

# PRVÉ EXPERIMENTÁLNE MERANIA DRUŽÍC GALILEO NA SLOVENSKU A ICH ANALÝZA METÓDOU PPP

## FIRST EXPERIMENTAL OBSERVATIONS OF GALILEO SATELLITES AND THEIR ANALYSIS USING PPP

Ján Hefty<sup>1</sup>, Ľubomíra Gerhátová<sup>2</sup>

### Abstract

Precise Point Positioning (PPP) approach using the un-differenced code and phase GPS observations, precise orbits and precise satellite clocks is recently an important alternative to the method using double differences usually applied for geocentric coordinate determination. In this paper we examine the extension of PPP method by introducing the GLONASS and Galileo GIOVE satellites into the processing algorithms. The results are demonstrated by application of the software package ABSOLUTE developed at the Slovak University of Technology in Bratislava.

### Kľúčové slová

*GNSS Galileo, kombinácia meraní GPS, GLONASS a Galileo, Precise Point Positioning – PPP.*

## 1 ÚVOD

Globálne navigačné družicové systémy (americký GPS a ruský GLONASS) sú v súčasnosti v období modernizácie a zdokonaľovania. Európsky systém Galileo má na obežných dráhach 2 testovacie družice a od októbra 2011 aj 2 družice v riadnej prevádzke. Takéto podmienky a stav GNSS teda dovoľujú na geodetické určovanie polohy využívať kombináciu meraní GPS, GLONASS aj Galileo.

Kombinácia viacerých GNSS pri spoločnom určovaní polohy je výhodná z dôvodu väčšieho počtu družíc a ich vhodnejšej geometrickej konfigurácie pri meraní. Systémy pracujú nezávisle na sebe, odlišujú sa parametrami dráh družíc, rôznymi frekvenciami a kódovaním vysielaných signálov. Majú osobitne definované súradnicové a časové referenčné systémy. Prijímacie antény môžu mať inak definovanú polohu a variáciu fázového centra na prijímanie signálov GNSS. Prijímače majú vo všeobecnosti systematické posuny medzi frekvenciami/kódmi v rámci jednotlivých systémov a tiež systematické rozdiely medzi systémami. Pri kombinácii a spoločnom spracovaní nediferencovaných meraní metódou presného absolútneho určovania polohy (Precise Point Positioning - PPP) treba všetky tieto

---

<sup>1</sup> Prof. Ing. Ján Hefty, PhD., Katedra geodetických základov SvF STU, Radlinského 11, +421259274533, [jan.hefty@stuba.sk](mailto:jan.hefty@stuba.sk),

<sup>2</sup> Ing. Ľubomíra Gerhátová, PhD., Katedra geodetických základov SvF STU, Radlinského 11, +421259274348, [lubomira.gerhatova@stuba.sk](mailto:lubomira.gerhatova@stuba.sk)

odlišnosti zohľadniť. Metóda PPP vyžaduje presné polohy družíc aj parametre družicových hodín v dostatočne hustom intervale (min. 5 minút). Takéto údaje sú v súčasnosti k dispozícii okrem GPS aj pre GLONASS a Galileo.

## 2 TEORETICKÝ ZÁKLAD KOMBINÁCIE NEDIFERENCOVANÝCH KÓDOVÝCH A FÁZOVÝCH MERANÍ ROZLIČNÝCH GNSS

Matematický model kombinácie nediferencovaných meraní rozličných GNSS je podrobnejšie rozpracovaný napr. v (Kouba, Héroux, 2001). Vychádzame zo vzťahov pre pseudovzdialenosti merané pomocou kódových (P) a fázových (L) meraní medzi prijímačom  $A$  a družicou  $j$  na frekvencii  $f$  s vlnovou dĺžkou  $\lambda$ , pričom uvažujeme časové posuny medzi jednotlivými družicovými systémami ( $S$ ), časové posuny medzi kanálmi prijímača GNSS ( $H$ ,  $h$ ) a diferenciálne posuny kódov ( $D$ )

$$\begin{aligned} P_{Af}^j &= r_A^j + cd_A - cd^j + I_{Af}^j + T_A^j + S_A^j + H_{Af} + D_{AC}^j + e_{PAf}^j \\ \lambda L_{Af}^j &= r_A^j + cd_A - cd^j - I_{Af}^j + T_A^j + h_{Af} + \lambda N_{Af}^j + e_{LAf}^j \end{aligned} \quad (1)$$

Ďalšie veličiny vo vzťahoch (1) sú rýchlosť šírenia sa signálu  $c$ , geometrická vzdialenosť  $\rho$  medzi družicou a prijímačom v okamihu merania, korekcie hodín družice a prijímača  $\delta$ , vplyv ionosféry  $I$  a troposféry  $T$ , ambiguity fázových meraní  $N$  a náhodné chyby  $\varepsilon$ .

V prvej fáze výpočtov sa spracovávajú samostatne kontinuálne kódové a fázové merania družice  $j$  na dvoch frekvenciách  $f_1$  a  $f_2$ , cieľom je eliminovať vplyv ionosféry  $I$  a odhadnúť ambiguity vo forme reálnych čísel spolu s hodnotami pseudovzdialeností  $P$  vzťahnutými k epoche merania  $t$ . Získané pseudovzdialenosti zbavené vplyvu ionosféry  $P$  a merania fáz  $L$  opravené o odhadnuté ambiguity sa kombinujú v spoločnom spracovaní viacerých GNSS. Riešenie vychádza zo vzťahov

$$\begin{aligned} P_A^j + c\delta^j - (\rho_A^j)_0 &= a_X \Delta X_A + a_Y \Delta Y_A + a_Z \Delta Z_A + c\delta_A + S_A + H_{Af} + D_{AC} + \varepsilon_{PA}^j \\ \lambda L_A^j + c\delta^j - (\rho_A^j)_0 &= a_X \Delta X_A + a_Y \Delta Y_A + a_Z \Delta Z_A + c\delta_A + S_A + h_{Af} + \lambda N_{Af}^j + \varepsilon_{PA}^j \end{aligned} \quad (2)$$

Hodnoty  $\rho_0$  predstavujú vzdialenosti medzi družicou  $j$  a prijímačom  $A$  a sú vypočítané využitím presných dráh družíc. Sú v nich uvážené korekcie z vplyvu relativity, družicovej aberácie, denného pohybu pólu, slapových deformácií Zeme, excentricít fázových centier antény družice a antény prijímača a efektu polarizácie fázy nosnej vlny.

Odhadované parametre sú súradnice stanovišťa, korekcie hodín prijímača, časové posuny medzi jednotlivými družicovými systémami (inter-system bias  $S_A$ ) (Wang et al., 2001), časové posuny medzi kanálmi prijímača GNSS (inter-channel bias  $H_{Af}$  pre GLONASS) (Wang et al., 2001) a diferenciálne posuny kódov (DCB – differential code bias, vo vzťahu označené ako  $D_{AC}$ ) (Dach et al., 2007). Väčšina uvedených parametrov zahŕňa kombináciu vplyvov časového systému GNSS, družice a prijímača.

Pri spracovaní meraní metódou PPP sme použili softvér ABSOLUTE (Hefty, Gerhátová, 2011), pričom pri kombinácii viacerých GNSS vychádzame z meraní 24 h s intervalom 120 s.

### 3 NIEKTORÉ VÝSLEDKY SPRACOVANIA EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ METÓDOU PPP

V rámci experimentu sme realizovali 24-hodinové merania GPS, GLONASS a Galileo v dlhšom časovom intervale a následne analyzovali výsledky získané spracovaním pomocou programového balíka ABSOLUTE metódou PPP. Merania boli vykonané na Observatóriu Katedry geodetických základov SvF STU v období október – november 2011, na analýzu však neboli použité všetky dni z dôvodu nedostupných informácií o presných polohách, resp. hodinách družíc Galileo. Na meranie sme použili prístroj TRIMBLE R8 Model 3 s integrovanou anténou (obr. 1). Výsledky meraní sme mali k dispozícii vo formátoch RINEX 2.11 (GPS, GLONASS) a 3.0 (GPS, GLONASS, Galileo). Pri spracovaní boli použité kódové merania GPS (C1/P2), GLONASS (P1/P2) a Galileo (E1/E5a) a fázové merania na príslušných nosných frekvenciách.



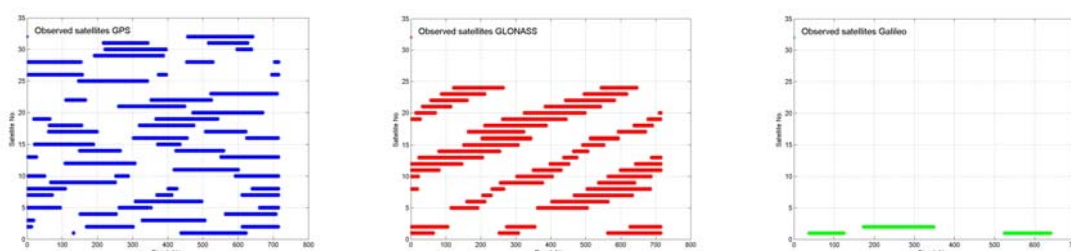
**Obr. 1** Bod AGOB počas meraní GNSS

Počas meraní sme prijímali signály testovacích družíc Galileo GIOVE A a GIOVE B. Do spracovania však vstupovali iba merania družice GIOVE B z dôvodu, že sme nemali k dispozícii informácie o presnej polohe a družicových hodinách GIOVE A.

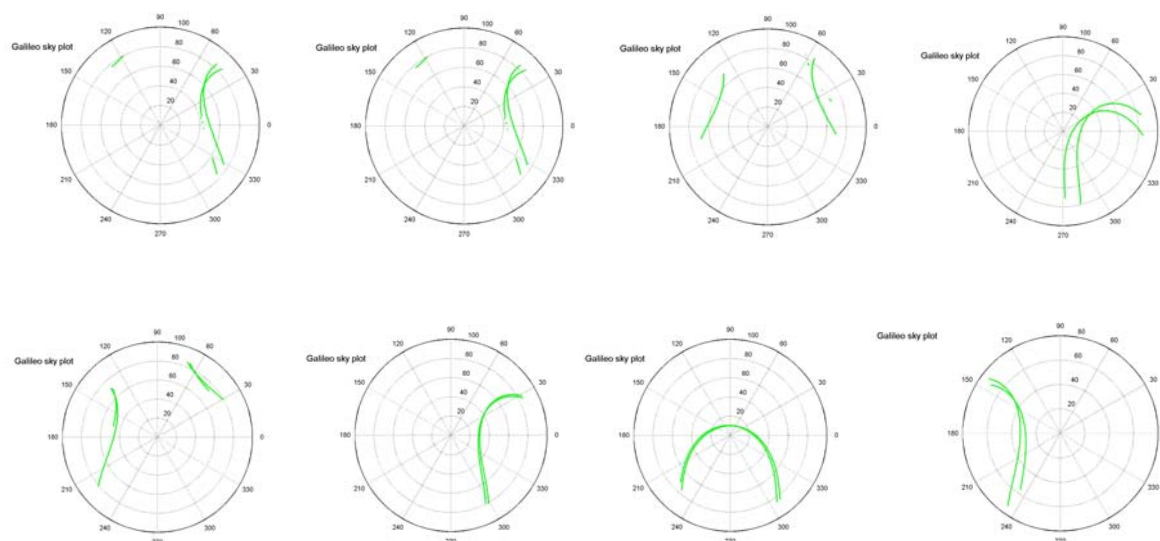
Pri spracovaní metódou PPP je nevyhnutné poznať presné polohy a hodiny družíc GNSS. Dráhy a parametre hodín družíc GPS poskytuje Medzinárodná služba GNSS (International GNSS Service – IGS) (IGS, 2011), polohy družíc sú dostupné s intervalom 15 minút, hodiny s intervalom 5 minút a 30 sekúnd. Okrem toho IGS poskytuje aj presné polohy a hodiny družíc GLONASS s 15-minútovým intervalom. Pri spracovaní sme využívali produkty ESA/ESOC (ESOC, 2011), ktoré poskytuje okrem presných polôh aj hodiny v intervale 5 minút a 30 sekúnd. Na sledovanie družíc Galileo bola vybudovaná sieť (Cooperative Network for GIOVE Observations – CONGO) (Steinberger et al., 2011), ktorú spravuje Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR/GSOC). Túto sieť tvorí 19 staníc rozmiestnených po celom svete. Na bodoch siete sú prijímače Septentrio GeNeRx1, Leica GRX1200+GNSS a NovAtel Europak15a. Sieť slúži na monitorovanie testovacích družíc Galileo, dosiaľ vypustených družíc Galileo v riadnej prevádzke, ďalej sleduje družice japonského systému QZSS. DLR poskytuje dráhy a parametre hodín družíc GPS, GLONASS a testovacích družíc GIOVE s 10 s intervalom. Príslušné súbory sú k dispozícii na internetovej stránke s oneskorením 1 hodiny po meraní. Nevýhodou je nižšia presnosť produktov a výpadky (niekedy pomerne časté) v určení presných polôh a hodín družíc, najmä Galileo. Okrem toho jedným z problémov spracovania je dostupnosť hodnôt DCB konzistentných s riešením dráh a hodín družíc.

V rámci spracovania boli použité dve verzie: spoločné spracovanie GPS/GLONASS/Galileo s využitím dráh družíc a parametrov družicových hodín DLR a kontrolný výpočet GPS/GLONASS s využitím dráh družíc a parametrov družicových hodín ESA/ESOC.

Obr. 2 znázorňuje pozorovateľnosť družíc GPS, GLONASS a Galileo počas 24-hodinového merania dňa 24. 10. 2011 na bode AGOB. Na obr. 3 sú vykreslené denné trajektórie družice GIOVE B v intervale 10 dní. Počas dvoch dní z tohto intervalu neboli k dispozícii údaje o družici GIOVE B, preto nebolo možné vykonať spracovanie.

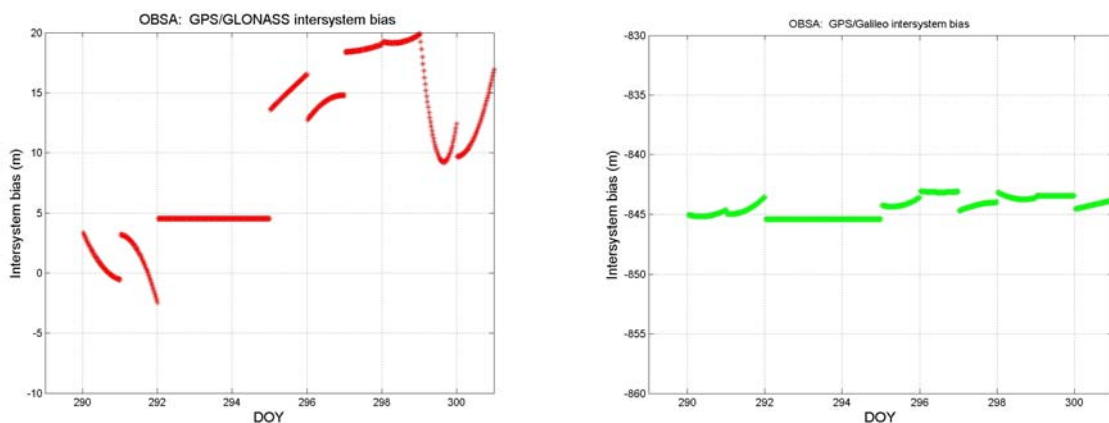


**Obr. 2** Pozorovateľnosť družíc GPS (modrá), GLONASS (červená), Galileo (zelená) na bode AGOB počas merania 24. 10. 2011



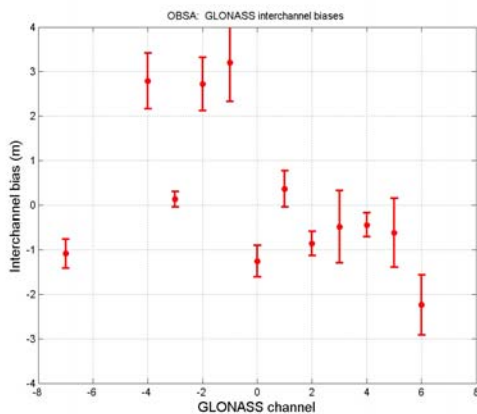
**Obr. 3** Trajektórie družice GIOVE B na bode AGOB počas merania 4. 11. 2011 – 13. 11. 2011

Jedným z výsledkov spoločného spracovania GPS/GLONASS, resp. GPS/Galileo je systematický časový posun medzi jednotlivými družicovými systémami (inter-system bias) znázornený na obr. 4. Inter-system bias  $S$  predstavuje systematický rozdiel medzi hodinami prijímača GNSS určenými pomocou kódového merania GPS, resp. Galileo (vyjadrený v metroch). Na veľkosti a priebehu  $S$  sa podieľajú družice, prijímače, ako aj hodnoty DCB. Pri spracovaní PPP jednotlivých staníc nemožno jednotlivé zdroje vyčleniť. Pri spracovaní GPS/GLONASS bola pozorovaná významne väčšia variabilita inter-system bias ako pri použití parametrov ESA. Stredná hodnota pri použití polôh a hodín družíc DLR je  $\sim 10$  m, pre riešenie ESA bola  $\sim -105$  m. Pri riešení GPS/Galileo sa ukazuje pomerne dobrá stabilita v čase, ale veľká stredná hodnota  $\sim 840$  m. Modelovanie a odhad inter-system bias je významným faktorom ovplyvňujúcim výsledky kombinácie GNSS.

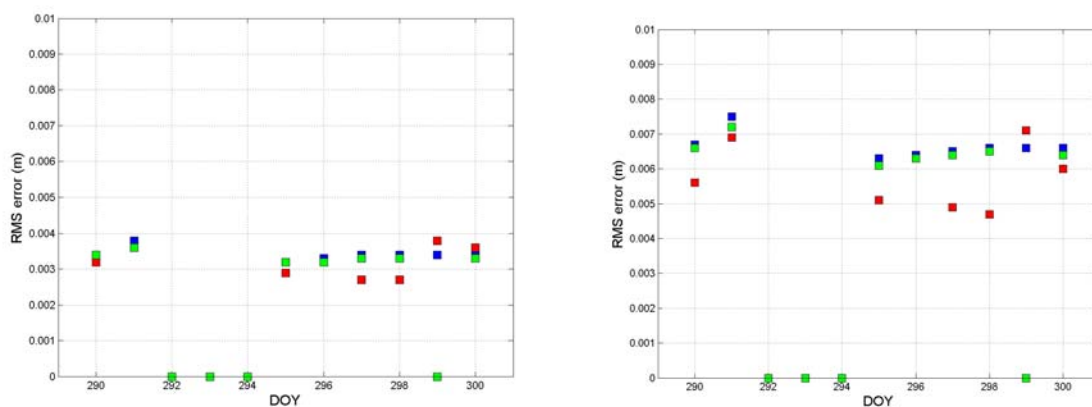


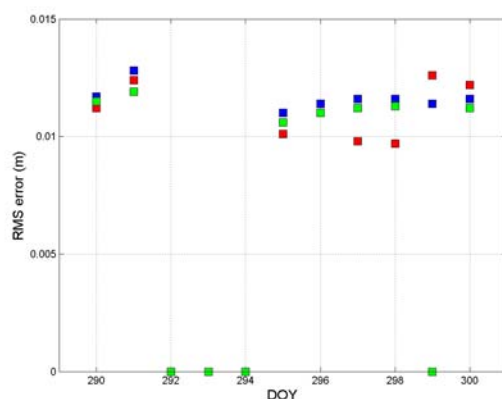
**Obr. 4** Systematický časový posun medzi jednotlivými družicovými systémami (intersystem bias), riešenie GPS/GLONASS (červená), riešenie GPS/Galileo (zelená).

Inter-channel bias  $H$  na obr. 5 predstavuje systematické posuny medzi jednotlivými kanálmi prijímača v dôsledku rozličných frekvencií vysielaných družicami GLONASS (14 kanálov).



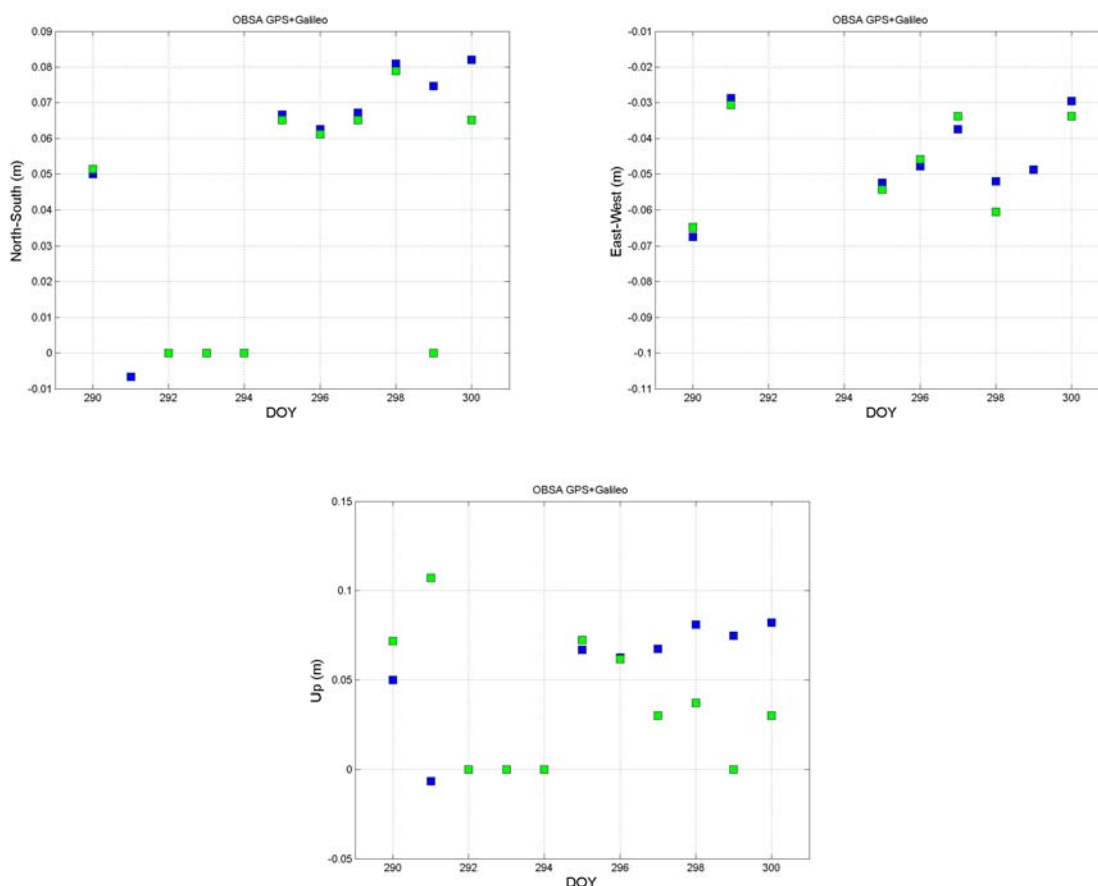
**Obr. 5** Systematický časový posun medzi kanálmi prijímača GNSS pri prijímaní signálov družíc GLONASS.





**Obr. 6** Stredné chyby určenia súradníc zo spoločného spracovania GPS/GLONASS a GPS/Galileo v zložkách sever-juh, východ-západ a vo výške. Porovnanie riešení z 24 h intervalov meraní: GPS (modrá), GPS+GLONASS (červená), GPS+Galileo (zelená).

Z numerických výsledkov je zrejmé, že stredné chyby súradníc z riešenia DLR sú viac ako dvojnásobné v porovnaní s riešením ESA. Začlenenie GIOVE B k spoločnému riešeniu s GPS (obr. 6) potvrdilo konzistenciu oboch systémov (použitá zatiaľ len 1 družica!).



**Obr. 7** Opakovateľnosť určenia súradníc (zložky sever-juh, východ-západ a výška) pri spoločnom spracovaní GPS/Galileo

Obr. 7 predstavuje vývoj súradnicových zložiek v smere sever-juh, východ-západ a vo výške získaných z 24-hodinových meraní počas experimentu. Začlenenie jednej družice Galileo do riešenia GPS ovplyvnilo najmä zložku vo výške (až 5 cm), vplyv na horizontálne zložky je do 1 cm. Predpokladáme, že je to spôsobené najmä obmedzenou presnosťou dráh a hodín DLR, ktoré sú verejne prístupné, ale nie sú dostatočne presné na aplikáciu PPP. Problémom sú aj časté obmedzené riešenia DLR (bez družíc GIOVE) a nedostupnosť meraní družíc Galileo na iných staniciach. Spoľahlivejšie výsledky bude možno získať až z dlhších kontinuálnych sérii multi-GNSS meraní, prípadne aj na iných bodoch. Problémom je však získanie takýchto meraní v dlhšom časovom intervale a už spomínané obmedzenia polôh a hodín DLR.

## 4 ZÁVER

Kombinácia viacerých GNSS do spoločného riešenia metódou PPP je perspektívna vzhľadom na to, že v súčasnosti je k dispozícii 57 (+2) družíc troch systémov – GPS, GLONASS a Galileo. Kvalita produktov kombinácie nediferencovaných meraní je podmienená použitím jednotného modelu dráh a hodín družíc a znalosťou, resp. vhodným modelovaním, systematických rozdielov medzi jednotlivými GNSS, nakoľko produkty globálneho riešenia (IGS, CONGO) nezabezpečia ich dostatočnú elimináciu. V našich analýzach softvérom STU Absolute multi-GNSS riešenie prinieslo zvýšenie vnútornej presnosti, avšak opakovateľnosť v určení súradníc sa nezvýšila. Ako hlavnú príčinu vidíme nekonzistentnosť potrebných produktov – dráh družíc, hodín družíc, diferencií medzi kódmi a modelmi fázových centier antén družíc GNSS. Navyše, na takmer všetkých uvedených efektoch sa významne podieľa aj konkrétny prijímač GNSS použitý pri meraní.

## PodĎakovanie

Autori ďakujú Agentúre Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR pre štrukturálne fondy EÚ a Slovenskej technickej univerzite v Bratislave za finančnú podporu Projektu ITMS 26220220108.

## LITERATÚRA

- Dach, R. – Hugentobler, U. – Fridez, P. – Meindl, M. (eds.), 2007: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomical Institute, University of Berne. 612 s.
- Hefty, J.,- Gerháťová, Ľ., 2011: Specific features of observations of various GNSS affecting their combination in the Precise Point Positioning. In: '3<sup>rd</sup> Int. colloquium on scientific and fundamental aspects of the Galileo Programme' (CD-ROM), WPP-326 Proceedings, ESA Publications Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands.
- Kouba, J. - Héroux, P., 2001: Precise Point Positioning Using IGS orbits and Clocks Products. *GPS Solutions*, 5 (2), s. 12-28.
- Steinberger, P.- Hugentobler, U. - Montenbruck, O.- Hauschild, A., 2011: Precise orbit determination of GIOVE-B based on the CONGO network. *Journal of Geodesy*, 85 (6), s. 357-365.
- Wang, J. – Rizos, C.- Steward, M.P. – Leick, A., 2001: GPS and GLONASS Integration: Modelling and Ambiguity Resolution Issues. *GPS Solutions*, 5 (1), s. 55-64.
- IGS, 2011: International GNSS Service web page, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/>



ESOC, 2011: The ESOC GLONASS Analysis Centre.  
[http://nng.esoc.esa.de/gps/dat\\_ana\\_igex.html](http://nng.esoc.esa.de/gps/dat_ana_igex.html)