatele. Výsledná přesnost opravených efemerid dosahuje přibližně 5 cm. Korekce hodin družic dosahují přesnosti přibližně 300 ps (Wang et al., 2018). Zajímavou službou pro PPP v reálném čase je

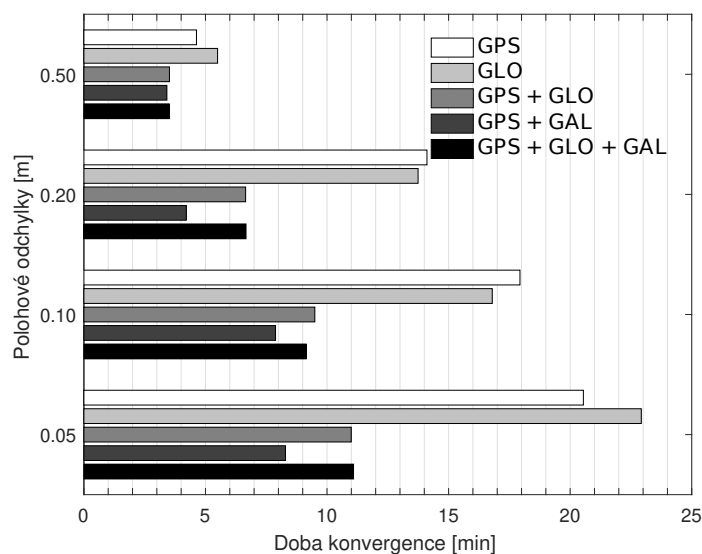
Tab. 3.2: Služby IGS pro PPP v reálném čase; (IGS, 2020b)

Služba	Družicový systém	Způsob pořízení
IGS01	GPS	kombinace řešení v jedné epoše
IGS02	GPS	kombinace řešení pomocí Kalmanova filtru
IGS03	GPS + GLONASS	kombinace řešení pomocí Kalmanova filtru

Trimble CenterPoint RTX, která poskytuje PPP korekce s využitím družic na ge-

ostacionárních drahách. Podobný přenos PPP korekcí bude umožňovat i družicový systém Galileo.

Zpracování PPP v reálném čase umožňuje i několik volně dostupných programů, například BNC a RTKLib. Přesnost řešení pak závisí na kvalitě observačních dat a působení systematických vlivů. V reálném čase lze pomocí PPP získat až centimetrovou přesnost při době konvergence prvních desítek minut (Nosek et al., 2020). Ukázkou rychlosti konvergence PPP v reálném čase s využitím různých družicových systémů můžeme vidět na obrázku 3.7.



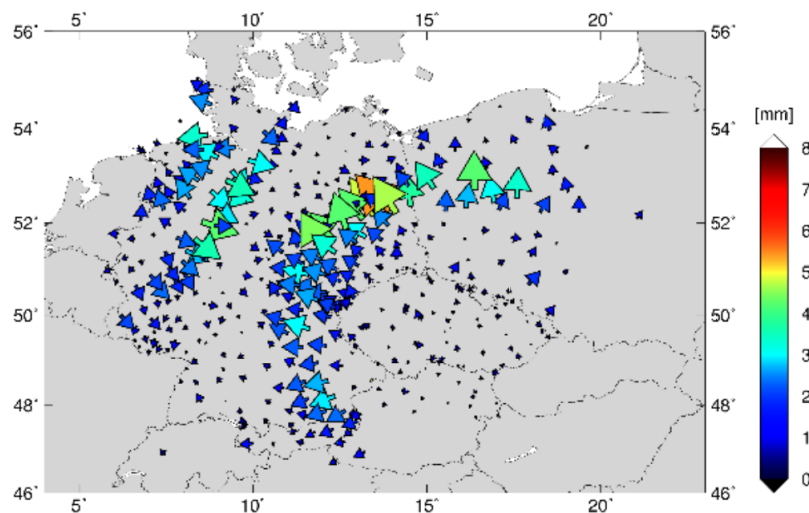
Obr. 3.7: Konvergence PPP v reálném čase; převzato (Nosek et al., 2020)

3.6 Využití metody PPP

Souběžně s vývojem PPP během posledních 20 let vznikají další možnosti uplatnění této metody v geodézii a dalších oborech. První výsledky zpracování v 90. letech 20. století byly využívány pro výpočet apriorních souřadnic pro následné síťové řešení pomocí dvojitých diferencí (Zumberge et al., 1997a). Metoda PPP umožňovala velice přesné určení souřadnic bodů, které mělo za přínos zrychlení dalšího zpracování.

Po roce 2000 začala být metoda PPP využívána pro určování korekcí hodin přijímačů a pro určování zenitového troposférického zpoždění (Kouba – Héroux, 2001). Vlastnosti metody PPP, které umožňují zpracovat paralelně data z velkého množství stanic, vedly k aplikacím v meteorologii. Hodnota zenitového troposférického zpoždění a souvisejících gradientů (Obr. 3.8), jejichž odhad může být výsledkem zpracování PPP, umožňuje určení vlhké složky troposférického zpoždění a následně

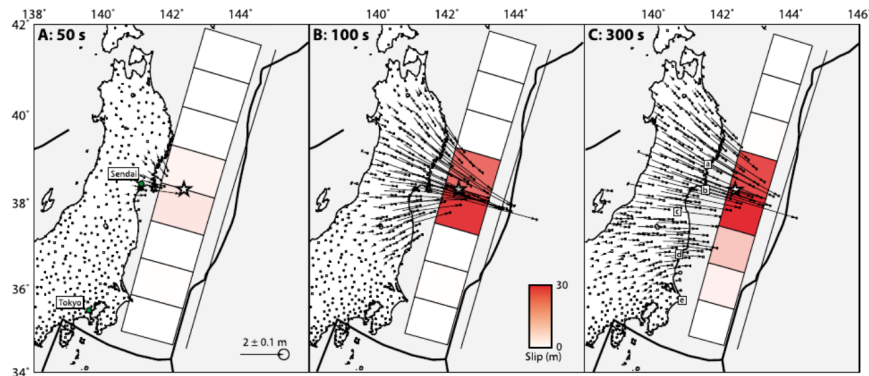
modelování obsahu vodních par v atmosféře (Gendt et al., 2004), (Li et al., 2014). V rámci tzv. GNSS meteorologie nachází PPP velké uplatnění ve zpřesňování numerických modelů počasí, kde mohou být klasická měření pomocí meteorologických balónů nahrazena daty ze sítě GNSS stanic, která jsou dostupná v jakoukoliv denní dobu (Wilgan – Geiger, 2019).



Obr. 3.8: Gradienty troposféry 31. 5. 2013 18:00 nad Německem z řešení PPP; převzato (Kačmařík et al., 2018)

Využití PPP můžeme nalézt i v oblasti seismologie a detekci zemětřesení. Horizontální a vertikální posuny zemské kůry mohou být s využitím relativních metod těžko detekovatelné, protože se vlivem zemětřesení mohou pohybovat velké části zemské kůry (Kouba, 2003). Pomocí metody PPP byly analyzovány i posuny japonské pevniny vlivem zemětřesení o síle 9.0 stupně Richterovy škály, ke kterému došlo 11. 3. 2011 poblíž japonské provincie Tóhoku. Analýzy odhalily, že kdyby byly do systému včasného varování před tsunami zahrnuty i výsledky zpracování GNSS PPP v reálném čase, bylo by možné lépe odhadnout sílu tsunami a zahájit dříve evakuaci obyvatelstva. Výzkum odhalil, že pomocí GNSS lze sílu zemětřesení stanovit již po 100 s od začátku zemětřesení (Wright et al., 2012). Ukázku posunů zjištěných na GNSS stanicích během zemětřesení 11. 3. 2011 můžeme vidět na obrázku 3.9.

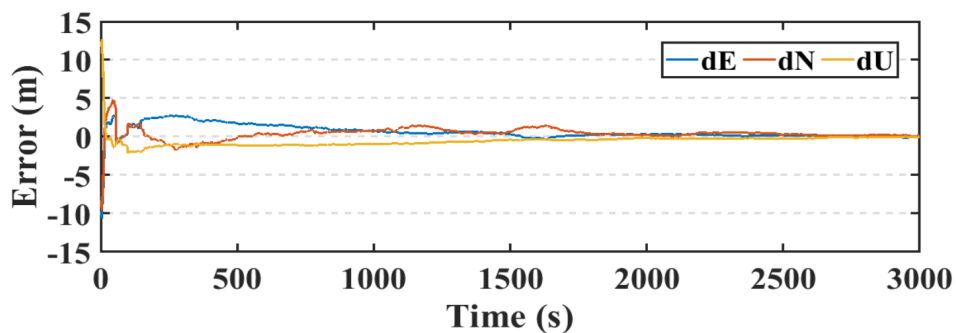
Moderní technologie zasahují v poslední době i do zemědělství. Kromě přesných předpovědí počasí a využívání leteckých snímků se začíná v zemědělství uplatňovat ve větší míře i technologie GNSS. Přesné navádění zemědělských strojů v kombinaci s různými senzory umožňuje efektivně aplikovat postřiky a hnojiva pouze na místa, kde je jich potřeba. Zemědělské stroje také mohou být na poli naváděny zcela automatizovaně bez účasti lidské posádky. Metoda PPPv reálném čase se v zemědělství může uplatnit při navádění strojů, kde je ve většině případů decimetrová přesnost



Obr. 3.9: Posuny GNSS stanic získané z řešení PPP během zemětřesení v Tohoku, 11. 3. 2011; převzato (Wright et al., 2012)

plně dostačující (Guo et al., 2018). PPP může být pro zemědělce výhodná i při vyměrování půdních celků, které jsou obsaženy v registrech půdy (LPIS).

Některé z nejnovějších mobilních telefonů umožňují práci se surovými GNSS daty. Jedním z takových mobilních telefonů je Xiaomi Mi 8, který umožňuje provádění kódových i fázových dvoufrekvenčních měření s využitím systémů GPS, GLONASS, Galileo a BeiDou. První výsledky ukazují (Obr. 3.10), že s takovýmto mobilním telefonem je možné pomocí metody PPP v reálném čase určovat polohu s přesností v řádu decimetrů (Elmezayen – El-Rabbany, 2019), (Guo et al., 2020).



Obr. 3.10: Konvergence a přesnost PPP v reálném čase s využitím mobilního telefonu Xiaomi Mi 8; převzato (Elmezayen – El-Rabbany, 2019)

4 Zpracování

4.1 Výběr software

Zpracování měření GNSS metodou PPP umožňuje celá řada programů a online služeb. Pro tuto práci bylo důležité, aby software splňoval několik podmínek:

- možnost práce s více GNSS,
- možnost importu přesných produktů a korekčních parametrů,
- možnost automatizace zpracování velkého množství dat,
- (volně dostupný software).

Každý software využívá jiný matematický aparát a pracuje s různými korekčními daty, a proto bylo důležité porovnat výsledky jednotlivých programů. Pro ověření byl zvolen vzorek observačních dat ze stanice CADM z 1. 1. 2019. Při testování byly využity přesné efemeridy a korekce hodin družic IGS. Výsledky jednotlivých programů můžeme vidět v tabulce 4.1. Hodnoty ΔE , ΔN , ΔU značí souřadnicové složky lokálního topocentrického systému (viz podkapitola 4.4), které představují skutečné chyby vůči referenční poloze bodu stanice CADM. Z porovnání vyplývá,

Tab. 4.1: Porovnání programů pro zpracování PPP

Program	Typ programu	ΔE [mm]	ΔN [mm]	ΔU [mm]
RTKLib	desktopová aplikace	-2.5	-2.9	6.2
CSRS-PPP	online služba	-1.9	-4.2	-3.9
magicGNSS	online služba	4.3	-0.3	25.1
APPS	online služba	-1.9	-3.9	22.7
gLAB	desktopová aplikace	-1.9	-4.3	-4.0

že horizontální přesnost je u všech testovaných programů podobná. Hodnoty ΔU služeb magicGNSS a APPS se nápadně liší od ostatních testovaných programů¹. Pro zpracování této diplomové práce byl po zvážení zvolen program RTKLib, který podporuje jak práci s mnoha formáty zpřesňujících produktů a více navigačními systémy, tak umožňuje automatizaci zpracování.

4.2 CADM

CADM je pracovní označení permanentní GNSS stanice, která je umístěna v rámci výzkumného centra AdMaS (Advanced Materials, Structures and Technologies), které

¹autor se domnívá, že tato odchylka může být zapříčiněna zanedbáním vlivu slapového zatížení oceánského dna (podkapitola 2.3.4), které bylo v případě ostatních programů uvažováno.

je součástí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Stanice CADM byla zprovozněna v prosinci 2017 a od té doby nepřetržitě zaznamenává data z družic čtyř navigačních systémů (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou).

Stanice je vybavena GNSS přijímačem Trimble NetR9 (sériové číslo 5423R48793) a GNSS anténou Trimble Zephyr Geodetic 2 RoHS, která je umístěna na pilíři s nucenou centrací na střeše budovy P4 centra AdMaS. Přijímač Trimble NetR9 umožňuje měření až na 440 kanálech. Data jsou v současné době zaznamenávány v intervalu 10 s a ukládány ve formátu Trimble T02. Souřadnice stanice CADM byly určeny v roce 2018 na základě celkem 9 týdenních kampaní z téhož roku. Stanice byla připojena na permanentní stanice České sítě permanentních stanic (CZEPOS) a na stanice evropské sítě permanentních stanic (EPN).

Tab. 4.2: Souřadnice stanice CADM v epoše 2018.0 (MJD 58119)

System	X [m]	Y [m]	Z [m]
ETRF2000	3999588.7745	1190109.7502	4807943.3933
ITRF2014	3999588.2433	1190110.1938	4807943.7302



Obr. 4.1: Permanentní stanice CADM

Stanice CADM je využívána pro testování různého softwarového a hardwarového vybavení výzkumného centra AdMaS a k podpoře výzkumných aktivit Ústavu geodézie Fakulty stavební VUT v Brně.

4.3 Strategie zpracování

Před zahájením zpracování měření GNSS metodou PPP v programu RTKLib bylo potřeba získat podpůrné soubory, stanovit postup zpracování a připravit automatizaci zpracování. Pro přehlednost bylo celé řešení rozděleno do několika samostatných variant.

4.3.1 Varianty zpracování

Podle zadání práce má být přesnost metody PPP testována na datech z delšího časového úseku. Samotné testování přesnosti bylo rozděleno do dvou samostatných variant:

- testování přesnosti různých GNSS a jejich kombinací,
- testování přesnosti v závislosti na délce observace.

Testování přesnosti různých GNSS a jejich kombinací

Cílem této varianty bylo otestovat různé GNSS. Pro tuto práci byly vybrány systémy GPS, GLONASS a Galileo (u systému BeiDou byl po většinu období 2018 – 2019 nedostatečný počet družic pro zpracování s přesností odpovídající ostatním GNSS). Přesnost kombinací GNSS byla testována na základě observací z let 2018 – 2019. Zpracovávány byly vždy 24hodinové observační soubory (celkem 720 dnů) v 7 různých variantách. Pro zpřehlednění při následném zpracování byly jednotlivé varianty označeny zkratkami, jak můžeme vidět v tabulce 4.3. Zpracování dlouho-

Tab. 4.3: Varianty porovnání přesnosti GNSS

Zkratka	Použité GNSS
G	GPS
R	GLONASS
E	Galileo
GR	GPS + GLONASS
GE	GPS + Galileo
RE	GLONASS + Galileo
GRE	GPS + GLONASS + Galileo

dobých měření GNSS bývá často řešeno s využitím pouze systému GPS. Jedním z výstupů této varianty bude ověření, jestli je takový přístup výhodný, nebo zda je výhodnější kombinace více družicových systémů, která na jednu stranu vnáší do výpočtu chyby související s transformacemi jednotlivých GNSS, ale zároveň může být přínosná kvůli vyššímu počtu měřených družic.

Testování přesnosti v závislosti na délce observace

V této variantě je cílem zhodnotit, jak přesně lze určovat polohu pomocí metody PPP s využitím různě dlouhých observací. Můžeme předpokládat, že existuje souvislost mezi zvyšující se přesností řešení a délkou observace. V této variantě budou využity pouze dvě kombinace družicových systémů:

- pouze systém GPS (G),
- kombinace systémů GPS, GLONASS, Galileo (GRE).

Testování v závislosti na délce observace bylo dále rozděleno na dvě samostatné části:

- delší observace (3 h, 6 h, 12 h, 24 h),
- kratší observace (10 min, 20 min, 30 min, 60 min).

Varianta „delších“ observací může odpovídat svou délkou statické metodě, která je řešena relativní metodou pomocí dvojitých diferencí. Varianta „kratších“ observací svou délkou odpovídá rychlé statické metodě. Z důvodu velkého množství dat, které by bylo nutno zpracovat kdyby se vyhodnocovaly roky 2018 – 2019 (jako u varianty porovnání kombinací GNSS), byl pro variantu testování „delších“ observací vybrán rok 2018 a pro variantu „kratších“ observací 50 dní z roku 2018.

Tab. 4.4: Počet zpracovávaných observací

Délka observace	Počet observací
24hodinová	365
12hodinová	720
6hodinová	1460
3hodinová	2920
60minutová	1200
30minutová	2400
20minutová	3600
10minutová	7200

4.3.2 Příprava souborů pro zpracování PPP

Při zpracování GNSS měření pomocí metody PPP je třeba uvažovat různé systematické vlivy, které mají vliv na výslednou přesnost (viz kapitola 2). Program RTKLib podporuje zejména práci se standardizovaným formátem RINEX, který je všeobecně nejpoužívanější při zpracování GNSS měření. Pro zpracování PPP byla využita podpůrná data od různých poskytovatelů, jak můžeme vidět v tabulce 4.5. Data po-

Tab. 4.5: Podpůrná data použitá pro zpracování PPP

Typ podpůrných dat	Formát	Poskytovatel
efemeridy družic	SP3 (EPH)	CODE ²
korekce hodin družic	CLK	CODE
parametry rotace a orientace Země	ERP	CODE
diferenční kódové bias	DCB	CODE
kalibrace fázových center antén	ATX	IGS
globální ionosférická mapa	IONEX	CODE
model slapového zatížení oceánského dna	BLW	Onsala Space Observatory ³

skytovaná CODE je možné získat z FTP serveru <http://ftp.aiub.unibe.ch/>. Soubory bývají zpravidla označovány kombinací pořadového čísla GPS týdne a GPS dne. Soubory s globální ionosférickou mapou bývají označovány pomocí pořadového čísla dne v roce – *Day of Year* (DOY). Soubor s absolutními kalibracemi fázových center antén přijímačů a družic GNSS poskytovaný IGS lze získat na adrese <ftp://www.igs.org/pub/station/general/igs14.atx>.

```

CADM
$$ Complete FES2004
$$ OLCMC/ OLFPG, H.-G. Scherneck, Onsala Space Observatory 2019-Aug-22
$$ CADM,          RADI TANG lon/lat:  16.5928  49.2059  324.390
.00476 .00173 .00115 .00041 .00164 .00170 .00055 .00038 .00030 .00018 .00019
.00192 .00023 .00049 .00004 .00185 .00100 .00060 .00018 .00004 .00003 .00003
.00130 .00022 .00027 .00010 .00375 .00245 .00125 .00042 .00039 .00024 .00019
-92.9  -65.9 -110.1  -78.2  144.8  142.2  144.2  136.4  100.8  62.0   8.6
 122.4  178.1  98.4 -144.8   82.3   48.2   82.7    9.2  114.5  104.7  14.6
   80.0  136.4   74.6   81.5  -98.2 -114.0  -98.3 -130.7   69.1   31.3   7.2

```

Obr. 4.2: Ukázka souboru BLQ s modelem FES2004 pro stanici CADM

Soubor s modelem slapového zatížení oceánského dna pro stanici CADM byl vygenerován na základě zadaných souřadnic stanice na adrese <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>. Využit byl model FES2004. Ukázku souboru BLQ pro stanici CADM můžeme vidět na obrázku 4.2.

4.3.3 Nastavení programu RTKLib

Pro zpracování všech variant byl program RTKLib nastaven se stejnými parametry. Nejdůležitější z nich můžeme vidět v tabulce 4.6. Zkrácenou ukázkou konfiguračního

²Center for Orbit Determination in Europe (CODE) je součástí Astronomického institutu bernské univerzity (AIUB) a zároveň je jedním z analytických center IGS

³Onsala Space Observatory je součástí Chalmers University of Technology (Švédsko)

Tab. 4.6: Základní nastavené parametry programu RTKLib

Parametr	Hodnota
použité frekvence	L1 + L2
elevační maska	7°
mód přijímače	statický
modelování ionosféry	lineární kombinace iono-free
modelování troposféry	určování ZTD a gradientů
směr řešení	kombinovaný (forward + backward filtr)
metoda řešení neznámých	rozšířený Kalmanův filtr
typ efemerid a korekcí hodin družic	přesné
modelování slapových vlivů	zemské slapy + OTL
řešení ambiguit	celočíselné (PPP)
parametry fázových center antén	absolutní (igs14.atx)
wind-up efekt	uvažován
diferenční kódové bias	uvažovány

souboru pro zpracování metodou PPP v programu RTKLib můžeme vidět v příloze A (pro stanici CADM, 1. 1. 2019). Kompletní ukázka konfiguračního souboru je součástí elektronických příloh.

4.3.4 Automatizace zpracování PPP

Jak bylo zmíněno v podkapitole 3.4, program RTKLib umožňuje i práci z příkazového řádku. Ke zpracování v post-processingu je určena konzolová aplikace RNX2RTKP. Automatizované zpracování lze v operačním systému Windows provádět s využitím dávkových souborů Batch⁴ (*.bat).

K vytváření dávkových souborů autor vytvořil celkem tři skripty v programu Matlab R2016a. Přípravu dávkových souborů pro variantu kombinace GNSS řeší skript `makeBat.m`. Do skriptu vstupují soubory obsahující seznam dnů, pro které má být dávkový soubor vytvořen, seznam pořadových čísel dnů v roce a seznam obsahující čísla GPS dnů a jim příslušných týdnů. Zkrácenou ukázkou skriptu můžeme vidět v příloze B. Podobnou strukturu má skript `makeBatTime.m`, který připravuje dávkový soubor pro variantu porovnání různě dlouhých observací. Zkrácenou ukázkou skriptu můžeme vidět v příloze C. Konfigurační soubory pro jednotlivé varianty zpracování jsou vytvářeny pomocí skriptu `makeConf.m`. Nezkrácené verze všech skriptů jsou k dispozici v elektronických přílohách.

⁴Batch je skriptovací jazyk vyvinutý pro operační systém Windows. Jazyk využívá pro svůj běh příkazového řádku

4.4 Předzpracování výsledků řešení PPP

Zpracování observačních dat metodou PPP bylo prováděno na počítačích v učebnách Ústavu geodézie Fakulty stavební VUT v Brně. Výsledkem zpracování všech variant programem RTKLib (RNX2RTKP) byly textové soubory, kdy každý z nich obsahoval zpracování právě jedné observace. Pro snadnější přenos výsledků a následné zpracování byl vytvořen program `pos2txt.exe`, který z jednotlivých souborů s výsledky vytvořil jeden textový soubor pro každou zpracovávanou variantu. Program `pos2txt.exe` byl napsán v programovacím jazyku C# ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2019. Zdrojový kód programu i zkompileovaný spustitelný soubor `pos2txt.exe` jsou součástí elektronických příloh.

Následné zpracování výsledků probíhalo v programu Matlab R2016a. Soubory s výsledky zpracování PPP musely být před analýzami předzpracovány do požadované podoby. V prvním kroku bylo třeba vyhledat diskontinuity v souborech. Tyto diskontinuity vznikaly v případech, kdy se nepodařilo určit souřadnice přijímače (například kvůli nedostatečnému počtu družic v průběhu řešení). K tomuto účelu byl vytvořen skript `detectDis.m`, který vyhledává v jednotlivých souborech diskontinuity a nahrazuje je hodnotami NaN (Not a Number). Opravená data jsou následně ukládána ve stejné struktuře jako data surová. Na podobném principu fungují i další vytvořené skripty. Pro snadný import datové struktury výstupu programu RTKLib byla vytvořena funkce `loadPosFile.m`.

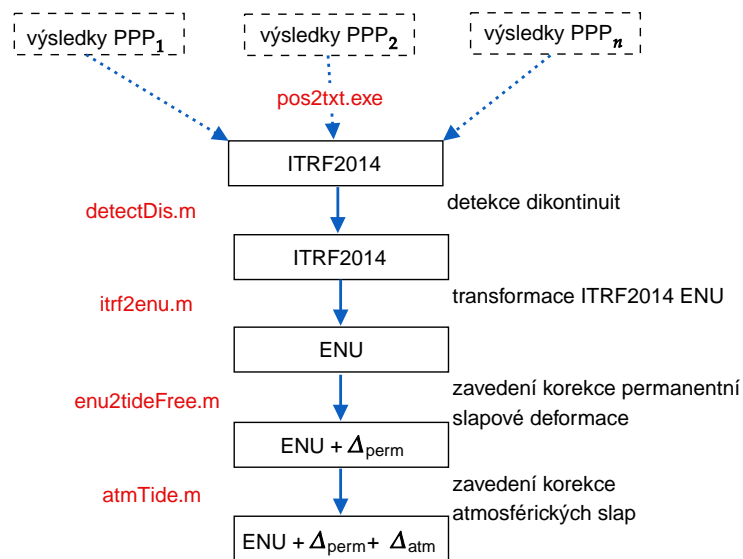
Orientace souřadnicových os systému ITRF2014, ke kterému jsou vztaženy výsledky řešení PPP, znesnadňuje snadnou interpretaci výsledků, protože osa z směřuje ve směru spojnice počátku systému a pólu. Z tohoto důvodu byly výsledné souřadnice všech variant transformovány do lokálního topocentrického systému (viz podkapitola 1.2). Pomocí rovnice (1.1) byly souřadnice ITRF2014 transformovány do systému NEU , kde bylo topocentrum lokálního topocentrického systému voleno v referenční poloze bodu CADM (podkapitola 4.2)⁵. Souřadnice levotočivého systému NEU byly následně převedeny do pravotočivému systému ENU pomocí jednoduchého vztahu

$$\begin{pmatrix} E \\ N \\ U \end{pmatrix}_{ENU} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n \\ e \\ u \end{pmatrix}_{NEU}, \quad (4.1)$$

Pro transformaci do topocentrického systému byl vytvořen skript `itrf2enu.m`, který opět využívá k importu souborů s datovou strukturou RTKLib funkci `loadPosFile.m`.

⁵Při zpracování byly uvažovány změny souřadnic stanice CADM způsobené pohybem litosférických desek. Rychlosti pohybu stanice CADM v systému ITRF2014 byly převzaty z permanentní stanice TUBO. Všechny souřadnice byly transformovány do společné epochy s využitím rovnice (2.26).

V průběhu zpracování byl zjištěn systematický posun ve výškách U přibližně 5 cm. Na základě zdrojových kódů programu RTKLib bylo zjištěno, že program zanedbává permanentní slapovou deformaci. Všechny výsledky jednotlivých variant tedy byly v systému „mean tide“. Pro transformaci do systému „tide-free“, kterým je i systém ITRF2014, byl využit vzorec (2.30), který byl implementován do skriptu `enu2tideFree.m` a funkce `meanTide2TideFree.m`. Na závěr byly pomocí skriptu `atmTide.m` souřadnice opraveny o korekce vlivu atmosférických slapů, které byly získány z online služby <http://massloading.net/atm/>. Schéma průběhu celého předzpracování je zobrazeno na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Předzpracování výsledků PPP

5 Výsledky

5.1 Porovnání různých GNSS

Na základě souřadnic E , N , U lokálního topocentrického systému (představují skutečné chyby) bylo možné vypočítat přesnost jednotlivých variant, která je charakterizována výběrovými směrodatnými odchylkami jednoho určení souřadnic σ_E , σ_N , σ_U , které lze vypočítat jako

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}}, \quad \sigma_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n}}, \quad \sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}}, \quad (5.1)$$

kde n je počet souřadnic (epoch). Směrodatné odchylky byly počítány zvlášť pro rok 2018 i pro rok 2019 a jejich hodnoty můžeme vidět v tabulce 5.1. Každá z uvedených směrodatných odchylek odpovídá přesnosti, které jsme schopni dosáhnout během jedné 24hodinové observace. Z tabulky vyplývá, že pomocí metody PPP a 24hodinových observací lze určovat polohu s přesností lepší než 1 cm. Informace o absolutních hodnotách maximálních odchylek jednotlivých složek souřadnic můžeme vidět v tabulce 5.2.

Tab. 5.1: Přesnost 24hodinového řešení PPP [m]

GNSS	2018				2019			
	σ_E	σ_N	σ_U	n	σ_E	σ_N	σ_U	n
G	0,002	0,003	0,008	365	0,003	0,003	0,007	365
R	0,007	0,007	0,009	361	0,008	0,007	0,011	364
E	0,007	0,006	0,021	170	0,008	0,006	0,021	320
GR	0,005	0,005	0,007	365	0,005	0,004	0,007	365
GE	0,003	0,003	0,010	365	0,008	0,006	0,021	320
RE	0,007	0,006	0,009	364	0,007	0,006	0,009	363
GRE	0,005	0,005	0,008	365	0,005	0,004	0,007	365

Informace o úspěšnosti vyřešení souřadnic metodou PPP nám poskytne tabulka 5.3. Nižší úspěšnost řešení v případě systému Galileo je způsobena nízkým počtem družic v některých dnech (pro metodu PPP je potřeba minimálně 5 družic). Systém GPS (případně jeho kombinace s jinými GNSS) nám může zaručit až 100% jistotu, že dosáhneme úspěšného řešení PPP. Informace o průměrném počtu družic v jednotlivých dnech roku 2018 můžeme vidět na obrázku 5.1. Zajímavý je sezonní výkyv počtu družic systému GPS v období mezi 80. a 150. dnem roku 2018. Vyšší počet úspěšně vyřešených observací s využitím systému Galileo v druhé polovině

Tab. 5.2: Maximální hodnoty odchylek PPP [m]

GNSS	2018				2019			
	max _E	max _N	max _U	n	max _E	max _N	max _U	n
G	0,011	0,011	0,022	365	0,013	0,006	0,018	365
R	0,019	0,021	0,028	361	0,021	0,015	0,044	364
E	0,023	0,013	0,045	170	0,071	0,055	0,058	320
GR	0,011	0,011	0,020	365	0,013	0,009	0,021	365
GE	0,012	0,010	0,030	365	0,015	0,007	0,025	320
RE	0,018	0,017	0,025	364	0,019	0,012	0,036	363
GRE	0,011	0,011	0,023	365	0,013	0,009	0,024	365

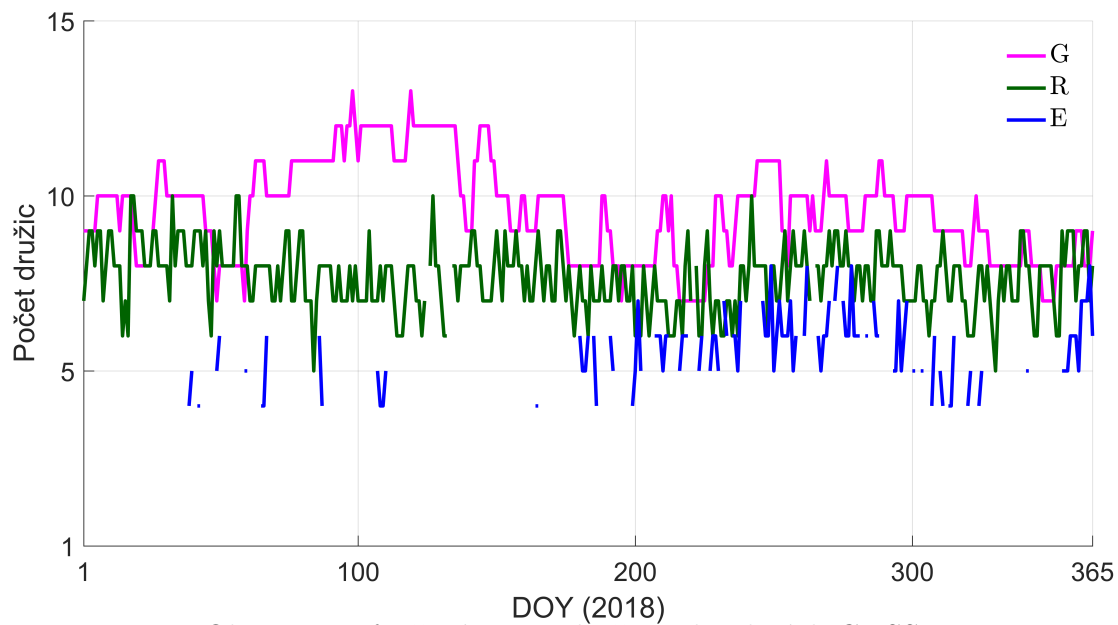
roku zřejmě souvisí s vypuštěním 4 nových družic Galileo na oběžnou dráhu Země, ke kterému došlo 25. 7. 2018.

Tab. 5.3: Procentuální úspěšnost řešení PPP

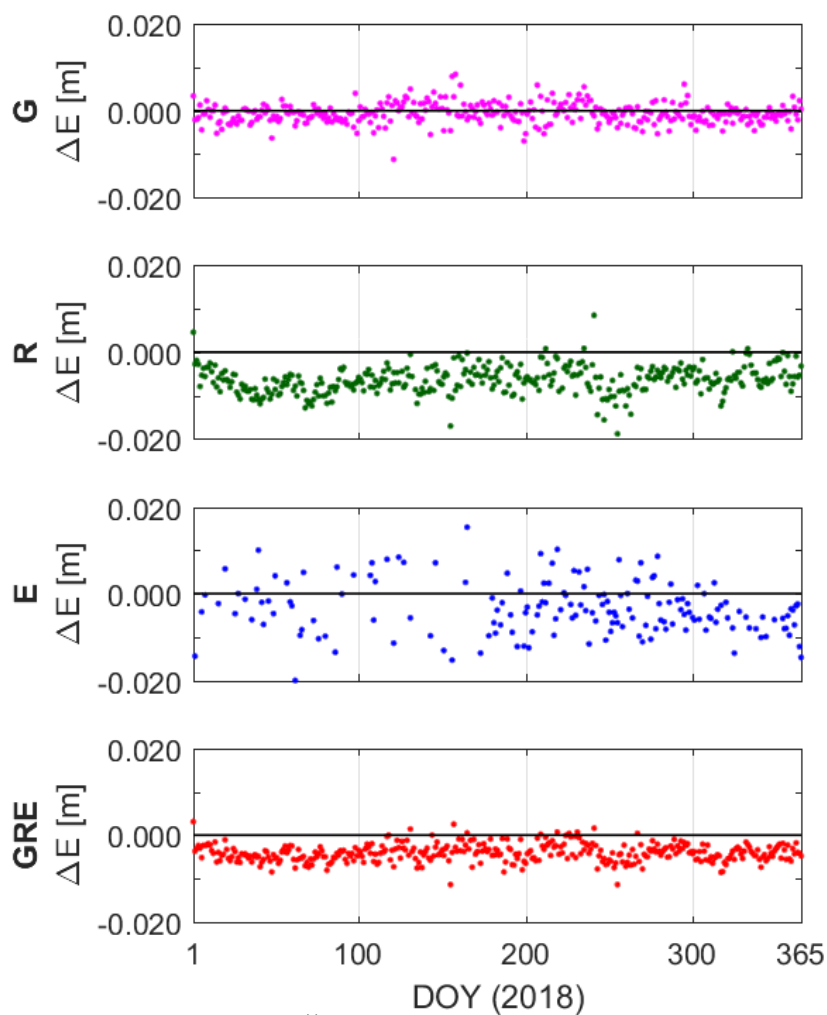
GNSS	2018 [%]	2019 [%]
G	100.0	100.0
R	98.9	99.7
E	46.6	87.7
GR	100.0	100.0
GE	100.0	87.7
RE	99.7	99.5
GRE	100.0	100.0

Na obrázcích 5.2 a 5.3 můžeme vidět časový průběh odchylek E a N během roku 2018 s využitím družicových systémů GPS, GLONASS, Galileo a jejich kombinace. Periodické změny souřadnicových odchylek u jednotlivých družicových systémů pravděpodobně souvisejí s ročními variacemi vlivu ionosféry a také se zbytkovými systematickými vlivy, které nebyly ve zpracování PPP modelovány, nebo byly modelovány s nižší přesností.

Nejpřesnější výsledky poskytuje řešení s využitím pouze systému GPS. Při delších observacích (například 24hodinových) může vést kombinace více družicových systémů k nižší přesnosti, kdy se nepříznivě projevují jak chyby způsobené transformacemi mezi jednotlivými systémy, tak různé vlivy související s architekturou a použitými technologiemi jednotlivých družicových systémů. Tento předpoklad můžeme vidět na obrázku 5.3, kde změnový trend souřadnice N u systému GLONASS na konci roku 2018 negativně ovlivňuje i kombinované řešení (GRE). Již zmiňované

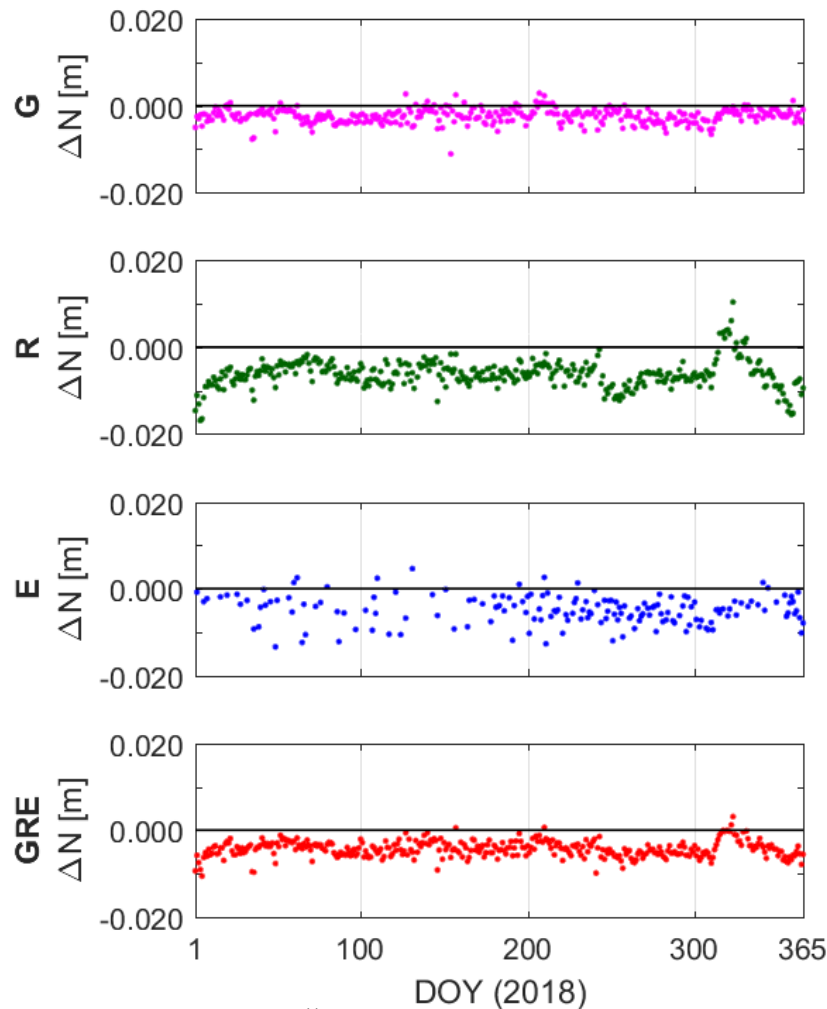


Obr. 5.1: Průměrný počet družic jednotlivých GNSS



Obr. 5.2: Časový průběh odchylek E

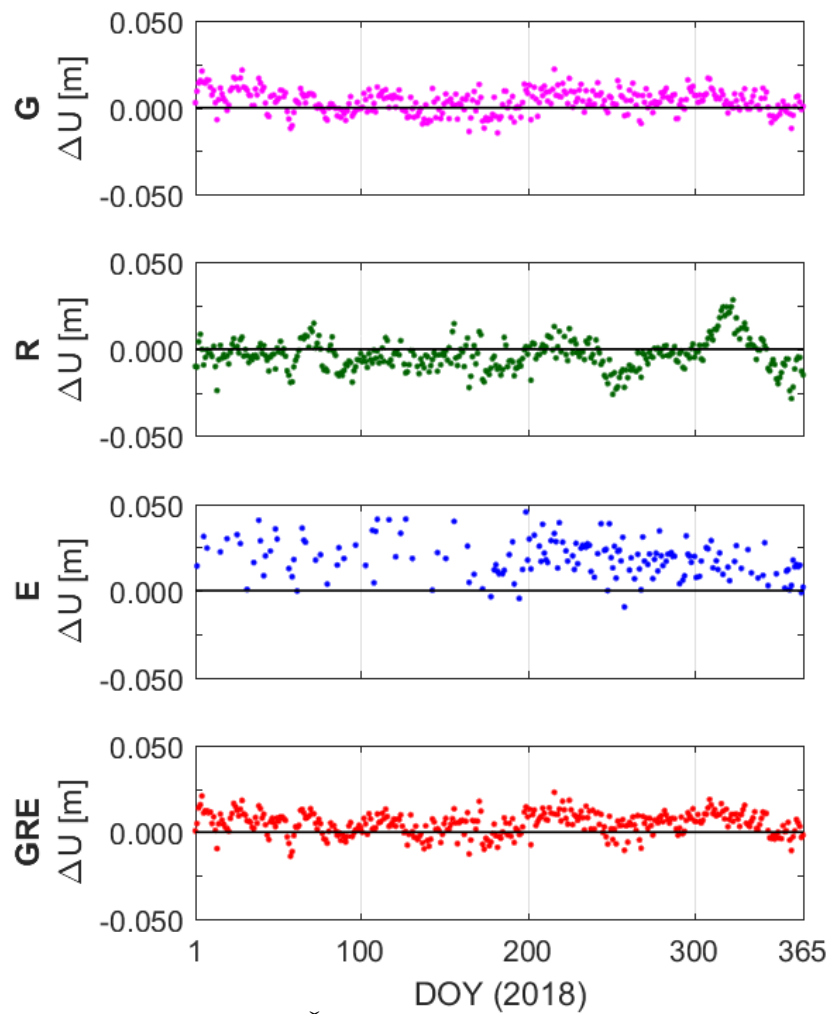
vypuštění nových družic Galileo v roce 2018 přispělo k stabilnějším výsledkům PPP s využitím tohoto systému.



Obr. 5.3: Časový průběh odchylek N

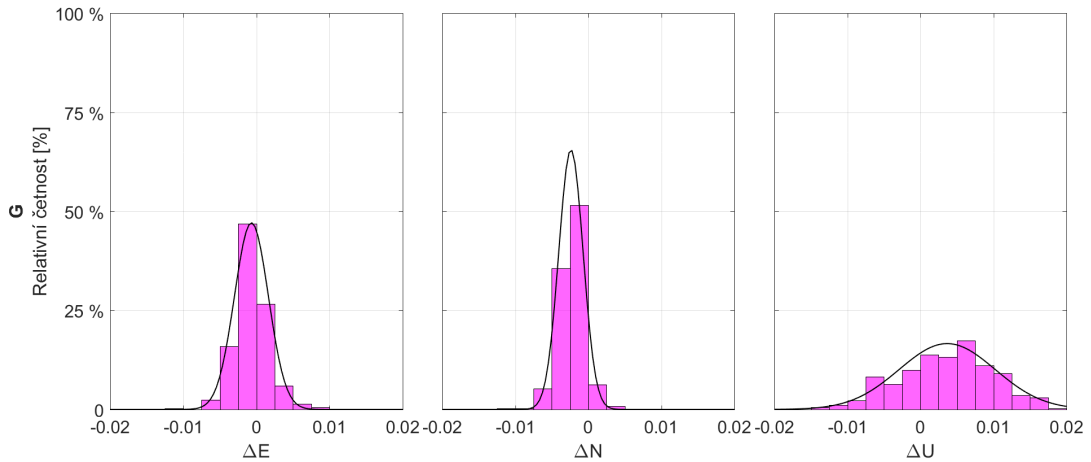
Výškové odchylky (U) vykazují oproti polohovým odchylkám větší rozptyl, a proto byly v grafech zobrazeny s jiným měřítkem, než měly horizontální složky souřadnic (Obr. 5.4). Největší rozptyl výsledků je opět patrný u systému Galileo. Nejlepší výsledky byly dosaženy s využitím pouze systému GPS.

Pro lepší představu o rozložení odchylek od referenční hodnoty souřadnic bodu CADM v rámci jednotlivých zpracovávaných variant byly vytvořeny histogramy relativních četností. Jejichž ukázkou pro variantu G a GRE můžeme vidět na obrázcích 5.5. Histogramy jsou zároveň doplněny znázorněním funkcí hustoty pravděpodobnosti. U všech variant byla ověřována hypotéza o jejich normálním rozložení (test dobré shody) pomocí Kolmogorov-Smirnovova testu pro jeden výběr (Hampacher – Štroner, 2015). Všechny výsledky jednotlivých variant odpovídají normálnímu rozdělení na hladině významnosti $\alpha = 5 \%$. Díky potvrzení normality jednotlivých

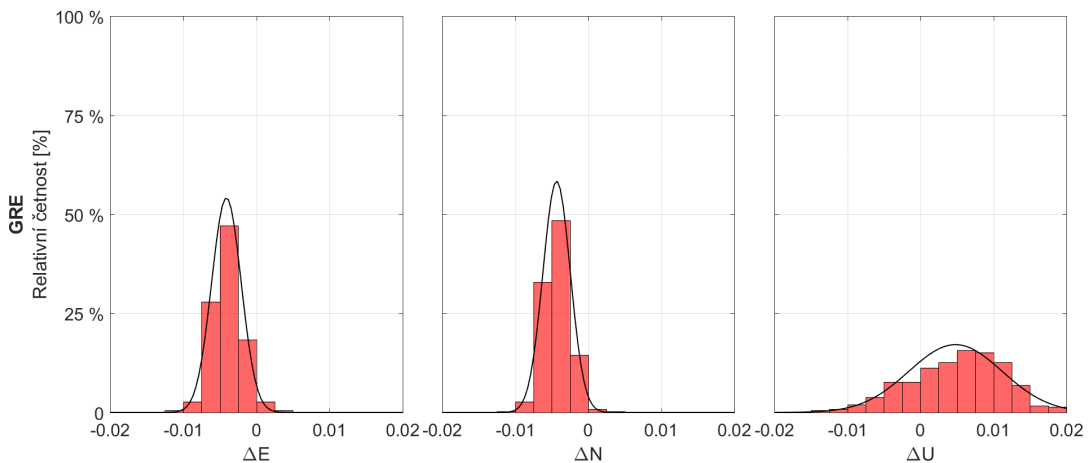


Obr. 5.4: Časový průběh odchylek U

variant lze vypočtené střední hodnoty a směrodatné odchylky jednotlivých variant považovat za nestranné odhady.



Obr. 5.5: Histogramy relativní četnosti odchylek, varianta G, rok 2018



Obr. 5.6: Histogramy relativní četnosti odchylek, varianta GRE, rok 2018

Následně bylo možné testovat hypotézu o shodnosti výběrových směrodatných odchylek, které jsou uvedeny v tabulce 5.1, pomocí tzv. F-testu. Cílem testu je ověřit, zda výsledky zpracování metodou PPP v letech 2018 a 2019 patří do dvou základních souborů, pro které platí rovnost směrodatných odchylek (základních středních chyb) $\sigma_{2018} = \sigma_{2019}$ (Hampacher – Štroner, 2015).

Z tabulky 5.4 vyplývá, že až na výjimky musíme hypotézu o shodnosti výběrových směrodatných odchylek zamítnout. Z výsledků získaných s využitím pouze systému GPS byly vypočteny průměrné odchylky \bar{E} , \bar{N} , \bar{U} zvláště pro oba roky Tab. 5.5.

Meziroční rozdíly průměrných hodnot odchylek s nejvyšší pravděpodobností souvisí s limitní přesností metody PPP. Nabízí se i hypotéza o posunu stanice CADM během let 2018 – 2019.

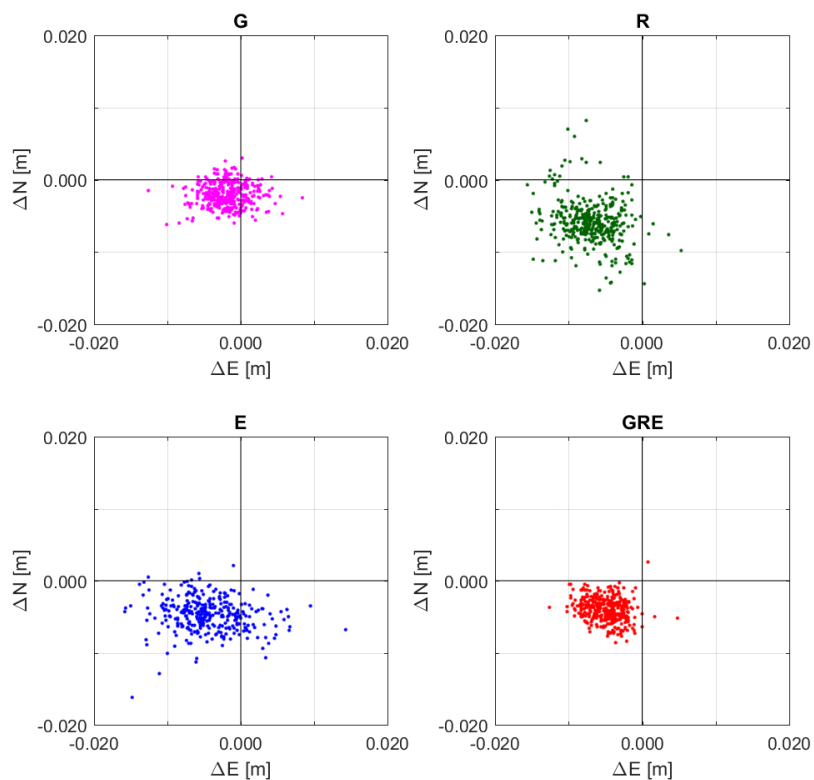
Tab. 5.4: Výsledky F-testu při porovnání výsledků z let 2018 a 2019

SPLNĚNÍ TESTU			
GNSS	E	N	U
G	NE	ANO	NE
R	NE	ANO	NE
E	NE	ANO	ANO
GR	ANO	NE	ANO
GE	NE	NE	NE
RE	ANO	ANO	ANO
GRE	ANO	NE	NE

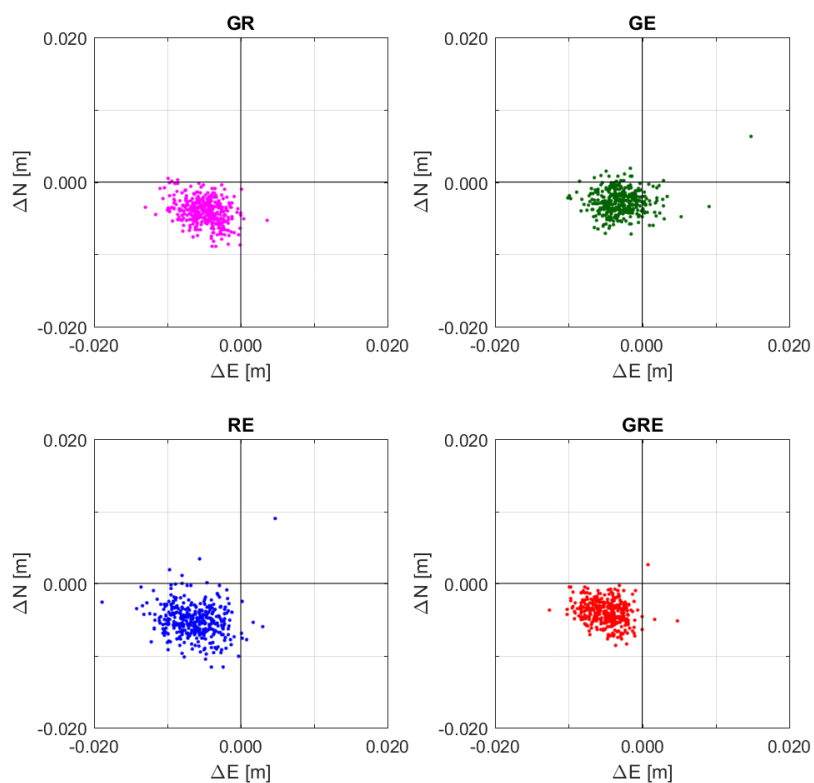
Tab. 5.5: Průměrné hodnoty odchylek s využitím systému GPS v letech 2018 – 2019

ROK	\bar{E} [mm]	\bar{N} [mm]	\bar{U} [mm]
2018	-0.7	-6.3	-1.7
2019	-1.9	-6.9	-3.7

Jiný pohled na výsledky zpracování PPP poskytují obrázky 5.7 a 5.8. Největší rozptyl výsledků má řešení s využitím pouze systému Galileo. Výsledky řešení s využitím systému GLONASS vykazují systematický posun ve směru jihozápadu o velikosti přibližně 0,7 cm. Tento posun negativně ovlivňuje výslednou přesnost výsledků kombinací GR a GRE, jak můžeme vidět na obrázku 5.8. Kombinace GE dává téměř totožné výsledky, jako při použití pouze systému GPS.



Obr. 5.7: Polohové odchylky výsledků různých GNSS 1



Obr. 5.8: Polohové odchylky výsledků různých GNSS 2

5.2 Porovnání podle délky observace

Porovnání 24hodinových řešení PPP ukázalo, že nejpřesnějších výsledků lze dosáhnout s využitím pouze systému GPS. U kratších observací, které mají zákonitě menší přesnost, se příznivě projeví kombinace více GNSS. Testování v závislosti na délce observace bylo proto řešeno s využitím pouze systému GPS (varianta G) a kombinace všech GNSS používaných v této práci (varianta GRE).

5.2.1 Varianta „delší observace“

Podobně, jako u varianty porovnání různých GNSS, byla přesnost jednotlivých řešení, charakterizovaná výběrovými směrodatnými odchylkami jednoho určení souřadnic, odvozena na základě (5.1). Charakteristiky přesnosti observací dlouhých 24 hodin, 12 hodin, 6 hodin a 3 hodiny můžeme vidět v tabulce 5.6. V případě 24hodinové observace dosahuje vyšší přesnosti varianta s využitím pouze systému GPS. Zkracováním délky observace se začínají příznivě projevovat souvislosti kombinace více GNSS (GRE) a tato varianta dává přesnější výsledky již při využití 12hodinových observací. Zkracováním délky observace až na délku 3 hodin dochází k postupnému snižování přesnosti u obou variant, ale tento pokles přesnosti je u varianty GRE pomalejší. Absolutní hodnoty maximálních odchylek jednotlivých souřadnic jsou uvedeny v tabulce 5.7.

Tab. 5.6: Přesnost varianty „delší observace“ [m]

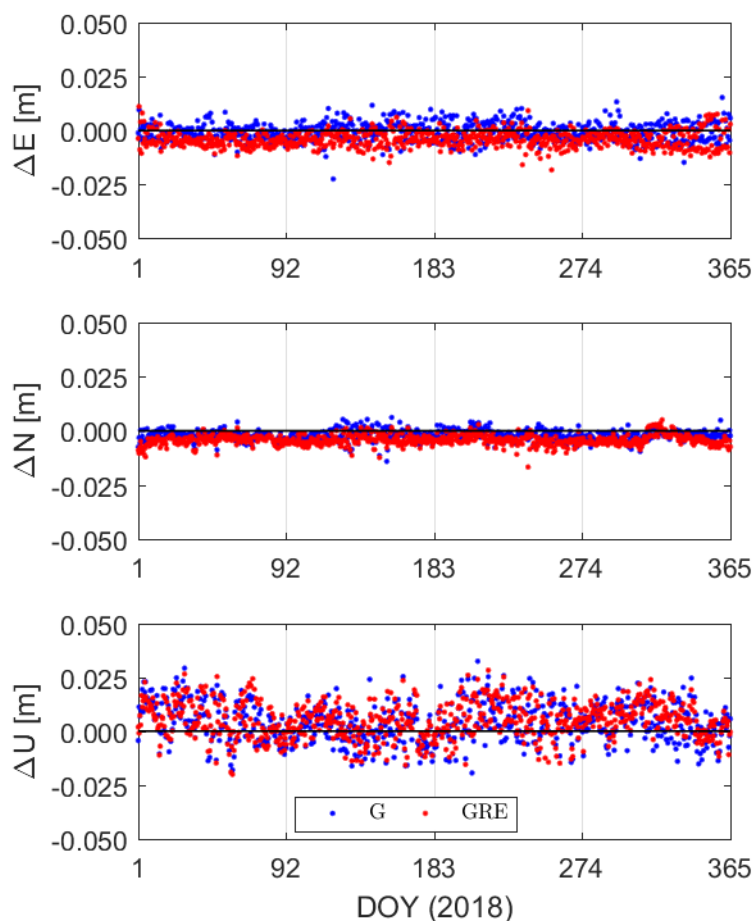
Varianta	G			GRE		
	σ_E	σ_N	σ_U	σ_E	σ_N	σ_U
24 h	0.002	0.003	0.008	0.005	0.005	0.008
12 h	0.012	0.007	0.010	0.010	0.006	0.010
6 h	0.014	0.009	0.014	0.010	0.007	0.012
3 h	0.019	0.011	0.019	0.016	0.008	0.017

Ukázku grafického znázornění odchylek můžeme vidět na obrázcích 5.9 a 5.11. Oproti 24hodinovým řešením (obrázky 5.2, 5.3 5.4) můžeme vidět trend zhoršování přesnosti nepřímo úměrný délce řešení. Periodické variace velikosti odchylek U v průběhu roku 2018 jsou pravděpodobně způsobeny nemodelovanými systematickými vlivy a aktivitou ionosféry. Kombinace více družicových systémů (GRE) výrazně napomáhá zvyšovat těsnost shody výsledků (zřejmě u odchylek E a N varianty 3hodinových observací).

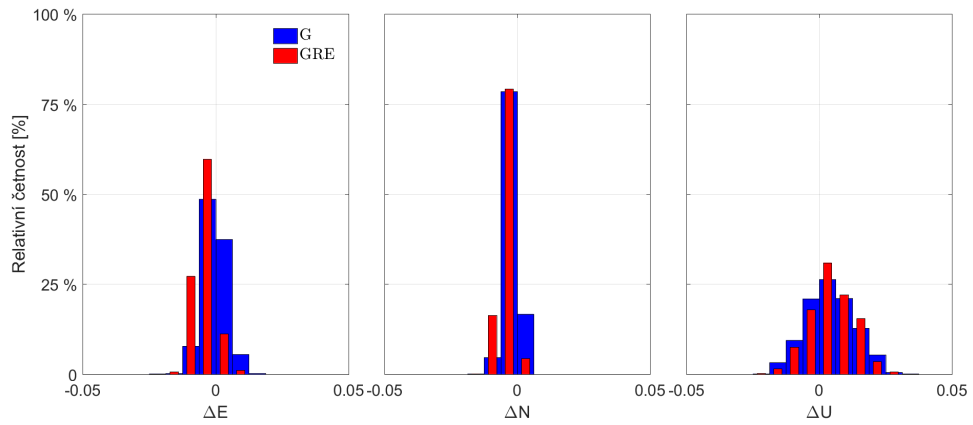
Tab. 5.7: Maximální hodnoty odchylek varianty „delší observace“ [m]

GNSS	G			GRE		
	max _E	max _N	max _U	max _E	max _N	max _U
24 h	0.011	0.011	0.022	0.011	0.010	0.023
12 h	0.022	0.014	0.032	0.018	0.017	0.028
6 h	0.053	0.027	0.053	0.033	0.027	0.046
3 h	0.114	0.089	0.103	0.049	0.105	0.233

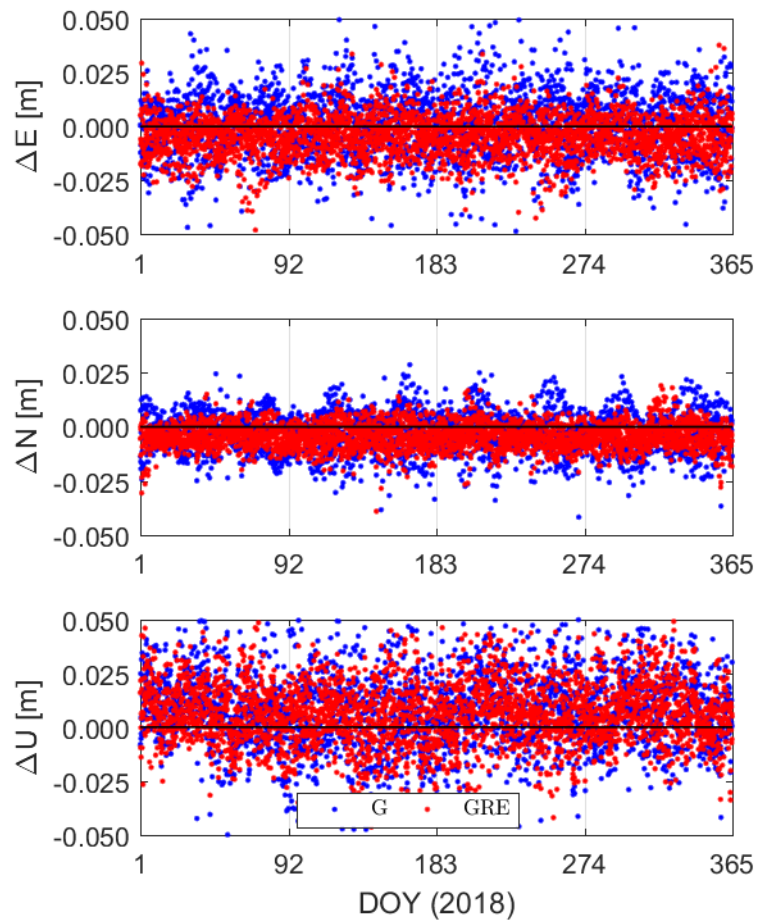
Obrázky 5.10 a 5.12 znázorňují histogramy relativní četnosti odchylek jednotlivých variant. I z těchto histogramů je zřejmé, že varianta GRE příznivě přispívá k zvyšování vnitřní přesnosti řešení a celkové přesnosti.



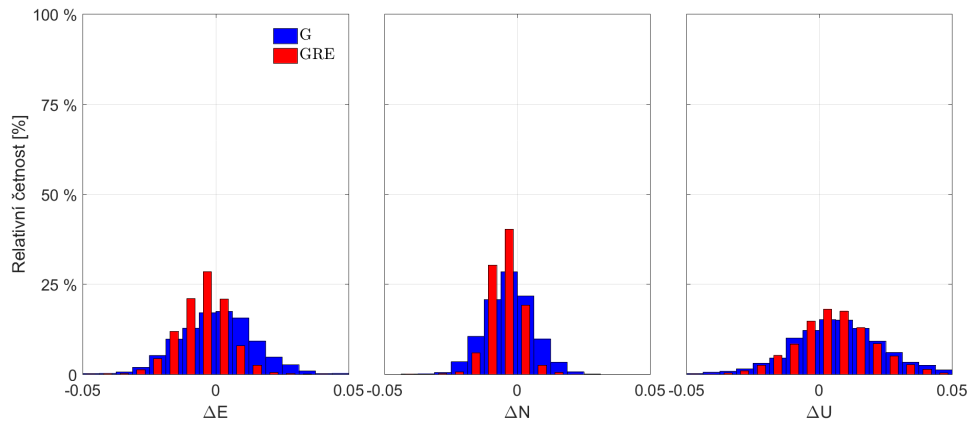
Obr. 5.9: Přesnost 12hodinových observací



Obr. 5.10: Histogramy relativní četnosti odchylek, 12hodinové observace, rok 2018

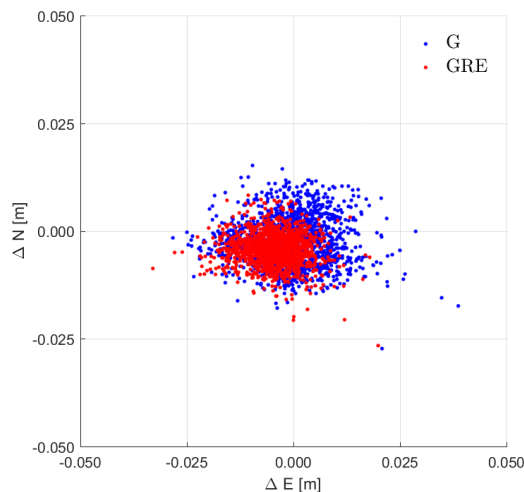


Obr. 5.11: Přesnost 3hodinových observací



Obr. 5.12: Histogramy relativní četnosti odchylek, 3hodinové observace, rok 2018

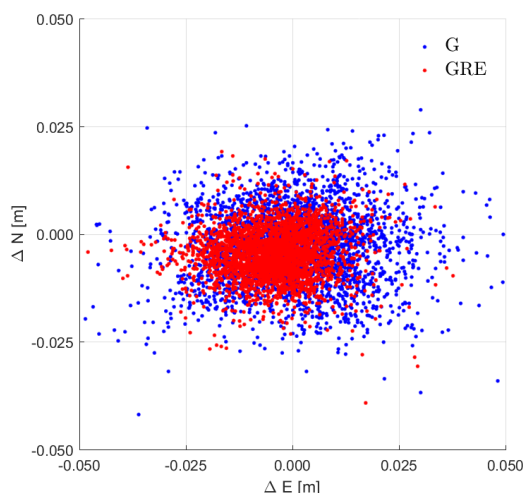
Pro snadnější interpretaci rozložení odchylek v horizontální složce souřadnic byly opět vytvořeny obrázky znázorňující polohové odchylky jednotlivých řešení v roce 2018. Na ukázkou jsou zde uvedeny polohové odchylky varianty 6hodinových observací (Obr. 5.13) a 3hodinových observací (Obr. 5.14).



Obr. 5.13: Polohové odchylky 6hodinových observací, rok 2018

5.2.2 Varianta „kratší observace“

Přesnost kratších observací, odpovídajících svou délkou rychlé statické metodě, byla testována na reprezentativním vzorku 50 dní (MJD 58368 – MJD 58418). Charakteristiky přesnosti observací dlouhých 60 minut, 30 minut, 20 minut a 10 minut můžeme vidět v tabulce 5.8. Trend klesající přesnosti nepřímo úměrný délce observací se u takto krátkých observací projevuje mnohem výrazněji. Hodnoty odchylek ukazují zásadní přínos kombinace více GNSS.



Obr. 5.14: Polohové odchylky 3hodinových observací, rok 2018

S ohledem na maximální hodnoty souřadnicových odchylek (Tab. 5.9) je nutno uvedené charakteristiky přesnosti brát s rezervou. Odlehlé hodnoty nebyly z výběrového souboru filtrovány záměrně, aby se projevíly ve výpočtu charakteristik přesnosti.

Tab. 5.8: Přesnost varianty „kratší observace“ [m]

Varianta	G			GRE		
	σ_E	σ_N	σ_U	σ_E	σ_N	σ_U
60 min	0.059	0.025	0.046	0.026	0.014	0.030
30 min	0.103	0.037	0.072	0.040	0.020	0.046
20 min	0.125	0.048	0.093	0.049	0.026	0.055
10 min	0.189	0.077	0.137	0.078	0.044	0.081

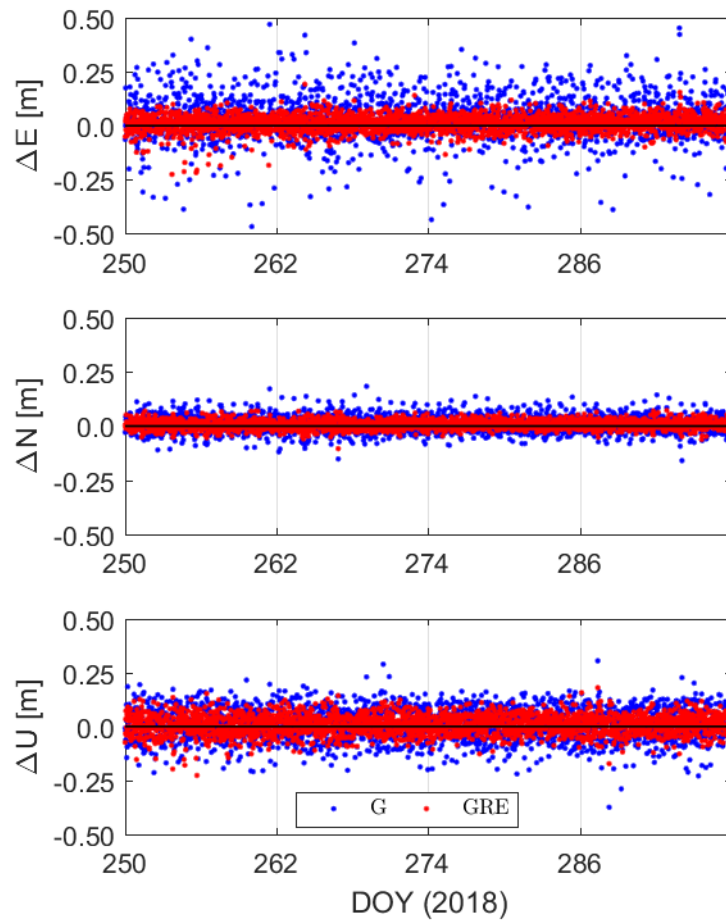
Výsledky byly zobrazeny opět pomocí grafů odchylek jednotlivých složek souřadnic od referenční polohy bodu CADM. Na ukázkou byly vybrány varianty 30minutových observací (Obr. 5.15) a 10minutových observací (Obr. 5.17). Rozptyl odchylek je u takto krátkých observací mnohonásobně větší, než u observací dlouhých 3 hodiny a více. Odchylky musely být zobrazeny s různým rozpětím:

- 1 m – varianta 60minutových a 30minutových observací,
- 2 m – varianta 20 minutových a 10minutových observací.

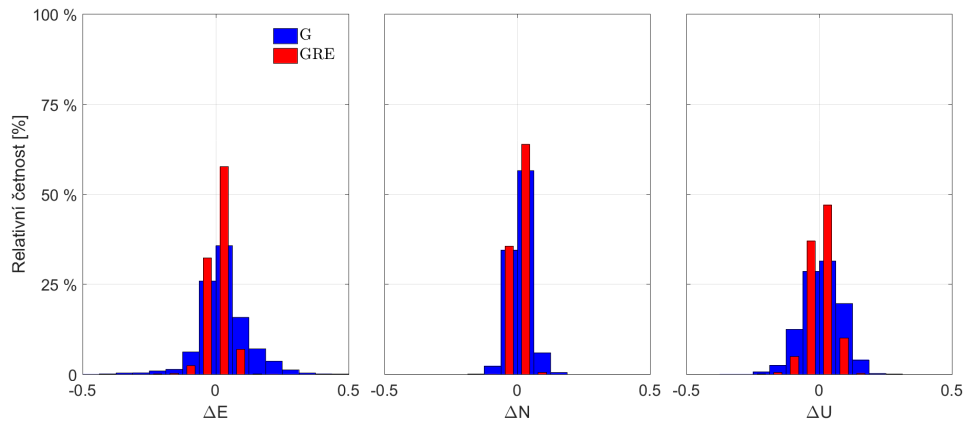
Podobně jako u testování předchozích variant byly vyhotoveny histogramy relativních četností odchylek (Obr. 5.16 a Obr. 5.18).

Tab. 5.9: Maximální hodnoty odchylek varianty „kratší observace“ [m]

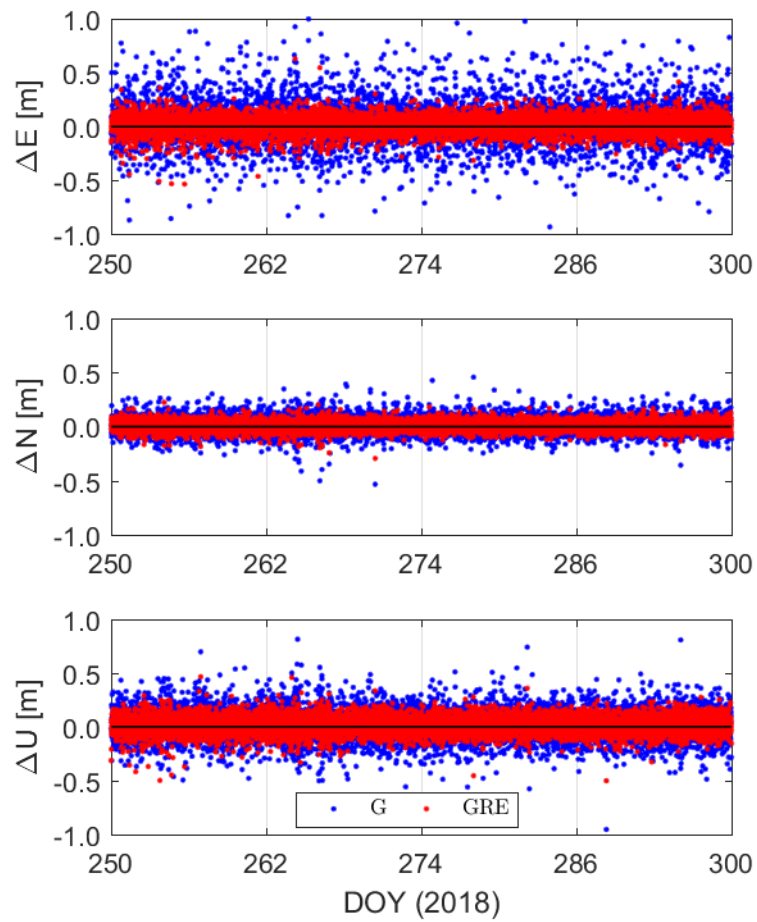
GNSS	G			GRE		
	max _E	max _N	max _U	max _E	max _N	max _U
60 min	0.318	0.106	0.173	0.092	0.054	0.125
30 min	1.215	0.184	0.374	0.226	0.105	0.227
20 min	1.236	0.250	0.787	0.406	0.147	0.331
10 min	1.992	0.536	1.535	0.629	0.295	0.502



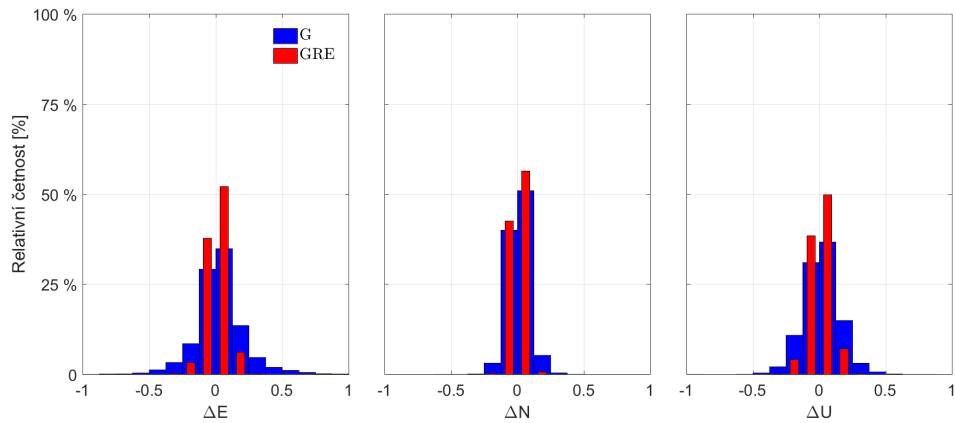
Obr. 5.15: Přesnost 30minutových observací



Obr. 5.16: Histogramy relativní četnosti odchylek, 30minutové observace

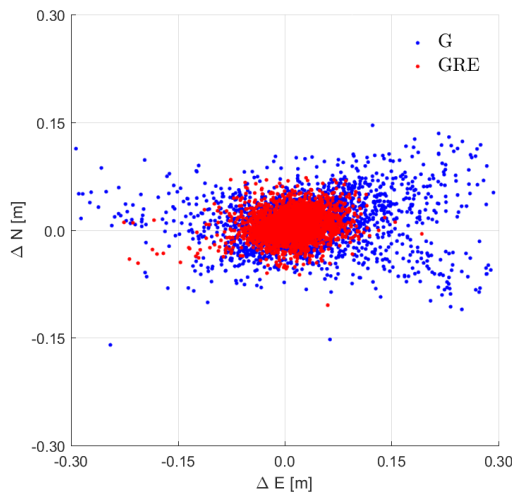


Obr. 5.17: Přesnost 10minutových observací



Obr. 5.18: Histogramy relativní četnosti odchylek, 10minutové observace

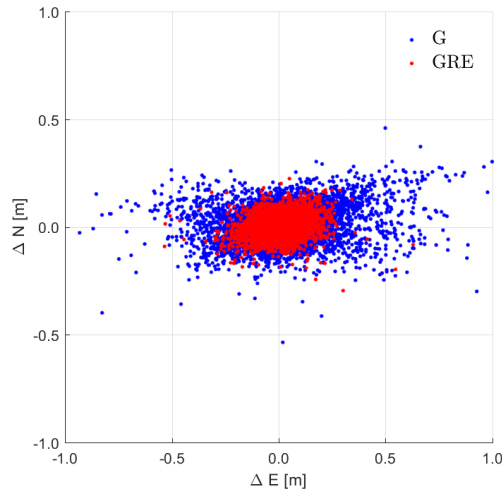
Na závěr byly opět vyhotoveny grafy zobrazující rozložení polohové složky odchylek. V obrázcích 5.19 a 5.20, které zobrazují polohové odchylky varianty 30minutových observací, respektive 10minutových observací, můžeme sledovat trend větších odchylek ve směru východ-západ, který je znatelný zejména u varianty využití pouze systému GPS (G).



Obr. 5.19: Polohové odchylky 30minutových observací

5.3 Ověření výsledků hodnocení přesnosti PPP

Výsledky popsané v této kapitole ukazují relativně vysokou přesnost metody PPP u zejména dlouhých observací. Stanice CADM se nachází v Evropě, kde je velký počet permanentních GNSS stanic, jejichž data jsou využívána pro výpočet přesných produktů poskytovaných například IGS. Pro nastínění celosvětové přesnosti metody PPP byl proveden test na datech z 300 stanic IGS ze dne 1. 12. 2019.



Obr. 5.20: Polohové odchylky 10minutových observací

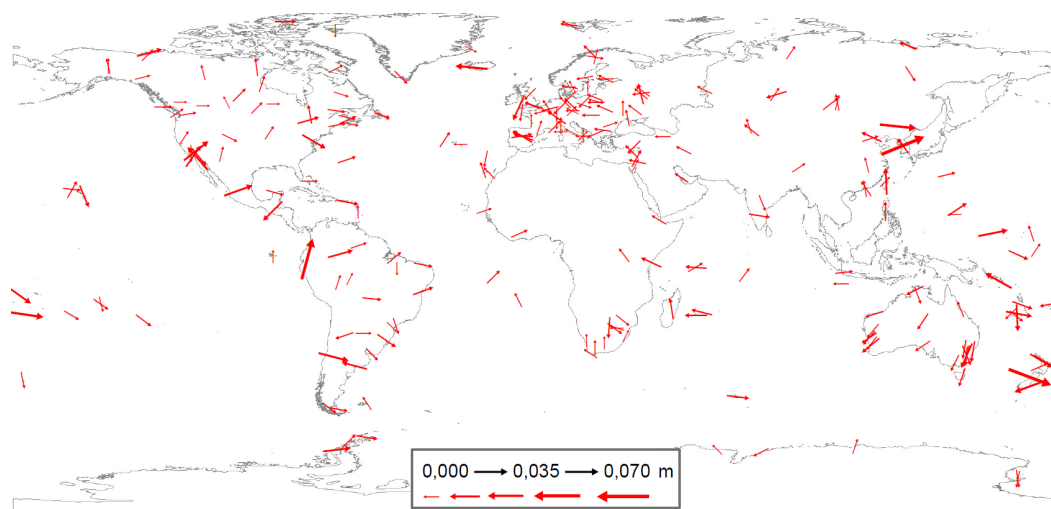
Souřadnice stanic byly získány z týdenního řešení IGS. Souřadnice a rychlosti souřadnicových změn stanic jsou poskytovány ve formátu Solution INdependent EXchange Format (SINEX), který je využíván pro výsledky řešení různých technik kosmické geodézie. Soubory SINEX lze získat z FTP serveru <ftp://cddis.nasa.gov/gnss/products/>.

Řešení metodou PPP v programu RTKLib bylo provedeno s parametry shodnými s tabulkou 4.6. V souladu s výsledky prezentovanými v podkapitole 5.1 byly využity 24hodinové observace na jednotlivých stanicích s využitím pouze systému GPS. Charakteristiky přesnosti tohoto porovnání jsou uvedeny v tabulce 5.10.

Tab. 5.10: Informace o přesnosti PPP na stanicích IGS [m]

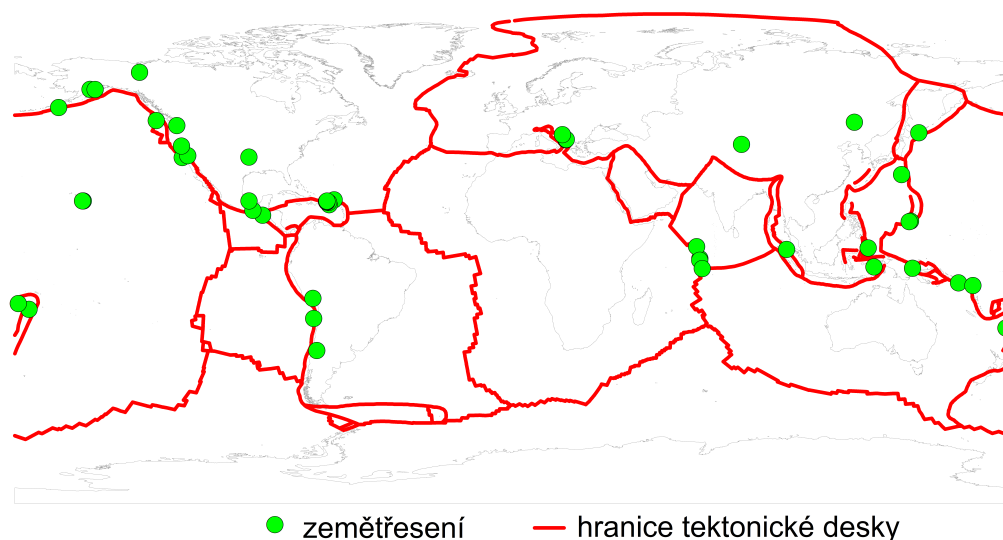
TYP	E	N	U
směrodatná odchylka	0.010	0.009	0.021
maximální absolutní odchylka	0.051	0.070	0.205
medián	0.001	0.001	0.005

Směrodatné odchylky, vypočtené podle vzorce (5.1), jsou zhruba trojnásobné oproti experimentálním odchylkám z podkapitoly 5.1. Toto zhoršení přesnosti může být způsobené rozdílnou přesností efemerid družic pro různé části Země. Hodnoty polohových odchylek byly následně zobrazeny formou vektorů (Obr. 5.21). Z obrázku je patrná velká hustota stanic IGS v Evropě.



Obr. 5.21: Vektory polohových odchylek na stanicích IGS

Dalším faktorem, který nepříznivě ovlivňoval přesnost řešení PPP na některých stanicích IGS, mohla být seismická aktivita. Za tímto účelem byly z webu <https://earthquake.usgs.gov/>, který provozuje United States Geological Survey (USGS), získány informace o zemětřeseních ze dne 1. 12. 2019, které byly silnější než 2,5 magnitudo (M) Richterovy stupnice. Obrázek 5.22 zobrazuje místa výskytu jednotlivých zemětřesení a hranice tektonických desek. Některé zemětřesení nápadně kopírují místa s výskyty větších souřadnicových odchylek řešení PPP, nicméně toto tvrzení je pouze na úrovni hypotézy.



Obr. 5.22: Zemětřesení 1. 12. 2019 větší 2,5 M

Komplexní testování celosvětové přesnosti metody PPP by zasloužilo další analýzy, které jsou již nad rámec této diplomové práce. Hodnoty zjištěné tímto testem podle autora nevyvrací experimentální hodnoty získané na stanici CADM.

Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou testování přesnosti metody GNSS PPP. Za účelem zpracování dat byl nastudován celý koncept metody PPP, zejména problematika působení systematických vlivů, které se při jejím užití zásadně projevují. Pro hodnocení přesnosti metody PPP byla využita observační data z permanentní GNSS stanice CADM, která je umístěna ve výzkumném centru AdMaS a podpůrné produkty poskytované různými institucemi. Zpracování observačních dat metodou PPP bylo prováděno s využitím volně dostupného programu RTKLib. Součástí zpracování dat byla i tvorba podpůrných programů a skriptů, které umožnily automatizované zpracování a vyhodnocení v různých variantách. Celkem bylo zpracováno více jak 22 000 různě dlouhých observačních souborů z let 2018 – 2019.

Výsledky varianty ve které byly porovnávány kombinace různých GNSS ukázaly, že pomocí metody PPP lze určovat polohu se subcentimetrovou přesností. Vzhledem ke všem systematickým vlivům, které výslednou přesnost ovlivňují, a charakteru zpracování PPP se jedná velice příznivé výsledky z pohledu geodetické přesnosti. Analýzy ukázaly, že nejpřesnějších výsledků lze dosáhnout s využitím systému GPS. Rozšiřování evropského systému Galileo umožňuje při kombinaci se systémem GPS dosahovat stejné přesnosti jako při použití systému GPS, ale s příznivým vlivem vyššího počtu družic. Ruský systém GLONASS poskytuje stále nižší přesnost zejména s ohledem na modulaci FDMA, kterou využívá. Budoucí generace družic GLONASS, využívající již modulaci CDMA, budou s vysokou pravděpodobností umožňovat dosažení přesnosti blížíící se systému GPS.

Druhá varianta posuzování výsledků byla založena na porovnání dat pořízených na základě různě dlouhých observací. Tento přístup měl za úkol přiblížit výsledky testování reálnějším aplikacím metody PPP, kdy se dá očekávat potřeba kratší observační doby. Výsledky ukázaly, že přesnost řešení PPP se výrazně snižuje se zkracující se observační dobou. Observace v řádu jednotek hodin dosahují centimetrové přesnosti, zatímco přesnost observací dlouhých desítky minut klesá až na submetrovou přesnost. Výrazným přínosem u těchto krátkých observací je pak kombinace více GNSS.

Na závěr testování byla přesnost metody PPP ověřena na vzorku denních dat z 300 stanic IGS, které jsou rozmístěny po celém světě. Přesnost získaná z tohoto testu byla nižší, než subcentimetrová až milimetrová přesnost získaná z dlouhodobého testování na stanici CADM.

Určování polohy metodou PPP je v současné době jedním z trendů v oblasti GNSS. Schopnost poskytovat relativně přesné výsledky kdekoliv na Zemi předurčuje metodu k uplatnění v globálních aplikacích, jakými mohou být například měření v souvislosti s monitoringem seismické aktivity. Význam metody PPP poroste

s rozšiřováním družicových systémů, dostupností podpůrných služeb a vývojem nových modelů zpracování. Zpřesňování levných GNSS přijímačů, které jsou umístěny například v mobilních telefonech a dostupnost surových GNSS měření může mít pozitivní dopad na rozšíření metody PPP mezi širokou veřejnost. I analýzy, které byly provedeny v rámci této diplomové práce by mohly částečně přispět k rozšíření povědomí o metodě PPP v České republice.

Seznam použitých zdrojů

ABOU-GALALA, M. et al., 2018. Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning. *Alexandria Engineering Journal*. 57, 3, s. 1721–1726. ISSN 11100168. doi: 10.1016/j.aej.2017.04.019. Dostupné z: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110016817301795>>.

AHMED, F. et al., 2016. Comparative analysis of real-time precise point positioning zenith total delay estimates. *GPS Solutions*. 20, 2, s. 187–199. ISSN 1080-5370. doi: 10.1007/s10291-014-0427-z. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s10291-014-0427-z>>.

AIUB, 2020, *Differential Code Biases (DCB)* [online]. University of Bern. [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <<http://www.aiub.unibe.ch>>.

ALLINSON, C. R., 2004. Stability of direct GPS estimates of ocean tide loading. *Geophysical Research Letters*. 31, 15. ISSN 0094-8276. doi: 10.1029/2004GL020588. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2004GL020588>>.

ALTAMIMI, Z. , DICK, W. R., 2020. Description and evaluation of DTRF2014, JTRF2014 and ITRF2014. Technical report, International Earth Rotation and Reference Systems Service. IERS Technical Note No. 40.

ANDERLE, R. J., 1976. Point Positioning Concept Using Precise Ephemeris. In *Proceedings of the International Geodetic Symposium*, 1, s. 47–75, Las Cruces.

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>>.

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>>.

BIPM, 2019. *Le Système international d'unités / The International System of Units ('The SI Brochure')*. Bureau international des poids et mesures, ninth edition. Dostupné z: <<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>>. ISBN 978-92-822-2272-0.

BKG, 2020, *GNSS Data Center* [online]. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <<<http://igs.bkg.bund.de/index/index>>>.

- BOEHM, J. , SCHUH, H., 2003. Vienna Mapping Functions. In *Proceedings of the 16th EVGA Working Meeting*.
- BOEHM, J. et al., 2006. Global Mapping Function (GMF). *Geophysical Research Letters*. 33, 7. ISSN 0094-8276. doi: 10.1029/2005GL025546. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL025546>>.
- BRUNNER, F. , GU, M., 1991. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observations. In *Manuscripta Geodaetica*, s. 205–214.
- CNSA. BeiDou Navigation Satellite System, 2017.
- COLLINS, P., 2008. Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities. In *Proceedings of the ION NTM-2008*, s. 720–732, San Diego. Institute of Navigation.
- DARWIN, G. H., 1882. On variations in the vertical due to elasticity of the earth's surface. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 14, 90.
- DIRECTORATE, U. G., 2013. *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*. U.S. Air Force GPS Directorate.
- EINSTEIN, A., 1905. Zur Elektrodynamik bewegter Körper [AdP 17, 891 (1905)]. *Annalen der Physik*. 14, S1, s. 194–224. ISSN 00033804. doi: 10.1002/andp.200590006. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/andp.200590006>>.
- 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>>.
- ELMEZAYEN, A. , EL-RABBANY, A., 2019. Precise Point Positioning Using World's First Dual-Frequency GPS/GALILEO Smartphone. *Sensors*. 19, 11. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s19112593. Dostupné z: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/11/2593>>.
- ESA, 2020, *ESA navipedia* [online]. European Space Agency. Dostupné z: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Main_Page>.
- ESA. Galileo Open Service Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD), 2015.

- FU, W. et al., 2019. Multi-GNSS Combined Precise Point Positioning Using Additional Observations with Opposite Weight for Real-Time Quality Control. *Remote Sensing*. 11, 3. ISSN 2072-4292. doi: 10.3390/rs11030311. Dostupné z: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/311>>.
- GE, M. et al., 2008. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*. 82, 7, s. 389–399. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-007-0187-4. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-007-0187-4>>.
- GENDT, G. et al., 2004. Near Real Time GPS Water Vapor Monitoring for Numerical Weather Prediction in Germany. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. 82, 1B, s. 361–370. ISSN 0026-1165. doi: 10.2151/jmsj.2004.361.
- GOP, 2020, *G-NUT CORE LIBRARY* [online]. Geodetická observatoř Pecný. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <<https://www.pecny.cz/GOP/index.php/gnss/sw>>.
- GUO, F. , ZHANG, X., 2014. Real-time clock jump compensation for precise point positioning. *GPS Solutions*. 18, 1, s. 41–50. ISSN 1080-5370. doi: 10.1007/s10291-012-0307-3. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s10291-012-0307-3>>.
- 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>>.
- GUO, L. et al., 2020. Characteristics Analysis of Raw Multi-GNSS Measurement from Xiaomi Mi 8 and Positioning Performance Improvement with L5/E5 Frequency in an Urban Environment. *Remote Sensing*. 12, 4. ISSN 2072-4292. doi: 10.3390/rs12040744. Dostupné z: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/4/744>>.
- HADAS, T. , BOSY, J., 2015. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solutions*. 19, 1, s. 93–105. ISSN 1080-5370. doi: 10.1007/s10291-014-0369-5. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s10291-014-0369-5>>.
- HAMPACHER, M. , ŠTRONER, M., 2015. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. České vysoké učení technické v Praze, vydání druhé, upravené a doplněné edition. ISBN 978-80-01-05843-5.

- HEĆIMOVIĆ, Z., 2013. Relativistic Effects On Satellite Navigation. *Tehnički vjesnik*. 20, 1, s. 195–203. ISSN 1848-6339.
- HOFMANN-WELLENHOF, B. , LICHTENEGGER, H. , WASLE, E., 2008. *GNSS–global navigation satellite systems*. Springer. ISBN 978-3-211-73012-6.
- IAC, 2020, *GLONASS HISTORY* [online]. Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <<https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php>>.
- IGS, 2020a, *IGS Products* [online]. International GNSS Service. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <<http://www.igs.org/products>>.
- IGS, 2020b, *Real-time Service* [online]. Dostupné z: <<http://www.igs.org/rts/products>>.
- IGS, 2020c, *ANTEX format description* [online]. International GNSS Service. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <<http://kb.igs.org>>.
- KALMAN, R. E., 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*. 82, 1, s. 35–45. ISSN 0021-9223. doi: 10.1115/1.3662552.
- KAČMAŘÍK, M., 2017. Současný stav využívání globálních navigačních družicových systémů pro zkvalitnění předpovědi počasí. *Geodetický a kartografický obzor*. 63 (105), 4, s. 69–73. ISSN 1805-7446.
- KAČMAŘÍK, M. et al., 2017. Inter-technique validation of tropospheric slant total delays. *Atmospheric Measurement Techniques*. 10, 6, s. 2183–2208. ISSN 1867-8548. doi: 10.5194/amt-10-2183-2017. Dostupné z: <<https://www.atmos-meas-tech.net/10/2183/2017/>>.
- KAČMAŘÍK, M. et al., 2018. Sensitivity of GNSS tropospheric gradients to processing options. *Annales Geophysicales*.
- KLOBUCHAR, J., 1987. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. AES-23, 3, s. 325–331. ISSN 0018-9251. doi: 10.1109/TAES.1987.310829. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4104345/>>.
- KOUBA, J., 2008. Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1). *Journal of Geodesy*. 82, 4-5, s. 193–205. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-007-0170-0. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-007-0170-0>>.

KOUBA, J., 2009. *A guide to using International GNSS Service (IGS) products*. Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada.

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>>.

KOUBA, J., HÉROUX, P., 2001. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*. 5, 2, s. 12–28. ISSN 1080-5370. doi: 10.1007/PL00012883. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/PL00012883>>.

LAURICHESSE, D. et al., 2008. Real time zerodifference ambiguities blocking and absolute RTKs. In *Proceedings of the ION NTM-2008*, s. 747 – 755, San Diego. Institute of Navigation.

LI, X. et al., 2014. Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor. *Geophysical Research Letters*. 41, 10, s. 3615–3621. ISSN 00948276. doi: 10.1002/2013GL058721. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2013GL058721>>.

LI, X. et al., 2015. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning. *Journal of Geodesy*. 89, 6, s. 607–635. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-015-0802-8. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-015-0802-8>>.

LYARD, F. et al., 2006. Modelling the global ocean tides. *Ocean Dynamics*. 56, 5-6, s. 394–415. ISSN 1616-7341. doi: 10.1007/s10236-006-0086-x. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s10236-006-0086-x>>.

MADER, G. L., 1999. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*. 3, 1, s. 50–58. ISSN 1080-5370. doi: 10.1007/PL00012780. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/PL00012780>>.

MERVART, L., 1994. Sekvenční vyrovnání, kolokace, Kalmanův filtr. *Geodetický a kartografický obzor*. 40 (82), 8, s. 155–157.

MERVART, L., 2003. Numerická stabilita vyrovnání měření GPS v reálném čase. *Geodetický a kartografický obzor*. 49 (91), 3, s. 44–48. ISSN 0016-7096.

NIELL, A. E., 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 101, B2, s. 3227–3246. ISSN 01480227. doi: 10.1029/95JB03048. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1029/95JB03048>>.

NOSEK, J. et al., 2020. Porovnání přesnosti vybraných služeb PPP v reálném čase. In *Družicové metody v geodézii a katastru*, s. 45–50, Brno. ISBN 978-80-86433-74-5.

NRC, 2020, *Tools and Applications: CSRS-PPP* [online]. Natural Resources Canada. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <<https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/22028>>.

PENNA, N. T. et al., 2008. Assessing the accuracy of predicted ocean tide loading displacement values. *Journal of Geodesy*. 82, 12, s. 893–907. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-008-0220-2. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-008-0220-2>>.

PETIT, G. , LUZUM, B., 2010. IERS conventions. Technical report, International Earth Rotation and Reference Systems Service. IERS Technical Note No. 36.

PETROV, L., 2004. Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *Journal of Geophysical Research*. 109, B3. ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/2003JB002500. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003JB002500>>.

PETROV, L. , MA, C., 2003. Study of harmonic site position variations determined by very long baseline interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 108, B4. ISSN 01480227. doi: 10.1029/2002JB001801. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2002JB001801>>.

PUCHRIK, L., 2013. *Aspekty vyhodnocení měření GNSS*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, Brno.

QIU, C. et al., 2020. The Performance of Different Mapping Functions and Gradient Models in the Determination of Slant Tropospheric Delay. *Remote Sensing*. 12, 1. ISSN 2072-4292. doi: 10.3390/rs12010130. Dostupné z: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/1/130>>.

RIENECKER, M. M. et al., 2011. MERRA. *Journal of Climate*. 24, 14, s. 3624–3648. ISSN 0894-8755. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1. Dostupné z: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>>.

RIENECKER, M., 2008. *The GEOS-5 Data Assimilation System: Documentation of Versions 5.0.1, 5.1.0, and 5.2.0*. NASA technical memorandum. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center. Dostupné z: <<https://books.google.cz/books?id=q9UajwEACAAJ>>.

ROSCOSMOS. GLONASS Interface Control Document, 2008.

ROTHACHER, R., 1995. The Perturbation of the Orbital Elements of GPS Satellites through Direct Radiation Pressure and Y-bias. In *IGS workshop*.

RÍČNÝ, R., 2016. *Posouzení využitelnost techniky Precise Point Positioning pro mapování*. Bakalářská práce, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Michal Kačmařík. Dostupné z: <<https://dspace.vsb.cz/handle/10084/115208>>.

SANZ, J. et al., 2012. The ESA / UPC GNSS-Lab Tool (gLAB) An advanced educational and professional package for GNSS data processing and analysis. In *d*.

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>>.

SEEBER, G., 2003. *Satellite geodesy*. Walter de Gruyter, 2nd completely revised and extended edition edition. ISBN 3-11-017549-5.

TAKASU, T. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. Dostupné z: <<http://www.rtklib.com/>>. 2013.

TENZER, R. et al., 2011. Assessment of the LVD offsets for the normal-orthometric heights and different permanent tide systems—a case study of New Zealand. *Applied Geomatics*. 3, 1, s. 1–8. ISSN 1866-9298. doi: 10.1007/s12518-010-0038-5. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s12518-010-0038-5>>.

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://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0273117715005220>>.

VACLAVOVIC, P. , DOUSA, J., 2016. G-Nut/Anubis. In *IAG 150 Years*. Cham: Springer International Publishing. s. 775–782. doi: 10.1007/1345_2015_97. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/1345_2015_97>. ISBN 978-3-319-24603-1.

WANG, Z. et al., 2018. Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 7, 3. ISSN 2220-9964. doi: 10.3390/ijgi7030085. Dostupné z: <<http://www.mdpi.com/2220-9964/7/3/85>>.

- WILGAN, K. , GEIGER, A., 2019. High-resolution models of tropospheric delays and refractivity based on GNSS and numerical weather prediction data for alpine regions in Switzerland. *Journal of Geodesy*. 93, 6, s. 819–835. ISSN 0949-7714. doi: 10.1007/s00190-018-1203-6. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-018-1203-6>>.
- WILHELM, H. , ZÜRN, W. , WENZEL, H.-G., 1997. *Tidal Phenomena*. Springer-Verlag. doi: 10.1007/BFb0011453. ISBN 3-540-62833-9.
- 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>>.
- WRIGHT, T. J. et al., 2012. Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning. *Geophysical Research Letters*. 39, 12, s. n/a–n/a. ISSN 00948276. doi: 10.1029/2012GL051894. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2012GL051894>>.
- WU, J.-T. et al., 1992. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. In *Astrodynamics*, 1991, s. 1647–1660.
- WÜBBENA, G., 1985. Software development for geodetic positioning with GPS using TI 4100 code and carrier measurements. In *Proceedings 1st international symposium on precise positioning with the global positioning system*, s. 403.
- ZHANG, R. et al., 2013. Research on Receiver Clock Jump Detection and Processing in Precise Point Positioning. In *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings*, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-37407-4_13. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-37407-4_13>. ISBN 978-3-642-37406-7.
- ZHANG, Y. , WANG, Q. , JIANG, X., 2017. Property Analysis of the Real-Time Uncalibrated Phase Delay Product Generated by Regional Reference Stations and Its Influence on Precise Point Positioning Ambiguity Resolution. *Sensors*. 17, 5. ISSN 1424-8220. doi: 10.3390/s17051162. Dostupné z: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1162>>.
- ZHANG, Y. , LI, X., 1996. Fixed-interval smoothing algorithm based on singular value decomposition. In *Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications IEEE International Conference on Control Applications held together with IEEE International Sym-*

posium on Intelligent Control IEEE International Symposium on Computer-Aided Control, s. 916–921. IEEE. doi: 10.1109/CCA.1996.559012. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/559012/>>. ISBN 0-7803-2975-9.

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>>.

ZUMBERGE, J. F. et al., 1997a. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 102, B3, s. 5005–5017. ISSN 01480227. doi: 10.1029/96JB03860. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1029/96JB03860>>.

ZUMBERGE, J. F. , WATKINS, M. M. , WEBB, F. H., 1997b. Characteristics and Applications of Precise GPS Clock Solutions Every 30 Seconds. *Navigation*. 44, 4, s. 449–456. ISSN 00281522. doi: 10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x>>.

Seznam obrázků

1.1	Družice bloku IIR-M na oběžné dráze; převzato z (ESA, 2020)	12
1.2	Kosmický segment GLONASS; převzato z (ESA, 2020)	13
1.3	Družice systému Galileo; převzato z (ESA, 2020)	14
2.1	Geometrie modelu ionosféry	20
2.2	Vliv wind-up efektu na určení polohy	29
2.3	Vlivu zatěžování atmosférou – 1. 7. 2018 12:00 UTC	32
3.1	Detekce skoku hodin přijímače; upraveno (Zhang et al., 2013)	35
3.2	Porovnání řešení forward, backward a combined	43
3.3	Hlavní okno programu <i>RTKPOST</i>	46
3.4	RTKPOST - nastavení 1	46
3.5	RTKPOST - nastavení 2	46
3.6	Parametry ZTD z řešení v programu <i>gLAB</i>	49
3.7	Konvergence PPP v reálném čase; převzato (Nosek et al., 2020)	50
3.8	Gradients troposféry 31. 5. 2013 18:00 nad Německem z řešení PPP; převzato (Kačmařík et al., 2018)	51
3.9	Posuny GNSS stanic získané z řešení PPP během zemětřesení v To- hoku, 11. 3. 2011; převzato (Wright et al., 2012)	52
3.10	Konvergence a přesnost PPP v reálném čase s využitím mobilního telefonu Xiaomi Mi 8; převzato (Elmezayen – El-Rabbany, 2019)	52
4.1	Permanentní stanice CADM	54
4.2	Ukázka souboru BLQ s modelem FES2004 pro stanici CADM	57
4.3	Předzpracování výsledků PPP	60
5.1	Průměrný počet družic jednotlivých GNSS	63
5.2	Časový průběh odchylek E	63
5.3	Časový průběh odchylek N	64
5.4	Časový průběh odchylek U	65
5.5	Histogramy relativní četnosti odchylek, varianta G, rok 2018	66
5.6	Histogramy relativní četnosti odchylek, varianta GRE, rok 2018	66
5.7	Polohové odchylky výsledků různých GNSS 1	68
5.8	Polohové odchylky výsledků různých GNSS 2	68
5.9	Přesnost 12hodinových observací	70
5.10	Histogramy relativní četnosti odchylek, 12hodinové observace, rok 2018	71
5.11	Přesnost 3hodinových observací	71
5.12	Histogramy relativní četnosti odchylek, 3hodinové observace, rok 2018	72
5.13	Polohové odchylky 6hodinových observací, rok 2018	72
5.14	Polohové odchylky 3hodinových observací, rok 2018	73
5.15	Přesnost 30minutových observací	74

5.16	Histogramy relativní četnosti odchylek, 30minutové observace	75
5.17	Přesnost 10minutových observací	75
5.18	Histogramy relativní četnosti odchylek, 10minutové observace	76
5.19	Polohové odchylky 30minutových observací	76
5.20	Polohové odchylky 10minutových observací	77
5.21	Vektory polohových odchylek na stanicích IGS	78
5.22	Zemětřesení 1. 12. 2019 větší 2,5 M	78

Seznam tabulek

3.1	Přehled programů knihovny RTKLib	45
3.2	Služby IGS pro PPP v reálném čase	49
4.1	Porovnání programů pro zpracování PPP	53
4.2	Souřadnice stanice CADM v epoše 2018.0 (MJD 58119)	54
4.3	Varianty porovnání přesnosti GNSS	55
4.4	Počet zpracovávaných observací	56
4.5	Podpůrná data použitá pro zpracování PPP	57
4.6	Základní nastavené parametry programu RTKLib	58
5.1	Přesnost 24hodinového řešení PPP [m]	61
5.2	Maximální hodnoty odchylek [m]	62
5.3	Procentuální úspěšnost řešení PPP	62
5.4	Výsledky F-testu při porovnání výsledků z let 2018 a 2019	67
5.5	Průměrné hodnoty odchylek s využitím systému GPS v letech 2018 – 2019	67
5.6	Přesnost varianty „delší observace“ [m]	69
5.7	Maximální hodnoty odchylek varianty „delší observace“ [m]	70
5.8	Přesnost varianty „kratší observace“ [m]	73
5.9	Maximální hodnoty odchylek varianty „kratší observace“ [m]	74
5.10	Informace o přesnosti PPP na stanicích IGS [m]	77

Seznam výpisů

3.1	Syntaxe programu RNX2RTKP	47
3.2	Ukázka vstupu programu RNX2RTKP	47

Seznam symbolů, veličin a zkratk

AIUB	Astronomical Institute of the University of Bern
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
CTRS	Conventional Terrestrial Reference System
DCB	Differential Code Bias
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DOY	Day of Year
FCB	Fractional Code Bias
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Globální navigační satelitní systémy
GPS	Global Positioning System
GPST	GPS Time
GRS80	Geodetic Reference System 1980
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS	International GNSS Service
ITRF2014	International Terrestrial Reference Frame 2014
ITRS	International Terrestrial Reference System
MJD	Modifikované juliánské datum
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPP	Precise Point Positioning
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
SLR	Satellite Laser Ranging
SPP	Single Point Positioning
SSR	State Space Representation
TAI	Temps Atomique International
UPD	Uncalibrated Phase delay
UTC	Universal Time Coordinated
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGS84	World Geodetic System 1984

Seznam příloh

A Ukázka konfiguračního souboru RTKLib	96
B Ukázka dávkového souboru pro různé GNSS	98
C Ukázka dávkového souboru pro různě dlouhé observace	99
D Obsah přiloženého CD	100