

Implementácia navigačného družicového systému Galileo do spracovania Európskej permanentnej subsiete na STU

Ing. Martin Imrišek,
Katedra geodetických základov,
Stavebná fakulta,
Slovenská technická univerzita
v Bratislave

Abstrakt

Ohodnotenie dopadu implementácie družicového systému Galileo na odhadnuté zenitové totálne oneskorenia signálu Globálnych navigačných družicových systémov určené finálnym riešením subsiete Európskej permanentnej subsiete spracovávanej na Katedre geodetických základov Slovenskej technickej univerzity. Jedná sa o analýzu časových radov zenitových totálnych oneskorení a príbuzných veličín počas desiatich týždňov, určených kombináciou meraní družicových systémov GPS, GLONASS a Galileo.

Implementation of Galileo Navigation System into Processing of European Permanent Subnetwork at SUT

Abstract

This paper deals with the impact assessment of implementation of Galileo navigational satellite system on zenith total delay of signal of Global Navigation Satellite System determined by final solution of European permanent sub network processed in the Department of Theoretical Geodesy at Slovak University of Technology. It is a ten-week analysis of time series of zenith total delays and related variables determined by combination of satellite system measurements of GPS, GLONASS and Galileo.

Keywords: global navigation satellite system, Galileo, zenith total delay, time series, impact assessment

1. Úvod

Merania permanentných staníc Globálnych navigačných družicových systémov (GNSS) sú zhromažďované a spracovávajú sa na Katedre geodetických základov, Stavebnej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave (SvF STU) za účelom odhadu polohy bodov a parametrov atmosféry. Predovšetkým sa jedná o epochové spracovania lokálnych sietí na posúdenie geologickej stability záujmového územia. Od roku 2002 sa venujeme rutinnému spracovaniu rozsiahlej subsiete Európskej permanentnej siete, ktorá je využitá na realizáciu Európskeho terestrického referenčného systému 1989 [1]. V januári 2016 boli do spracovania meraní GPS NAVSTAR¹⁾ zahrnuté aj merania družicového systému GLONASS²⁾. Toto navýšenie meraných parametrov malo za následok zníženie neistoty určovaného troposférického oneskorenia signálu GNSS približne o 30 %.

Ako sa blíži realizácia európskeho družicového systému Galileo do finálneho štádia, sú znova upriamené očakávania na zvýšenú kvalitu odhadovaných parametrov permanentných staníc GNSS vďaka implementácii jeho meraní do spracovania. Družicový systém Galileo začal poskytovať prvé navigačné služby pre verejnosť, štátne orgány a súkromné spoločnosti od 14. 12. 2016. V dobe písania tohto príspevku je aktívnych 22 družíc, dve sú v testovacej fáze a dve sú mimo prevádzky. Tento systém by mal byť plne funkčný v roku 2020 s 24 aktívnymi a šiestimi záložnými družicami na troch orbitálnych dráhach. Implementáciou meraní systému Galileo do spracovania denných súborov subsiete Európskej permanentnej siete sme sa začali zaoberať od roku 2019. Prvé finálne riešenie zahrnu-

júce aj merania Galileo bolo určené pre týždeň GPS 2035, ktorý sa začína v nedeľu 6. 1. 2019. Z celkového počtu 59 spracovávaných staníc v danom období malo iba 23 staníc dostupné merané dáta vo formáte RINEX verzia 3, obsahujúce aj pseudovzdialenosti a fázy nosných vln družicového systému Galileo. Finálne sieťové riešenia sú publikované s oneskorením 21 dní, pričom sú určované pomocou presného sieťového prístupu s dvojnásobne diferencovanými meraniami fáz nosných vln prijímaného signálu. Účelom tohto typu spracovania je spresňovanie aktuálneho referenčného rámca kombináciou odhadov súradníc permanentných staníc viacerých spracovateľských centier. Jedným z produktov spracovania denných súborov sú troposférické oneskorenia signálu GNSS s hodinovou frekvenciou, ktoré sú z pohľadu využiteľnosti vhodné na validáciu a tvorbu počiatočných podmienok numerických predpovedných modelov počasia [2]. Štandardne sa na tvorbu počiatočných podmienok numerických predpovedných modelov počasia používajú troposférické oneskorenia signálov GNSS v zenite. V poslednom období sa v numerickej meteorológii experimentuje s využitím šikmých troposférických oneskorení na družice [3]. Článok je zameraný na posúdenie dopadu implementácie meraní Galileo na odhad troposférického oneskorenia signálov GNSS v zenite z finálneho riešenia subsiete Európskej permanentnej siete spracovávanej na Katedre geodetických základov.

2. Implementácia navigačného družicového systému Galileo do spracovania

Spracovanie denných súborov meraní GNSS vykonávame pomocou softvéru vyvinutého na Astronomickom inštitúte

1) Skratka odvodená z názvu „Global Positioning System NAVigation Signal Timing And Ranging“.

2) Skratka odvodená z názvu „GLObálna NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistema“.



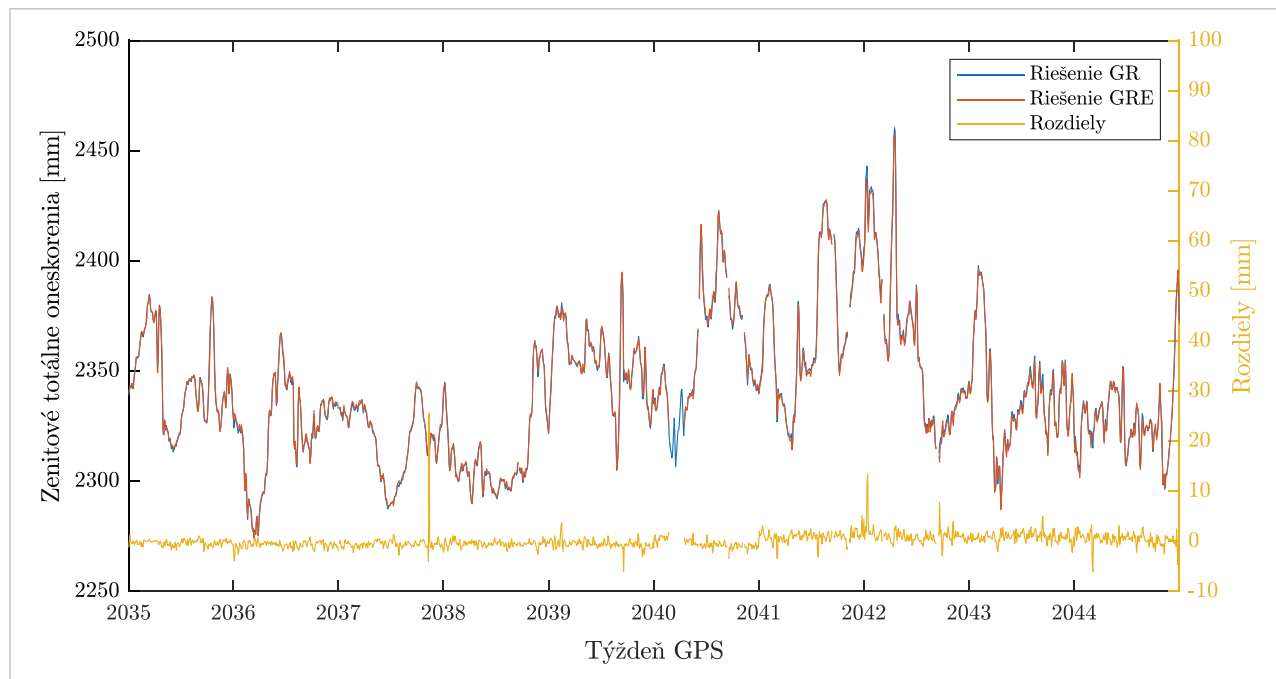
Obr. 1 Rozmiestnenie permanentných staníc GNSS spracovávaných v lokálnom analytickom centre STU

túte Bernskej univerzity vo Švajčiarsku, Bernese GPS Software verzia 5.2 [3]. Rozmiestnenie 59 permanentných staníc GNSS subsiete EPN je na obr. 1.

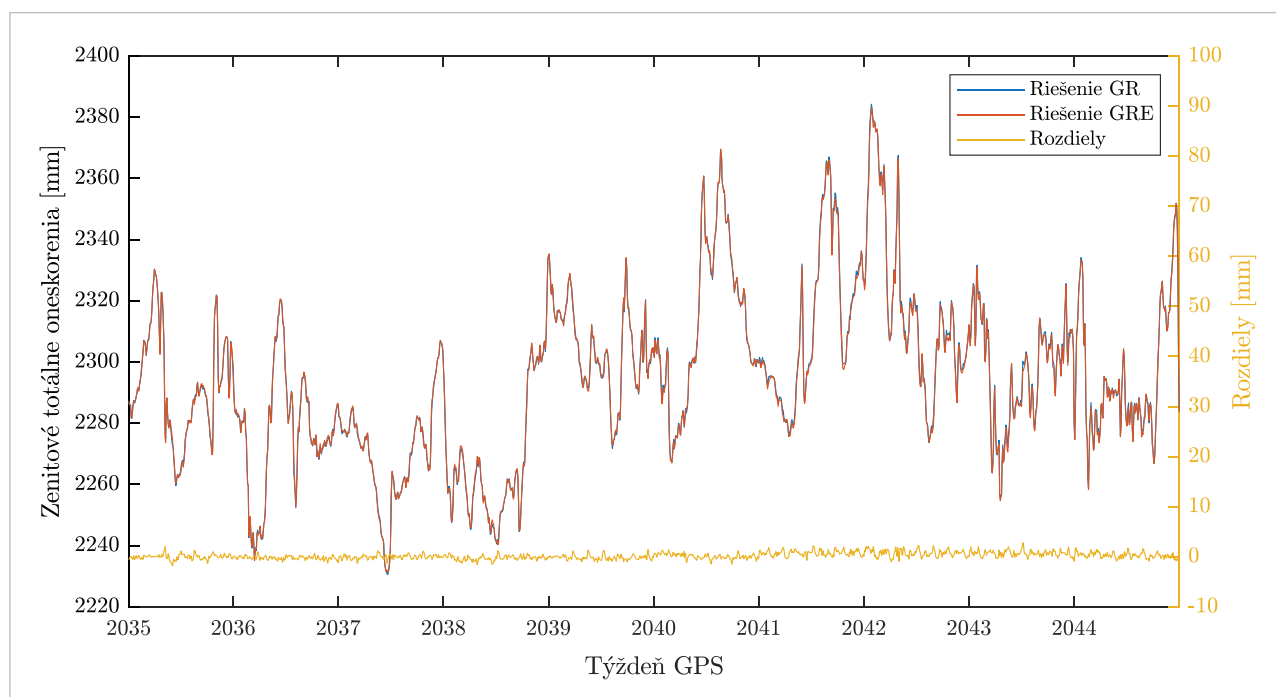
Dátové súbory vo formáte RINEX verzia 2.11 a verzia 3.04 sú sťahované z regionálnych dátových centier Federal Office of Metrology and Surveying Austria, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie a lokálneho dátového centra na Katedre geodetických základov. Z Center for Orbit Determination in Europe sú sťahované vstupné riadiace súbory potrebné na spracovanie, finálne polohy družíc, parametre orientácie Zeme a mapy ionosférického oneskorenia [5]. Riešenie s použitím iba observácií GPS a GLONASS označujeme skratkou GR, pričom riešenie s implementáciou observácií Galileo do spracovania označujeme skratkou GRE. V riešení GR sú využívané pseudovzdialenosti C1 a C2 a fázy nosných vln L1 a L2 systémov GPS a GLONASS, pričom v spracovaní GRE sú použité aj C1, C5, L1 a L5 zo systému Galileo. Merania GNSS sú ovplyvňované rôznymi systematickými a náhodnými vplyvmi ako napríklad chyba určenia polôh družíc, chyba hodín prijímača a družice, prostredie v ktorom sa šíri signál, relativistické efekty, chyba fázového centra antény alebo družice, viaceré šírenie sa signálu a mnohé ďalšie. V riešení GR sú použité individuálne korekcie fázových centier antén signálov GPS a GLONASS. Pre merania družicového systému Galileo v čase spracovania neboli dostupné individuálne korekcie fázových centier antén a boli nahradené korekciami systému

GPS. Pred každým spracovaním týždenného riešenia GRE sú sťahované a oficiálne kalibrácie fázových centier družíc. Medzi nastaveniami spracovania riešení GR a GRE nie sú žiadne rozdiely a základnice medzi permanentnými stanicami GNSS sú taktiež identické.

Najväčší vplyv na merané parametre majú troposférická a ionosférická refrakcia. Troposférická refrakcia, ktorej dôsledkom je oneskorenie signálu GNSS, je spôsobená vplyvom neutrálnej časti atmosféry na šíriaci sa signál z družice k permanentnej stanici GNSS. Toto oneskorenie nie je závislé od frekvencie vysielaného signálu a je rovnaké pre všetky merané veličiny. Na druhej strane ionosféra je pre vysielaný signál disperzné médium, čo znamená, že ionosférická refrakcia je závislá od frekvencie vysielaného signálu. V tomto príspevku sa budeme ďalej venovať dopadu implementácie meraní družicového systému Galileo na odhad troposférického oneskorenia družicového signálu. Keďže vysielaný signál z družíc GNSS je ovplyvnený refrakciou počas prechodu celou atmosférou, je označenie troposférické oneskorenie matúce. V praxi je preto zaužívané označenie totálne oneskorenie, ktoré vyjadruje oneskorenie spôsobené hydrostatickou (suchou) a nehydrostatickou (vlhkou) zložkou atmosféry, toto rozdelenie navrhol Davis v roku 1985 [6]. Nehydrostatická zložka atmosféry sa nachádza iba v troposfére, preto sa inklinuje k tomuto názvu. O zenitovom totálnom oneskorení signálu GNSS permanentnej stanice hovoríme v prípade, že je one-



Obr. 2 Časové rady zenitového totálneho oneskorenia stanice BOR1



Obr. 3 Časové rady zenitového totálneho oneskorenia stanice TUBO

skorenie odhadnuté v zenite stanice. Toto oneskorenie dosahuje hodnotu približne 2400 mm na stanici, ktorá je na úrovni mora. Ak by sme chceli vyjadriť pomer medzi hydrostatickou a nehydrostatickou zložkou, zistili by sme, že hydrostatická zložka tvorí asi 90 % z celkového oneskorenia. Závislosť zenitového hydrostatického a nehydrostatického oneskorenia signálu od ľubovoľného elevačného uhla voči oneskoreniu signálu v zenite je vyjadrená koeficientami mapovacej funkcie odhadnutými pomocou meteorologických údajov alebo pomocou numerických pred-

povedných modelov počasia. Pri výpočte apriórnych zenitových hydrostatických a nehydrostatických oneskorení sme použili koeficienty Vienna Mapping Functions 1 [7]. Uložené sú v rovnomernej globalnej mriežke s veľkosťou kroku $2,5^\circ \times 2,0^\circ$. Na obr. 2 a 3 sú zobrazené časové rady zenitových totálnych oneskorení s hodinovou frekvenciou pre týždne GPS 2035 až 2044 permanentných staníc BOR1 (Borowiec v Poľsku) a TUBO (Vysoké učení technické v Brně). Rozdiely sú vypočítané ako hodnoty časových radov zenitových totálnych oneskorení riešenia GR mínus

Tab. 1 Štatistické údaje rozdielov ZTD riešenia GR a GRE [mm]

| | BOR1 | TUBO |
|----------------------|------|------|
| Minimum | -6,0 | -1,8 |
| Maximum | 25,5 | 2,8 |
| Priemerná hodnota | 0,07 | 0,19 |
| Štandardná odchýlka | 1,37 | 0,65 |
| Koeficient korelácie | 0,99 | 1,00 |

Tab. 2 Štatistické údaje po filtrácii rozdielov ZTD riešenia GR a GRE [mm]

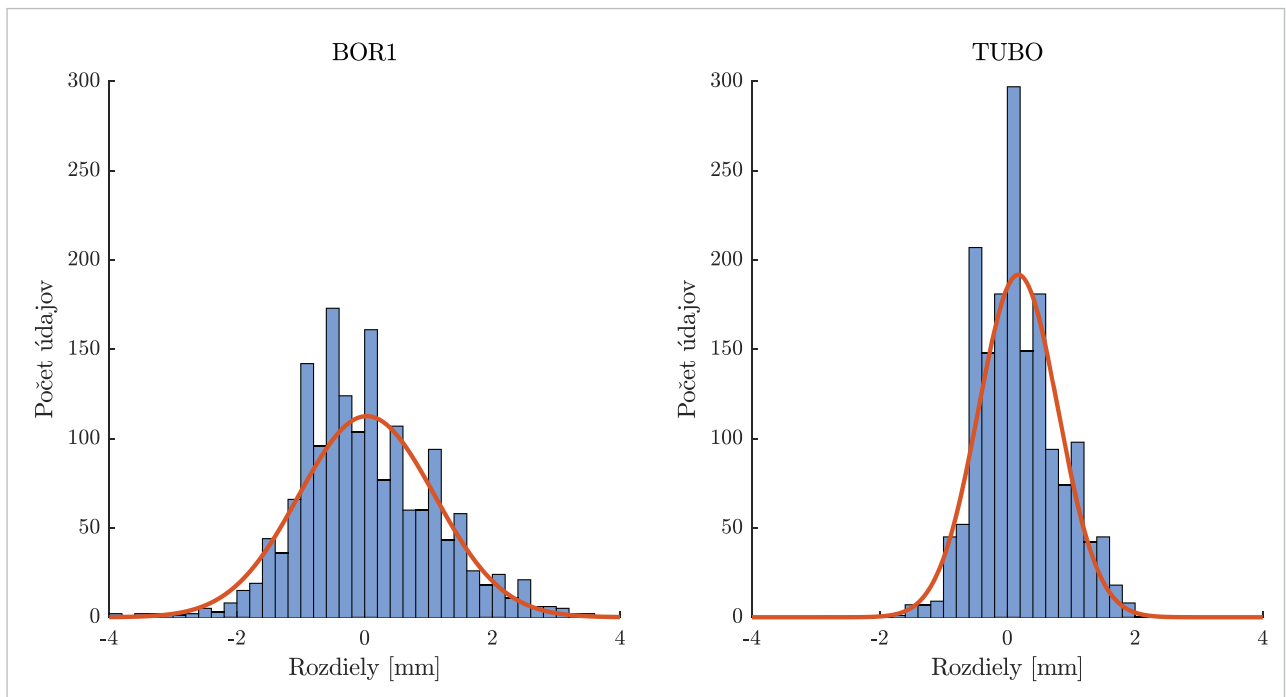
| | BOR1 | TUBO |
|---|-------|-------|
| Minimum | -4,0 | -1,8 |
| Maximum | 4,0 | 1,9 |
| Priemerná hodnota | 0,03 | 0,17 |
| Štandardná odchýlka | 1,06 | 0,62 |
| Koeficient asymetrie | 0,32 | 0,35 |
| Štandardná odchýlka koeficientu asymetrie | 0,061 | 0,060 |
| Koeficient excesu | 0,51 | -0,08 |
| Štandardná odchýlka koeficientu excesu | 0,122 | 0,120 |

riešenia GRE. Tieto stanice sme vybrali preto, že ich časové rady sú dostatočne dlhé a bez dlhodobých výpadkov.

Štatistické údaje o rozdieloch medzi riešením GR a GRE staníc sú uvedené v **tab. 1**.

Následne sme sa zamerali na analýzu rozdielov zenitových totálnych oneskorení medzi riešeniami GR a GRE. Na stanici TUBO nedošlo k významným rozdielom, ktorým by sa bolo treba bližšie venovať. Dňa 26. 1. 2019 sa na stanici BOR1 vyskytol najväčší rozdiel 25,5 mm (rozdiel platný pre 1:00 UTC). Tento rozdiel bol zapríčinený výpadkom meraní družicového systému Galileo z nezistených dôvodov. Na základe porovnávaného obdobia sa tento rozdiel javí ako hrubá chyba riešenia GRE, preto budeme ďalej monitorovať rozdiely odhadnutých zenitových totálnych oneskorení. Systematický posun rozdielov riešení GR a GRE viditeľný na **obr. 1** a **obr. 2** od týždňa GPS 2041 nastal zmenou metodiky tvorby apriórnych súradníc permanentných staníc GNSS vstupujúcich do spracovania. Každá stanica bola zmenou metodiky tvorby apriórnych súradníc ovplyvnená individuálne.

Z časových radov rozdielov sme odstránili vybočujúce údaje, ktoré majú absolútnu hodnotu väčšiu ako trojnásobok štandardnej odchýlky daného časového radu ZTD. Takto vyselektované údaje sme podrobili neparametrickému testovaniu empirických koeficientov asymetrie a excesu. Stredné hodnoty rozdielov, odhadnuté koeficienty a ich štandardné odchýlky sú uvedené v **tab. 2**. Overenie platnosti nulových hypotéz je vykonané porovnaním hodnoty koeficientu s kritickou hodnotou vypočítanou ako dvojnásobok príslušnej štandardnej odchýlky daného koeficientu. Rozdiely sme podrobili aj testovaniu normality rozdelenia pravdepodobnosti pomocou Jarque–Bera štatistického testu. Všetky testy boli vykonané na hladine významnosti 5 %. Na **obr. 4** sú zobrazené histogramy rozdielov permanentných staníc BOR1 a TUBO. Červenou krivkou na grafoch sú zobrazené funkcie hustoty pravdepodobnosti normálneho rozdelenia.



Obr. 4 Histogramy rozdielov GR a GRE zenitových totálnych oneskorení pre stanice BOR1 (vľavo) a TUBO (vpravo)

Neparametrické testy empirických koeficientov asymetrie pre obe permanentné stanice zamietli nulovú hypotézu H_0 : *Empirický koeficient asymetrie je nulový*. Histogramy rozdielov oboch permanentných staníc sú naklonené do ľavej strany, čo dokumentujú kladné koeficienty asymetrie. V histogramoch sa vyskytuje viac záporných rozdielov, ktoré sú pravdepodobne spôsobené zmenou metodiky tvorby apriórnych súradníc a použitím korekcií fázových centier antén signálov družicového systému GPS pre signály Galileo.

Neparametrický test empirického koeficientu excesu stanice BOR1 zamietol nulovú hypotézu H_0 : *Empirický koeficient excesu je nulový*. Početnosť malých rozdielov na stanici BOR1 prevyšuje teoretickú početnosť normálneho rozdelenia pravdepodobnosti.

Testovanie nulovej hypotézy empirického koeficientu excesu stanice TUBO nezamietlo nulovú hypotézu.

Normalitu rozdelenia pravdepodobnosti rozdielov sme testovali pomocou Jarque–Bera štatistického testu s nulovou hypotézou H_0 : *Údaje majú normálne rozdelenie pravdepodobnosti*. Na základe testu sme zamietli nulovú hypotézu na hladine významnosti 5 % pre obe stanice. Aj toto testovanie potvrdilo, že rozdiely medzi riešeniami GR a GRE majú syntetický charakter a nie sú spôsobené rozdielnym oneskorením signálov Galileo.

Na základe porovnania časových radov neistôt zenitových totálnych oneskorení medzi riešeniami GR a GRE sme vypočítali strednú hodnotu rozdielov (0,1 mm) a štandardnú odchýlku (0,15 mm). Tieto rozdiely nedosahujú hodnoty zaznamenané pri implementácii navigačného systému GLONASS, kde nastalo zníženie neistôt určenia zenitových totálnych oneskorení o 20 % až 30 %, čo predstavovalo 0,3 až 0,4 mm. Nesignifikantná veľkosť zníženia neistôt určených zenitových totálnych oneskorení je spôsobená nárastom počtu meraní, ktoré môžeme považovať za redundantné (bez novej informácie).

Výrazne sú ovplyvnené iba gradienty zenitového totálneho oneskorenia (poznáme dva gradienty: v smere na sever a na východ). Na základe porovnania časových radov jednotlivých gradientov zmena riešenia GRE dosahuje voči riešeniu GR hodnoty 10 % až 20 %. Rovnako bol zaznamenaný aj pokles neistôt určenia gradientov približne o 10%. Keďže tieto veličiny využívame pri výpočte šikmých totálnych oneskorení signálu GNSS, ktoré experimentálne asimulujeme do numerických predpovedných modelov počasia, je toto zlepšenie vítané. V budúcnosti sa budeme hlbšie venovať vplyvu implementácie meraní systému Galileo na odhad horizontálnych gradientov zenitového totálneho oneskorenia.

3. Záver

Implementácia meraní družicového systému Galileo do spracovania subsiete Európskej permanentnej siete prispela najmä k robustnosti spracovania. Navýšenie počtu observácií v spracovaní predstavuje zvýšené nároky na výpočtové kapacity počítačov v lokálnych analyzáčných centrách Európskej permanentnej siete. V budúcnosti s očakávaným nárastom podielu antén a prijímačov schopných zaznamenávať aj signály vysielané z družíc navigačného systému Galileo očakávame nárast meraných parametrov o viac ako tretinu voči súčasnému stavu. Tento nárast prispieva k robustnosti riešenia, ale neprispieva signifikantne ku kvalite odhadu zenitových totálnych oneskorení sig-

nálu GNSS. Stredná hodnota rozdielov neistôt zenitových totálnych oneskorení je 0,1 mm so štandardnou odchýlkou 0,15 mm. Podobné minimálne rozdiely sme zaznamenali v zenitovom totálnom oneskorení signálu GNSS. Vyskytli sa však aj rozdiely s veľkými hodnotami (25,5 mm). Výsledky štatistického testovania rozdielov riešení GR a GRE sú uvedené v **tab. 1**. Na základe vyhodnotenia neparametrických testov môžeme povedať, že rozdiely zenitových totálnych oneskorení riešení GR a GRE oboch staníc nemajú normálne rozdelenie pravdepodobnosti. Výsledok štatistického testovania rozdielov môže byť ovplyvnený faktom, že namiesto korekcií fázových centier antén pre signály družicového systému Galileo sa používajú korekcie určené pre signály družicového systému GPS a zmenou metodiky tvorby apriórnych súradníc permanentných staníc vstupujúcich do spracovania riešenia GRE. Vzhľadom na ich malú pomernú hodnotu k ZTD (menej ako 0,001%) môžu byť zanedbané. V ďalšej fáze testovania vykonáme porovnanie zenitových totálnych oneskorení určených na základe kombinácie navigačných družicových systémov GPS, GLONASS a Galileo s numerickými predpovednými modelmi počasia a budeme kvantifikovať absolútny príspevok riešenia GRE voči GR.

Významnú zmenu odhadnutých parametrov spracovania meraní GNSS sme zaznamenali pri gradientoch zenitových totálnych oneskorení signálu GNSS. Zmena absolútnej hodnoty gradientov dosiahla hodnotu 10 % až 20 %, pričom ich neistoty klesli približne o 10 %.

Podakovanie:

Táto práca vznikla s podporou grantovej agentúry VEGA v rámci riešenia projektu VEGA 1/0682/16.

LITERATÚRA:

- [1] BRUYNINX, C. et al.: The Use of the Euref Permanent GPS Network for the Maintenance of the European Terrestrial Reference frame. *Advances in Positioning and Reference Frames*. International Association of Geodesy Symposia, vol. 118. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [2] GUEROVA, G. et al.: Review of the state-of-the-art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 2016, p. 5385–5406.
- [3] HAAN, de S.-MAREL, van der H.-BARLAG, S.: Comparison of GPS slant delay measurements to a numerical model: case study of a cold front passage, *Physics and Chemistry of the Earth, Volume 27, Issues 4–5*, 2002, p. 317–322, ISSN 1474-7065.
- [4] UNIVERSITÄT BERN: Bernese GPS Software Version 5.2. 27. 5. 2019, <http://bernese.unibe.ch/docs/DOCUS2.pdf>.
- [5] DACH, R.-SCHAER, S.-ARNOLD, D.-PRANGE, L.-SIDOROV, D.-STEBLER, P.-VILLIGER, A.-JÄGGI, A.: CODE final product series for the IGS. *Astronomical Institute, University of Bern*, 2018, <http://aiub.unibe.ch/download/CODE>.
- [6] DAVIS, J.-HERRING, T.-SHAPIRO, I.-ROGERS, A.-ELGERED, G.: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio science*, 20, 1985, p. 1593–1607.
- [7] BÖHM, J.-WERTL, B.-SCHUH, H.: Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, 2006, pp. 111.

Do redakcie došlo: 9. 7. 2019

Lektoroval:
Ing. Jan Douša, Ph.D.,
Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v. v. i.