

# VPLYV MULTIPATH PRI KINEMATICKOM URČOVANÍ POLOHY A MOŽNOSTI JEHO REDUKCIE

## EFFECT OF MULTIPATH IN KINEMATIC POSITIONING AND POSSIBILITIES OF ITS REDUCTION

Ján Hefty<sup>1</sup>, Ľubomíra Gerhátová<sup>2</sup>, Juraj Papčo<sup>3</sup>

### Abstract

Multipath detection in GPS code and phase observations, effect of multipath in coordinate time series from Precise Point Positioning, and multipath performance in Signal to Noise Ratio variations. Examples of multipath behaviour from GPS kinematic observations with 1 s and 60 s sampling. Demonstration of sidereal filtering as the method suitable for multipath reduction if the time series obtained from identical satellite constellation are available.

### Kľúčové slová

*Viaccestné šírenie signálu, kinematické určovanie polohy, opakovanie konfigurácie družíc GPS, detekcia a eliminácia multipath*

## 1 ÚVOD

Efekt viaccestného šírenia družicového signálu (všeobecne sa pre tento efekt používa termín multipath, prevzatý z anglického jazyka, *Misra a Enge, 2001*) je sprievodným javom meraní pomocou globálnych družicových navigačných systémov uskutočňovaných na povrchu Zeme. Ovplyvňuje merania kódov vysielaných družicami GNSS, merania fáz nosných vln ako aj merania intenzity prijatého signálu vo forme pomeru signálu a šumu (SNR – Signal to Noise Ratio). Veľkosť efektu multipath závisí od rozmiestnenia odrazových plôch v okolí antény prijímača GNSS, konštrukcie antény, softvéru prijímača, ako aj od aktuálnej polohy meranej družice (azimut družice a jej výška nad horizontom). Okamžitý vplyv multipath je v určitej epoche merania pre každú družicu rozdielny, nakoľko je funkciou smeru na konkrétnu družicu. Zmeny efektu multipath v čase sú však pre konkrétnu družicu len pozvoľné.

Systematický vplyv multipath pri určovaní polohy využitím statických metód merania a spracovania GNSS je v značnej miere redukovaný vzhľadom na to, že počas merania

---

<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., +421259274348, [lubomira.gerhatova@stuba.sk](mailto:lubomira.gerhatova@stuba.sk)

<sup>3</sup> Ing. Juraj Papčo, PhD., +421259274345, [juraj.papco@stuba.sk](mailto:juraj.papco@stuba.sk)

dochádza k postupným zmenám konfigurácie pozorovaných družíc. Súradnice určené z dlhodobého záznamu družíc sú preto ovplyvnené len minimálne, nakoľko vo výslednej polohe sa uplatní len stredná hodnota efektu multipath v rámci celého intervalu merania. Pri kinematickom meraní je každé určenie polohy výsledkom spracovania aktuálnej konfigurácie družíc. Preto sú súradnice v epoche merania systematicky ovplyvnené kombináciou multipath pozorovaných družíc, pričom veľkosť výsledného efektu sa postupne v čase mení.

V článku sa venujeme možnostiam detekcie multipath v meraniach GPS: špecifickým prejavom multipath v kódových meraniach, pri absolútnom a relatívnom určovaní polohy ako aj vo variáciách intenzity družicového signálu vyjadrenej pomerom signálu a šumu. Uvedieme princíp redukcie vplyvu multipath pri kinematickom monitorovaní malých polohových zmien aplikáciou postupu, ktorý využíva špecifické prejavy multipath pri opakovaní rovnakej konfigurácie družíc GPS.

## 2 DETEKCIA MULTIPATH V MERANIACH GPS

Numerické vyjadrenie veľkosti efektu multipath v dlhodobých meraniach na konkrétnom stanovišti sa obvykle využíva ako indikátor kvality na posúdenie vhodnosti vonkajších podmienok pre merania pomocou GNSS (*Estey a Meertens, 1999*). Vychádza sa pritom z odhadov variability  $\sigma_{MP1}$  a  $\sigma_{MP2}$  veličín *MP1* a *MP2* získaných analýzou meraní všetkých pozorovaní družíc v určitom intervale. Hodnoty  $\sigma_{MP1}$  a  $\sigma_{MP2}$  vyjadrujú veľkosť vplyvu multipath v kódových meraniach na nosných vlnách L1 a L2. Charakterizovať multipath len kumulatívne, dvomi číselnými hodnotami obvykle nepostačuje na dôkladnejšie analýzy, a preto poukážeme na ďalšie možnosti indikácie prítomnosti multipath v meraniach GPS.

### 2.1 Efekt multipath v meraniach PRN kódov

Efekt multipath v meraniach pseudonáhodných kódov je pomerne jednoducho identifikovateľný a je základným indikátorom vplyvu multipath na konkrétnom stanovišti. Teoretické východiská sú uvedené v (*Estey a Meertens, 1999*). Podmienkou je súvislý interval kódových a fázových meraní na dvoch frekvenciách  $i = 1, 2$ . Rovnice pre meranie fáz  $L_i$  a kódov  $P_i$ , ktoré zohľadňujú efekt multipath ( $m_i$ , resp.  $M_i$ ), sú

$$L_i = \rho + c(\delta t^s + \delta t_r) - I_i + T + N_i \lambda_i + m_i \quad (1)$$

$$P_i = \rho + c(\delta t^s + \delta t_r) + I_i + T + M_i$$

kde  $\rho$  je vzdialenosť medzi družicou  $s$  a prijímačom  $r$ ,  $c$  je rýchlosť šírenia sa signálu,  $\delta t$  predstavuje korekcie hodín,  $I$  a  $T$  sú hodnoty vplyvu ionosféry a troposféry,  $N$  je ambiguita merania fázy s vlnovou dĺžkou  $\lambda$ . Úpravou (1), ktorá využíva skutočnosti, že hodnoty  $T$  a  $I_i$  majú rovnakú veľkosť pre merania fázy a aj kódov, ako aj toho, že vzťah medzi  $I_1$  a  $I_2$  je funkciou príslušných frekvencií nosných vln  $f_1$  a  $f_2$ , dostávame rovnice vplyvu multipath na merania na prvej (*MP1*) a druhej (*MP2*) frekvencii

$$MP1 = P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right) L_1 + \frac{2}{\alpha - 1} L_2 = M_1 + B_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right) m_1 + \frac{2}{\alpha - 1} m_2 \quad (2)$$

$$MP2 = P_2 - \frac{2\alpha}{\alpha - 1} L_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right) L_2 = M_2 + B_2 - \frac{2\alpha}{\alpha - 1} m_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right) m_2$$

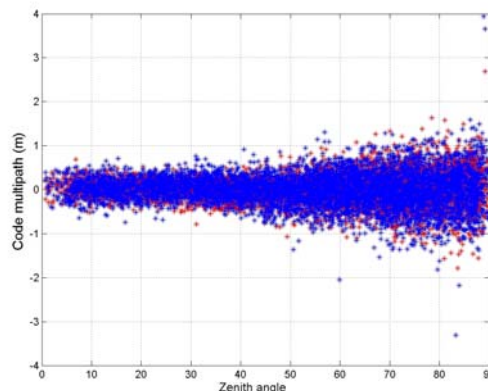
kde  $\alpha = f_1^2 / f_2^2$ . Veličiny  $B_i$  predstavujú systematické posuny v dôsledku ambiguit  $N_i$  fázových meraní a majú tvar

$$B_1 = -\left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)N_1\lambda_1 + \frac{2}{\alpha - 1}N_2\lambda_2 \quad (3)$$

$$B_2 = -\frac{2\alpha}{\alpha - 1}N_1\lambda_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right)N_2\lambda_2$$

Ak uvážime, že hodnoty  $B_i$  sú pre sériu meraní bez prerušenia záznamu fázy nosnej vlny konštantné (ambiguity  $N_i$  sú v danom intervale konštantné), variabilita  $MP1$  a  $MP2$  v čase je výlučne dôsledkom variability efektu multipath v meraniach kódov  $M_i$  a v meraniach fáz  $m_i$ . Vzhľadom na to, že multipath v meraniach fáz je významne menší ako v meraní kódov, veličiny  $MP1$  a  $MP2$  sa interpretujú ako vplyv multipath na merania kódov na prvej a druhej frekvencii. Ako reprezentatívne charakteristiky multipath sa potom využívajú odhady  $\sigma_{MP1}$  a  $\sigma_{MP2}$  variability hodnôt  $MP1$ , resp.  $MP2$  získané z meraní všetkých kontinuálnych intervalov všetkých pozorovaných družíc. Kvôli prehľadnosti grafických výstupov budeme v ďalšom prezentovať efekt multipath redukovanými hodnotami  $MP1-E[MP1]$  a  $MP2-E[MP2]$ , kde  $E$  predstavuje operátor strednej hodnoty aplikovaný na neprerušený interval fázových meraní.

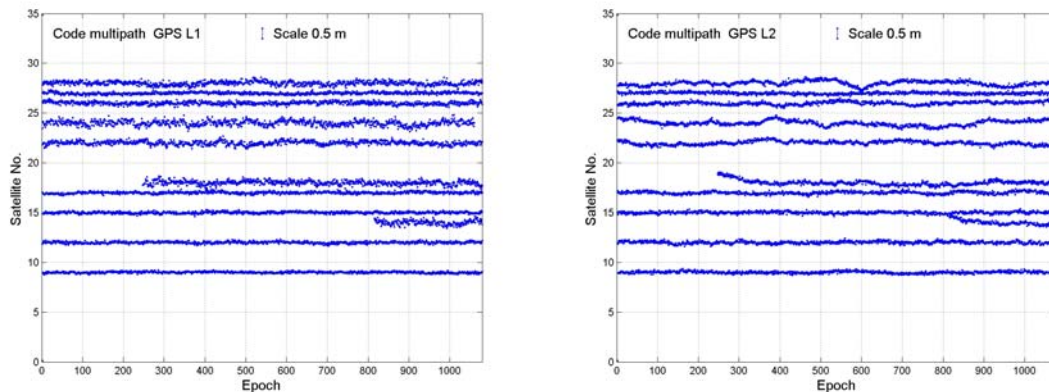
Variabilita  $MP1$  a  $MP2$  je ovplyvnená viacerými činiteľmi, najmä výškou družice nad horizontom, nakoľko multipath spôsobujú odrazy od okolitého terénu. Dokumentuje to obr. 1, na ktorom sú hodnoty  $MP1$  a  $MP2$  pre 24 h interval meraní (záznam každých 120 s) na permanentnej stanici Modra-Piesok (MOP2).



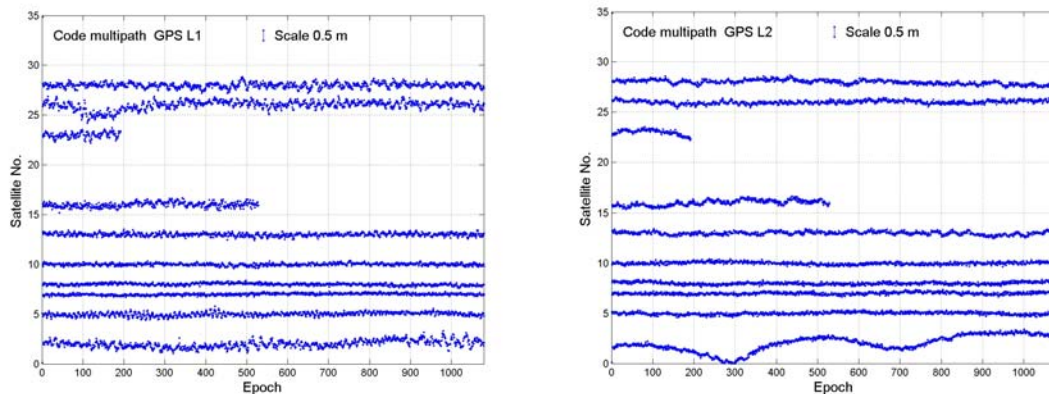
**Obr. 1** Hodnoty  $MP1$  a  $MP2$  v závislosti od zenitového uhla na družicu získané z 24 h intervalu meraní na bode MOP2.

Priebeh hodnôt  $MP1$  a  $MP2$  má rozmanitú štruktúru pre družice merané v rozličných azimutoch a výškach. Prejaví sa to najmä, ak je zobrazený priebeh 1 s záznamov meraní (v prípade malého vplyvu multipath je situácia reprezentovaná horizontálnou priamkou s minimálnou variabilitou). Na obr. 2 sú názorne vidieť rozdiely pre jednotlivé družice ako aj rozdielny charakter multipath pre dve nosné frekvencie. Ešte výraznejšie špecifiká sú na bode PIL2, ktorý sa nachádza na streche budovy Stavebnej fakulty v Bratislave (obr. 3). Pre detailný priebeh multipath je teda charakteristická závislosť od polohy družice, od frekvencie a prejavuje sa rozličnou periodicitou zmien – od desiatok sekúnd až po niekoľko minút. Súčasne sú však aj také priebehy  $MP1$  a  $MP2$ , kde je vplyv multipath prakticky zanedbateľný.

Uvedené poznatky poukazujú na to, že charakteristika multipath v kódových meraniach len na základe niekoľkých číselných údajov má obmedzenú informačnú hodnotu.



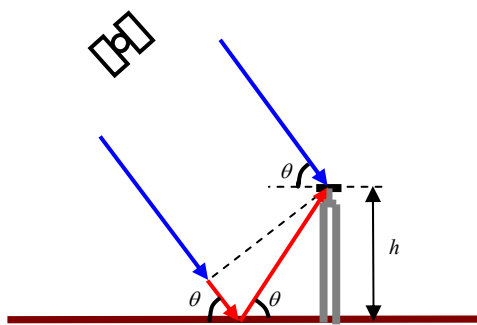
**Obr. 2** Priebeh *MP1* (vľavo) a *MP2* (vpravo) pre 11 družíc GPS meraných počas 18 minút (1 Hz záznam) na bode MOP2.



**Obr. 3** Priebeh *MP1* (vľavo) a *MP2* (vpravo) pre družice GPS merané počas 18 minút (1 Hz záznam) na bode PIL2.

## 2.2 Efekt multipath v meraniach fázy nosnej vlny

Princíp efektu multipath v meraní fázy nosnej vlny je schematicky znázornený na obr. 4. Podľa (Larson *et al.*, 2007) je anténou GPS prijímaný okrem priameho signálu družice aj signál odrazený od povrchu terénu v okolí antény. Pri výške antény  $h$  a výškovom uhle  $\theta$  smeru na družicu je dráha odrazeného signálu dlhšia v porovnaní s priamym signálom o hodnotu  $s = 2h \sin \theta$  (úsek vyznačený červenou farbou). Pri zmene výškového uhla družice v závislosti od času nastáva aj zmena hodnoty  $s$ , čo ovplyvňuje meranie fázy nosnej vlny. Pre deriváciu  $s$  podľa času platí  $\frac{ds}{dt} = 2h \cos \theta \frac{d\theta}{dt}$ . Z uvedeného vzťahu vyplýva, že v meraniach fázy nosnej vlny je okrem priameho signálu obsiahnutý aj efekt odrazeného signálu meniaci sa v čase. Veľkosť uvedeného dodatkového efektu závisí od výšky antény a znižuje sa s výškou družice nad horizontom.



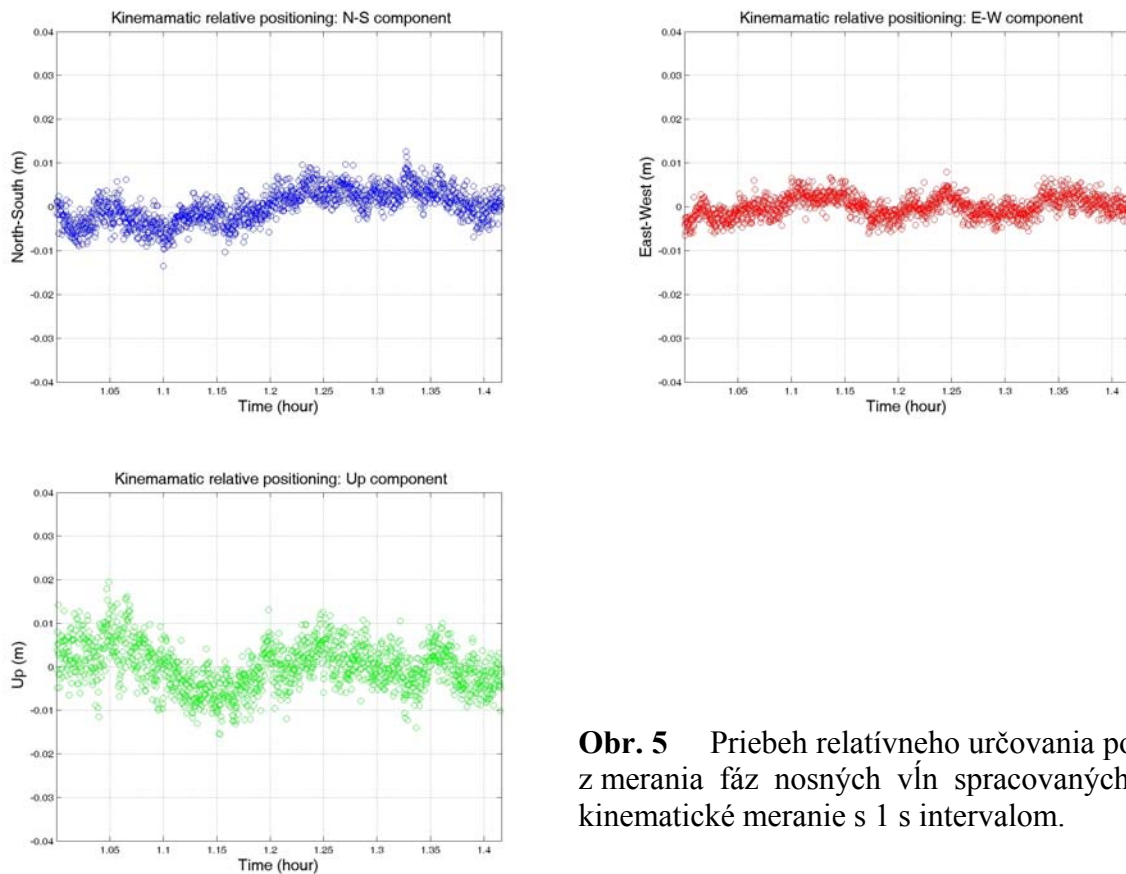
**Obr. 4** Princíp efektu multipath v pri meraní fázy nosnej vlny. Nosná vlna odrazená od horizontu prekoná dodatočnú dráhu vyznačenú červenou farbou.

Na diagnostiku vplyvu multipath  $m_i$  v meraniach fáz nosných vln  $L_i$  ( $i = 1, 2$ ) nie sú dostupné metódy, ktoré by ho priamo identifikovali a kvantifikovali samostatne pre pozorovanie každej družice. Príčinou je relatívne malá amplitúda  $m_i$  ako aj malá vlnová dĺžka nosných vln ( $\sim 0.19$  a  $0.24$  m). V práci (Billich *et al.*, 2008) sa popisuje princíp modelovania multipath v meraniach fázy nosných vln na základe periodických zmien veličiny SNR. Ide však o metódu, ktorá je aplikovateľná len v špecifických podmienkach.

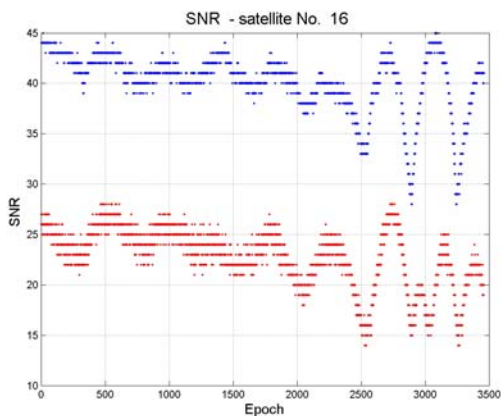
Za kumulatívny dôsledok efektu multipath v meraniach fáz jednotlivých družíc možno považovať špecifické krátkodobé variácie polohy, odvodené zo spracovania diferencovaných fázových meraní. Pri kontinuálnom meraní na dvojici pevných bodov spracovaných metódou kinematického relatívneho určovania polohy z merania fáz nosných vln s vysokou frekvenciou záznamu ( $0.2 - 1$  Hz) je oprávnené očakávať náhodne rozložené oscilácie jednotlivých určení súradníc okolo ich strednej hodnoty. Ako však dokumentujeme na obr. 5, na ktorom sú výsledky určovania súradníc N-S, E-W a elipsoidickej výšky počas 25 minút na základnici dlhej 400 m, systematické zmeny v časových radoch prevládajú nad náhodnými osciláciami. Uvedené výsledky sa získali výlučne spracovaním fázových meraní na frekvencii L1. Vzhľadom na malú dĺžku základnice a relatívne krátky interval meraní, systematický vplyv ionosféry a troposféry je v tomto prípade nevýznamný.

### 2.3 Efekt multipath v meraniach intenzity družicového signálu

Pomer signálu a šumu družicového signálu – SNR je indikátorom kvality vysielaného signálu ako aj kvality prijímacieho zariadenia. Pri spracovaní meraní GNSS na geodetické účely sa obvykle veličina SNR nevyužíva. Ako sa však uvádza v (Larson *et al.*, 2008 a Billich *et al.*, 2008), je SNR vhodným indikátorom efektu multipath a možno ho využiť na jeho modelovanie s následnými aplikáciami pri redukcii multipath v meraniach fázy nosnej vlny. Prítomnosť multipath sa v priebehu SNR prejavuje periodickými osciláciami v meraniach družíc nízko nad horizontom. Na obr. 6 je príklad variácií SNR pre nosné frekvencie L1 a L2 na permanentnej stanici Gánovce (GANP) na základe meraní s 1 Hz záznamom. Zo znižujúcou výškou družice nad horizontom klesá intenzita signálu, zároveň však dochádza aj k periodickým zmenám so zväčšujúcou sa amplitúdou. Uvedené periodické variácie sú spôsobené efektom multipath, ich frekvencia je funkciou výšky antény nad horizontom a vlnovej dĺžky nosnej vlny. Sú detekovateľné len pri dostatočne vysokej hustote záznamu meraní GNSS (1 - 5 s).



**Obr. 5** Priebek relatívneho určovania polohy z merania fáz nosných vln spracovaných ako kinematické meranie s 1 s intervalom.



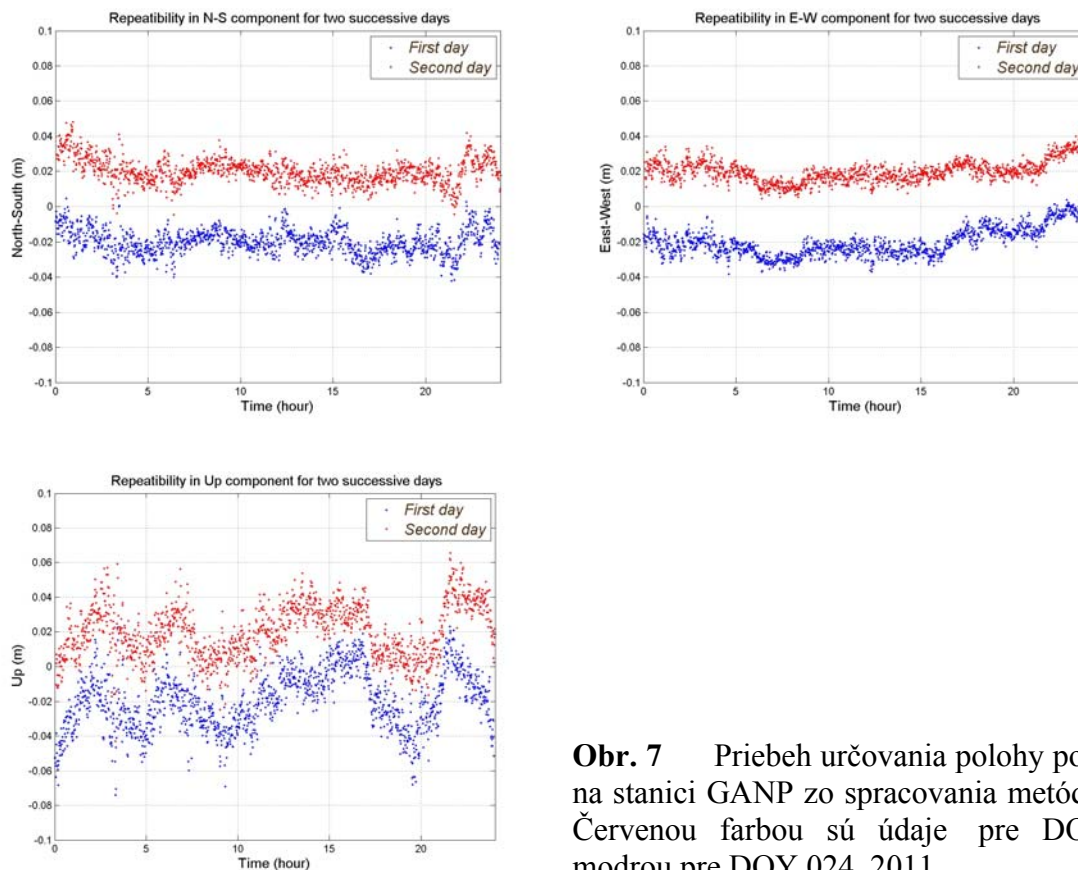
**Obr. 6** Priebek intenzity signálu pri klesaní družice k horizontu (stanica GANP, DOY 027, 2011, 17.00 – 18.00 UT, frekvencie L1 a L2).

## 2.4 Efekt multipath pri presnom určovaní absolútnej polohy (PPP)

Metóda PPP využíva na určovanie polohy kombináciu kódových a fázových meraní GNSS uskutočnených na dvoch frekvenciách (*Kouba a Héroux, 2003, Hefty et al., 2010*). Vstupnými hodnotami pri výpočte súradníc sú pseudovzdialenosti získané algoritmom, ktorý eliminuje vplyv ionosféry a ambiguity fázových meraní. Z hľadiska efektu multipath sú takto získané pseudovzdialenosti ovplyvnené kombináciou aktuálnych hodnôt  $M_i$  a  $m_i$ , pričom však príspevok jednotlivých zložiek ( $M_1, m_1, M_2, m_2$ ) nemožno vzájomne vyčleniť. Výsledný efekt sa však prejaví v priebehu súradníc rezultujúcich zo spracovania metódou PPP v kinematickom móde. Na obr. 7 sú znázornené výsledky pre permanentnú stanicu GANP: 24 h interval meraní zaznamenávaných so 60 s krokom spracovaný softvérom BV50 metódou PPP. Priebek znázornený červenou farbou je z dňa DOY 023, 2011. Priebek znázornený

modrou farbou je výsledkom spracovania nasledujúceho dňa (DOY 024, 2011). Pre lepšiu názornosť sú zobrazené časové rady súradníc vzájomne posnuté o 0.04 m.

Z obr. 7 je zrejmé, že pre priebeh určovania všetkých 3 zložiek súradníc GANP sú charakteristické systematické variácie, ktoré v horizontálnej polohe dosahujú 0.04 m a vo výške až 0.08 m. Veľmi dôležitý je však aj poznatok, že variabilita počas po sebe nasledujúcich dní má podobný priebeh. Táto skutočnosť potvrdzuje, že hlavnou príčinou uvedených systematických zmien je efekt multipath a jeho opakovanie vzhľadom na opakovanie sa rovnakej konštelácie družíc GPS po 24 h hviezdneho času.



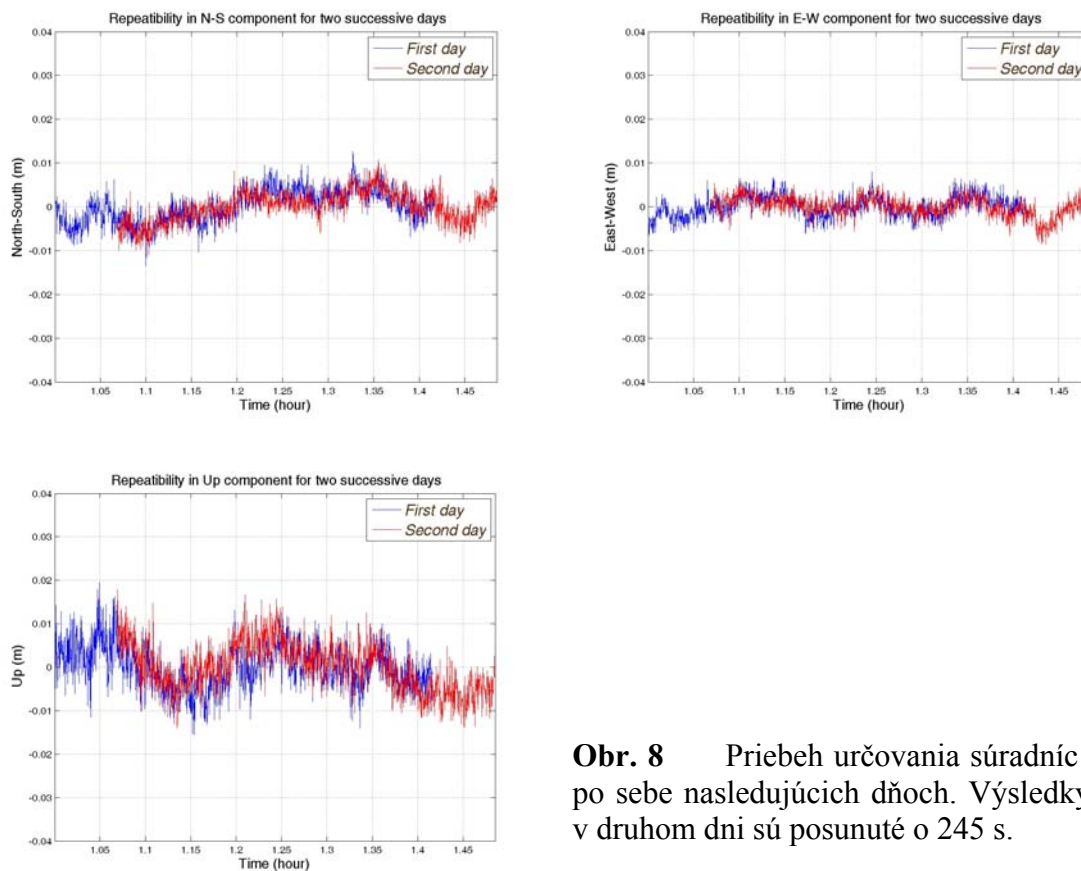
**Obr. 7** Priebeh určovania polohy počas 24 h na stanici GANP zo spracovania metódou PPP. Červenou farbou sú údaje pre DOY 023, modrou pre DOY 024, 2011.

### 3 ELIMINÁCIA MULTIPATH METÓDOU FILTRÁCIE NA BÁZE OPAKOVANIA KONŠTELÁCIE DRUŽÍC GPS

Poznatok, že systematické zmeny v určovaní polohy sa vzájomne podobajú pri opakovaní meraní pri rovnakom geometrickom rozložení družíc nad horizontom pozorovacieho miesta, vedie k metóde eliminácie (resp. významnej redukcii) vplyvu multipath pomocou filtrácie využívajúcej dlhodobé merania na určitom stanovišti. V práci (Choi et al., 2004) sa tento princíp nazýva „sidereal filtering“, keďže je postavený na využití rovnakej konštelácie GPS po uplynutí jedného hviezdneho dňa (24 h hviezdneho času  $\sim 24$  h stredného slnečného času mínus 236 s). V skutočnosti nastane opakovanie rovnakej polohy družíc o  $\sim 9$  s skôr, nakoľko dochádza k stáčaniu dráhových rovín družíc GPS o  $\sim 140''$ /deň. Spoločlivú hodnotu časového intervalu opakovania rovnakej konštelácie získame analýzou časových radov kontinuálneho určovania polohy. Eliminácia multipath je vhodná pre absolútne aj relatívne určovanie

polohy. Podmienkou je možnosť analýzy časových radov súradníc získaných v rovnakom čase po uplynutí 24 h hviezdneho času na rovnakom pozorovacom stanovišti.

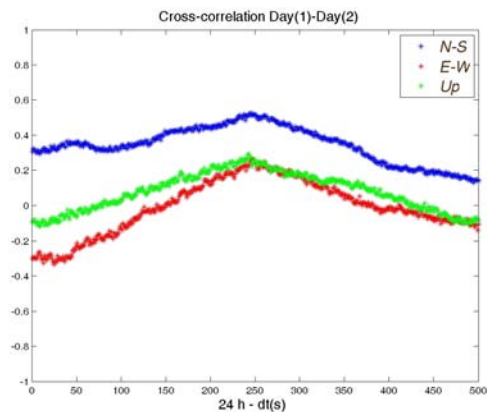
Metódu filtrácie budeme demonštrovať na priebehu výsledkov relatívneho určovania polohy znázornených na obr. 5 (základnica medzi objektmi STU na Mýtnej ul. a na Námestí slobody). Využijeme merania uskutočnené v dvoch po sebe nasledujúcich dňoch (DOY 135 a 136, 2011). Na obr. 8 sú časové rady súradníc N-S, E-W a výšky, s tým, že výsledky meraní v druhom dni sú vynesené s posunom o 245 s. Opakovanie systematických zmien v priebehu všetkých troch súradnicových zložiek je jednoznačne identifikovateľné a potvrdzuje hypotézu, že je výsledkom pôsobenia efektu multipath. Až na niekoľko krátkych intervalov sa časové rady prekrývajú v rozsahu do 5 mm.



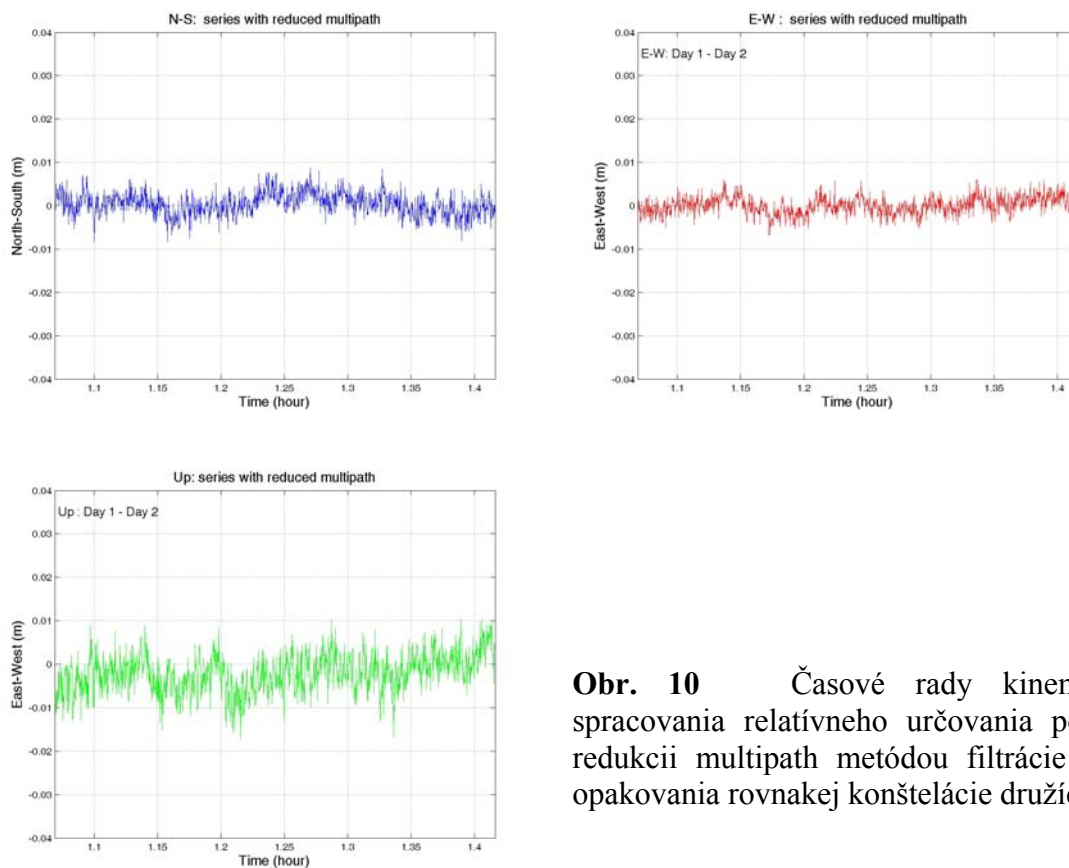
**Obr. 8** Priebeh určovania súradníc v dvoch po sebe nasledujúcich dňoch. Výsledky meraní v druhom dni sú posunuté o 245 s.

Na stanovenie presných hodnôt posunov medzi uvedenými časovými radmi využijeme odhad koeficientu vzájomnej korelácie. Na obr. 9 je priebeh koeficientov vzájomnej korelácie medzi meraniami v dvoch po sebe nasledujúcich dňoch v intervale od 24 h do 23 h 08 min. Hodnoty maxim sú 24 h – 246 s (N-S), 24 h – 249 s (E-W), 24 h – 244 s (výška). Eliminácia efektu multipath sa uskutoční odčítaním priebehov súradníc v zodpovedajúcich si okamihoch po uvážení príslušných časových posunov. Výsledné časové rady po aplikácii uvedenej metódy redukcie multipath sú na obr. 10. Variabilita v priebehu všetkých troch súradnicových zložiek sa významne znížila a zmenšili sa aj systematické posuny, ktoré boli dôsledkom efektu multipath.



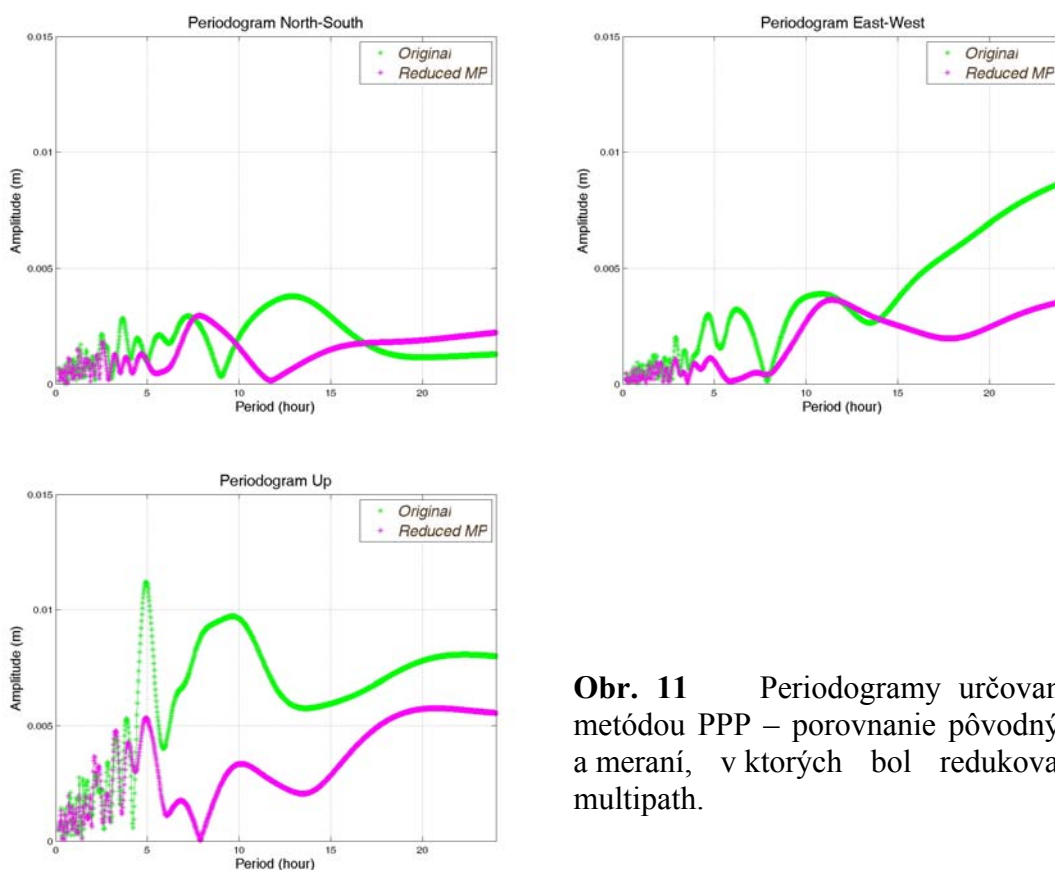


**Obr. 9** Koeficienty vzájomnej korelácie medzi priebehom súradníc v dvoch za sebou nasledujúcich dňoch.



**Obr. 10** Časové rady kinematického spracovania relatívneho určovania polohy po redukcii multipath metódou filtrácie na báze opakovania rovnakej konštelácie družíc GPS.

Uvedený postup redukcie multipath možno aplikovať ako na relatívne, tak aj na absolútne určovanie polohy. Efektívnosť metódy sa prejaví pri spracovaní dlhších intervalov meraní. Na obr. 11 sú periodogramy súradnicových zložiek N-S, E-W a elipsoidickej výšky pre 24 h interval meraní spracovaných metódou PPP (ako východiskové údaje sme použili merania na stanici GANP zobrazené na obr. 7). Periodogram originálnych meraní sa získal analýzou časových radov pre DOY 024 na obr. 7. Periodogram redukovaných meraní sa získal analýzou meraní DOY 024, v ktorých bol eliminovaný vplyv multipath pomocou filtrácie s posunom časového radu meraní v dni DOY 023 o 24 h – 240 s. Z porovnania periodogramov neredukovaných a redukovaných časových radov je zrejмый prínos eliminácie multipath pre periódy dlhšie ako 3 h. Najvýraznejší efekt má redukcia multipath pre zložku vo výške.



**Obr. 11** Periodogramy určovania polohy metódou PPP – porovnanie pôvodných meraní a meraní, v ktorých bol redukovaný vplyv multipath.

## 4 ZÁVER

Viacsmerné šírenie sa signálu GNSS je systematickým vplyvom, ktorého prejavy sú výrazné najmä pri kinematických metódach určovania polohy, resp. pri meraniach signálov GNSS zaznamenaných s vysokou frekvenciou. Preukázané efekty v meraniach kódov GPS, meraniach SNR, ako aj pri relatívnom aj absolútnom určovaní polohy dokumentujú, že z krátkodobého hľadiska spôsobuje multipath systematické variácie meraných veličín s časovým účinkom v intervale od desiatok sekúnd až po desiatky minút. Charakter pozorovaných variácií je veľmi rozmanitý – každá lokalita sa vyznačuje špecifickým priebehom a významná je aj závislosť od azimutu a zenitového uhla meranej družice. Na zníženie vplyvu multipath pri kinematickom určovaní polohy možno využiť merania GPS pri opakujúcom sa rovnakom rozložení družíc. Uvedená metóda sa uplatní, ak sa kinematický monitoring využíva na detekciu malých polohových zmien, napr. sledovanie dynamiky inžinierskych konštrukcií – výškových stavieb, mostov alebo pri analýze seizmických efektov. Metóda nie je účinná, ak nemožno zabezpečiť meranie pri opakujúcej sa konfigurácii družíc GPS. Významné je však poznanie, že výsledky kinematického určovania polohy z krátkych intervalov meraní (v trvaní od niekoľkých sekúnd po niekoľko minút) sú systematicky ovplyvnené, pričom v našich analýzach odchýlky od výsledkov statického spracovania dosiahli 0.02 m v horizontálnej polohe a 0.04 m vo výške.

## Pod'akovanie

Tento článok vznikol pri riešení projektu 1/1108/11 finančne podporeného Vedeckou grantovou agentúrou VEGA MŠŠaM SR a SAV

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

- Billich, A., Larson, K.,M., Axelrad, P., 2008: Modelling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Bolivia. *Journal of geophysical research*, Vol.113, B04401, s.
- Choi, K., Billich, A., Larson, K.,M., Axelrad, P., 2004: Modified sidereal filtering: Implications for high-rate GPS positioning. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L22608.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M. (eds.), 2007: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Bern, Astronomical Institute, University of Berne. 612 p.
- Hefty, J., Gerhátová, L., Burgan, J., 2010: Presné určovanie absolútnej polohy – nezávislé riešenia GPS a GLONASS. In: *Globálne navigačné družicové systémy ako efektívny prostriedok na určovanie priestorovej polohy*. Bratislava, SSGK, s. 31-41.
- Kouba, J., Héroux, P., 2001: Precise Point Positioning Using IGS orbits and Clocks Products. *GPS Solutions*, 5 (2), 12-28.
- Larson, K.,M. – Small, E., E. - Gutmann E. – Billich, A. – Axelrad, P. – Braun, J., 2008: Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. *GPS Solutions*, 12. S. 173 – 177.
- Larson, K., M. – Braun, J. – Small, E. – Zavorotny, V., U. – Gutmann, E. – Billich, A.. 2010: GPS Multipath and Its relation to Near-Surface Soil Moisture Content. to measure soil moisture fluctuations. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth. Obs. Rem. Sens.*
- Misra, P. - Enge, P., 2001: *Global Positioning System. Signals, Measurements, and Performance*. Ganga-Jamuna Press, Lincoln, Massachusetts, USA. 391 s.