

Technologie pro testování geodetických GNSS přístrojů na referenčním etalonu polohy

Evidována jako technická zpráva č. 1236/2014

Jakub Kostecký, Jan Kostecký

Tato technologie byla vytvořena s finanční podporou Technologické agentury, program BETA, v rámci projektu TB01CUZK005 „Výzkumné činnosti spojené se zajištěním aktuální metrologické návaznosti pro etalony využívané při realizaci zeměměřických činností ve veřejném zájmu, spočívající zejména ve zpřesňování parametrů státních etalonů velkých délek, tíhového zrychlení, referenčního etalonu polohy včetně nových metod laser scanningu“.



1. Úvodní informace

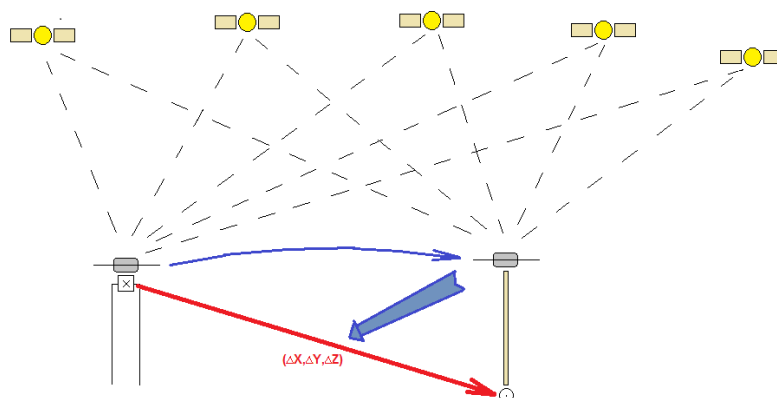
Tato technologie je určena pro zpracování měření na referenčním etalonu polohy - testovací základně pro GPS Skalka [1], která jsou určena pro kalibraci GNSS aparatur (sestav přijímače a antény) při měření metodou real-time kinematic a při navazování měření na sítě permanentních GNSS stanic. Postup zakotvený v této technologii je možno použít pro zpracování všech kalibračních měření technologií GNSS, které jsou navazované na sítě permanentních GNSS stanic.

2. Charakteristika kalibrovaných metod technologie GNSS

Technologie GNSS – Globálních navigačních družicových systémů – je primárně určena v tzv. „navigačním módu“ pro lokalizaci tj. určování polohy objektů na zemském povrchu a jeho okolí s metrovou přesností a určování aktuálního času s přesností lepší jak 1 μ sec [2]. Základem je příjem signálů vyslaných družicemi, který obsahuje informaci o čase vysílání. Z určení doby šíření (a času příjmu v přijímači) je při zpracování signálů z minimálně 4 družic možno určit aktuální polohu a čas přijímače. Tato metoda se nazývá metodou „kódového měření“. V geodézii je technologie GNSS aplikována pomocí metod měření, které umožňují určení relativní (vzájemné) polohy dvou bodů s centimetrovou (nebo lepší) přesností. Využívá se přitom interference signálů přijatých dvěma (a více) přijímači na základě tzv. „fázového měření“.

V následujících odstavcích stručně charakterizujeme nejpoužívanější geodetické metody technologie GNSS [2]. Aplikace metod se liší podle toho, zda využíváme existující síť permanentních GNSS stanic či zda po dobu měření provozujeme jednu z aparatur na známém bodě jako dočasnou GNSS stanic. Zmíněny budou pouze nejpoužívanější metody využívající sítě permanentních GNSS stanic.

2.1 Real-time kinematic



Obr. 1 – metoda real-time kinematic

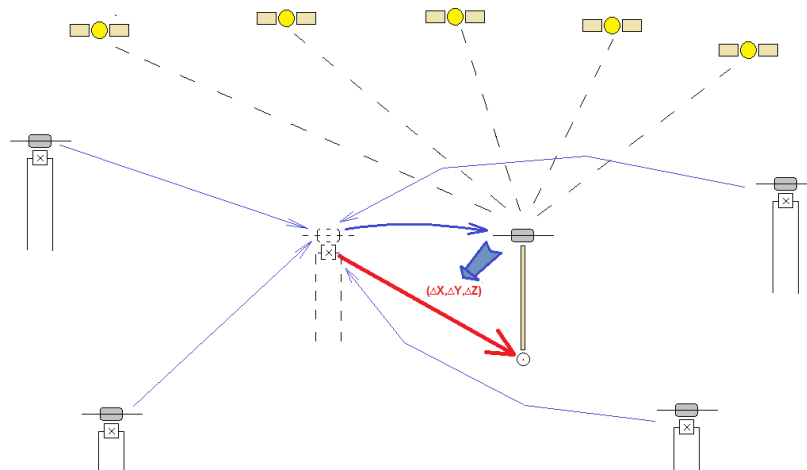
Metoda real-time kinematic (dále též RTK) využívá dvojice GNSS aparatur – viz obr. 1. Jedna stojí na určovaném bodě nebo se pohybuje po určované trase. Druhá je permanentní GNSS stanice, která je umístěna na známém bodě. Velkou předností metody je určení polohy určovaného bodu v reálném čase. Pro realizaci je podstatné, že GNSS aparatura na určovaném bodě získává v reálném čase měření z permanentní GNSS stanice umístěné na známém bodě spolu se souřadnicemi známého bodu. Děje se tak různými způsoby:

- radiovým přenosem (na kratší vzdálenosti),
- pomocí mobilních telefonů – GSM komunikací nebo přenosem dat v režimu GPRS.

GNSS aparatura na určovaném bodě pak v reálném čase řeší vektor mezi známým a určovaným bodem a počítá tak polohu určovaného bodu. Po inicializaci (určení prvotních ambiguit) je měření velice rychlé (polohu je možno určovat s intervalem záznamu dat tj. např. každou 1 sekundu) a moderní metody inicializace jsou též rychlé (desítky sekund, maximálně 1 minuta). Rychlost měření a přesnost výsledné polohy ale velmi závisí na délce určovaného vektoru. Jelikož provozování husté sítě permanentních GNSS stanic (jejichž vzájemná vzdálenost je malá) je velmi ekonomicky náročné, jsou budovány sítě permanentních GNSS stanic, které mají vzájemnou vzdálenost přes 50 km. Výše popsaná metoda RTK při délce vektoru přes 50 km je ale málo přesná. Proto byly vytvořeny modifikace metody RTK, které jsou popsány v dalších odstavcích.

2.2 RTK s virtuálními referenčními stanicemi – RTK-VRS

Jednou z modifikací je real-time kinematic s virtuální referenční stanicí – obr. 2.



Obr. 2 – real-time kinematic s virtuální referenční stanicí

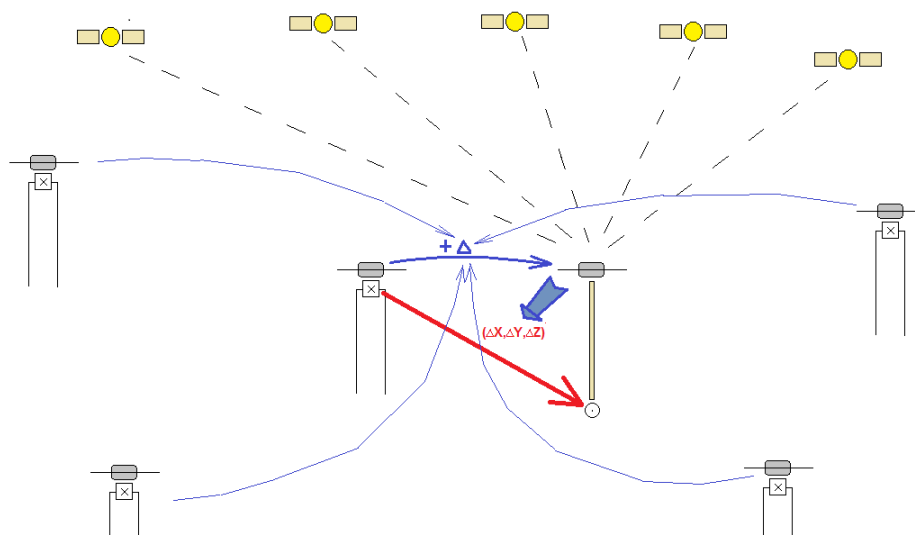
Aby při použití běžné husté sítě permanentních GNSS stanic byla vzdálenost mezi výchozí (referenční) stanicí umístěnou na známém bodě a GNSS aparaturou umístěnou na určovaném bodě malá, je jedním z řešení vytváření virtuální referenční stanice. GNSS aparatura umístěná na určovaném bodě se připojí do sítě permanentních GNSS stanic a pošle svou přibližnou polohu. Na jejím základě vygeneruje obslužný software sítě permanentních stanic virtuální permanentní GNSS stanici ve vhodné vzdálenosti (obvykle kolem 5 km) od určovaného bodu a pomocí měření ze sítě permanentních GNSS stanic vytváří software model, ze kterého produkuje fiktivní měření

odpovídající poloze virtuální referenční stanice a tato měření zasílá do GNSS aparatury, která je umístěna na určovaném bodě.

Pro GNSS aparaturu na určovaném bodě je virtuální referenční stanice obdobou běžné permanentní stanice a tak počítá vektor mezi určovaným bodem a bodem, na kterém je fiktivně umístěna virtuální referenční stanice, jehož polohu obdržela spolu s daty z virtuální referenční stanice. Přesnost určení polohy není primárně ovlivněna délkou určovaného vektoru (je krátký), ale větší vliv má kvalita modelu, ze kterého jsou generována fiktivní měření virtuální referenční stanice.

2.3 RTK s doplňkovými plošnými korekcemi – RTK-FKP

Metoda RTK s doplňkovými plošnými korekcemi RTK-FKP je druhou modifikací metody RTK – viz obr. 3.



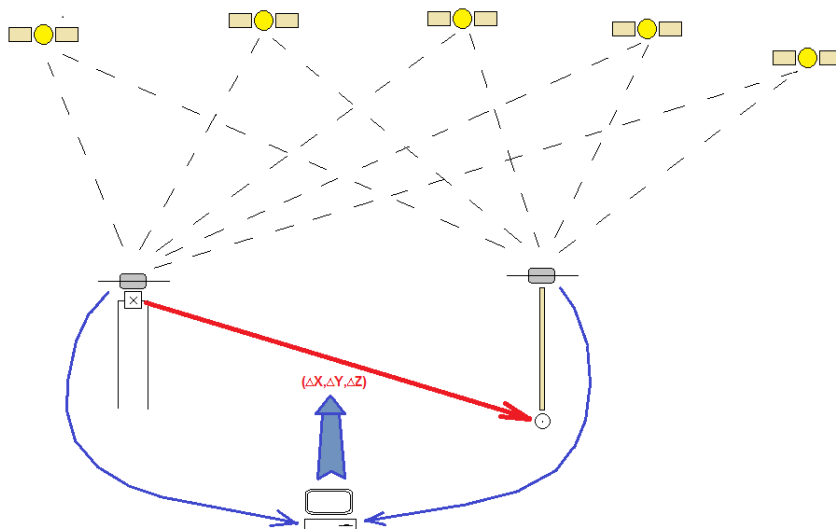
Obr. 3 – real-time kinematic s doplňkovými plošnými korekcemi

Při této metodě získává GNSS aparatura umístěná na určovaném bodě z permanentní GNSS stanice jednak souřadnice bodu, na kterém je stanice umístěna, jednak měřená data a k nim ještě parametry doplňkových plošných korekcí, které jsou vypočtené v centru sítě permanentních stanic z modelu vytvářeného z měření všech permanentních GNSS stanic v síti. Tyto parametry jsou též použité GNSS aparaturou na určovaném bodě pro řešení vektoru mezi známým a určovaným bodem. Jejich použití umožňuje přesnější určení vektoru i v případě dlouhého vektoru.

2.4 RTK-PRS

Metoda real-time kinematic s pseudo reference station – RTK-PRS je prakticky shodná s metodou RTK-VRS. Uvádíme ji, protože je někdy též používána při kalibračních měření na testovací základně pro GPS.

2.5 Rychlá statická metoda



Obr. 4 – rychlá statická metoda

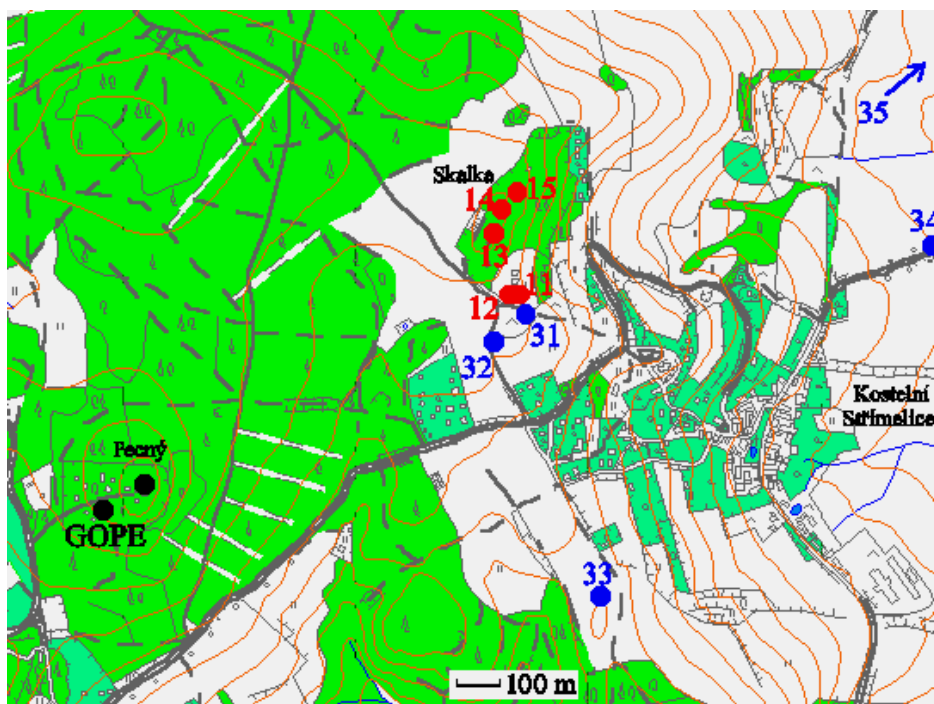
Rychlá statická metoda (dále též RST) využívá dvojice GNSS aparatur (obr. 4). Jedna z nich je na určovaném bodě, druhá je permanentní GNSS stanice na bodě, jehož souřadnice známe. Měření, které obvykle trvá 5-15 minut (dle vzdálenosti bodů tj. dle délky určovaného vektoru), jsou vložena do software v počítači a po zpracování jsou získány rozdíly souřadnic mezi určeným a daným bodem. Místo permanentní GNSS stanice je možno používat i virtuální referenční stanici (viz odst. 2.2), ale postup měření a zpracování se nezmění.

3. Popis používaného etalonu

Používaným etalonem je referenční etalon polohy – testovací základna pro GPS Skalka – vedený v databázi Českého metrologického institutu pod č. ECR 110-14.

Testovací základna pro GPS Skalka [1] byla vybudována v letech 1998 až 2001 v areálu Geodetické observatoře Skalka u Kostelních Střímelic (součást obce Stříbrná Skalice ve Středočeském kraji, 35 km jihovýchodně od Prahy). Sestává se ze tří částí (obr. 5):

- vnitřní základna – 5 bodů stabilizovaných pilíři s nucenou centrací (obr. 6) ve vzájemných vzdálenostech 2 až 200 m uvnitř areálu Geodetické observatoře Skalka,
- vnější základna – 5 bodů stabilizovaných běžnou geodetickou stabilizací kamennými hranoly s křížkem (ve kterém je pro přesnou definici zavrtán mosazný váleček s otvorem) a s ochrannou skruží (obr. 7), které jsou umístěny ve vzdálenostech 100 m až 11 km od areálu Geodetické observatoře Skalka a
- navazovací základna – je tvořena zejména permanentní GNSS stanicí GOPE, která může sloužit k navázání měření prováděných na testovací základně. Permanentní stanice GOPE je umístěna na Geodetické observatoři Pecný, vzdálené cca 1,5 km od areálu Geodetické observatoře Skalka.



Obr. 5 – plán Testovací základny pro GPS Skalka: červeně vnitřní základna, modře vnější základna, černě navazovací základna



Obr. 6 – detail nucené centrace na pilíři vnitřní základny, obr. 7 – stabilizace bodu vnější základny

4. Postup kalibrace – poznámky k měření

Měření s kalibrovanou GNSS aparaturou (přijímačem a anténou) tzv. kalibrovaným kompletem provádí uživatel kompletu. Je to proto, že se kalibruje celá sestava: přístroj – metoda měření – interakce uživatele (způsob centrace, orientace a zejména určení výšky).

Uživatel určí běžně používaným způsobem souřadnice nejlépe všech 10, minimálně však 8, bodů Testovací základny pro GPS Skalka. Předpisy v geodézii stanovují, že se musí provést dvě nezávislá určení a výsledkem určení je průměr získaných souřadnic.

Správce základny provede během měření uživatele fotodokumentaci měření, výrobních čísel a způsobu měření výšky antény na bodech vnitřní i vnější základny. Též zaznamená používanou metodu

měření, postup měření (délka měření, počet opakování, minimální časová odlehlost opakování) včetně nastavení GNSS aparatury (interval záznamu, elevační maska, DOP limit, průměrování odečtů polohy apod.) a identifikace uživatele a GNSS aparatury (výrobce, typ, výrobní a evidenční čísla, verze firmware apod.). Dále zaznamenaná způsob navázání do referenčního souřadnicového systému, použité permanentní GNSS stanice resp. síť permanentních GNSS stanic, použitá data ze sítě permanentních stanic.

Uživatel z měření předá správci základny určené souřadnice bodů Testovací základny v závazném geocentrickém referenčním souřadnicovém systému ETRS, (v současnosti je to ETRS89 s referenčním rámcem ETRF2000). Nejsou požadovány souřadnice v národním referenčním souřadnicovém systému S-JTSK, protože pro transformaci souřadnic z geocentrického systému ETRS do národního systému S-JTSK musí být používány programy, jejichž použití je schvalováno Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním na podkladě testování prováděného VÚGTK, v.v.i. Uživatel odevzdá výsledky v závazném referenčním systému, pokud využije pro navázání měření do referenčního systému při zpracování souřadnice permanentní GNSS stanice, která je zařazena do Nezávislého monitoringu permanentních GNSS stanic, který pro Český úřad zeměměřický a katastrální zajišťuje VÚGTK, v.v.i. a v rámci kterého je denně ověřováno, že poloha každé zařazené permanentní GNSS stanice v České republice se nezměnila od hodnoty ověřených souřadnic této stanice o více jak povolený limit, který zajišťuje, že při použití této stanice uživatel bude mít GNSS měření navázáno do závazného referenčního souřadnicového systému s potřebnou přesností.

5. Postup zpracování kalibrace

Postup zpracování vychází z doporučení v [3].

- V prvním kroku jsou vypočteny rozdíly souřadnic určených uživatelem (x_i, y_i, z_i) s oficiálními souřadnicemi Testovací základny pro GPS Skalka (X_i, Y_i, Z_i). Počítají se rozdíly na každém určovaném bodě i

$$dx_i = X_i - x_i, \quad dy_i = Y_i - y_i \quad \text{a} \quad dz_i = Z_i - z_i, \quad \text{pro } i = 1, \dots, l, \text{ kde } l \text{ je počet uživatelem zaměřených bodů základny.}$$
- Ve druhém kroku jsou jednotlivé rozdíly v pravoúhlých geocentrických souřadnicích přetransformovány na rozdíly v lokálních souřadnicových systémech. Každý lokální systém je definován tak, že jeho počátek je v bodě základny (v oficiálních souřadnicích), osa x' leží v rovině poledníku a je kladná na sever (složku označujeme n), osa z' je ve směru místní normály k elipsoidu a je kladná ve směru vně elipsoidu (složku označujeme u) a osa y' je na ně kolmá a kladná ve směru na východ (složku označujeme e). Získáme tak rozdíly dn_i, de_i a du_i , pro $i = 1, \dots, l$, kde l je počet uživatelem zaměřených bodů základny.
- Ve třetím kroku jsou nalezeny maximální rozdíly v absolutní hodnotě v každé souřadnici tj.

$$Dn = \max \{ dn_i \}, \quad De = \max \{ de_i \} \quad \text{a} \quad Du = \max \{ du_i \}, \quad \text{pro } i = 1, \dots, l$$
- V dalším kroku jsou vypočteny jednotkové směrodatné odchylky v každé souřadnici tj.

$$m_n = \sqrt{(\sum dn_i^2)/(l-1)}, \quad m_e = \sqrt{(\sum de_i^2)/(l-1)} \quad \text{a} \quad m_u = \sqrt{(\sum du_i^2)/(l-1)}, \quad \text{kde suma je počítána přes } i = 1, \dots, l, \text{ kde } l \text{ je počet zaměřených bodů}$$
- V následujícím kroku je vypočtena střední souřadnicová chyba m_{xy} podle vztahu

$$m_{xy} = \sqrt{1/2 (m_n^2 + m_e^2)}.$$

- f) Dále jsou vypočteny standartní nejistoty středních chyb
 $\mu_n = m_n / \sqrt{2(l-1)}$, $\mu_e = m_e / \sqrt{2(l-1)}$, $\mu_u = m_u / \sqrt{2(l-1)}$ a $\mu_{xy} = m_{xy} / \sqrt{2(l-2)}$.
- g) Pak jsou vypočteny rozšířené nejistoty středních chyb
 $s_n = k \mu_n$, $s_e = k \mu_e$, $s_u = k \mu_u$ a $s_{xy} = k \mu_{xy}$, kde k je koeficient rozšíření, je používáno $k = 2$.
- h) Nakonec jsou porovnány vypočtené jednotkové směrodatné odchylky v každé souřadnici m_n , m_e a m_u , zda jsou podobné velikosti jako směrodatné odchylky příslušné metody měření zjištěné v [3] – viz tab. 1. V případě extrémně malých směrodatných odchylek vypočtených z kalibrace je podezření na nesprávný (podvodný) způsob kalibrace, v případě výrazně vyšších směrodatných odchylek vypočtených z kalibrace je pravděpodobně nedodržen správný postup měření v dané metodě (např. chybně prováděná centrace nebo měření výšky antény).

Tabulka 1 – Směrodatné odchylky rozdílů souřadnic v milimetrech podle jednotlivých metod měření

Metoda	složka sever-jih	složka východ-západ	složka nahoru
rychlá statická (RST)	4,3	3,7	11,2
RTK („čistě“)	7,6	7,4	14,7
RTK VRS	5,8	4,5	13,1
RTK FKP	8,0	6,1	13,6
RTK PRS	4,9	3,1	11,6

Celý postup zpracování je naprogramován v programu TZGPSROZ. Vstupem jsou dva soubory:

- soubor oficiálních souřadnic bodů Testovací základny pro GPS,
- soubor souřadnic určených uživatelem základny při kalibračním měření.

Výstupem zpracování je protokol obsahující všechny vypočtené hodnoty.

6. Obsah výstupu – kalibračního listu

Výstupem kalibrace GNSS aparatury je kalibrační list.

Kalibrační list bude obsahovat:

- identifikační informace,
- popis kalibrace jednotlivé metody měření,
- vysvětlivky,
- závěrečné autorizační informace,

přičemž část b) se může v kalibračním listu opakovat tolikrát, pro kolik metod měření byla GNSS aparatura kalibrována.

Nyní podrobně k jednotlivým částem.

Ad a) identifikační informace obsahuje:

- identifikaci správce základny (VÚGTK, v.v.i.),
- identifikaci kalibračního listu (jeho číslo, datum vystavení),
- identifikaci zadavatele/uživatele testovaného kompletu (název, sídlo, atp.),

- identifikaci měřidla – testovaného kompletu obvykle složeného z přijímače, antény a modemu (výrobce, typ, výrobní čísla, verze firmware, evidenční čísla),
- identifikace použitého etalonu – Testovací základny pro GPS Skalka,
- podmínky prostředí při kalibraci (datum měření pro kalibraci, použitý navigační systém, počasí, teplota),
- podmínky kalibrace tj. popis postupu kalibrace a
- identifikace kalibračních postupů a metodik.

Ad b) popis kalibrace jednotlivé metody měření obsahuje pro každou kalibrovanou metodu:

- identifikace metody,
- popis postupu měření při dané metodě, identifikace zaměřených bodů, nastavení přijímače (elevační maska, interval záznamu, limit DOP, délka měření, počet opakování, minimální odlehlost mezi opakováními, způsob průměrování výsledku jednoho opakování), způsob určení výšky antény a způsob zavádění oprav fázových center do zpracování včetně identifikace zdroje oprav fázových center,
- informace o tom, zda byla použita jiná měřidla (v případě metody, která vyžaduje současné použití dvou a více GNSS aparatur – např. statická metoda),
- identifikace použitého zpracovatelského software resp. firmware včetně verze,
- popis způsobu navázání výsledku měření do referenčního souřadnicového systému včetně případné identifikace použité permanentní GNSS stanice resp. sítě permanentních GNSS stanic,
- popis postupu zpracování dat (identifikace souřadnicového systému, ve které bylo zpracování provedeno, způsob výpočtu výsledné hodnoty – např. váženým průměrem),
- výsledné souřadnice bodů Testovací základny pro GPS Skalka určené kalibrovaným měřidlem,
- výsledky kalibrace, které v první části pro každou složku souřadnic (sever, východ, nahoru) obsahují hodnoty maximálních odchylek a jednotkové směrodatné odchylky a ve druhé části jsou pro střední souřadnicovou chybu a střední chybu ve výšce uvedeny jejich hodnoty a standardní a rozšířené nejistoty včetně informace o použitém koeficientu rozšíření a odkaz na dokument definující způsob určení nejistot.

Ad c) vysvětlivky obsahují vysvětlení termínů použitých ve výsledcích kalibrace včetně nezbytných vysvětlujících vzorců.

Ad d) závěrečné autorizační informace obsahují:

- informaci o platnosti výsledků kalibrace
- datum kalibrace
- podpisy dvou pracovníků správce základny zodpovědných za výsledky kalibrace s razítkem.

7. Závěr

Tato technologie stanovuje závazný postup zpracování měření pro kalibraci GNSS aparatur při použití metody měření real-time kinematic s využitím dat a navázáním do referenčního souřadnicového systému pomocí sítě permanentních GNSS stanic. Může být použita i pro další metody měření technologií GNSS, které využívají sítě permanentních GNSS stanic.

Literatura

- [1] Karský, G.: Testovací základna pro technologii GPS. Výzkumná zpráva VÚGTK č. 1007/2000. VÚGTK, Zdiby, 2000.
- [2] Hofmann-Wellenhof, B. – Lichtenegger, H. – Collins, J.: Global Positioning System – Theory and Practice, 5th rev. Edition, 2001, XXII, 382 pp., 45 figs.
- [3] Kostecký, J. jr.: Ke zpracování testovacích měření technologií GNSS metodami RTK a RST na Testovací základně GPS Skalka. Technická zpráva VÚGTK č. 1209/2013. VÚGTK, Zdiby, 2013.