

# Detekcia polohových zmien v takmer reálnom čase na základe kontinuálnych meraní GNSS

Juraj Bezručka – Ján Hefty

Katedra geodetických základov, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11  
813 68, Bratislava, Slovensko  
[juraj.bezruccka@stuba.sk](mailto:juraj.bezruccka@stuba.sk)  
[jan.hefty@stuba.sk](mailto:jan.hefty@stuba.sk)

**Abstrakt.** Permanentné siete GNSS poskytujú údaje z kontinuálnych meraní s veľmi krátkym oneskorením. Pri takýchto meraniach je potrebné pravidelne monitorovať polohu permanentných staníc, aby bolo možné včas odhaliť jej prípadnú zmenu. Predkladaný článok popisuje spracovanie údajov nameraných permanentnými stanicami GNSS v takmer reálnom čase a analýzu výsledkov. Základným prostriedkom analýzy určených súradníc je Kalmanov filter, ktorý aktualizuje odhad polohy stanice s každým novým meraním. Pomocou štatistických testov sa vyhodnotí rozdiel predpovedanej a skutočnej polohy a na zvolenej hladine významnosti sa určí či nastala zmena.

**Kľúčové slová:** permanentná stanica, GNSS, detekcia zmien, Kalmanov filter, spracovanie v takmer reálnom čase

**Abstract.** Permanent GNSS networks provide almost un-delayed continual observational data. The station position should be regularly checked to immediately discover the possible changes. This paper deals with processing of GNSS observations obtained from network of permanent stations in near real time approach. The essential part of the analysis is the Kalman filtering, an algorithm updating station position estimate every epoch when new observation is available. By using the standard statistic tests it is enabled to evaluate the apriori residuals and at chosen significance level to test the hypothesis if the position did change.

**Keywords:** permanent station, GNSS, Kalman filter, near real time processing, sudden change detection

## 1 Úvod

Nové technológie nám umožňujú stále rýchlejší prístup k čoraz väčšiemu objemu údajov. Ich kvalifikované spracovanie a interpretácia môžu priniesť novú kvalitu informácií s vysokou aktuálnosťou. Týka sa to takmer všetkých odvetví ľudskej činnosti a geodézia nie je výnimkou. Národné permanentné polohové služby GNSS vo všeobecnosti poskytujú údaje z kontinuálnych meraní uskutočňovaných v sekundových intervaloch a prakticky v reálnom čase. Presnosť určených súradníc je však obmedzená na úroveň niekoľkých centimetrov vzhľadom na použitie vysielaných efemeríd družíc GNSS a obmedzeného modelovania systematických

efektov. Trend skracovania intervalu medzi okamihom uskutočnenia merania a jeho poskytnutím používateľom je v súčasnosti charakteristický aj pre kontinentálne permanentné siete vedeckého charakteru akou je Permanentná sieť EUREF (EPN). Väčšina zo zúčastnených 200 staníc poskytuje výsledky meraní v hodinových intervaloch. V rámci projektu EUREF-IP, na ktorom sa podieľa viac ako 100 staníc EPN, k užívateľovi prúdi tok meraní s oneskorením len niekoľko sekúnd. Súčasne sa skracuje aj interval spracovania meraní v analytických centrách permanentných sietí. V rámci Medzinárodnej služby GNSS (IGS) sú k dispozícii tzv. rýchle a ultrarýchle efemeridy družíc ako aj parametre orientácie Zeme, ktoré sa vyznačujú výrazne vyššou presnosťou a integritou v porovnaní s hodnotami obsiahnutými v navigačnej správe vysielanej družicami GNSS.

V tejto práci sa venujeme problematike spracovania permanentných meraní GNSS v takmer reálnom čase so snahou o získanie sub-centimetrovej presnosti v okamžitých súradniciach monitorovacích staníc GNSS. Predpokladáme, že takto získané aktuálne súradnice sa použijú na detekciu možných pohybov v polohe stanice, prípadne odhalenie technických problémov observačného zariadenia, s cieľom vytvoriť monitorovací a varovný systém na báze GNSS. Pri spracovaní a testovaní časových radov súradníc použijeme algoritmus Kalmanovej filtrácie. Tento postup umožňuje efektívny odhad aktuálnej polohy z výsledkov meraní ovplyvnených náhodnými aj systematickými chybami, pričom výpočet parametrov sa aktualizuje vždy po dodaní nových údajov.

V článku je opísaný postup spracovania a následná analýza permanentných sietí GNSS v takmer reálnom čase s použitím ultrarýchlych polôh družíc. Cieľom je automatická detekcia polohových zmien permanentných staníc vo veľkosti do 1 cm s oneskorením maximálne niekoľko hodín (resp. epoch merania) za pomoci Kalmanovej filtrácie a štandardných štatistických testov.

## 2 Spracovanie údajov z permanentnej siete GNSS

Lokálne analyzačné centrum na Katedre geodetických základov Stavebnej fakulty STU (LAC SUT) vykonáva rutinné spracovanie údajov EPN v týždňových intervaloch v zmysle metodiky prijatej Centrálnym úradom EPN. V súčasnosti prebieha na LAC SUT testovacia prevádzka nového produktu - ultrarýchleho spracovania meraní permanentných staníc GNSS. Základnou požiadavkou realizácie takéhoto produktu je prístup k aktuálnym výsledkom observácií GNSS na permanentných stanicách. V prípade blízkeho spracovania ide o hodinové **observačné súbory** vo výmennom formáte RINEX. Zvyčajne sa poskytujú v hodinových intervaloch s oneskorením do 20 minút. Je možné ich získať pomocou protokolu FTP z lokálnych dátových centier EPN. Tieto súbory bývajú komprimované okrem tradičných kompresných nástrojov aj kompresiou, vyvinutou Hatanakom špeciálne pre tento druh údajov.

Ďalším dôležitým prvkom vo výpočte sú **efemeridy družíc**, ktoré udávajú presnú polohu družíc. IGS produkuje každých šesť hodín ultrarýchle efemeridy, ktoré obsahujú aj predikovanú zložku. [3]

Z **parametrov orientácie Zeme** sú pre riešenie GNSS dôležité najmä poloha zemského pólu ( $x,y$ ) a rozdiel medzi rotačným a koordinovaným časovým systémom (*DUT1*). Tieto určuje Medzinárodná služba rotácie Zeme a referenčných rámcov (IERS) a pre potreby ultrarýchleho spracovania je možné využiť ich predikované hodnoty. Všetky spomenuté údaje možno stiahnuť pomocou protokolu FTP.

Nakoľko názvy vstupných súborov sú odlišné pre finálne, rýchle a ultrarýchle produkty IGS, vyvinuli sme program *getdata*, ktorý zabezpečuje po ich stiahnutí premenovanie na štandardné názvy. Takto sa uľahčí prechod medzi rôznymi typmi spracovania nameraných údajov a dovoľuje použiť jednotnú metodiku.

Výpočet polôh permanentných staníc prebieha vo vedeckom softvéri Bernese 5.0, vyvinutom na Astronomickom inštitúte Bernskej univerzity [5]. Softvér umožňuje do výpočtu zakomponovať sofistikované procedúry, ktoré spresňujú odhad parametrov, akými sú riešenie ambiguit, eliminácia lokálnych vplyvov ionosféry a troposféry, eliminácia vplyvu polohy a variácie fázových centier antén prijímačov a družíc GNSS a i. Vyrovnanie prebieha metódou najmenších štvorcov ako výpočet siete s jedným referenčným bodom vzťahnutým k aktuálnej epoche v ITRF2005. Základnice sú definované v samostatnom súbore, ktorý sa generuje na základe predchádzajúcej analýzy vstupných observačných súborov. V prípade malého počtu meraní je stanica vylúčená zo spracovania. Všetky kroky výpočtov sú automatizované a nevyžadujú zásah operátora.

Výsledkom výpočtu sú súradnice staníc permanentnej siete a ich kovariančná matica. Výsledné parametre sa generujú v špeciálnych alfanumerických formátoch, ako aj v výmennom formáte SINEX.

### 3 Kalmanov filter

Kalmanov filter je algoritmus vyvinutý v roku 1960 [6], ktorý umožňuje spracovávať opakované merania. Nakoľko algoritmus je rekurzívny, všetky predchádzajúce vstupné údaje sú zhrnuté v poslednom odhade a tvoria tak okrem nového merania jediný vstup do nového cyklu. Znamená to, že na rozdiel od klasickej metódy najmenších štvorcov sa takto vyhneme inverzii veľkých matic, pretože použijeme vždy len kovariančnú maticu aktuálnych meraní a kovariančnú maticu parametrov z posledného odhadu. Princíp Kalmanovho filtra spočíva v dvoch základných krokoch: predikcia a aktualizácia.

**Predikcia** predpovedá na základe posledného odhadu hodnoty platné pre aktuálnu epochu podľa nasledujúcich vzťahov [9]

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \Phi_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \Phi_k \mathbf{P}_{k-1}^+ \Phi_k^T + \mathbf{Q} \quad (2)$$

kde  $\hat{\mathbf{x}}$  predstavuje odhad určovanej veličiny,  $\mathbf{P}$  jeho kovariančnú maticu,  $\mathbf{Q}$  je kovariančná matica bieleho šumu, ktorou charakterizujeme variabilitu meraní spôsobenú nedokonalosťou meracích prístrojov a vplyvom prostredia. Symbolom je  $\Phi$  je označená tranzitná matica, ktorá definuje matematický vzťah medzi stavom systému v predchádzajúcej epoche a stavom v aktuálnej epoche. Pri statických alebo kvázi-statických veličinách (ako napríklad súradnice s konštantnými zmenami) je možné tranzitnú maticu považovať za jednotkovú. Spodný index označuje epochu, ku ktorej sa daná veličina vzťahuje, zatiaľ čo horný index predstavuje stav pred (-) alebo po (+) aktualizácii odhadu.

**Aktualizácia** (update) je druhým krokom Kalmanovho filtra, kedy na základe nového merania vylepšíme – aktualizujeme – predchádzajúci odhad. Hlavnú úlohu zohráva matica prírastkov  $\mathbf{K}$  (Kalman gain [4], reťazová matica [8]), ktorá vyjadruje váhu posledného merania vzhľadom na predchádzajúci odhad

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (3)$$

kde  $\mathbf{R}_k$  je kovariančná matica meraní a  $\mathbf{H}$  je matica plánu, ktorá vyjadruje vzťah medzi nameranými hodnotami  $\mathbf{z}_k$  a odhadovanými  $\hat{\mathbf{x}}_k$ .

Aktualizovaná hodnota odhadovanej veličiny sa určí podľa vzťahu

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (4)$$

kde člen  $(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-)$  nazývame apriórnym reziduom, pretože predstavuje rozdiel medzi predpovedanou a skutočne nameranou hodnotou.

Kovariančnú maticu aktualizujeme podľa vzťahu

$$\mathbf{P}_k^+ = \mathbf{I} - (\mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (5)$$

kde  $\mathbf{I}$  predstavuje jednotkovú maticu.

## 4 Detekcia polohových zmien

V kapitole 2 sme uviedli základné informácie o postupe spracovania ktorým získame súradnice permanentnej stanice a ich kovariančnú maticu v takmer reálnom čase. Táto časť procesu je v súčasnosti vyriešená a algoritimizovaná. Získané údaje spolu s predchádzajúcim odhadom parametrov (referenčná poloha a rýchlosť stanice)

vstupujú do Kalmanovho filtra, aby sa aktualizovali odhadované parametre na základe novo uskutočnených observácií.

Základným princípom detekcie polohových zmien je porovnanie aktuálnych hodnôt získaných pridaním najnovších meraní s ich predikciou na základe Kalmanovho filtra. V tejto súvislosti treba vyriešiť ešte niektoré problémy. LAC SUT používa jednu referenčnú stanicu, ku ktorej sú vzťahnuté odhadnuté polohy ostatných staníc. Apriórne súradnice referenčnej stanice sa počítajú z rýchlostného modelu EPN a nie sú teda predmetom vyrovnania. Pri detekcii posunov jednotlivých bodov je treba najprv overiť, či nedošlo k posunu referenčného bodu. Zmenu polohy referenčnej stanice možno zistiť porovnaním polôh ostatných staníc, alebo ich podmnožiny. Na testovanie vychylenia siete možno v prvej aproximácii použiť napríklad jednoduchý kvartilový test odľahlých hodnôt [7]. V ďalších fázach bude treba aplikovať metódu, ktorá zohľadní stochastické väzby medzi testovanými súradnicami jednotlivých bodov.

Základným problémom procedúry detekcie polohových zmien je predikcia polohy stanice v zvolenej referenčnej epoche (zvyčajne epocha najbližšieho uskutočneného merania) a parametrov pohybu. V súčasnosti sa testuje lineárny model pohybu, ktorý sa štandardne využíva pri analýze sietí EPN a IGS. Modifikáciou matice plánu však možno použiť aj iný komplexnejší model, napríklad s uvažovaním kvadratického člena, periodických sezónnych variácií, prípadne ďalších parametrov. Výhodou tohto prístupu, že určované parametre sa menia len málo a tak sa dynamický problém mení na stacionárny. Vďaka tomu možno definovať viac parametrov určených ako meraní [2].

Každú hodinu  $k$  máme k dispozícii pre každú stanicu aktuálne súradnice  $\mathbf{z}_k = [X, Y, Z]^T_k$  a ich kovariančnú maticu  $\mathbf{R}_k$ . Z posledného odhadu preberieme odhadované parametre, v našom prípade súradnice v referenčnej epoche a rýchlosti stanice  $\mathbf{x}_k^- = \mathbf{x}_{k-1}^+ = [X_0, Y_0, Z_0, X, Y, Z]^T$  a ich kovariančnú maticu  $\mathbf{P}_k^-$ . Podľa vzťahov (1) – (5) určíme aktuálny odhad určených parametrov  $\mathbf{x}_k^+$  a ich kovariančnú maticu  $\mathbf{P}_k^+$ . Predpovedané hodnoty porovnáme s aktualizovanými a následne vhodným štatistickým testom (napríklad párovým  $t$  testom [1]) na zvolenej hladine významnosti zamietneme alebo nezamietneme nulovú hypotézu, t. j. či nedošlo k posunu bodu.

## 5 Záver

Zmena polohy permanentnej stanice môže významne ovplyvniť výsledky z meraní GNSS využívajúce túto stanicu ako referenčnú. Ak sa takáto zmena včas zistí, možno predísť chybám pri určovaní polôh iných objektov. V článku sme opísali postup, akým možno pravidelne overovať stabilitu permanentnej stanice, a to v takmer reálnom čase s oneskorením niekoľkých hodín. Pravidelný odhad polohy permanentnej stanice sa efektívne vykonáva pomocou Kalmanovho filtra. Pri

stanovení vhodných kritérií sa na základe rozdielu medzi predpovedanou a aktuálne určenou polohou vysloví predpoklad či k posunu došlo alebo nie.

Predložená metóda sa zatiaľ realizovala na riešení siete podmnožiny staníc EPN. Perspektívne však uvažujeme aplikácie, kde sú aktuálne informácie o zmene polohy súčasťou monitorovacieho systému, napr. pri sledovaní stability budov, mostov, inžinierskych konštrukcií, pri zosuvných územiach, seizmických procesoch a pod.

## Referencie

1. Anděl J. *Matematická statistika*. Nakladatelství technické literatury, Praha, 1978.
2. Bezručka J. *Využitie Kalmanovho filtra v geodézii a navigácii*. 2007. <http://mimmon.net/mimo/dokumenty/kalman.pdf>
3. Dow J.M. – Neilan R.E. – Gendt G. The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade. *Adv. Space Res.* 36 vol. 36, no. 3, pp. 320-326, 2005.
4. Gelb, A. et al. *Optimal Linear Estimation*. MIT Press, Boston, Mass., 1974
5. Hugentobler, U, Dach, R. and Fridez, P. (eds) *Bernese GPS software, Version 5.0*. Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2006.
6. Kalman, R.E. 1960: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D): s. 35-45.
7. Mendenhall W. – Sincich T. *Statistics for the engineering and computer sciences*. Dellen Publishing Company, San Francisco, 1988.
8. Mervart, L. Sekvenční vyrovnání, kolokace, Kalmanův filtr. *Geodetický a kartografický obzor 40/82 1994, číslo 8*. s. 155-157, Praha 1994.
9. Welch G. – Bishop G. *An Introduction to the Kalman Filter*. UNC Chapel Hill, 2001. [http://www.cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/SIGGRAPH2001\\_CoursePack\\_08.pdf](http://www.cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/SIGGRAPH2001_CoursePack_08.pdf)