

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

PŘESNOST RTK PŘI BUDOVÁNÍ BODOVÝCH POLÍ

ACCURACY OF REAL TIME KINEMATIC METHOD IN BUILDING OF GEODETIC CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Nosek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LADISLAV BÁRTA, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie, kartografie a geoinformatika
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jakub Nosek
Název	Přesnost RTK při budování bodových polí
Vedoucí práce	Ing. Ladislav Bárta, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- [1] GE13 - M01 – Geodetické sítě – Příprava dat pro vyrovnání. L. Bárta, F. Soukup, VUT Brno, 2005
- [2] GE13 - M02 – Geodetické sítě – Vyrovnání geodetických sítí. L. Bárta, F. Soukup, VUT Brno, 2005
- [3] Geodézie IV, Z. Nevosád, J. Vitásek, J. Bureš, VUT Brno, 2002
- [4] Globální systém určování polohy – GPS – Využití v Geodézii. V. Kratochvíl, J. Fixel, VA v Brně, 2001
- [5] Polohové geodetické sítě – Aplikace MNČ a transformace souřadnic. V. Kratochvíl, VA v Brně, 2000
- [6] www.cuzk.cz
- [7] www.trimble.com

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Měřické práce budou provedeny na území města Brna a v okolí obce Jedovnice. V uvedených lokalitách bude provedeno zaměření skupiny měřických bodů kinematickou metodou v reálném čase s epochovým záznamem dat a rychlou statickou metodou. Výsledky družicových měření budou převedeny do S-JTSK globálním klíčem ČR 2013. Budou porovnány výsledky transformace při použití různých transformačních programů. Polohově bude síť bodů proměřená totální stanicí a v lokalitě Brno budou body též znivelovány. Shodnost metody bude posouzena na základě rozptylu epochového záznamu naměřených dat a též rozdílů opakovaného určení jednotlivých bodů. Správnost metody bude posouzena vzhledem k výsledkům statického výpočtu družicových dat v postprocesingu. Relativní přesnost bude vyhodnocena pomocí výsledků polohových měření. Relativní přesnost lze posoudit přímo porovnáním přímo měřených veličin tj. délek a úhlů nebo hodnotami zbytkových odchylek na opěrných bodech z vyrovnání volné měřické sítě. Využita bude školní GNSS aparatura Trimble R4, totální stanice Trimble M3, softwarové řešení Trimble TBC a další pomůcky. Zápisníky a výpočetní protokoly budou přílohou částí bakalářské práce. Grafy a tabulky s výsledky vyhodnocení a s porovnáním jednotlivých metod budou součástí textové části bakalářské práce. Výsledky analýz budou vhodně okomentovány.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo zhodnotit přesnost metody RTK při tvorbě bodových polí. Měření metodou RTK probíhalo v blízkosti Fakulty stavební VUT v Brně a poblíž obce Jedovnice s využitím korekcí sítě CZEPOS a sítě Trimble VRS Now Czech. Tyto dvě lokality umožnily zhodnotit vliv vzdálenosti přijímačů od referenčních stanic na přesnost měření. Na každém bodě byly metodou RTK realizovány dva kontinuální záznamy souřadnic po 10 sekundách délky 10 minut. Graficky byly porovnány rozdíly souřadnic dvojic nezávislých měření. Výsledky metody RTK byly testovány vůči referenčním hodnotám určeným společným vyrovnáním výsledků měření rychlé statické metody a terestrických měření totální stanicí užitím MNČ. Součástí bakalářské práce bylo též porovnání výsledků převodu prostorových souřadnic ETRF2000 do S-JTSK pomocí zpřesněné globální transformace provedené několika transformačními programy.

KLÍČOVÁ SLOVA

RTK, S-JTSK, GNSS, MNČ, CZEPOS, TRIMBLE VRS NOW, transformace

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis was to evaluate the accuracy of the RTK method in the creation of point fields. The RTK-measurement was carried out near the Faculty of Civil Engineering, Technical University in Brno, and near Jedovnice, by using the CZEPOS network and the Trimble VRS Now Czech network. These two locations have made it possible to assess the effect of receivers distance to the reference stations on measurement accuracy. At each point, two continuous coordinate records were executed by the RTK method after 10 seconds during 10 minutes. The graphs were compared to the coordinate differences of the pairs of independent measurements. The results of the RTK method were tested against the reference values determined by the common equalization of the measurement results of the fast static method and the terrestrial measurements by the total station using the LSM. The bachelor thesis also includes a comparison of the results of the transfer of spatial coordinates ETRF2000 to S-JTSK using precise global transformation performed by several transformation programs.

KEYWORDS

RTK, S-JTSK, GNSS, LSM, CZEPOS, TRIMBLE VRS NOW, transformation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Jakub Nosek *Přesnost RTK při budování bodových polí*. Brno, 2018. 47 s., 53 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Ladislav Bárta, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 5. 2018

Jakub Nosek
autor práce

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu této práce Ing. Ladislavu Bártovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a konzultace, bez kterých by tato práce nevznikla. Dále děkuji mé rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

1	Úvod	10
2	Technologie GNSS	11
2.1	Historie a struktura GNSS	11
2.2	Systematické vlivy	12
2.2.1	Chyba v určení polohy družice	12
2.2.2	Vliv atmosféry	12
2.2.3	Variace fázového centra antény přijímače a družice	13
2.2.4	Relativistické vlivy	13
2.2.5	Vícecestné šíření signálu	13
2.2.6	Vliv rozmístění družic na přesnost měření	14
2.3	Metody určení polohy	14
2.3.1	Dělení podle vstupních veličin	14
2.3.2	Dělení podle způsobu určení polohy	15
2.3.3	Dělení podle doby měření a pohybu přijímače v průběhu měření	17
2.4	RTK	18
2.5	Sítě permanentních stanic	19
3	Transformace do S-JTSK	20
3.1	Lokální transformační klíč	20
3.2	Zpřesněná globální transformace	20
3.2.1	Převod do S-JTSK/05	20
3.2.2	Převod z S-JTSK/05 do S-JTSK	21
3.2.3	Porovnání transformace jednotlivých programů	22
4	Měření v terénu	24
4.1	Použité přístroje a pomůcky	24
4.2	Volba postupu měření	26
4.3	Lokalita Brno	26
4.4	Lokalita Jedovnice	27
5	Zpracování a analýza naměřených dat	28
5.1	Použitá teorie	28
5.1.1	Vyrovnání přímých měření	28
5.1.2	Dvojice měření	29
5.1.3	Filtrace odlehlých měření	30
5.1.4	Vyrovnání geodetických sítí	30
5.2	Zpracování a vyrovnání sítí v obou lokalitách	32
5.3	Zpracování a analýza měření RTK	34

6 Závěr	40
Seznam použitých zdrojů	42
Seznam zkratk	43
Seznam obrázků	45
Seznam tabulek	46
Seznam příloh	47

Kapitola 1

Úvod

Kinematická metoda v reálném čase (RTK) má rozsáhlé využití od navigace v zemědělství, řízení stavebních strojů po nejrůznější úlohy v geodetické praxi. Pro využití v oblasti katastru nemovitostí a při mapování je RTK v současné době už plnohodnotnou metodou nejen při měření podrobných bodů, ale i při vytváření bodových polí. V oblasti inženýrské geodézie, měření přetvoření a posunů stavebních objektů a při budování přesných účelových sítí bývá zatím na výsledky RTK pohlíženo s nepřilíšnou důvěrou. Jedním z důvodů může být i to, že z hlediska mnoha uživatelů představuje přijímač GNSS (zejména u RTK) „černou skříňku“.

Cílem této práce je zhodnotit využitelnost metody RTK při budování bodových polí (zejména účelových sítí menšího rozsahu). Pro objektivní posouzení přesnosti této metody byly kromě využití služeb dvou různých poskytovatelů RTK korekcí, a to sítě CZE-POS a sítě Trimble VRS Now Czech, testovány dvě sítě, kdy první síť se nachází v blízkosti referenční stanice, zatímco druhá síť je od referenční stanice vzdálená více jak 20 km. Pro samotné měření metodou RTK je zde zvolena 10 minutová observace s intervalem záznamu souřadnic 10 sekund.

V jedné kapitole této práce jsou, kromě samotné analýzy využitelnosti metody RTK, porovnány některé programy umožňující použití zpřesněné globální transformace. Cílem této kapitoly je posoudit, zda transformační programy podávají stejné výsledky, případně zda jsou tyto programy mezi sebou zaměnitelné.

Kapitola 2

Technologie GNSS

Global Navigation Satellite System (GNSS) – česky Globální navigační satelitní systémy – hrají v dnešní době nezastupitelnou roli v geodézii, navigaci, vojenství, zemědělství a dalších oborech. Výhoda těchto systémů spočívá v tom, že dokáží určit prostorovou polohu objektů a čas na Zemi nezávisle na počasí, rychlosti těchto objektů a denní době. Název napovídá, že tyto systémy využívají umělé družice na oběžné dráze Země, které vysílají rádiový signál. V současné době plnohodnotně na celé Zemi fungují systémy Global Positioning System (GPS) a Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS). Další systémy, jako čínský Beidou/Compass nebo Galileo, mají zatím pouze částečné pokrytí.

2.1 Historie a struktura GNSS

Jako základ historie GNSS bývá považováno vypuštění sovětské družice Sputnik, kdy z jejího vysílaného signálu dokázali američtí vědci určit její přesnou polohu. Historicky první družicový polohový systém *Transit* byl v letech 1964–1996 provozovaný námořnictvem Spojených států amerických. Přesnost určení polohy s využitím tohoto systému činila několik stovek metrů. Kromě lokalizace a synchronizace času byly měření systém *Transit* využity i pro vytvoření dodnes používaného souřadnicového systému (a elipsoidu) World Geodetic System 1984 (WGS84).

NAVSTAR GPS jako takový začal vznikat od roku 1973. Družice systému GPS obíhají Zemi na 6 drahách ve výšce zhruba 20 350 km. Systém je plně funkční od roku 1994 (24 družic na oběžné dráze). Pro výpočty se využívá světový systém WGS84.

Vývoj ruského (dříve sovětského) systému GLONASS započal v roce 1970. Vzhledem k ekonomickým problémům v Rusku se GLONASS dostal do plného operačního stavu až v roce 2011. Družice tohoto systému obíhají Zemi na 3 drahách ve vzdálenosti zhruba 19 100 km. Všechny družice systému umožňují využívání technologie Satellite Laser Ranging (SLR) díky instalovaným koutovým odražečům. Pro výpočet polohy je využíván souřadnicový systém Parametry Zemli 1990 goda (PZ-90).

Struktura je u všech GNSS podobná. Systémy zpravidla rozdělujeme do tří složek: kosmický segment, řídicí segment a uživatelský segment.

Kosmický segment se skládá z družic na oběžné dráze Země. Kromě přijímací a vysílací antény, zdroje elektrické energie a procesorové jednotky družice obsahují i několik přesných atomových hodin. Družice sleduje vlastní stav a dráhu a tyto informace vysílá do řídicího centra.

Řídicí segment sestává z hlavní řídicí stanice, pozemních řídicích stanic a monito-

rovacích stanic. Tyto stanice kromě řízení a telemetrického sledování drah družic také zpracovávají jejich efemeridy a synchronizují jejich atomové hodiny.

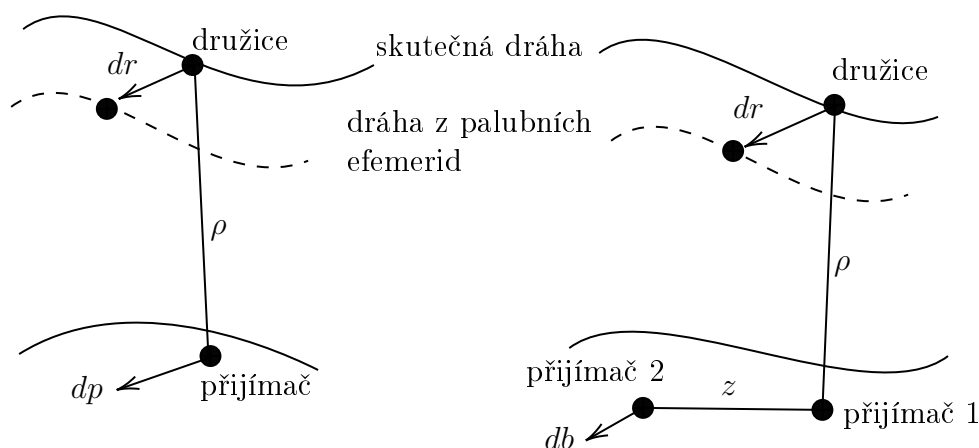
Uživatelský segment je tvořený jednotlivými zařízeními, určenými pro zpracování družicových signálů. Důležité součásti těchto přijímačů jsou anténa, radiofrekvenční jednotka, mikroprocesor, komunikační jednotka a zdroj napětí. Existuje mnoho typů přijímačů podle způsobu jejich využití. [1] [2]

2.2 Systematické vlivy

Družicová měření GNSS jsou zatížena mnoha systematickými vlivy. Přesnost určení výsledné polohy z velké míry závisí na možnosti minimalizace, případně úplné eliminace těchto vlivů.

2.2.1 Chyba v určení polohy družice

Poloha družice se určuje na základě *efemerid*, ze kterých je možno vypočítat aktuální pozici družice v prostoru. Každá družice vysílá tzv. palubní efemeridy o své poloze a tzv. almanach o přibližné pozici ostatních družic. Nesrovnalosti mezi efemeridami vysílanými a skutečnými nepříznivě ovlivňují vypočtenou polohu přijímače. Z obrázku (obr. 1) je patrné, že se vliv radiální složky dr této chyby na odchylku od správné polohy dp výrazně eliminuje při použití dvou přijímačů (odchylka od správné polohy dp , základna z) měřením tzv. relativní metodou, která je blíže popsána v sekci 2.3.2.



Obr. 1: Vliv chyby polohy družice na výpočet polohy přijímače (dvou přijímačů)

V současné době dosahují palubní efemeridy přesnosti přibližně 1 m. Pro velmi přesné práce lze využít produkty International GNSS Service (IGS) s přesností 5 cm (Ultra-Rapid v reálném čase), nebo případně efemeridy s přesností 2,5 cm (Final), které jsou dostupné zhruba po 11–17 dnech.

2.2.2 Vliv atmosféry

Signál z družic musí projít několika vrstvami atmosféry, než dorazí k přijímači. Nejvýznamněji tento signál ovlivňuje *ionosféra* (jev nazývaný ionosférická refrakce), která se rozkládá ve výšce zhruba 50–1000 kilometrů nad povrchem Země. Ionty, vzniklé sluneční

aktivitou a působením geomagnetického pole Země, společně s volnými elektrony v této vrstvě dokáží ovlivnit vypočtenou délku mezi družicí a přijímačem chybou v rozmezí jednoho až několika desítek metrů. Kód, modulovaný do nosné vlny, se vlivem ionosféry „zpožďuje“. Nosná vlna je při průchodu ionosférou ovlivňována s opačným efektem, tudíž se „zrychluje“ a dochází k tzv. fázovému zpoždění.

Vliv ionosféry se potlačuje pomocí kvalitních modelů této atmosférické vrstvy, lineárních kombinací měření na dvou frekvencích a nebo také vytvářením tzv. diferencí (blíže popsáno v sekci 2.3.2).

Druhá vrstva atmosféry, která má na šíření družicového signálu zásadní vliv, je *troposféra* a jí způsobovaná troposférická refrakce. Vrstva troposféry se rozkládá od povrchu Země do výšky zhruba 14 kilometrů, ale pro aplikace GNSS se do ní započítává i stratosféra a pak je tedy uvažovaná výška troposféry zhruba 50 kilometrů. Vliv troposféry je závislý na výšce družice nad obzorem podobně, jako je to u astronomické refrakce. Oproti astronomii, kde se uvažuje změna směru světelného paprsku, zde hraje zásadní roli zpoždění družicového signálu podobně jako u ionosférické refrakce.

Pro odstranění vlivu troposféry se využívá celá řada troposférických modelů, ale ani tyto modely nemusí, vzhledem k proměnlivosti podmínek v troposféře, tento vliv dostatečně odstranit. Druhou možností je využití diferencovaných měření, ale kvůli nehomogenosti atmosféry lze této techniky použít pouze do určité vzdálenosti mezi přijímači.

2.2.3 Variace fázového centra antény přijímače a družice

Pomyslný bod, ve kterém je měřen přijímaný rádiový signál se nazývá fázové centrum. Excentricita tohoto bodu závisí na azimutu a výškovém úhlu dopadu přijímaného signálu, síle signálu a také na frekvenci signálu. Fázové centrum mění svou polohu vůči středu antény díky změně směru přijímaného signálu z družic - tzv. *variace fázového centra*. Obecně platí, že antény stejného typu od stejného výrobce mají velice podobné variace fázových center. V rozsáhlejších měřických kampaních se ale často kombinuje více typů antén. V takovém případě je nezbytné určit fázová centra jednotlivých antén měřením v terénu, případně laboratorně. [3]

2.2.4 Relativistické vlivy

Družice GNSS a přijímač jsou v neustálém pohybu vzhledem k vztažné inerciální soustavě. Na družicích, které se pohybují vysokou rychlostí přibližně 3800 m s^{-1} , plyne čas vůči přijímači na zemi pomaleji. Tento jev vyplývá ze speciální teorie relativity a vlivem toho činí rozdíl času zhruba $7,2 \mu\text{s}$

Mnohem významnější je ale ovšem efekt plynoucí z obecné teorie relativity. Ta zjednodušeně říká, že v silnějším gravitačním poli plyne čas pomaleji. Z pohledu přijímače na Zemi tedy plyne čas na družici rychleji zhruba o $46 \mu\text{s}$ za den. Tyto jevy jsou kompenzovány tak, že družice vysílají na frekvenci $10,22999999543 \text{ MHz}$, ale přijímače pracují se základní frekvencí $12,23 \text{ MHz}$. [4]

2.2.5 Vícecestné šíření signálu

Nepřesnost způsobená vícecestným šířením signálu (v zahraniční literatuře označovaná jako *multipath*) vzniká při současném přijímání přímých a odražených vln anténou přijímače. Odražená vlna urazí k anténě delší dráhu než vlna přímá - zároveň má i jinou fázi. Modelování tohoto vlivu je velice složité. Pro účinné omezení vícecestného šíření signálu

se používá několik různých technik od filtrování signálu podle elevačního úhlu, filtrování signálu se slabou intenzitou až po antény speciální konstrukce (tzv. „choke ring“ antény).

2.2.6 Vliv rozmístění družic na přesnost měření

Pro posuzování vlivu kvality geometrické konfigurace družic využíváme matici kofaktorů \mathbf{Q}_x vyrovnaných kódových měření GNSS. V praxi se tento vliv označuje zkratkou *DOP* (z anglického *dilution of precision*) - ve volném překladu „činitel zhoršení přesnosti“. [5]

$$\mathbf{Q}_x = \begin{pmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{Xt} \\ q_{XY} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Yt} \\ q_{XZ} & q_{YZ} & q_{ZZ} & q_{Zt} \\ q_{Xt} & q_{Yt} & q_{Zt} & q_{tt} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Faktor DOP slouží například k plánování GNSS observací, případně slouží v některých předpisech i jako kritérium správnosti měření. Pro praktické účely bývá nejvíce využívána hodnota *PDOP*.

$$\begin{aligned} GDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}} && \text{(geometrický DOP)} \\ PDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} && \text{(polohový DOP)} \\ TDOP &= \sqrt{q_{\Delta t_R}} && \text{(časový DOP)} \end{aligned}$$

2.3 Metody určení polohy

Polohu pomocí GNSS lze určit různými metodami, které můžeme rozdělit do několika skupin například podle:

- vstupních veličin, použitých pro výpočet polohy
- způsobu určení polohy
- doby měření a pohybu přijímače v průběhu měření

2.3.1 Dělení podle vstupních veličin

Kódová měření

Kódová měření využívají pro výpočet pseudovzdálenosti tranzitní čas, během kterého se signál vysílaný družicí dostane k přijímači. Výslednou rovnici lze zapsat jako

$$R_i = \rho_i + c\Delta t - \Delta r_i + \Delta r_{I_i} + \Delta r_{T_i}, \quad (2.2)$$

kde R je měřená pseudovzdálenost, ρ_i topocentrický vektor mezi přijímačem a družicí (skutečná vzdálenost), $c\Delta t$ odchylka časové základny přijímače, vyjádřená v délkových jednotkách, Δr_i korekce hodin přijímače k systémovému času GNSS, Δr_{I_i} a Δr_{T_i} jsou

vlivy ionosférické a troposférické korekce. Velikost vektoru ρ_i můžeme vyjádřit z geocentrických souřadnic jako

$$\rho_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2}, \quad (2.3)$$

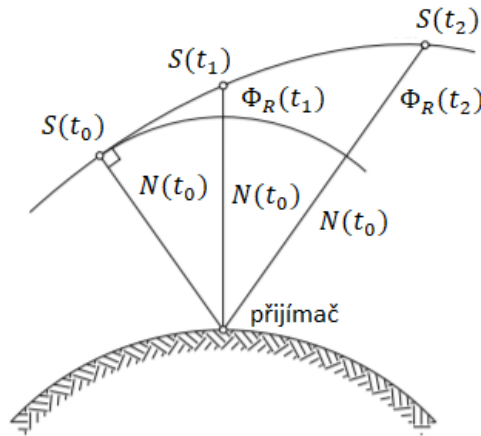
kde X, Y, Z jsou geocentrické souřadnice přijímače a X_i, Y_i, Z_i jsou souřadnice jednotlivých družic. Rovnice (2.2) obsahuje 4 neznámé a to odchylku časové základny přijímače a geocentrické souřadnice X, Y a Z

Fázová měření

Fázová měření pracují na principu určování fázových doměrků a počtu celých vln. Čtyři neznámé z kódových měření jsou zde rozšířeny o neznámý počet vlnových délek v pseudovzdálenostech k jednotlivým družicím. Rovnici fázových pozorování zapíšeme jako

$$\lambda\phi_R^i = \lambda N^i(t_0) + \rho^i - c\Delta t_R(t) + c\Delta t^i(t) - \Delta r_{I_i} + \Delta r_{T_i}, \quad (2.4)$$

kde λ je vlnová délka, ϕ_R^i je fázový rozdíl, $N^i(t_0)$ je počet celých vlnových délek na počátku měření (tzv. počáteční ambiguita) a ostatní složky jsou stejné jako v rovnici (2.2). Fázový rozdíl ϕ_R^i se měří pomocí tzv. *fázového závěsu*, kdy je fáze přijímaného signálu posouvána tak, aby byla identická s fází signálu generovaného přijímačem. Oba signály jsou udržovány ve stejné fázi tj. přijímaný signál se neustále posouvá a velikost tohoto posunu vyjadřuje měřený fázový rozdíl ϕ_R^i . [5] Princip fázového měření pseudovzdálenosti je patrný z obrázku 2.



Obr. 2: Princip fázového měření pseudovzdálenosti; upraveno [5]

2.3.2 Dělení podle způsobu určení polohy

Absolutní metoda

Autonomní určení polohy (tzv. absolutní metoda) využívá při měření jeden přijímač. Měření jsou při této metodě zatěžována všemi systematickými vlivy (viz podkapitola 2.2). Nejvíce je tato metoda uplatňována v navigaci, ale vznikají i techniky pro přesné určování autonomní polohy. *Precise Point Positioning (PPP)* umožňuje až centimetrovou přesnost

s absencí potřeby dalších přijímačů. Základem této metody je znalost přesného času a efemerid družic ze zpracovatelských center a měření na dvou frekvencích (pro odstranění vlivu ionosféry). Metoda PPP má velký budoucí potenciál po odstranění současných omezení, kterými jsou dlouhá observační doba a složitost řešení ambiguit.

Relativní metoda

Relativní metoda vyžaduje simultánní měření dvou a více přijímačů na různých bodech. Výsledkem zpracování této metody je poloha přijímače (přijímačů) vztažená k jinému přijímači. Výslednou relativní polohu těchto přijímačů nazýváme *základnový vektor*. Ve většině případů má jeden přijímač polohu známou - ten nazýváme *Base*. Přijímač, jehož polohu určujeme, označujeme jako *Rover*. Jako synonymum relativní metody je některými autory vykládána metoda *diferenční*. Tyto metody jsou ale (minimálně teoreticky) odlišné.[5] Diferenční metoda je spíše zdokonalené autonomní určování polohy a je založena na využívání predikovaných korekcí měřených pseudovzdáleností pro konkrétní místo. Relativní metoda naopak vyžaduje simultánní měření dvou přijímačů a měření prováděná na obou místech jsou přímo kombinována.

Při relativním měření můžeme odstraňovat systematické vlivy vytvářením tzv. *diferencí*. Využíváme tři možné přístupy k řešení diferencí:

1. diference mezi přijímači - rozdíl měření různých přijímačů na jednu družici v jedné epoše
2. diference mezi družicemi - rozdíl měření jednoho přijímače na dvě různé družice v jedné epoše
3. diference mezi epochami - rozdíl měření jednoho přijímače na jednu družici ve dvou různých epochách

V praxi využíváme první (jednoduché), druhé (dvojité) a třetí (trojité) diference. Pro odstranění ionosférické refrakce vytváříme lineární kombinaci měření na dvou frekvencích a získáváme upravenou základní rovnici fázového měření:

$$L^i = \rho^i + d_p^i + \lambda n^i + c\delta_k - c\delta^i + T_k + \epsilon_{mp} + \epsilon_p, \quad (2.5)$$

kde L je fázové měření na družici, ρ^i je prostorová vzdálenost mezi družicí a přijímačem, d_p^i je chyba v poloze družice, λ je vlnová délka přijímaného signálu, n je počáteční fázová ambiguita, δ_k a δ^i jsou chyby hodin přijímače a družice, T_k je troposferická refrakce, ϵ_{mp} je chyba z vícecestného šíření signálu a ϵ_p je šum přijímače. Z této rovnice jsou vytvářeny další diference.

- **první diference** jsou označovány jako diference mezi přijímači. Tyto diference odstraňují chybu v poloze družice d_p^i a chybu družicových hodin δ^i v případě, že přijímače nejsou od sebe příliš vzdálené. Vliv troposféry jde odstranit pouze v případě velmi blízkých přijímačů
- **druhé diference** vznikají odečtením dvou prvních diferencí. Jsou v nich použita měření na dvě družice v jednom okamžiku. Kompletně odstraňují vliv troposféry a chyby hodin přijímačů. V případě nevyužití lineární kombinace měření na dvou frekvencích eliminují i vliv ionosféry. Při druhých diferencích se zdvojnásobuje vliv

šumu přijímačů. Při druhých diferencích lze určovat pouze relativní polohu přijímačů, protože neznámé jsou vysoce korelované a znemožňují tím řešení pomocí metody nejmenších čtverců (nelze numericky řešit normální rovnice).

- **třetí diference** umožňují odstranit celočíselné ambiguity. Vznikají z rozdílů dvou druhých diferencí ve dvou po sobě jdoucích časech. Umožňují nám eliminovat fázové skoky (nespojitosť fázových měření způsobená dočasnou ztrátou signálu), ale neposkytují dostatečnou přesnost. V praxi bývají třetí diference využity pro vyřešení ambiguity a poloha je poté vypočtena pomocí druhých diferencí.

2.3.3 Dělení podle doby měření a pohybu přijímače v průběhu měření

Metody měření GNSS dělíme na statické a kinematické. Při statických metodách zůstává přijímač v klidu vzhledem k zemskému povrchu v průběhu celého měření (statická metoda, rychlá statická metoda a částečně metoda Stop and Go). Při kinematických metodách přijímač svou polohu vůči Zemi v průběhu měření mění (kinematická metoda a metoda RTK).

Statická metoda

Statická metoda umožňuje nejpřesnější určení polohy díky délce observace (řádově hodiny až dny). Simultánní měření dvou a více přijímačů bývá ekonomicky náročné a proto je tato metoda využívána hlavně při budování základních bodových polí. Přesnost polohy bodu určeného touto metodou bývá zhruba $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ v závislosti na délce vektoru, době měření a kvalitě použité měřické techniky.[1]

Rychlá statická metoda

Rychlá statická metoda (Rapid static) umožňuje určení polohy bodů s přesností zhruba 5 až $10 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ při délce observace v řádu desítek minut. Při dostatečném počtu družic lze ambiguity řešit i pro observace dlouhé několik minut. Rychlé řešení ambiguity umožňují speciální algoritmy; např. *Fast Ambiguity Resolution Approach (FARA)* a mnohé další. [5] Rychlá statická metoda nachází největší uplatnění při zhušťování bodových polí a tvorbě účelových sítí.

Metoda Stop and Go

Tato metoda je jedna z nejrychlejších postprocesních metod pro určování polohy bodů. Přesnost při této metodě dosahuje 1 až 2 cm s délkou observace v řádu vteřin. Bývá často poznačována jako metoda *polokinematická* z důvodu, že ambiguity se řeší pouze na prvním bodě a poté se přijímač přesouvá na další body - je zde ovšem podmínka stálého příjmu družicového signálu.

Kinematická metoda

Při kinematické metodě můžeme určovat dráhu pohybujícího se tělesa. Ambiguity bývají buď řešeny v rámci statické inicializace (obdobně jako u metody Stop and Go), nebo za pohybu přijímače (tzv. řešení *On The Fly*). Přesnost je obdobná jako u metody Stop and Go.

2.4 RTK

Real Time Kinematic (RTK) neboli kinematická metoda v reálném čase je v současné době nejvyužívanější družicovou metodou v geodézii. Zároveň je tato metoda stěžejní pro tuto práci a proto jí bude věnován podrobnější výklad. Metoda RTK je založena na fázových měřeních, řešení ambiguit On The Fly a online přenosu korekcí z referenční stanice (případně sítě referenčních stanic, nebo virtuální stanice).[6] Přesnost RTK se pohybuje v řádu několika centimetrů v závislosti na vzdálenosti přijímače od referenční stanice, stáří korekcí a dalších faktorech (například viz podkapitola 2.2)

V současné době bývají nejčastěji využívány korekce z permanentních referenčních stanic. Mezi největší poskytovatele korekcí v České Republice patří síť CZEPOS, Trimble VRS Now Czech a TopNET. Korekce mohou být z referenční stanice přenášeny rádiovým vysílačem, GSM, případně pomocí datových služeb mobilních operátorů (např. GPRS). Existuje několik koncepcí řešení korekcí.

RTK

Klasické RTK korekce jsou poskytovány z jedné stanice. V případě sítě referenčních stanic bývají tyto korekce poskytovány z nejbližší stanice, případně uživatelem zvolené stanice.

VRS

Virtual Reference Station (VRS) - česky virtuální referenční stanice - je koncept poskytování korekcí v síti referenčních stanic. Přijímač odešle přes komunikační kanál informaci o své přibližné poloze pomocí standardu NMEA (řetězec GPGGA) do řídicího centra sítě referenčních stanic. Korekce jsou ze síťového řešení vypočteny v řídicím centru pro referenční stanici (virtuální), která leží v poloze přijímače a tyto korekce zašle zpět do přijímače. [7]

PRS

Pseudo-Reference Station (PRS) - česky pseudoreferenční stanice - je koncept téměř shodný s VRS, ale korekce jsou vypočteny pro virtuální stanici, která má polohu obvykle několik km směrem k nejbližší reálné referenční stanici. Toto řešení se využívá u přijímačů, které mají problémy s nulovými (velice krátkými) vektory k referenční stanici jaku u VRS.

MAC

Master-Auxiliary Concept (MAC) je řešení vyvinuté firmami Leica Geosystems a Geo++. Na základě znalosti přibližné polohy přijímače (NMEA zpráva) vybere řídicí centrum několik referenčních stanic v okolí přijímače (tzv. buňku). Nejbližší referenční stanice je zvolena jako hlavní - *Master* a ostatní stanice z buňky jsou brány jako pomocné - *Auxiliary*. Z hlavní stanice jsou přes řídicí centrum vysílány kompletní korekce, z pomocných stanic pouze difference korekcí. Z těchto dat počítá přijímač přesné korekce pro svou polohu. MAC využívá v rámci firmy Leica Geosystems řešení označované jako MAX (mimo jiné využívané v síti CZEPOS). Pro přijímače, které neumožňují zpracování MAC korekcí existuje individualizované řešení i-MAX, kde je MAC algoritmus počítán v řídicím centru a až tato celková korekce je posílána do přijímače. [8] [9]

2.5 Síť permanentních stanic

Síť permanentních stanic slouží k poskytování korekcí GNSS zpravidla v reálném čase. V současné době je na území České Republiky v provozu několik sítí permanentních stanic. V této práci budou zpracovávána data ze státní sítě CZEPOS a soukromé sítě Trimble VRS Now Czech (TVN), a proto budou v následujícím textu zmíněny jen tyto dvě.

CZEPOS

Síť permanentních stanic GNSS České Republiky (CZEPOS) je provozována Zeměměřic-kým úřadem a slouží k poskytování korekčních dat uživatelům GNSS. [10] Síť CZEPOS poskytuje korekční data na území celé České Republiky z 23 stanic ve správě Zeměmě-řického úřadu a 5 externích stanic - síť VESOG. V příhraničních oblastech jsou navíc využívána data 27 stanic permanentních sítí okolních států. Síť CZEPOS poskytuje ko-rekce z měření na družice GPS, GLONASS a v omezené míře i Galileo a Beidou.

Kromě korekcí s přesností vhodnou pro běžné geodetické účely (např. služby RTK, RTK – PRS, RTK – FKP, VRS3 – iMAX - GG) poskytuje síť CZEPOS také korekce DGPS, případně data pro postprocesní vyhodnocení ve formátu RINEX. V této práci byly ze sítě CZEPOS využity data služby VRS3 – iMAX - GG (korekce z družic GPS a GLONASS vypočtené na základě řešení MAC - viz podkapitola 2.4) a data ve formátu RINEX pro postprocesní zpracování.

Trimble VRS Now Czech

Trimble VRS Now Czech je soukromá síť permanentních stanic, kterou u nás vytvořila firma Trimble ve spolupráci s firmou Geotronics Praha, s. r. o. Síť tvoří 29 permanent-ních stanic, které jsou doplňovány dalšími 10 stanicemi ze sítí v Německu a Rakousku. Korekční data s přesností vhodnou pro geodetické účely jsou v této síti počítána řešením VRS.

Kapitola 3

Transformace do S-JTSK

3.1 Lokální transformační klíč

Transformace z ETRS89 do S-JTSK pomocí lokálního transformačního klíče vychází z obecných matematických vzorců. Pro výpočet této transformace je třeba znát souřadnice ETRS89 a S-JTSK identických bodů, jejichž počet a konfigurace ovlivňuje výslednou přesnost. Nejčastěji využíváme prostorovou podobnostní transformaci, někdy zvanou jako *Helmertova sedmiprvková transformace*. V případě malých rotací a posunů lze užít tzv. diferenciální (zjednodušenou) Helmertovu transformaci, kterou můžeme v linearizovaném tvaru zapsat jako

$$\underbrace{\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}}_{\mathbf{X}} = (1 + m) \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix}}_{\mathbf{R}} \underbrace{\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}}_{\mathbf{x}'} + \underbrace{\begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta jZ \end{pmatrix}}_{\Delta \mathbf{X}}, \quad (3.1)$$

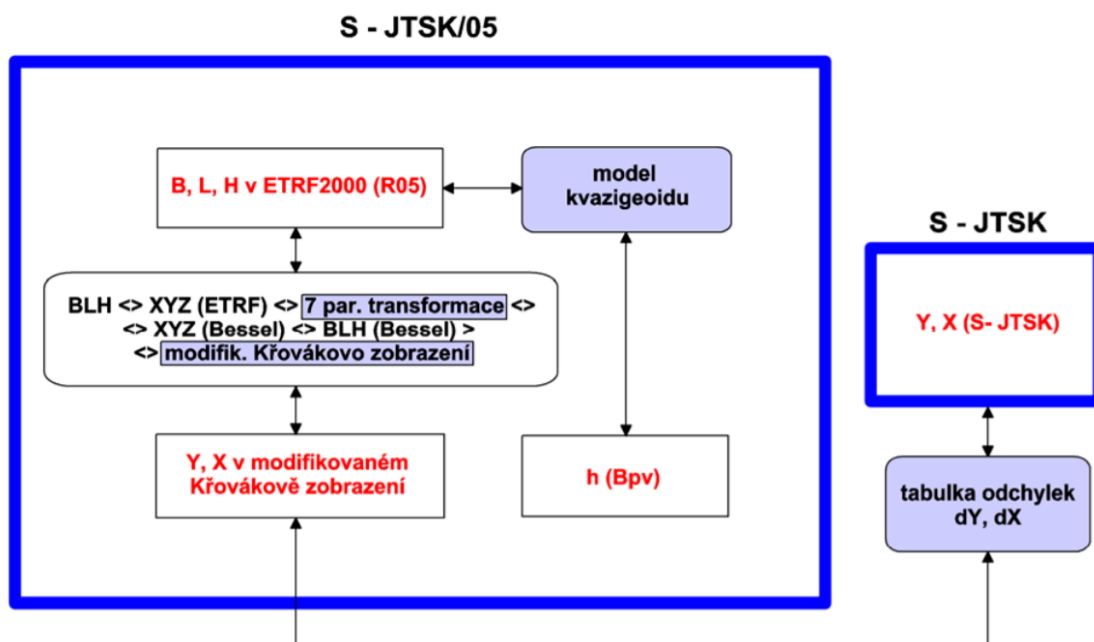
kde \mathbf{X} je vektor výsledných souřadnic, m je měřítko, \mathbf{R} rotační matice, \mathbf{x}' je vektor výchozích souřadnic a $\Delta \mathbf{X}$ je vektor prostorových translací. Lokální transformace přejímá místní měřítko sítě a lépe tedy navazuje na stávající bodové pole.

3.2 Zpřesněná globální transformace

Pro snazší převod do S-JTSK byla Zeměměřickým úřadem a VÚGTK vyvinuta tzv. *zprecněná globální transformace*, která odstraňuje potřebu měření na identických bodech, případně nutnost výpočtu lokálního transformačního klíče z dvojích souřadnic trigonometrických a zhušťovacích bodů. Princip této transformace je patrný ze schématu (obr. 3).

3.2.1 Převod do S-JTSK/05

Elipsoidické souřadnice B_{ETRS} , L_{ETRS} a elipsoidická výška H_{ETRS} na elipsoidu GRS80 jsou převedeny na pravoúhlé prostorové souřadnice X_{ETRS} , Y_{ETRS} a Z_{ETRS} . Tyto souřadnice jsou transformovány sedmiprvkovou podobnostní prostorovou transformací na prostorové souřadnice X_{Bes} , Y_{Bes} a Z_{Bes} na Besselově elipsoidu. Koeficienty α , β , γ , měřítko m a prostorové translace jsou dány v Metodice. [11] Tyto souřadnice jsou dále převedeny na elipsoidické souřadnice B_{Bes} , L_{Bes} a elipsoidickou výšku H_{Bes} na Besselově elipsoidu.



Obr. 3: Schéma zpřesněné globální transformace; převzato [11]

Aplikací zobrazovacích rovnic Křovákova zobrazení jsou vypočteny přibližné pravoúhlé souřadnice Y' a X' . Souřadnice $Y_{JTSK/05}$ a $X_{JTSK/05}$ jsou z přibližných souřadnic vypočteny přičtením konstanty 5 000 000 a pomocí *bikubické dotransformace*, kterou je docílena co největší shoda mezi systémy S-JTSK/05 a S-JTSK.

3.2.2 Převod z S-JTSK/05 do S-JTSK

Na základě znalosti souřadnic ETRF2000 a S-JTSK vybraného počtu trigonometrických a zhušťovacích bodů byly vypočteny korekce mezi těmito systémy, které můžeme zapsat jako

$$dY = Y_{S-JTSK/05} - Y_{S-JTSK} - 5\,000\,000 \quad dX = X_{S-JTSK/05} - X_{S-JTSK} - 5\,000\,000.$$

Tyto korekce dY a dX byly interpolovány do čtvercové sítě (gridu) o velikosti oka 2 km a uloženy ve formě tabulky [11]. Hodnota korekce konkrétního bodu se z této tabulky interpoluje. Pro tuto interpolaci je dle Metodiky doporučena kvadratická interpolace. Zde ovšem vzniká jistá nejednoznačnost, protože autoři jednotlivých programů mohou využít různých interpolačních postupů pro získání mezilehlých hodnot a tyto programy mohou ukazovat různé výsledky.

V době tvorby této práce (jaro 2018) jsou v platnosti dvě verze převodních tabulek. Převodní tabulky *verze 1202* jsou určeny pro období 1. 7. 2012 až 30. 6. 2018. Tyto tabulky byly interpolovány na základě znalosti souřadnic zhruba 46 000 trigonometrických a zhušťovacích bodů. Přesnost transformace je v případě těchto tabulek charakterizována střední souřadnicovou chybou $m_{x,y} = 0,025m$.

V průběhu platnosti tabulek verze byla zjištěna chyba v jejich uzlu $Y = 518$ km; $X = 1148$ km. Velikost chyby v tomto uzlu činila 0,5 m. Tato chyba byla vyřešena tak, že byla pro potřeby určování bodů PPBP a podrobných bodů vyloučena lokalita v okolí

tohoto chybného uzlu. Zároveň od roku 2014 probíhaly práce na zpřesnění převodních tabulek a doplnění souboru identických bodů v problémových lokalitách. Velký důraz bylo kladeno na doplnění bodů na státních hranicích České republiky. Díky tomu se podstatně zmenšila nutnost extrapolace při tvorbě tabulek.

Pro tvorbu nových tabulek bylo testováno několik variant. Testovány byly varianty tabulek s velikostí oka od 500 m do 2000 m, vhodný matematický postup interpolace tabulky (zvolena varianta převrácené hodnoty 2. mocniny vzdálenosti) a také byly pro výpočet používány různě velké soubory identických bodů.

Ze všech možných variant byla nakonec vybrána varianta velikosti oka 2 x 2 km, která byla vypočtena z redukovaného počtu měřených trigonometrických bodů, která zajišťuje lepší hladkost a lepší vnitřní přesnost tabulky. [12] Platná verze této tabulky byla označena číslem 1710 a její platnost byla vyhlášena pro měření pořízená po 1. 1. 2018.

3.2.3 Porovnání transformace jednotlivých programů

Jak bylo popsáno výše, pro výpočet korekce mezi systémy S-JTSK/05 a S-JTSK je doporučena kvadratická interpolace. Zvolený postup může být v různých transformačních programech více či méně odlišný.

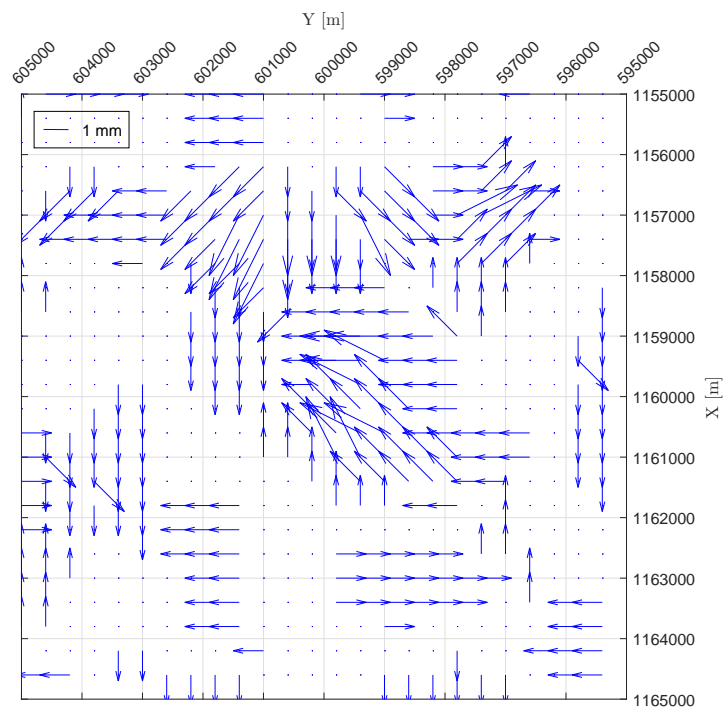
Pro verzi tabulek 1202 byl porovnán výpočetní program ETJTZU 2013, který je součástí aplikace Transformace souřadnic na Geoportálu ČÚZK, program Groma verze 11.0 a transformační modul ETRS-2-JTSK_1202 verze 1.0, který jsem vyvinul. Všechny tyto programy jsou schváleny pro transformace mezi ETRS89 a S-JTSK pomocí zpřesněné globální transformace.

Nejprve byla vytvořena testovací síť bodů 10x10 km po 400 m se souřadnicemi v ETRS89. Tím vzniklo 625 bodů, které byly zmíněnými transformačními programy transformovány do S-JTSK. Jako výpočetní nástroj pro porovnání výsledků jednotlivých programů byl zvolen program Matlab R2016a. Výsledky transformace z programu ETJTZU 2013 byly zvoleny za referenční a byly k nim porovnány výsledky obou zbylých programů. Vektory odchylek jsou zobrazeny v grafech (obr. 4) a (obr. 5). Kromě toho byly zvláště porovnány extrémní hodnoty rozdílů oproti transformaci ETJTZU 2013 tabulka (3.1).

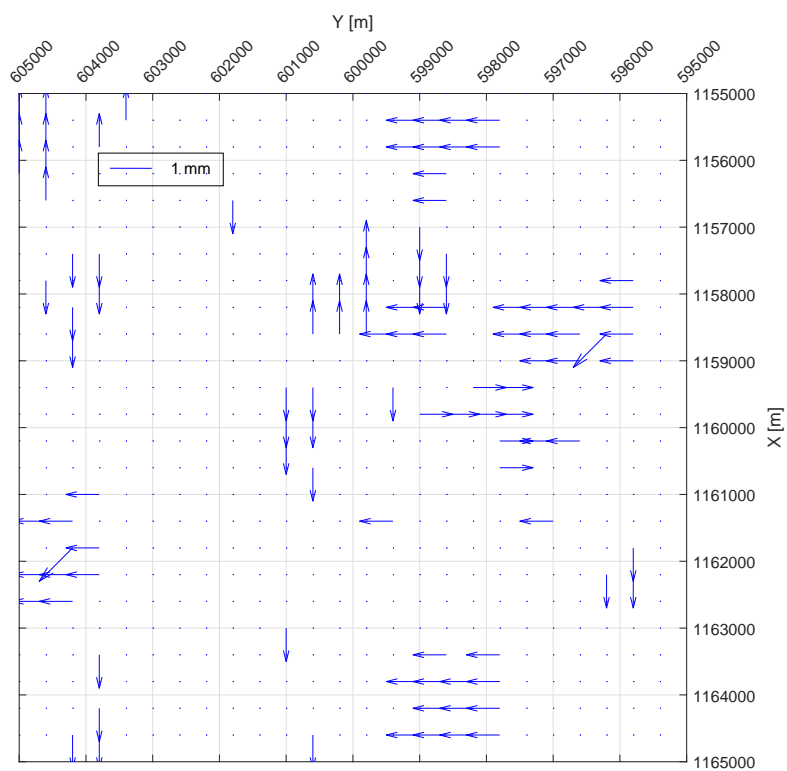
Z výsledků je patrné, že všechny tyto transformační programy dávají velice podobné výsledky.

Tab. 3.1: Extrémní hodnoty rozdílů oproti transformaci ETJTZU 2013 v lokalitě Brno

Program	X_{max} [mm]	Y_{max} [mm]	Z_{max} [mm]	X_{min} [mm]	Y_{min} [mm]	Z_{min} [mm]
ETRS-2-JTSK_1202	1.0	1.0	1.0	-1.0	-1.0	-2.0
Groma v.11.0	2.0	2.0	0.0	-2.0	-2.0	-4.0



Obr. 4: Rozdíly mezi transformací ETJTZU 2013 a Groma v.11.0 v lokalitě Brno



Obr. 5: Rozdíly mezi transformací ETJTZU 2013 a ETRS-2-JTSK_1202 v lokalitě Brno

Kapitola 4

Měření v terénu

Pro vlastní měření byly zvoleny dvě lokality. První lokalita se nachází v těsné blízkosti Fakulty stavební VUT v Brně (lokalita Brno), druhá poblíž obce Jedovnice (lokalita Jedovnice). Kromě samotného měření metodou RTK v sítích CZEPOS a Trimble VRS Now Czech proběhlo na měřených bodech terestrické měření totální stanicí a měření rychlou statickou metodou.

4.1 Použité přístroje a pomůcky

Trimble M3

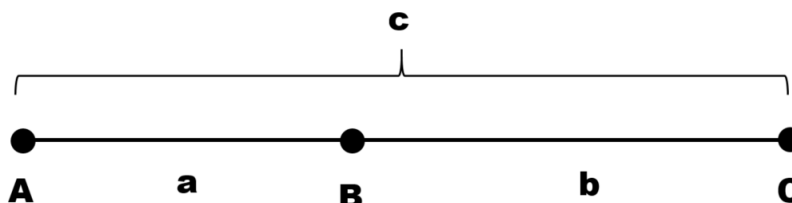
Trimble M3 je mechanická totální stanice, která je využitelná v největší míře pro mapování a v katastru nemovitostí. V průběhu měření se ukázalo, že tento přístroj není úplně vhodný pro přesná měření. Absence hrubých ustanovek znesnadňuje registraci dat, kdy se i při sebemenším dotyku (například při zadávání příkazu „měřit“) přístroj nepatrně pootočí. Základní parametry přístroje jsou popsány v tabulce 4.1.



Obr. 6: Ukázka totální stanice Trimble M3

Tab. 4.1: Základní parametry totální stanice Trimble M3 2"; čerpáno z [13]

Zvětšení dalekohledu	30x
Přesnost měřeného úhlu (DIN 18723)	2"
Přesnost měření délek	2 mm + 2 ppm
Dosah délkového měření na 1 hranol	1,5 až 3000 m



Obr. 7: Schéma měření při určování součtové konstanty hranolu

Totální stanice a odrazné hranoly byly centrovány pomocí optického centrovače, který je součástí třínožky GDF22 od firmy Wild. Nevýhodou tohoto centrovače je, že nemůže být v terénu jednoduše ověřena správnost centrace pootočením centrovače o 180° . Kontrola centrace byla provedena v učebně B150, která je součástí Ústavu geodézie, Fakulty stavební, VUT v Brně. Třínožka byla upevněna do kovové desky a na milimetrovém papíře byla vyznačena poloha záměrné přímký. Následně byla třínožka pootočena o 180° a na papíře byla vyznačena druhá poloha záměrné přímký. Polovina výchytky mezi těmito dvěma polohami byla opravena pomocí posunu středové značky nitkového kříže optického centrovače, druhá polovina posunem třínožky.

Měřeno bylo na odrazné hranoly Wild GPR1. Pro kombinaci totální stanice Trimble M3 a odrazných hranolů Wild GPR1 musela být určena součtová konstanta hranolu.

Měřické práce pro určení této konstanty probíhaly na pilířích s nucenou centrací v učebně B150. Výsledná konstanta hranolu se vypočte ze vzorce $PSM = c - (a + b)$, kde a , b a c jsou měřené délky ve smyslu schématu (obr. 7). Výsledná součtová konstanta -34,1 mm byla pro oba hranoly a totální stanici Trimble M3 2" (v. č. DO36267) totožná.

Trimble R4

Pro měření RTK v síti CZEPOS a měření rychlou statickou metodou byly použity dva přijímače Trimble R4 (v. č. 5328440051 a 5345446904). Tento typ přijímače má integrovanou GNSS anténu a pracuje na dvou frekvencích. Přijímač Trimble R4 umožňuje příjem signálu jak z družic systému GPS tak z družic GLONASS. Pro snadné ovládání je součástí GNSS systému Trimble i kontroler s dotykovým displejem. Přijímače byly umisťovány na stativy a centrovány pomocí optického centrovače. V průběhu měření na jednotlivých bodech byly okuláry optického centrovače a displej přijímače (antény) orientovány na sever.

Trimble GeoXR

Měření metodou RTK v síti Trimble VRS Now Czech probíhalo pomocí přijímače Trimble GeoXR (v.č. 5135407186) s využitím externí GNSS antény Trimble Tornado. Specifikace přesnosti přijímače jsou zobrazeny v tabulce 4.3

Tab. 4.2: Základní parametry GNSS přijímače Trimble R4; čerpáno z [14]

Metoda	Horizontální přesnost	Vertikální přesnost
Rychlá statická	3 mm + 0,5 ppm	5 mm + 0,5 ppm
RTK (referenční stanice do 30 km)	8 mm + 1,0 ppm	15 mm + 1,0 ppm
RTK (v síti referenčních stanic)	8 mm + 0,5 ppm	15 mm + 0,5 ppm

Tab. 4.3: Základní parametry GNSS přijímače Trimble R4; čerpáno z [15]

Metoda	Horizontální přesnost	Vertikální přesnost
Rychlá statická	5 mm + 0,5 ppm	6 mm + 0,5 ppm
RTK	13 mm + 1,0 ppm	20 mm + 1,0 ppm

4.2 Volba postupu měření

RTK

Pro měření metodou RTK byly využívány systémy GPS a GLONASS. Při měření v síti CZEPOS bylo využito korekcí ze služby VRS3 – iMAX - GG. V případě sítě Trimble VRS Now Czech bylo využito jediné dostupné služby, tedy VRS. Observováno bylo na každém bodě vždy po dobu 10 minut s intervalem záznamu souřadnic 10 s, kdy byla anténa upevněna na stativu. Na každém bodě byly provedeny dvě nezávislé observace s časovým rozestupem minimálně 3 hodiny.

Rychlá statická metoda

Pro rychlou statickou metodu bylo využito dvou přijímačů Trimble R4. První přijímač plnil funkci referenční stanice a byl tedy po celou dobu měření umístěn na jednom z určených bodů. Druhý přijímač byl vždy postupně přemístován mezi zbylými body sítě. Na každém bodě bylo dvakrát observováno po dobu 20 minut s časovým odstupem 3 hodiny. Interval fáznamu fázových měření byl 5 s. Antény byly umístěny na stativu. Návaznost na systém ETRS89 byla zajištěna vybranými permanentními stanicemi sítě CZEPOS.

Terestrické měření

K terestrickému měření byla využita totální stanice Trimble M3 a trojpodstavcová souprava. Zvolena byla metoda měření úhlů ve dvou skupinách. Délky byly měřeny vždy obousměrně. Výšky přístroje a cílů byly měřeny svinovacím metrem před a po měření.

V lokalitě Brno byly navíc body zaměřeny metodou technické nivelace digitálním nivelačním přístrojem Leica Sprinter 150M; v. č. 339511.

4.3 Lokalita Brno

Měření v lokalitě Brno probíhala na cvičném bodovém poli na travnaté ploše před Právnickou fakultou Masarykovy univerzity. Pro měření byly vybrány body 4010, 4011, 4018 a 4019, které tvoří nepravidelný čtyřúhelník. Měření na těchto bodech probíhaly na podzim roku 2017. Měření rychlou statickou metodou a metodou RTK bylo shodné

s postupem popsaným v sekci (4.2). Lokalita se nachází v bezprostřední blízkosti permanentní stanice TUBO sítě CZEPOS a v několikakilometrové vzdálenosti od nejbližší permanentní stanice sítě Trimble VRS Now Czech.



Obr. 8: Měření RTK na bodě 4011 Obr. 9: Trimble M3 na bodě 4018

4.4 Lokalita Jedovnice

Měřické body v lokalitě Jedovnice se nachází podél silnice II/373 mezi obcemi Jedovnice a Vilémovice. Pro vlastní měření byly vybrány body 4102, 4103, 4104, 4105 a 4106. Body jsou stabilizovány hřeby na stropnici betonových šachet, které jsou zbudovány podél silnice v rozestupu zhruba 200 m. Na všech bodech v této lokalitě bylo měřeno ve dnech 9. a 10. března 2018 výše popsaným postupem. Při terestrickém měření byl, vzhledem k liniové struktuře sítě, zvolen pro měření polygonový pořad. Lokalita se nachází několik desítek kilometrů daleko od nejbližších permanentních stanic sítě CZEPOS a Trimble VRS Now Czech.



Obr. 10: Trimble M3 na bodě 4103 Obr. 11: Referenční stanice Trimble R4 na bodě 4104

Kapitola 5

Zpracování a analýza naměřených dat

Jedním z hlavních cílů práce je analýza přesnosti metody RTK. V následující kapitole je popsán jak postup zpracování dat získaných metodou RTK. Tak výpočet souřadnic bodů referenčními metodami (rychlá statická metoda a terestrické měření totální stanicí). Pro větší přehlednost jsou základní teoretické principy, použité při zpracování dat, samostatně uvedeny v následující podkapitole.

5.1 Použitá teorie

5.1.1 Vyrovnání přímých měření

K výsledným hodnotám z metody RTK (souřadnicím Y, X a výšce H) bývá přistupováno jako k přímým měřením. Jednotlivá měření bývají považována za měření stejné přesnosti.

Platí, že nejlepší nestranný odhad střední hodnoty výběrového souboru měření je výběrový aritmetický průměr. V tomto případě, kdy mají měření stejnou váhu, se jedná o *jednoduchý aritmetický průměr* [17]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (5.1)$$

kde n je počet měření a x_i je jednotlivé měření. Základní charakteristikou přesnosti při měření přímých je *výběrová střední chyba jednoho měření* m , která se vypočte jako odhad základní střední chyby \bar{m} podle vzorce

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}, \quad (5.2)$$

kde člen v_i značí opravy (odchyly) jednotlivých měření od aritmetického průměru a vypočte se ze vztahu $v_i = \bar{x} - x_i$. V případě, kdy je známa skutečná hodnota určované veličiny, pracujeme se skutečnými chybami ε_i a střední chyba jednoho měření se pak vypočte ze vzorce

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}. \quad (5.3)$$

Z hodnoty m lze následně vypočítat *střední chybu aritmetického průměru* $m_{\bar{x}}$

$$m_{\bar{x}} = \frac{m}{\sqrt{n}}. \quad (5.4)$$

V případě, kdy kombinujeme měření různé přesnosti, využíváme *výběrový obecný (vážený) průměr*. Obecná formulace obecného průměru je

$$\bar{x} = \frac{p_1x_1 + p_2x_2 + \dots + p_nx_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i}, \quad (5.5)$$

kde x_i jsou jednotlivá měření a p_i jsou jejich váhy. Váha měřené veličiny je míra, se kterou zohledníme hodnotu této veličiny v dalším výpočtu. Přesnějším (nebo pravděpodobnějším) měřením přisuzujeme větší váhu. Při práci s výběrovými soubory se váha měření vypočte ze vztahu

$$p_i = \frac{m_0^2}{m_{x_i}^2}, \quad (5.6)$$

kde m_{x_i} je střední chyba měření a m_0 je jednotková střední chyba, která odpovídá měření o váze $p_0 = 1$. V praxi se také často používá vah způsobem, kdy se za střední jednotkovou chybu volí $m_0 = 1$ a do jmenovatele se dosadí jiná měřená veličina (využití v nivelaci, trigonometrickém určování výšek, vektorech GNSS, atd.).

Jednoduchý klouzavý průměr

Metodou klouzavých průměrů můžeme provádět „lokální“ vyrovnání časové řady. Ze souboru měření s n hodnotami vyrovnáváme postupně pomocí jednoduchého aritmetického průměru jednotlivé úseky o délce d , které v rámci časové řady postupně „posunujeme“. Matematicky tento postup můžeme zapsat jako

$$\bar{x}_1 = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_d}{d}, \bar{x}_2 = \frac{x_3 + x_2 + \dots + x_{d+1}}{d}, \dots, \bar{x}_i = \frac{x_{n-d-1} + \dots + x_{n-1} + x_n}{d}, \quad (5.7)$$

kde $i = (1, 2, \dots, n - d + 1)$ je číslo klouzavého průměru.

5.1.2 Dvojice měření

V geodézii – a při měření technologií GNSS to platí dvojnásob – je nutné z kontrolních důvodů měřit jednu veličinu minimálně dvakrát. Z jednotlivých nezávislých sobě odpovídajících měření ve dvou etapách vznikají tzv. *dvojice měření*.

Střední hodnoty dvojic se vypočtou jako jednoduché aritmetické průměry

$$x_1 = \frac{x'_1 + x''_1}{2}, \quad x_2 = \frac{x'_2 + x''_2}{2}, \quad \dots, \quad x_n = \frac{x'_n + x''_n}{2}, \quad (5.8)$$

kde x'_i a x''_i značí dvojici měření. Střední hodnoty souřadnic y_i a výšek h_i se vypočtou ze stejných vzorců cyklickou záměnou. Podobně můžeme vyjádřit difference (rozdíly) d_i mezi sobě odpovídajícími měřeními

$$d_1 = x'_1 - x''_1, \quad d_2 = x'_2 - x''_2, \quad \dots, \quad d_n = x'_n - x''_n. \quad (5.9)$$

Střední chyba jednoho měření se vypočte z rovnice (5.10) a vyjadřuje přesnost jakéhokoliv měření ze souboru měřených dvojic

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{2n}}. \quad (5.10)$$

Střední chyba aritmetického průměru dvojice se pak vypočte ze vzorce

$$m_x = \frac{m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}. \quad (5.11)$$

V případě měřických dvojic různé přesnosti bývá nejprve vypočtena jednotková střední chyba

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p d_i^2}{2n}} \quad (5.12)$$

ze které se chyby jednotlivých měření m_i vypočtou vzorcem

$$m_i = \frac{m_0}{\sqrt{p_i}}. \quad (5.13)$$

5.1.3 Filtrace odlehlých měření

Měření jsou obecně ovlivňována náhodnými a systematickými chybami. Pro relevantní analýzu měřených dat je třeba tyto data oprostít od hodnot, které nepříjemně ovlivňují výslednou střední hodnotu (tzv. odlehlá měření). Při testování výběrových souborů na výskyt odlehlých měření se vystavujeme riziku α , že z výběrového souboru vyřadíme (vyfiltrujeme) správné hodnoty.

Mezní rozdíl

Mezní rozdíl je jedna z metod, kterou lze detekovat odlehlé hodnoty. Při měření měřických dvojic zpravidla vznikají mezi jednotlivými dvojicemi rozdíly (diference). Střední chyba rozdílu se vypočte ze vzorce

$$m_{\Delta} = \sqrt{m_{x'}^2 + m_{x''}^2}, \quad (5.14)$$

kde m_1, m_2^2 jsou střední chyby jednotlivých měření. V případě, že jsou obě měření provedena se stejnou přesností m , lze tento vzorec upravit do tvaru

$$m_{\Delta} = m\sqrt{2}. \quad (5.15)$$

Mezní rozdíl takové dvojice se pak vypočte pomocí vzorce

$$\delta_{\Delta} = t_{\alpha} \cdot m_{\Delta}, \quad (5.16)$$

kde t_{α} je parametr volený na základě předem zvoleného rizika α , že bude nesprávně vyloučena určitá dvojice měření ($t_{\alpha} = 2$ pro $\alpha = 0,05$; $t_{\alpha} = 2,5$ pro $\alpha = 0,01$). [18]

5.1.4 Vyrovnání geodetických sítí

Geodetické sítě vytvářejí obrazce, díky kterým můžeme určovat hledané neznámé veličiny (zpravidla souřadnice) z nadbytečného počtu měřených veličin. V geodézii rozlišujeme dva typy sítí - volnou a vázanou síť.

Vázané sítě jsou takové, ve kterých vstupují souřadnice daných bodů do vyrovnání jako pevné a při vyrovnání nejsou tedy změněny. Měřené veličiny mezi danými body nemají vliv na výsledek vyrovnání, ale ovlivňují charakteristiky přesnosti.

Za *volnou* označujeme takovou síť, ve které považujeme všechny souřadnice za neznámé. Z toho plyne, že síť není umístěna v prostoru a matice normálních rovnic je tedy singulární. Pro řešení tohoto problému je tedy nezbytně nutné do výpočtu doplnit dodatečné informace pro odstranění defektu matice normálních rovnic pro umístění, orientaci, případně rozměr sítě (např. fixací souřadnic podmínkami), nebo systém normálních rovnic řešit tzv. pseudoinverzí.

Rozměr a tvar volné sítě není přizpůsoben žádným pevným bodů a proto se často využívá v aplikacích, kde je přesnost stávajícího bodového pole nedostatečná (např. S-JTSK). Volné sítě lze využít pro předběžné vyrovnání a zhodnocení kvality měření na základě porovnání apriorních a aposteriorních charakteristik přesnosti.

Pseudovázaná síť je jakýmsi mezikrokem mezi volnou a vázanou sítí. V případě pseudovázané sítě bývá vyrovnávaná síť napojena na již známé souřadnice, u kterých jsou uvažovány jejich charakteristiky přesnosti. Vyrovnávané body tak kromě lokální přesnosti přejímají i přesnost výchozích bodů. Souřadnice známých bodů vstupují do vyrovnání jako tzv. pseudoměření. Váhová matice \mathbf{P} je rozšířena o submatici $\mathbf{M}_{\mathbf{XYZ}}^{-1}$, která je nositelkou přesnosti výchozích bodů.

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{\mathbf{m}}^{-1} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{\mathbf{XYZ}}^{-1} \end{pmatrix}, \quad (5.17)$$

kde submatice $\mathbf{M}_{\mathbf{m}}^{-1}$ je původní váhová matice, podobně jako u vyrovnání sítě vázané. [18]

Globální kvalitu vyrovnání sítě můžeme posuzovat podle aposteriorní střední jednotkové chyby $^{apos}m_0$, tj. chyby o jednotkové váze $p_0 = 1$ vypočtené ze vzorce

$$^{apos}m_0 = \sqrt{\frac{v^t P v}{n - k}}, \quad (5.18)$$

kde v je vektor oprav, P je matice vah a $n - k$ je počet stupňů volnosti (počet nadbytečných měření). Poměr střední jednotkové chyby aposteriorní a apriorní $^{apri}m_0$ se rovná v ideálním případě 1.

Přesnost vyrovnaných souřadnic vyjadřujeme pomocí jejich středních chyb m_x , m_y a m_h , které získáme z hlavní diagonály kovarianční matice

$$\mathbf{C}_{\mathbf{x}} = ^{apos}m_0^2 \mathbf{Q}_{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} m_{x_1}^2 & m_{x_1 x_2} & \cdots & m_{x_1 x_k} \\ m_{x_2 x_1} & m_{x_2}^2 & \cdots & m_{x_2 x_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{x_k x_1} & m_{x_k x_2} & \cdots & m_{x_k}^2 \end{pmatrix}, \quad (5.19)$$

kde $\mathbf{Q}_{\mathbf{x}}$ je matice kofaktorů, která je inverzní k matici koeficientů normálních rovnic \mathbf{N} a zapisuje se jako

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1} = \begin{pmatrix} Q_{x_1 x_1} & Q_{x_1 x_2} & \cdots & Q_{x_1 x_k} \\ Q_{x_2 x_1} & Q_{x_2 x_2} & \cdots & Q_{x_2 x_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{x_k x_1} & Q_{x_k x_2} & \cdots & Q_{x_k x_k} \end{pmatrix}. \quad (5.20)$$

Střední souřadnicová chyba $m_{x,y}$ se pak pro jednotlivé body sítě vypočte ze vztahu

$$m_{x,y} = \sqrt{\frac{m_x^2 + m_y^2}{2}}. \quad (5.21)$$

5.2 Zpracování a vyrovnání sítí v obou lokalitách

Lokalita Brno

Měření z rychlé statické metody byla převedena do formátu RINEX. Výpočty vektorů probíhaly v programu Trimble Business Center (TBC). V lokalitě Brno byla nejdříve vypočtena poloha bodu 4018 dvěma nezávislými vektory z permanentní stanice TUBO, jejichž výsledné hodnoty byly porovnány a zprůměrovány. Ostatní body sítě, tj body 4010, 4011 a 4018, byly vypočteny pomocí vektorů z bodu 4018 (tedy referenční stanice). Pro každý z těchto bodů byly opět určeny dvě rozdílné polohy, které byly zprůměrovány. Z diferencí mezi měřeními byla odhadnuty empirické střední chyby jednotlivých složek souřadnic bodů v síti. Pomocí vzorce (5.21) byla vypočtena střední souřadnicová chyba $m_{x,y} = 4,3$ mm a střední chyba výšky $m_h = 11,7$ mm. Souřadnice byly ze systému ETRS89 transformovány do S-JTSK programem ETRS-2-JTSK_1202 verze 1.0

Pro ověření správnosti výšek ve výsledcích rychlé statické metody byly body přeměřeny pomocí technické nivelace. Výchozím bodem pro uzavřený nivelační pořad byl bod Kij-7.2c na rohu budovy C, Fakulty stavební VUT v Brně. Porovnání výsledků technické nivelace a rychlé statické metody je uvedeno v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Porovnání výšek z rychlé statické metody a nivelace

Bod	$H_{GNSS}[m]$	$H_{niv.}[m]$	Rozdíl[m]
4010	249.569	249.566	0.003
4011	249.143	249.146	-0.003
4018	249.997	249.996	0.001
4019	249.319	249.320	-0.001

Společné vyrovnání terestrických měření a výsledných souřadnic z rychlé statické metody bylo provedeno v programu DLL_MNČ 2, který vyvinul Ing. Ladislav Bárta, Ph.D. Program DLL_MNČ 2 umožňuje vyrovnání volných a vázaných sítí všech typů (1D, 2D a 3D sítě). Na první pohled se tento program může jevit složitě a poněkud „těžkopádně“ oproti jiným (komerčním) programům. Tento drobný nedostatek je ovšem vyvážen všestranností a využitelností programu i pro velmi přesné aplikace. Jako největší výhodu hodnotím možnost připsat každé použité veličině mnoho různých údajů o přesnosti, případně veličinu formovat přidáním přidavných atributů a v neposlední řadě možnost společného vyrovnání nesourodých veličin (směry, délky, úhly, převýšení, vektory GNSS).

Pro detekci odlehlých hodnot a pro informaci o přesnosti samotných měření byla síť nejprve vyrovnána jako volná metodou nejmenších čtverců (MNČ) zprostředkujícím vyrovnáním [17]. Do vyrovnání vstupovaly měřené osnovy směrů, vodorovné délky, převýšení mezi body a výsledné souřadnice ze zpracování rychlé statické metody. Po ověření homogenity a přesnosti měřených terestrických veličin následovalo finální vyrovnání pseudovázané sítě s uvážením reálných přesností souřadnic bodů určených technologií GNSS. Vyrovnané souřadnice bodů jsou zobrazeny v tabulce 5.2. V první části tabulky jsou zobrazeny vyrovnané souřadnice B , L , H_{El} v systému ETRS89. Druhá část obsahuje kromě souřadnic Y a X v systému JTSK a nadmořské výšky H_{Bpv} také jejich charakteristiky přesnosti: střední souřadnicovou chybu $m_{x,y}$ a střední chybu výšky m_h , které jsou odvozeny z rozptylu terestrických a družicových ve vztahu k připojovacím bodům permanentní sítě. Tyto charakteristiky přesnosti můžeme označit jako vnitřní přesnost takto vyrovnané sítě bodů, která nezahrnuje vliv nepřesnosti převodu ETRS89 → S-JTSK

(střední souřadnicová chyba zpřesněné globální transformace verze 1202 $m_{x,y} = 0,025$ m) a vliv nepřesnosti určení průběhu kvazigeoidu CR2005 (úplná střední chyba výškové anomálie $m_{uc} = 1$ cm; v pohraničí a horském terénu maximálně 3 cm).

Tab. 5.2: Vyrovnané souřadnice bodů v lokalitě Brno

ETRS89						
Bod	B	L	H _{EI}			
4010	49° 12' 27.82891"	16° 35' 31.68992"	294.264			
4011	49° 12' 29.75799"	16° 35' 30.51386"	293.839			
4018	49° 12' 27.49546"	16° 35' 30.99281"	294.692			
4019	49° 12' 30.13080"	16° 35' 29.29201"	294.016			
S-JTSK +Bpv						
Bod	Y	X	H _{Bpv}	m _{x,y} [mm]	m _h [mm]	
4010	599 160.181	1 159 233.322	249.569	1.6	3.0	
4011	599 177.426	1 159 171.515	249.143	1.6	3.0	
4018	599 175.317	1 159 242.043	249.997	1.6	3.0	
4019	599 200.770	1 159 157.402	249.319	2.0	3.0	

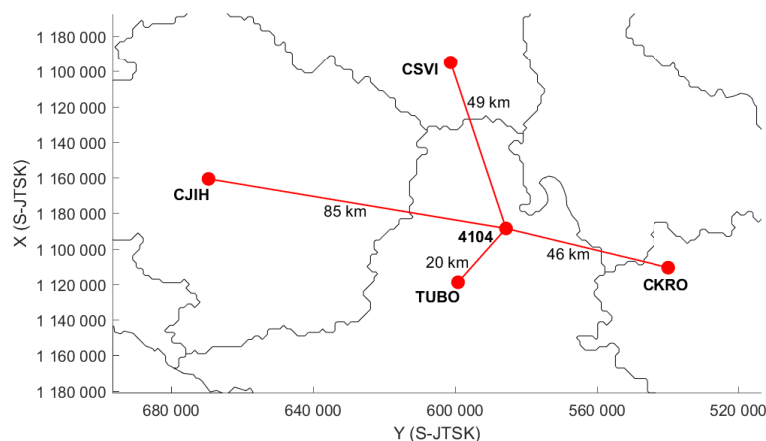
Lokalita Jedovnice

V případě lokality Jedovnice bylo potřeba k výpočtu bodů rychlou statickou metodou přistoupit odlišnou strategií. Lokalita se nachází v relativně velké vzdálenosti od stanic permanentní sítě CZEPOS, kdy vektory ke všem okolním permanentním stanicím mají délku několika desítek kilometrů. Výpočet polohy body z jedné permanentní stanice (jako v případě lokality Brno) by bylo nepřijatelné.

Jako výchozí bod sítě (bod s místní referenční stanicí) byl zvolen bod číslo 4104. Jeho poloha byla určena rychlou statickou metodou v návaznosti na čtyři okolní stanice sítě CZEPOS. Konkrétně se jednalo o body *CJIH* (Jihlava), *CKRO* (Kroměříž), *CSVI* (Svitavy) a externí bod *TUBO*. Poloha bodu 4104 byla vypočtena samostatně z každé permanentní stanice zvlášť pro každou etapu. To znamená, že bylo k dispozici 8 různých hodnot prostorové polohy tohoto bodu. Jak vyplývá z obrázku (obr. 12), vzdálenosti od bodu 4104 k jednotlivým permanentním stanicím se výrazně liší.

Proto byl k výpočtu finální polohy bodu 4104, která vstoupila do vyrovnání, zvolen vážený aritmetický průměr. Váhy byly vypočteny jako převrácená hodnota vzdálenosti k jednotlivým permanentním stanicím. Empirická střední souřadnicová chyba statické metody byla v této lokalitě $m_{x,y} = 3$ mm a střední chyba výšky $m_h = 4$ mm.

Podobně, jako u lokality Brno, zde bylo provedeno vyrovnání volné a pseudovázané sítě. Výsledné souřadnice bodů z lokality Jedovnice jsou zobrazeny v tabulce (5.3). Charakteristiky přesnosti $m_{x,y}$ a m_h těchto bodů byly získány z vyrovnání pseudovázané sítě a dají se považovat za vnitřní přesnost této sítě. Vnější přesnost těchto bodů je kromě nepřesnosti převodu ETRS89 → S-JTSK a nepřesnosti modelu kvazigeoidu výrazně ovlivněna přesností výpočtu vektorů z permanentních stanic na bod 4104 a vychází z parametrů přesnosti přístroje Trimble R4 (tabulka 4.2).



Obr. 12: Poloha bodu 4104 vůči okolním stanicím CZEPOS

Tab. 5.3: Vyrovnané souřadnice bodů v lokalitě Jedovnice

ETRS89						
Bod	B	L	H_{EI}			
4102	49° 21' 6.15134"	16° 45' 21.46949"	560.786			
4103	49° 21' 10.75361"	16° 45' 19.72090"	566.599			
4104	49° 21' 15.62176"	16° 45' 19.51985"	573.287			
4105	49° 21' 20.19479"	16° 45' 19.34536"	577.266			
4106	49° 21' 24.88108"	16° 45' 19.25876"	578.804			
S-JTSK +Bpv						
Bod	Y	X	H_{Bpv}	$m_{x,y}$ [mm]	m_h [mm]	
4102	585 601.834	1 144 584.418	516.150	2.1	2.3	
4103	585 621.917	1 144 439.320	521.959	1.6	1.9	
4104	585 610.078	1 144 289.351	528.645	1.5	1.8	
4105	585 598.668	1 144 148.504	532.621	1.6	1.9	
4106	585 585.125	1 144 004.365	534.157	2.1	2.3	

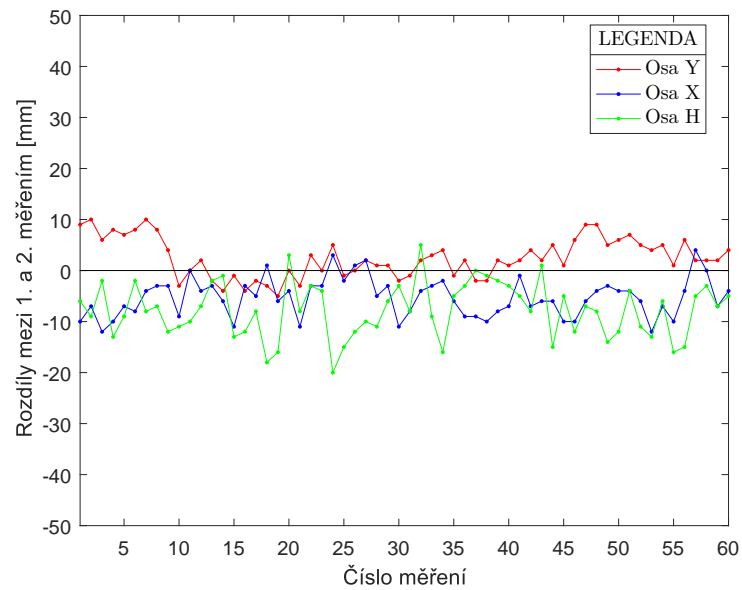
5.3 Zpracování a analýza měření RTK

Měřená data z obou lokalit byla upravena do textových souborů zvláště pro každý bod a každou etapu. Každý soubor tedy obsahoval 60 měřených souřadnic. Tyto souřadnice byly transformovány z evropského souřadnicového systému ETRS89 do národního S-JTSK zpřesněnou globální transformací transformačním modulem ETRS-2-JTSK_1202 verze 1.0. Samotná analýza metody RTK byla provedena v matematickém software Matlab R2016a.

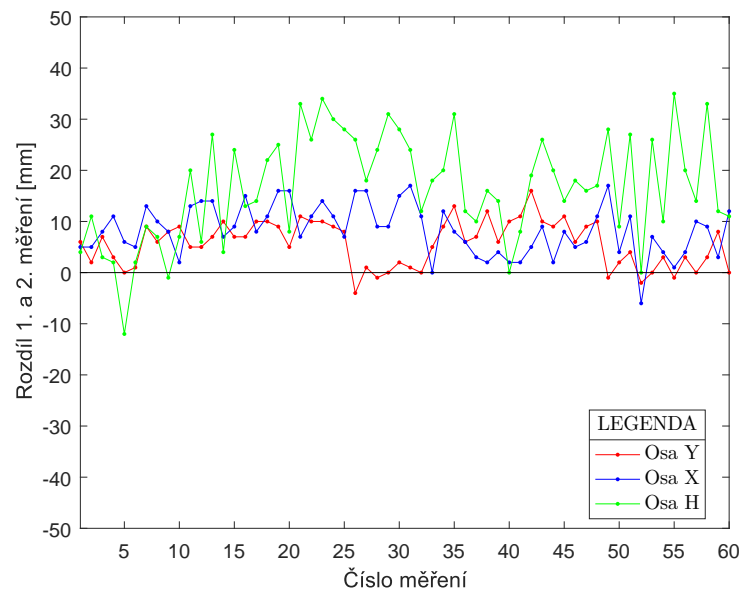
Na každém bodě byly vypočteny diference (rozdíly) mezi 1. a 2. měřením. Z těchto diferencí byla vypočtena střední chyba jednoho měření podle vzorce (5.10) a následně střední chyba rozdílu podle vzorce (5.15).

Na základě znalosti středních chyb rozdílů byla pomocí metody mezního rozdílu z dat odfiltrována odlehlá měření. Mezní chyba rozdílu byla vypočtena dle vzorce (5.16), kde byl volen parametr $t_\alpha = 2$. V případě, kdy rozdíl přesáhl tuto mezní hodnotu, byla vyřazena ze souboru celá dvojice měření (bez ohledu na to, v jaké složce souřadnic k rozdílu došlo). Rozdíly jednotlivých složek souřadnic byly zobrazeny i graficky formou

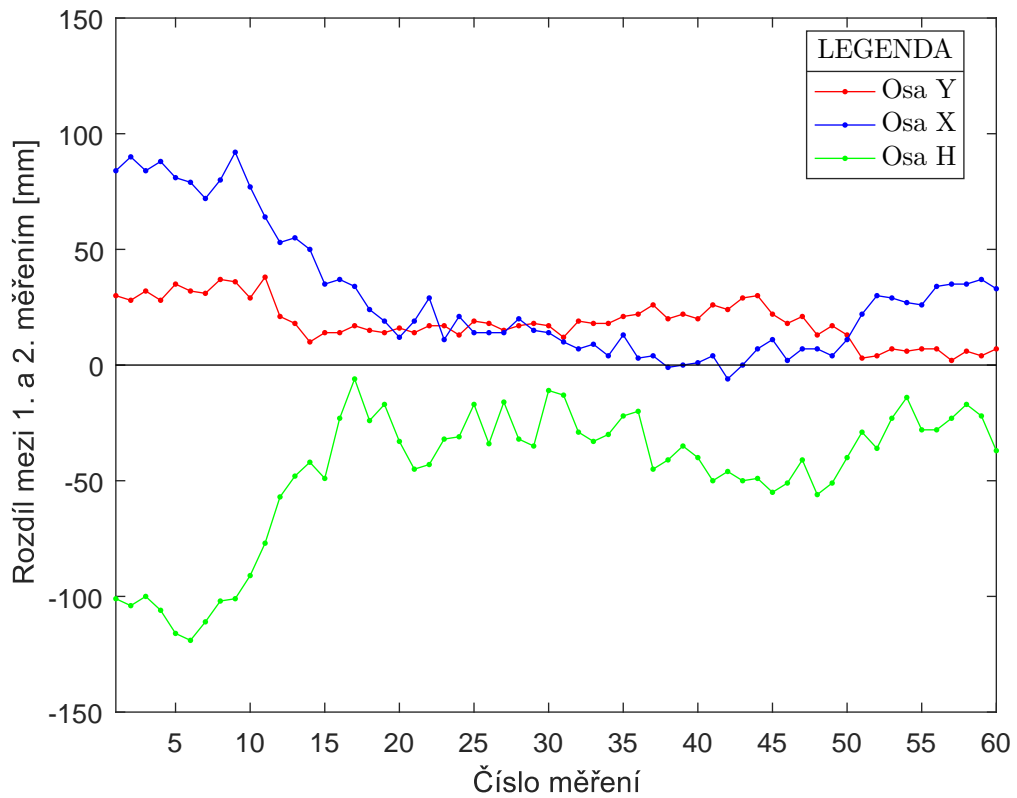
grafů, které jsou součástí přílohy 3 této práce. Zde jsou na ukázkou uvedeny rozdíly na bodě 4019 v lokalitě Brno (obr. 13), (obr. 14) a na bodě 4105 v lokalitě Jedovnice (obr. 15), (obr. 16).



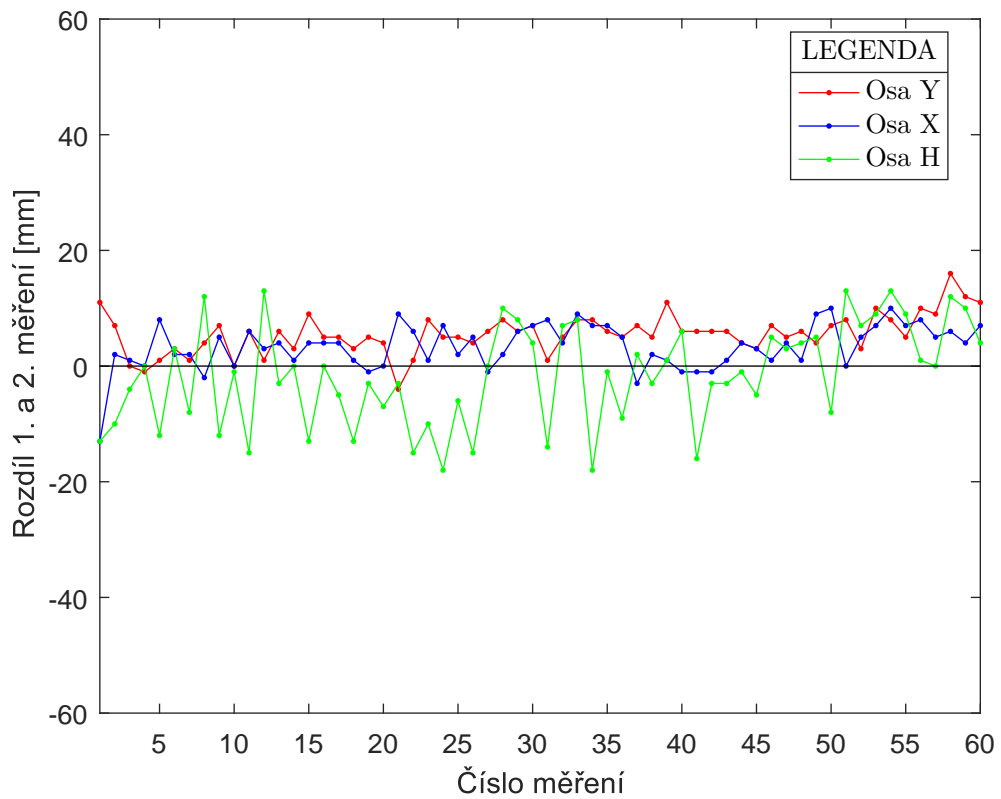
Obr. 13: Rozdíly dvojic měření, bod 4019, lokalita Brno, síť CZEPOS



Obr. 14: Rozdíly dvojic měření, bod 4019, lokalita Brno, síť TVN



Obr. 15: Rozdíly dvojic měření, bod 4105, lokalita Jedovnice, síť CZEPOS



Obr. 16: Rozdíly dvojic měření, bod 4105, lokalita Jedovnice, síť TVN

Z nově vzniklých (odfiltrovaných) časových řad souřadnic byly vypočteny klouzavé průměry po 30 sekundách (3 záznamy souřadnic), 90 sekundách (9 záznamů) a 180 sekundách (18 záznamů) zvlášť pro 1. a 2. měření. Odchytky klouzavých průměrů od středních hodnot časových řad byly zároveň zobrazeny formou grafů, které jsou součástí přílohy 4 této práce. Zde je na ukázkou uveden graf klouzavých průměrů z měření v síti CZEPOS na bodě 4105 v lokalitě Jedovnice (obr. 17).

Z rozdílů dvojic těchto klouzavých průměrů byly následně vypočteny střední chyby jednoho měření (5.10) a z nich dále střední chyby aritmetických průměrů 1. a 2. měření ve dvojicích po 30, 60 a 180 s (5.11), které můžeme označit jako *vnitřní přesnost*.

Vnější přesnost byla vypočtena ze skutečných chyb průměrů 1. a 2. měření (5.3) časových řad po 30, 90 a 180 sekundách vzhledem k referenčním hodnotám souřadnic, získaných z vyrovnání sítí MNČ. Tabulky 5.4 až 5.7 zobrazují hodnoty vnější a vnitřní přesnosti zvlášť pro každou síť permanentních stanic, lokalitu a variantu klouzavého průměru.

Tab. 5.4: Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Brno, síť CZEPOS

Bod	Vnitřní přesnost [mm]						Vnější přesnost [mm]					
	30 s		90 s		180 s		30 s		90 s		180 s	
	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h
4010	3.9	2.2	3.9	1.5	3.9	1.0	3.1	3.2	3.0	2.6	3.0	2.1
4011	8.1	6.7	8.0	6.2	8.0	5.4	19.5	25.7	19.8	26.1	20.3	26.5
4018	1.9	3.8	1.7	3.5	1.7	3.1	2.6	11.2	2.4	11.3	2.2	11.7
4019	2.5	4.1	2.2	3.9	2.2	3.7	5.8	3.9	5.7	3.1	5.6	2.4

Tab. 5.5: Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Brno, síť TVN

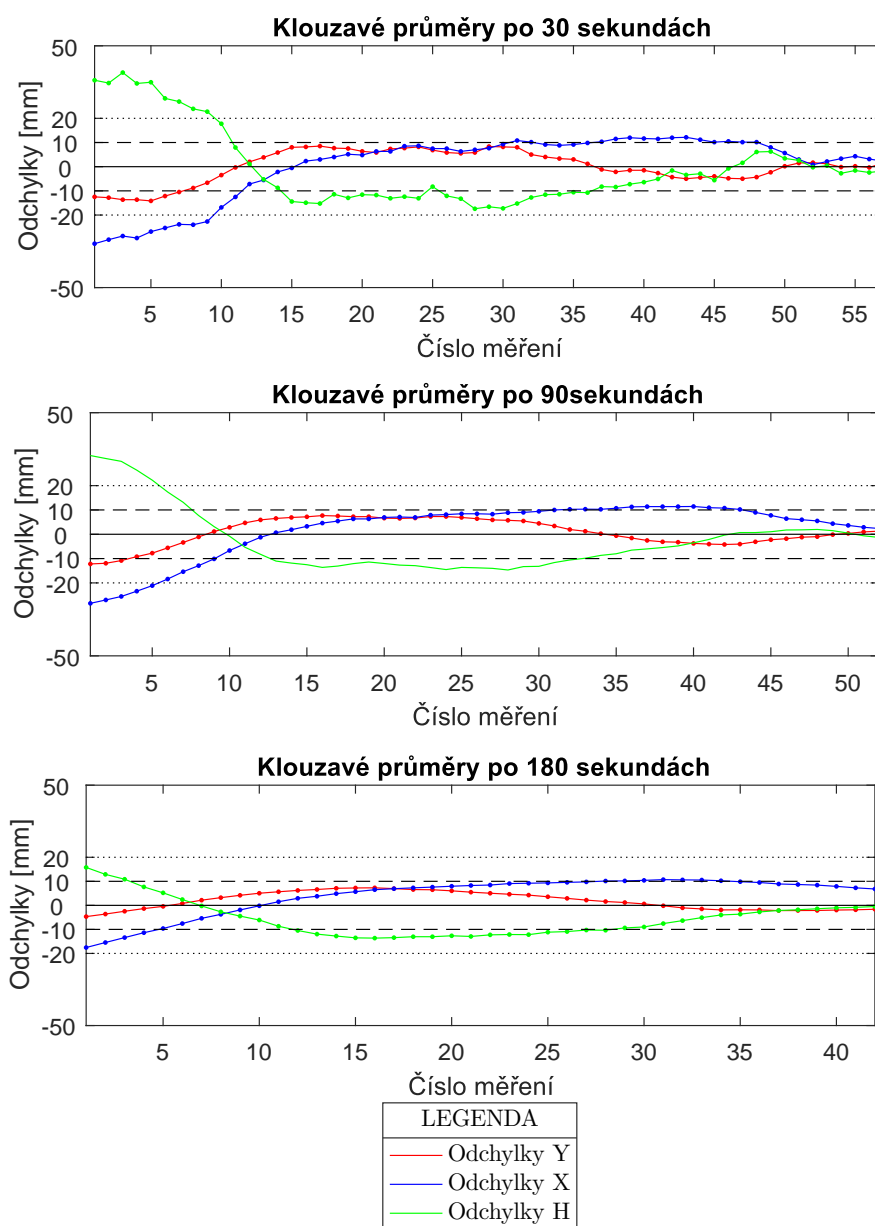
Bod	Vnitřní přesnost [mm]						Vnější přesnost [mm]					
	30 s		90 s		180 s		30 s		90 s		180 s	
	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h
4010	2.0	2.2	1.9	1.3	1.9	0.8	2.1	2.3	2.1	1.7	2.0	1.3
4011	2.5	4.1	2.1	3.4	2.1	3.1	5.6	19.7	5.5	19.8	5.6	20.3
4018	1.9	8.5	1.7	8.4	1.7	8.6	5.0	7.8	4.9	7.4	4.9	6.3
4019	4.0	9.3	3.9	9.2	3.9	9.4	2.6	8.2	2.2	8.0	2.1	8.0

Tab. 5.6: Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Jedovnice, síť CZEPOS

Bod	Vnitřní přesnost [mm]						Vnější přesnost [mm]					
	30 s		90 s		180 s		30 s		90 s		180 s	
	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h
4102	4.0	18.5	3.8	18.5	3.8	18.7	4.5	38.1	4.2	38.0	3.9	38.0
4103	2.8	8.1	2.6	7.1	2.6	5.7	13.9	105.7	13.9	105.9	13.9	107.0
4104	2.6	8.7	2.1	7.7	2.1	6.6	3.1	11.3	2.9	9.1	2.5	7.5
4105	11.3	19.3	9.6	17.8	9.6	17.5	6.5	8.5	5.5	6.0	5.2	5.0
4106	8.5	29.8	7.2	29.2	7.2	28.6	7.2	17.5	5.8	16.5	4.5	15.5

Tab. 5.7: Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Jedovnice, síť TVN

Bod	Vnitřní přesnost [mm]						Vnější přesnost [mm]					
	30 s		90 s		180 s		30 s		90 s		180 s	
	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h	$m_{x,y}$	m_h
4102	3.0	21.8	2.9	21.7	2.9	21.8	5.0	32.6	4.9	32.5	4.8	32.8
4103	4.1	17.0	3.9	17.0	3.9	17.3	9.6	20.1	9.5	20.2	9.5	20.4
4104	2.1	14.0	1.9	14.1	1.9	13.8	6.3	31.2	6.2	30.7	6.3	30.5
4105	2.5	2.7	2.3	2.0	2.3	1.5	3.1	34.9	2.9	35.4	2.8	36.4



Obr. 17: Klouzavé průměry, bod 4105, lokalita Jedovnice, síť CZEPOS

Mimo údajů o vnější a vnitřní přesnosti časových řad souřadnic určených metodou RTK byly vypočteny průměrné hodnoty vychýlení klouzavých průměrů (Y_{KLOUZ} , X_{KLOUZ} , H_{KLOUZ}) od referenční hodnoty (Y_{REF} , X_{REF} , H_{REF}) v podobě polohové odchylky

$$\Delta_p = \sqrt{(Y_{REF} - Y_{KLOUZ})^2 + (X_{REF} - X_{KLOUZ})^2} \quad (5.22)$$

a výškové odchylky

$$\Delta_h = H_{REF} - H_{KLOUZ}. \quad (5.23)$$

Tab. 5.8: Průměrné vychýlení od referenční hodnoty; lokalita Brno

Bod	CZEPOS [mm]						Trimble VRS Now CZECH [mm]					
	30 s		90 s		180 s		30 s		90 s		180 s	
	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h
4010	4.1	1.9	4.0	2.0	4.0	1.7	2.7	-0.2	2.8	-0.4	2.8	-0.4
4011	26.2	-23.9	27.1	-24.8	28.3	-25.8	7.5	19.0	7.6	19.5	7.7	20.3
4018	3.1	10.6	3.1	11.1	3.1	11.6	6.8	-4.0	6.8	-4.2	6.9	-4.8
4019	8.0	0.2	8.0	-0.2	7.9	-0.7	2.6	-7.2	2.7	-7.3	2.8	-7.5

Tab. 5.9: Průměrná vychýlení od referenční hodnoty; lokalita Jedovnice

Bod	CZEPOS [mm]						Trimble VRS Now CZECH [mm]					
	30 s		90 s		180 s		30 s		90 s		180 s	
	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h	Δ_p	Δ_h
4102	5.4	37.7	5.4	37.9	5.3	38.0	6.9	-32.5	6.9	-32.5	6.8	-32.8
4103	19.5	105.1	19.6	105.3	19.6	106.7	13.5	-20.0	13.4	-20.1	13.3	-20.3
4104	2.2	6.9	2.2	5.7	2.3	5.2	8.8	-31.0	8.8	-30.7	8.8	-30.5
4105	3.3	0.3	4.6	-1.0	5.7	-1.9	3.9	-34.5	3.8	-35.1	3.8	-36.2
4106	4.2	15.6	4.4	15.0	4.8	14.5	neměřeno					

Potvrdil se předpoklad, že výsledky v lokalitě Jedovnice, která je několik desítek kilometrů vzdálená od nejbližších permanentních stanic obou poskytovatelů, budou poněkud horší (zejména ve výškové složce souřadnic).

Z tabulek dále vyplývá, že délka observace neměla významný vliv na dosaženou přesnost. Delší observace v kombinaci s druhým nezávislým měřením výrazně snižují nejistotu ve správnosti určení polohy, tj. snižují riziko působení krátkodobých systematických vlivů (např. multipath).

Lze konstatovat, že výsledky a přesnost měření v síti CZEPOS a v síti Trimble VRS Now CZECH jsou srovnatelné. Zajímavé jsou velké rozdíly na některých bodech v lokalitě Jedovnice mezi 1. a 2. měřením těsně po „fixaci“, které byly měřeny s využitím sítě CZEPOS.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit přesnost metody RTK při budování bodových polí. Byly vybrány dvě lokality, které je možno charakterizovat různou vzdáleností od nejbližších permanentních stanic. V každé lokalitě byly měřeny časové řady souřadnic s dvěma opakováními s časovým odstupem 3 hodiny a zároveň byly využity služby dvou různých poskytovatelů RTK korekcí (CZEPOS, Trimble VRS Now Czech). Délka observace byla ve všech případech 10 minut s intervalem záznamu souřadnic 10 sekund. Z naměřených dat byly odfiltrovány odlehlé hodnoty.

Pro jednotlivé body v lokalitách byly vypočteny charakteristiky vnitřní a vnější přesnosti pro úseky časových řad po 30, 90 a 180 sekundách (klouzavé průměry). Vnitřní přesnost byla vypočtena na základě aritmetických průměrů dvojic měření vytvořených z klouzavých průměrů. Vnější přesnost vznikla porovnáním těchto klouzavých průměrů s hodnotami referenčními, které představovaly výsledky společného vyrovnání výsledků měření rychlou statickou metodou a měření terestrickými geodetickými metodami totální stanicí. Graficky byly dále zpracovány rozdíly mezi 1. a 2. měřením a odchylky klouzavých průměrů po 30, 90 a 180 sekundách od středních hodnot jednotlivých časových řad.

Součástí této práce bylo i porovnání výsledků zpřesněné globální transformace ze 3 různých transformačních programů.

Metoda RTK bývá v současné době v geodézii stále často spojována hlavně s pracemi v katastru nemovitostí a v oblasti mapování. Výsledky experimentálních analýz přesnosti provedených v této bakalářské práci ukázaly potenciál a možnost využití této metody i při budování přesných bodových polí, vytyčovacích a monitorovacích systémů staveb (účelových sítí) v inženýrské geodézii.

Nespornou výhodou metody RTK je rychlost a relativní nenáročnost získání výsledných souřadnic. Je ale potřeba zohledňovat vlivy, jakými jsou například vzdálenost od nejbližších permanentních stanic a dostatečná délka observace. Porovnání výsledků dvou nezávislých měření GNSS s kritériem přesnosti (odvoditelným z očekávané přesnosti měření pro zvolenou technologii měření – například tu, která byla testovaná v této práci tj. dvojice měření 30, 90, 180 sekund) je základem pro akceptaci výsledků této metody.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Josef WEIGEL a Radovan MACHOTKA. *Seminář GPS: HE09 Metodika GPS měření a vyhodnocení*. Brno: VUT, 2007.
- [2] *GNSS - Global Navigation Satellite System*. Český kosmický portál [online]. [cit. 2018-01-10]. Dostupné z:
<http://www.czechspaceportal.cz/3-sekce/gnss-systemy/>
- [3] KRATOCHVÍL, Vlastimil, Jan Fixel. *GLOBÁLNÍ SYSTÉM URČOVÁNÍ POLOHY - GPS: Využití v geodézii*. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2001.
- [4] KULBIEJ, Eric. *Relevance of the relativistic effects in satellite navigation*. 47 Scientific Journals: of the Maritime University of Szczecin. 2016, 119(47). DOI: 10.17402/153. ISSN 2392-0378.
- [5] HOFMANN-WELLENHOF, Bernhard, Herbert LICHTENEGGER a Elmar WASLE. *GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Austria: Springer Wien New York, 2008. ISBN 978-3-211-73012-6.
- [6] SEEBER, Günter. *Satellite geodesy. 2nd completely rev. and extended ed.* New York: Walter de Gruyter, 2003. ISBN 3-11-017549-5.
- [7] LANDAU, Herbert, Ulrich VOLLATH a Xiaoming CHEN. *Virtual Reference Station Systems*. Journal of Global Positioning Systems. Canada: CPGPS, 2002, 1(2), 137-143. ISSN 1446-3156.
- [8] BROWN, N, I GEISLER a L TROYER. *RTK Rover Performance using the MasterAuxiliary Concept*. Journal of Global Positioning System. Canada: CPGPS, 2006, 5(1-2). ISSN 1446-3156.
- [9] *Leica GPS Systém 1200: Návod pro rychlý start*. Praha: GEFOS, 2009.
- [10] *CZEPOS* [online]. 2018 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z:
<http://www.czepos.cuzk.cz/>
- [11] KOSTELECKÝ, Jan, Jakub KOSTELECKÝ a Ivan PEŠEK. *Metodika převodu mezi ETRF2000 a S-JTSK varianta 2*. GO Pecný, 2010.
- [12] NÁGL, Jaroslav a Jan ŘEZNÍČEK. *Výpočet nové verze převodních tabulek pro transformaci mezi referenčními systémy S-JTSK ETRS89 (verze 2017-10)*. In: WEIGEL, Josef a Alena BERKOVÁ. *Družicové metody v geodézii a katastru*. Brno: ECON publishing, 2018. ISBN 978-80-86433-67-7.

- [13] *Trimble M3: Total station* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z:
https://geospatial.trimble.com/sites/default/files/2017-04/TrimbleM3_datasheet_0.pdf
- [14] *Trimble R4: GNSS System* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z:
http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-468267/022543-490E_TrimbleR4GNSS_DS_0413_LR.pdf
- [15] *TRIMBLE GEOEXPLORER 6000 SERIES GEOXR HANDHELD* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: http://www.geoteam.dk/CustomerData/Files/Folders/83-nyhedsarkiv/666_na-geoxr-datasheet.pdf
- [16] *Trimble R4 GNSS System* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z:
https://plutongeo.ru/assets/images/Katalog/GPS/Trimble_R4_2.jpg
- [17] WEIGEL, Josef. *Teorie chyb a vyrovnávací počet I: GE04_M02 Základní druhy vyrovnání (1. část)*. Brno: VUT, 2004.
- [18] HAMPACHER, Miroslav, Martin ŠTRONER. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. Praha: ČVUT, 2015. ,

Seznam zkratek

CZEPOS	Síť permanentních stanic GNSS České Republiky
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DOP	Dilution of Precision
ETRF2000	European Terrestrial Reference Frame 2000
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
FARA	Fast Ambiguity Resolution Approach
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPGGA	Global Positioning System Fix Data
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GRS80	Geodetic Reference System 1980
IGS	International GNSS Service
MAC	Master-Auxiliary Concept
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
NMEA	National Marine Electronics Association
RTK	Real Time Kinematic
PPP	Precise Point Positioning
PRS	Pseudo-Reference Station
PZ-90	Parametry Zemli 1990 goda
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
S-JTSK	Souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
SLR	Satellite Laser Ranging

TBC	Trimble Business Center
TUBO	Technical Univerzity Brno
TVN	Trimble VRS Now Czech
VESOG	Výzkumná a experimentální síť pro observace GNSS
VRS	Virtual Reference Station
WGS84	World Geodetic System 1984
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i.

Seznam obrázků

1	Vliv chyby polohy družice na výpočet polohy přijímače (dvou přijímačů)	12
2	Princip fázového měření pseudovzdálenosti; upraveno [5]	15
3	Schéma zpřesněné globální transformace; převzato [11]	21
4	Rozdíly mezi transformací ETJTZU 2013 a Groma v.11.0 v lokalitě Brno	23
5	Rozdíly mezi transformací ETJTZU 2013 a ETRS-2-JTSK_1202 v lokalitě Brno	23
6	Ukázka totální stanice Trimble M3	24
7	Schéma měření při určování součtové konstanty hranolu	25
8	Měření RTK na bodě 4011	27
9	Trimble M3 na bodě 4018	27
10	Trimble M3 na bodě 4103	27
11	Referenční stanice Trimble R4 na bodě 4104	27
12	Poloha bodu 4104 vůči okolním stanicím CZEPOS	34
13	Rozdíly dvojic měření, bod 4019, lokalita Brno, síť CZEPOS	35
14	Rozdíly dvojic měření, bod 4019, lokalita Brno, síť TVN	35
15	Rozdíly dvojic měření, bod 4105, lokalita Jedovnice, síť CZEPOS	36
16	Rozdíly dvojic měření, bod 4105, lokalita Jedovnice, síť TVN	36
17	Klouzavé průměry, bod 4105, lokalita Jedovnice, síť CZEPOS	38

Seznam tabulek

3.1	Extrémní hodnoty rozdílů oproti transformaci ETJTZU 2013 v lokalitě Brno	22
4.1	Základní parametry totální stanice Trimble M3 2"; čerpáno z [13]	25
4.2	Základní parametry GNSS přijímače Trimble R4; čerpáno z [14]	26
4.3	Základní parametry GNSS přijímače Trimble R4; čerpáno z [15]	26
5.1	Porovnání výšek z rychlé statické metody a nivelace	32
5.2	Vyrovnané souřadnice bodů v lokalitě Brno	33
5.3	Vyrovnané souřadnice bodů v lokalitě Jedovnice	34
5.4	Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Brno, síť CZEPOS	37
5.5	Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Brno, síť TVN	37
5.6	Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Jedovnice, síť CZEPOS	37
5.7	Vnější a vnitřní přesnost v lokalitě Jedovnice, síť TVN	38
5.8	Průměrné vychýlení od referenční hodnoty; lokalita Brno	39
5.9	Průměrná vychýlení od referenční hodnoty; lokalita Jedovnice	39

Seznam příloh

1. Zápisník technické nivelace
2. Protokoly z vyrovnání obou sítí
3. Grafy rozdílů mezi záznamem 1. a 2. měření, měřené po 10 sekundách
4. Grafy rozdílů klouzavých průměrů po 30, 90 a 180 s od středních hodnot časových řad