

# 1 Úvod

Už od svojich začiatkov priniesli globálne navigačné družicové systémy (GNSS) geodetom silný nástroj s novými možnosťami na určovanie geodetických veličín. Možnosť merať vzdialenosti bez priamej viditeľnosti alebo priamo merať geocentrické karteziánske súradnice bola nevídaným prínosom. Posledné roky sme svedkami nebývalého technologického pokroku, ktorý postupne umožňoval získavať merania zo staníc kontinuálne poskytujúcich údaje s čoraz kratším oneskorením a intervalom záznamu.

V polovici 90. rokov minulého storočia permanentné stanice poskytovali denné merania s oneskorením aj niekoľko hodín či dní. Následné spracovanie týchto údajov a ich analýza zabrali ďalšie hodiny, alebo dokonca dni. V súčasnosti je štandardom poskytovanie hodinových údajov alebo 15-minútových vysokofrekvenčných observácií s oneskorením len niekoľko minút. Údaje s takouto latenciou je možné spracovávať v priebehu niekoľkých minút každú hodinu a následnú analýzu je možné vykonať ihneď po ukončení vyrovnania siete.

Táto dizertačná práca sa zaoberá problematikou spracovania permanentných sietí GNSS v takmer reálnom čase a následnou analýzou výsledkov. Súčasťou práce je aj automatizácia celého procesu spracovania údajov z GNSS sietí pomocou softvéru Bernese a vývoj vlastného softvéru na analýzu výsledkov. Táto analýza je založená na Kalmanovom filtri, práca teda oboznamuje aj s možnosťami tohto algoritmu ako principiálne jednoduchšej metódy na predikciu budúcich hodnôt a detekciu odchýlok. Hlavným cieľom analýzy je konštatovanie, či v polohe staníc permanentnej siete GNSS nastala zmena. Detekcia takejto chyby v čo najkratšom čase je v záujme všetkých jej používateľov, nakoľko nesprávne určené súradnice stanice fixovanej pri spracovaní meraní post-processingom ovplyvnia absolútnu polohu všetkých nameraných objektov, na výpočet ktorých bola použitá spomenutá permanentná stanica. Časť softvérového vybavenia sa z miernymi modifikáciami už používa na iných projektoch, analyzačná časť bola otestovaná na rôznych aplikáciách.

## 2 Súčasný stav v oblasti spracovania meraní permanentných staníc GNSS

### **Družicové systémy na určovanie polohy a presného času**

Pod označením GNSS alebo Globálne navigačné družicové systémy (Global Navigation Satellite Systems) rozumieme sústavu alebo sústavy umelých družíc Zeme vypustených za účelom určovania polohy pozorovateľa, navigácie a poskytovania informácie o presnom čase používateľom vybaveným špeciálnymi prijímacími zariadeniami. [13]

Navigačné družicové systémy možno rozdeliť do niekoľkých kategórií: základné družicové systémy (GPS, GLONASS, Galileo), globálne SBAS (rozširujúce družicové systémy – Omistar, Stafire), regionálne SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS), regionálne družicové navigačné systémy (QZSS, Beidou, IRNSS). Označením GNSS v tejto práci rozumieme len základné družicové systémy.

## **Permanentné siete GNSS**

Permanentnými sieťami GNSS rozumieme sieť staníc, na ktorých prebieha meranie GNSS signálov nepretržite a sú spracovávané spoločne. Jednou z najväčších sietí je sieť medzinárodnej služby pre GNSS (IGS). Produktami tejto služby sú efemeridy družíc GNSS, rotačné parametre Zeme a ďalšie údaje. Jednou z najdôležitejšou časťou sú práve presné ultrarýchle efemeridy družíc [4], ktoré umožňujú spracovanie sietí v takmer reálnom čase.

Zaujímavým projektom Permenentnej siete EUREF (EPN) bol v rokoch 2002-2007 EUREF-IP. Tento experiment mal povzbudiť užívateľov k využívaniu produktov v reálnom čase. V súčasnosti už veľká časť staníc siete EPN prispieva aj dátovým tokom v reálnom čase. [6]

V našom prostredí je nám najbližšia sieť Slovenskej Priestorovej Observačnej Služby pod názvom SKPOS. [7]

## **LAC SUT**

Astronomicko-geodetické observatórium Katedry geodetických základov na Stavebnej fakulte STU v Bratislave sa v roku 2002 stalo 16. lokálnym analyzačným centrom EPN. Vtedy spracovávalo údaje z 25 permanentných staníc s týždňovým intervalom. V súčasnosti (august 2010) je to 47 staníc. Okrem EPN vykonáva výpočty na stredo európskej sieti CERGOP, do ktorej je zapojených mnoho staníc EPN, ale aj ďalšie lokálne zhusťujúce permanentné stanice. Táto sieť je počítaná okrem týždňového intervalu aj s hodinovým intervalom. Tieto údaje sú ďalej spracovávané v projekte GPS meteorológie [15], výsledkom ktorého sú meteorologické modely obsahu vodných pár v atmosfére. [26] Tento projekt čiastočne využíva programové vybavenia vytvorené k tejto dizertačnej práci.

## **Softvéry na spracovanie meraní GNSS**

Na spracovanie observácií GNSS možno použiť množstvo rôznych softvérov. Tieto spravidla delíme na vedecké a firemné softvéry.

Firemné softvéry poskytujú výrobcovia prijímačov GNSS k svojim produktom. Takéto softvéry poskytuje napríklad firma Trimble (Trimble Geomatics Office), Leica (Leica Geo Office) a iné.

Z vedeckých softvérov môžeme spomenúť napríklad softvérový balík GIPSY-OASIS. Systém charakterizuje centimetrová presnosť, automatizácia spracovania meraní, inovatívne analýzy a samostatný balík pre reálny čas [25]. Softvér sa využíva na určovanie dráh družíc, presné určovanie polohy a času, filtrovania a vyhladzovanie údajov, nasadenie v aplikáciách v reálnom a blízko reálnom čase. Umožňuje použitie modelov tiažových porúch, zahŕňa gravitačný vplyv kozmických telies, tlak slnečného žiarenia, trenie, empirické modely.

Ďalším vedeckým softvérom je Bernský GPS softvér (Bernese GPS Software, ďalej Bernese), sofistikovaný nástroj spĺňajúci najvyššie štandardy geodetických a iných aplikácií využívajúcich signály družicových systémov GPS a GLONASS. [14] Program Bernese bol tiež použitý pri riešení

úloh tejto dizertačnej práce. Najdôležitejšími časťami softvéru sú program ADDNEQ2 slúžiaci na kombinovanie normálnych rovníc pre efektívne spracovanie viac-epochových meraní a BPE (Bernese Processing Engine), nástroj, ktorý beží nad ostatnými programami a riadi celý proces výpočtu.

### **Monitorovanie polohových zmien a deformácií pomocou GNSS**

Myšlienka využiť GPS alebo neskôr GNSS na sledovanie polohových deformácií je zrejme takmer rovnako stará ako samotné navigačné systémy. Vďaka rýchlym prenosovým rýchlostiam a výpočtovej technike je dnes sledovanie území, v ktorých môže dojsť k polohovým zmenám, možné dokonca v reálnom alebo takmer reálnom čase.

V roku 2003 bol predstavený systém ALERT [2, 23], vyvinutý na Univerzite v Novom Brunswicku, na plne automatizovaný monitoring zosuvových a iných území pomocou meraní robotických totálnych staníc. Tento systém bol úspešne zavedený v oblastiach s intenzívnou ťažbou, na monitoring zosuvových svahov, na vodných nádržiach a ďalších projektoch.

Okrem vedeckých aplikácií vyvíjajú podobné softvéry aj firmy. Trimble Integrity Manager [21] umožňuje nastavenie veľkosti pre detekciu posunu. Užívateľ si môže zvoliť monitoring v reálnom čase alebo v takmer reálnom čase. Leica CrossCheck [17] je softvér vychádzajúci z algoritmov Bernského softvéru. Výsledky monitoringu sú k dispozícii v takmer reálnom čase.

## **3 Ciele dizertačnej práce**

Jedným cieľom tejto práce je umožniť riešenie permanentnej siete GNSS v takmer reálnom čase pomocou programového vybavenia, ktoré zabezpečí pravidelné sťahovanie nameraných údajov z dátových centier a kontrolu ich integrity, získavanie iných údajov potrebných pre výpočet, konfiguráciu nastavení pre aktuálnu epochu výpočtu a spustenie samotného výpočtu permanentnej siete. Hlavným cieľom práce je však následná analýza výsledkov vyššie uvedeného procesu.

Dizertačnú prácu možno rozdeliť na niekoľko čiastkových úloh smerujúcich k splneniu hlavného cieľa:

1. Automatizácia prevádzky permanentnej stanice.
2. Automatizácia analyzačného centra - zabezpečenie observačných súborov staníc permanentnej siete a iných údajov potrebných pre výpočet, kontrola integrity týchto súborov, návrh siete na základe analýzy kvality údajov a následný výpočet pomocou programu Bernese.
3. Teoretický návrh metodiky analýzy výsledných údajov pomocou Kalmanovho filtra.
4. Načítanie výstupov programu Bernese.
5. Vytvorenie algoritmu na kontrolu integrity jednotlivých staníc permanentnej siete ako i integrity siete ako celku.

6. Vytvorenie programu a dokumentácie na spracovanie a analýzu výsledkov permanentných meraní GNSS pomocou softvéru Bernese.
7. Vytvorenie spoľahlivého modelu na odhaľovanie prípadných zmien polohy permanentnej stanice. Je potrebné nájsť kompromisné riešenie, ktoré bude dosť citlivé, aby odhalilo i malé posuny, no aby bolo schopné zabrániť falošným poplachom.

## 4 Automatizované spracovanie meraní permanentných staníc GNSS

Program Bernese umožňuje pokročilé nastavenia spracovania nameraných údajov permanentnej siete GNSS. Nástroj BPE umožňuje definovať súbor krokov, ktoré budú spúšťané po sebe. Aby sme však mohli využívať túto výhodu naplno, musíme docieľiť, aby sa BPE automaticky spúšťal v pravidelných intervaloch. Na tento účel slúži jednoduchý skript od autorov Bernese, ktorý autor tejto práce modifikoval pre potreby spracovania v takmer reálnom čase.

Výsledkom spracovania observácií permanentných staníc GNSS pomocou softvéru Bernese sú, okrem iných, odhadnuté súradnice staníc a im prislúchajúca kovariančná matica.

### Príprava údajov pre výpočet siete permanentných staníc

Väčšina permanentných staníc siete EPN poskytuje údaje s hodinovým intervalom s oneskorením od niekoľkých sekúnd po desiatky minút. Po ukončení merania, teda po celej hodine, je spravidla potrebné surové dáta skonvertovať do nezávislého dátového formátu - rinexu, tento sa ďalej komprimuje Hatanakovou [10] a následne Unixovou (Z) kompresiou. Pre spracovateľa je rozhodujúcim okamihom stiahnutie nameraných údajov zo serveru dátového centra do spracovateľského centra. Ako kompromisné bolo zvolené oneskorenie 20 minút, v tomto čase svoje údaje poskytne väčšina permanentných staníc. Je však možné zvážiť i skrátenie pôvodne navrhnutého a používaného oneskorenia. Čakanie na aktuálne údaje je v súčasnosti najdlhšou časťou spracovania údajov permanentnej siete.

Na korektný výpočet je nutné zabezpečiť observácie (vo formáte RINEX), informácie o póle a DUT, efemeridy družíc. Vhodné je tiež zabezpečiť súbor s problémovými družicami. Stiahnutie týchto súborov zo serverov IGS, prípadne iných organizácií zabezpečujú podprogramy **getdata** a **getrinex**. Po stiahnutí observačných súborov nasleduje analýza týchto súborov a následné generovanie základníc. Tento krok zabezpečuje program **baseline**. Na kombináciu už stiahnutých a nových súborov v určitom intervale slúži program **cr4hrnx**.

### Baseline

Program **baselines** na základe analýzy súborov nameraných údajov z rôznych staníc siete navrhne vhodnú konfiguráciu siete pre výpočet. Funkcia `checkfiles()` kontroluje stiahnuté observačné rinexy. Na začiatku vygeneruje zoznam očakávaných súborov a porovná so skutočne stiahnutými

údajmi. Aktuálna verzia pomocou programu `teqc` [5] určí skutočný počet observácií v danom intervale a porovná ho s očakávaným počtom pri štandardnom intervale záznamu. Pomocou voliteľných kritérií program rozdelí súbory podľa percentuálneho podielu zrealizovaných observácií do troch kategórií, na základe ktorých určí konfiguráciu siete. Tento algoritmus je podrobne vysvetlený v [1].

Priebeh výpočtu v Bernskom softvéri riadia konfiguračné panely, špeciálne formátované súbory v ASCII formáte, ktoré slúžia na zápis premenných potrebných pre výpočet. Týmito premennými sú napr. dátum a čas začiatku merania, názvy vstupných a výstupných súborov, ktoré môžu závisieť od epochy výpočtu a ďalšie parametre. V našom riešení sú panely menené automaticky na základe predchádzajúcej analýzy. Po úprave všetkých relevantných panelov sa spustí výpočet.

## 5 Analýza výsledkov opakovaného merania permanentnej siete GNSS

Súčasným trendom v oblasti permanentných sietí GNSS, je skracovanie intervalov merania, poskytovania údajov, ich spracovania a vyhodnotenia. Klasická Gaussova Metóda najmenších štvorcov [8] už zďaleka nepostačuje na efektívne spracovanie nepretržitého toku rôznych údajov. Jedným z najvýznamnejších spôsobov spracovania údajov meraných v reálnom alebo blízko-reálnom čase je algoritmus nazvaný podľa autora Kalmanov filter. R.E. Kalman vo svojej práci [16] popísal principiálne jednoduchý optimálny rekurzívny algoritmus na spracovanie údajov [18]. Kalmanov filter (ďalej KF) umožňuje vyrovnanie meraní pomocou metódy najmenších štvorcov s možnosťou aktualizácie odhadu na základe nových meraní. Za predpokladu správneho modelu pozorovaného procesu na výpočet aktuálneho stavu potrebujeme poznať len aktuálne meranie a posledný odhad. Silnou stránkou algoritmu je možnosť modifikácie podľa rôznych požiadaviek.

### Princíp Kalmanovho filtra

Predpokladajme, že  $\mathbf{z}$  predstavuje  $l$  meraní, ktoré môžu byť vyjadrené ako lineárna kombinácia  $n$  prvkov odhadovaného vektora  $\mathbf{x}$  a chybou merania  $\mathbf{v}$ .

$$\mathbf{z} = f(\mathbf{x}) = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}, \quad (5.1)$$

kde  $\mathbf{H}$  je matica plánu, ktorá je tvorená parciálnymi deriváciami meraní [20]

$$\mathbf{H} = \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^T}. \quad (5.2)$$

Chybu merania minimalizujeme podľa MNŠ ak

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{z}, \quad (5.3)$$

kde  $\mathbf{P}^{-1}$  je váhová matica (resp.  $\mathbf{P}$  je kovariančná matica).

Princíp metódy KF je založený na dvoch základných fázach: *predikcia* (z angl. *predict*) a *aktualizácia* odhadu (z angl. *update*).

**Predikcia** predpovedá na základe odhadu pre predchádzajúcu epochu  $l$  stav systému v epoche  $k$  [20]

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+, \quad (5.4)$$

a jeho kovariančnú maticu

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{k-1}^+ \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}, \quad (5.5)$$

kde  $\hat{\mathbf{x}}$  predstavuje odhad určovanej veličiny,  $\mathbf{P}$  jeho kovariančnú maticu,  $\mathbf{Q}$  je kovariančná matica bieleho šumu určovaného procesu,  $\mathbf{A}$  je *transformačná* matica (*transition matrix*), ktorá definuje vzťah medzi predchádzajúcou a súčasnou epochou. Tieto rovnice predstavujú odhad určených veličín v okamihu merania na základe predchádzajúcich meraní. Túto skutočnosť indikuje aj horný index (-). Po uskutočnení nového merania musíme apriórny odhad **aktualizovať**.

*Matica prírastkov*  $\mathbf{K}_k$  (z angl. *Kalman gain* [9]) vyjadruje váhu súčasného merania vzhľadom na odhadovanú veličinu a určí sa podľa vzťahu

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (5.6)$$

kde  $\mathbf{R}_k$  je kovariančná matica merania. Po jednoduchšej analýze rovnice (5.6) je zrejmé, že s presnejším meraním (tj. znižujúcou sa kovariančnou maticou meraní) vzrastá jeho váha [20] a naopak, ak sa k nule blíži apriórna kovariančná matica odhadu, potom meraniu, resp. apriórnemu reziduu, bude prisúdená malá váha.

Definujme apriórne reziduum  $\mathbf{e}$  ako rozdiel medzi skutočnou hodnotou aktuálneho merania a očakávaným meraním – určeným z posledného odhadu parametrov

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-, \quad (5.7)$$

potom aktualizovanú hodnotu odhadovanej veličiny určíme podľa

$$\hat{\mathbf{x}}_k^+ = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \mathbf{e}_k \quad (5.8)$$

a aktualizovanú kovariančnú maticu

$$\mathbf{P}_k^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^-. \quad (5.9)$$

Opísaný postup využíva hodnotu predchádzajúceho odhadu, preto ako každý rekurzívny algoritmus aj KF vyžaduje inicializáciu, ktorá na začiatku výpočtu definuje hodnoty základných veličín. Vektoru určených parametrov  $\mathbf{x}_0$  môžeme priradiť hodnotu určenú z počiatočného merania, prípadne nulovú. Pri inicializácii kovariančnej matice  $\mathbf{P}_0$  je najvýhodnejšie definovať diagonálnu maticu s dostatočne veľkými členmi, ktorá v ďalšej iterácii nebude mať takmer žiadnu váhu.

### Zjednodušený matematický model analýzy opakovaného merania permanentnej siete

Vstupnými údajmi do procesu vyrovnania pomocou KF sú súradnice získané vyrovnaním siete softvérom Bernese  $\mathbf{z}$  a ich kovariančná matica  $\mathbf{R}$

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} X_k^A \\ Y_k^A \\ Z_k^A \\ X_k^B \\ \vdots \\ Z_k^N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \text{cov}(X_k^A, X_k^A) & \text{cov}(X_k^A, Y_k^A) & \cdots & \text{cov}(X_k^A, Z_k^N) \\ \text{cov}(Y_k^A, X_k^A) & \text{cov}(Y_k^A, Y_k^A) & \cdots & \text{cov}(Y_k^A, Z_k^N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(Z_k^N, X_k^A) & \text{cov}(Z_k^N, Y_k^A) & \cdots & \text{cov}(Z_k^N, Z_k^N) \end{bmatrix}, \quad (5.10)$$

kde  $X, Y, Z$  označujú geocentrické karteziánske súradnice staníc  $A, B, \dots, N$  vzťahnuté k epoche  $k$  a  $\text{cov}(a, b)$  predstavuje vzájomné kovariancie medzi veličinami  $a$  a  $b$ .

Nakoľko geocentrické súradnice staníc GNSS ovplyvňuje pohyb litosférických dosiek, ich poloha sa kontinuálne mení. Štandardným postupom je určenie súradníc stanice v referenčnej epoche a parametrov pohybu. Tento prístup bol prijatý i pri tvorbe programu *kanses*. Odhadovanými veličinami  $\mathbf{x}$  tak nie sú meniace sa súradnice staníc, ale teoreticky nemenné referenčné súradnice a ich lineárne zmeny.

Zjednodušený model analýzy permanentnej siete pristupuje ku každej stanici zvlášť. Namiesto plnej kovariančnej matice využíva tzv. kovariančné submatice, ktoré zahŕňajú iba kovariancie súradníc danej stanice.

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_k = \begin{bmatrix} \text{cov}(X_k, X_k) & \text{cov}(X_k, Y_k) & \text{cov}(X_k, Z_k) \\ \text{cov}(Y_k, X_k) & \text{cov}(Y_k, Y_k) & \text{cov}(Y_k, Z_k) \\ \text{cov}(Z_k, X_k) & \text{cov}(Z_k, Y_k) & \text{cov}(Z_k, Z_k) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Dynamický model kontinuálne meniacich sa polôh staníc sa tak mení na statický – predmetom odhadu sa stáva referenčná poloha a zložky rýchlosti. Transformačná matica  $\mathbf{A}$  je teda jednotková a po dosadení do rovníc (5.4) a (5.5) dostávame

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+, \quad (5.12)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{P}_{k-1}^+ + \mathbf{Q}. \quad (5.13)$$

Odhad kovariančnej matice  $\mathbf{Q}$  je veľmi dôležitá súčasť ladenia systému, nakoľko nevhodne zvolená hodnota môže spôsobiť nefunkčnosť KF. Po viacerých experimentoch boli hodnoty prvkov šumovej matice  $\mathbf{Q}$  zvolené v oblasti 0,1 – 1 mm v závislosti od typu merania a súradníc, pri výnimočne stabilných údajoch je vhodné použiť ešte menší šum 0,01 mm.

Odhadovanými veličinami  $\mathbf{x}$ , ako je i vyššie spomenuté, sú referenčné súradnice a zložky rýchlosti

$$\hat{\mathbf{x}}_k = [X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ V_X \ V_Y \ V_Z]^T. \quad (5.14)$$

KF aktualizuje odhad určených veličín  $\mathbf{x}$  pre každú stanicu zvlášť. Pre odhadované a merané veličiny platí

$$X_k = X_0 + \Delta t_k \cdot V_X, \quad (5.15)$$

kde  $\Delta t_k = \frac{t_k - t_0}{365.25}$  predstavuje rozdiel medzi aktuálnou  $t_k$  a referenčnou epochou  $t_0$  danej stanice,  $X_0$  je odhad polohy stanice v referenčnej epoche a  $V_X$  je jej rýchlosť (zmena) za rok. Referenčná epocha môže byť rôzna pre každú stanicu a je ňou prvá epocha, ku ktorej bolo získané meranie.

Podľa (5.15) môžeme napísať analogické vzťahy pre ostatné súradnice a uvážením (5.1) získame maticu plánu

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t_k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t_k \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

## 6 Analýza sieťových riešení prostredníctvom Kalmanovho filtra

`kaneS` je akronym pre Kalman filter based Analysis of Network Solutions (Analýza riešení sietí pomocou KF). Tento názov zastrešuje hlavný program, niekoľko pomocných programov a knižníc na spracovanie meraní v GNSS v takmer reálnom čase pomocou programu Bernese. Programy sú napísané v jazyku Python, ktorého syntax je veľmi jednoduchá, vďaka čomu menšie úpravy programu podľa špecifických požiadaviek zvládne i začiatočník. Program využíva matematickú nadstavbu `numpy` a tiež vlastné knižnice na prácu so špecifickými formátmi údajov. V prípade potreby je možné program možné rozšíriť o knižnicu `matplotlib`, ktorá umožňuje vykreslenie numerických výsledkov do grafickej podoby.

Program `kaneS` využíva niekoľko vlastných tried a knižníc na prácu s rôznymi typmi súborov. Všetky súbory na uchovávanie údajov, ako i výstupy z Bernského softvéru sú vo formáte ASCII, preto ich možno jednoducho čítať, alebo – v prípade potreby – modifikovať.

### Triedy

Jedna z najdôležitejších tried programu `kaneS` je `last`. Slúži na prácu s aktuálnym odhadom určených parametrov. Na záznam relevantných informácií používa formát `.kl`, ktorý uchováva pre všetky stanice posledný stav veličín: `N` (počet cyklov, v ktorých bola daná stanica použitá), `EPOCH` (epocha, ku ktorej sa viaže aktuálny odhad vyjadrená modifikovaným juliánskym dátumom), `ESTIMATE` (vektor odhadovaných parametrov), `P` (jeho kovariančná matica), `PHI` (transformačná matica), `Q` (šumová matica). Rozlíšenie epochy je 0.001 dňa, čo predstavuje približne 1,5 minúty. V prípade potreby, spresnením o dva rády dosiahneme rozlíšenie na úrovni sekúnd.



Trieda `last` umožňuje predikciu parametrov a ich kovariančných matíc do ľubovoľnej epochy v geocentrickom i lokálnom súradnicovom systéme. Odhad pre aktuálnu epochu je určovaný formou predikcie do najnovšej epochy spomedzi všetkých staníc.

Trieda `coords` slúži na prácu so zoznamami súradníc v špecifickom formáte. Formát umožňuje ukladanie údajov z viacerých epoch pre viac staníc. Nepovinným parametrom sú i stredné chyby (RMS). Na koverziu medzi zoznamom geocentrických a topocentrických súradníc slúži externý program `crd_conv`. Program `kane` načítava súbory so súradnicami do dátového typu slovník, resp. do niekoľkých vnorených slovníkov.

Trieda `crd` vznikla z potreby plynulej konverzie z formátu CRD používanom softvérom Bernese do formátu `.kc` programu `kane`. Hlavný rozdiel medzi týmito formátmi spočíva v tom, že bernský formát umožňuje zápis súradníc všetkých staníc permanentnej siete pre jednu epochu, zatiaľ čo formát `.kc` umožňuje zápis ľubovoľného počtu epoch pre ľubovoľný počet staníc. Okrem súradníc je teda ku každému údaju priradená i epocha, ku ktorej sa dané hodnoty viažu. Program načítava z bernského formátu CRD pre každú stanicu do slovníka, s niekoľkými možnosťami kľúčových slov: `X`, `Y`, `Z`, `EPOCH`, `NUM`, `DOMES`, `FLAG`. Konverziu medzi formátmi zabezpečujú funkcie `crd2coords()` (transformácia bernského formátu CRD do formátu `kane kc`) a `coords2crd()` (spätná transformácia).

## Knižnice

Knižnica `timetsf` zabezpečuje transformácie medzi rôznymi časovými systémami. Zabezpečuje rôzne kombinácie transformácií v tvare `typA2typB`, kde za `typA`, resp. `typB` možno dosadiť ktorýkoľvek z nasledujúcich skratiek `mjd` (juliánsky dátum), `ymd` (rok, mesiac, deň), `doy` (rok, deň v roku), `gpw` (GPS týždeň a deň v týždni). Knižnica na transformácie nepoužíva exaktné vzťahy, ale vlastný rekurzívny algoritmus `hmd` (how many days [mimmon.net]), ktorý určuje počet dní medzi zvolenými epochami.

Ďalšou knižnicou je `crdtsf` zabezpečujúca konverzie súradnicových systémov podľa známych vzťahov [11, 19] a súvisiace funkcie. Označenie funkcií je podobné ako pri knižnici `timetsf`, pričom medzi podporované systémy patrí `blh` (elipsoidické súradnice, elipsoid WGS-84), `neu` (lokálny ľavotočivý súradnicový systém, v slovenskej literatúre zväčša označovaný ako `nev`), `xyz` (geocentrický karteziánsky systém), prípadne `dxyz` (topocentrický súradnicový systém s osami rovnobežnými s geocentrickým, vhodný pri transformáciach do `nev`) a `sab` (topocentrický sférický súradnicový systém označovaný tiež ako `sob`).

Knižnica `functions` obsahuje množstvo pomocných a obslužných funkcií. Medzi najdôležitejšie a

najčastejšie využívané patria `symbolic()`, ktorá symbolický zápis pri zadaní dátumu a času transformuje do skutočného názvu súboru a funkcia `file_mod()`, ktorá na základe symbolického názvu súboru určí jeho periodicitu. Podporované typy periodicity sú ročná (y), mesačná (m), týždenná (w), denná (d) a hodinová (h). Funkcia slúži na určenie najbližšej epochy, kedy bude potrebné súbor obnoviť.

Silnou stránkou programu je systém projektov. Každý projekt môže mať vlastné nastavenia, preto môžu byť paralelne počítané rovnaké údaje rôznymi spôsobmi. Je možné zmeniť nastavenia štatistických testov, zdroj vstupných údajov, spôsob inicializácie a niekoľko vedľajších nastavení. Nastavenia programu sa nachádzajú v každom projekte a načítavajú sa do dátového typu slovník, čo umožňuje jednoduché rozširovanie, alebo naopak zužovanie počtu systémových premenných. Program si prečíta jej typ a hodnotu a vďaka tomu na používanie tejto premennej nie je potrebné žiadne ďalšie programovanie či dodatočná inicializácia. V prípade, že potrebujeme doplniť novú premennú, jednoducho ju dopíšeme do inicializačného súboru so zachovaním štruktúry (názov typ hodnota) a v programe ju začneme používať presne tam, kde potrebujeme.

Cieľom programu *kanes* je plne automatické spracovanie a analýza permanentných sietí v blízko reálnom čase. Vzhľadom na tento cieľ je program vytvorený tak, aby bol v maximálnej miere *neinteraktívny*. Všetky nastavenia by mali byť obsiahnuté buď v inicializačnom súbore, alebo v príkazovom riadku.

### **Detekcia polohových zmien**

Po spracovaní súradníc zo sieťového riešenia pomocou KF dostávame aktualizované odhady počiatkovej polohy a rýchlosti stanice, resp. po prepočte k aktuálnej epoche aktuálnu polohu pozorovacieho miesta. Porovnaním aktuálnej polohy stanice a jej predpovedanej hodnoty je možné s uvažovaním strednej chyby, prípadne ďalších faktorov, vysloviť predbežný záver, či došlo alebo nedošlo k posunu stanoviska.

V súbore hodnôt, ktoré sa chystáme analyzovať sa niekedy môžu nachádzať aj takzvané odľahlé hodnoty, ktoré je vhodné pred analýzou z tohto súboru vylúčiť. Na tento účel vzniklo množstvo štatistických testov. Pre program *kanes* bol na štatistické testovanie odľahlých hodnôt zvolený jednoduchý **kvartilový test**. Kvartil je numerická hodnota prvku, ktorý sa nachádza v štvrtine vzostupne zoradeného testovaného súboru hodnôt. Jeho protipólom je tretí kvartil v troch štvrtinách súboru. Kvartilový test vychádza z normálneho rozdelenia. Označme prvý a tretí kvartil  $Q_1$ , respektíve  $Q_3$ . Potom ich rozdiel  $IQR = Q_3 - Q_1$  sa nazýva interkvartil. Pásmo odľahlých hodnôt sa nachádza mimo intervalu  $\langle Q_1 - 3 IQR; Q_3 + 3 IQR \rangle$ , „podozrivé hodnoty“ sa nachádzajú za

hranicami intervalu  $\langle Q1 - 1.5 IQR; Q3 + 1.5 IQR \rangle$ . Program *kanses* však za odľahlé považuje aj „podozrivé“, pretože viacero testov preukázalo, že trojnásobok interkvartilu toleruje príliš veľký rozptyl nameraných hodnôt a znemožňuje tak odhaliť množstvo chybných meraní.

Kvartilový test odľahlosti siete (ak nastane chybné meranie na referenčnej stanici) využíva súbor apriórnych reziduí, t.j. rozdielov hodnôt očakávaných na základe predchádzajúcich výsledkov KF a aktuálnych polôh pozorovaného bodu. Vstupnými hodnotami, na základe ktorých prebieha test vychýlenia siete, sú apriórne reziduá všetkých troch zložiek polohy jednotlivých staníc siete. Siet' staníc GPS považujeme za vychýlenú, ak sa nulový posun nenachádza medzi horným a dolným kvartilom zvýšeným, resp. zníženým o zvolený násobok interkvartilu. Referenčná stanica je vychýlená, ak majú obe krajné hodnoty zo súboru apriórnych reziduí rovnaké znamienko.

Posun referenčnej stanice však spôsobuje len zdanlivé posuny všetkých staníc siete. Program *kanses* vykonáva taktiež testy zmeny polohy stanice na základe apriórnych a aposteriórnych reziduí.

### **Faktor RMS**

Po vykonaní dostatočne veľkého počtu cyklov KF sa stredná chyba aktuálneho odhadu polohy ustáli na určitej hodnote. Skúsenosť potvrdzuje, že presnosti výsledkov spracovaných meraní GNSS sú zväčša nadhodnotené. Spôsobuje to fakt, že pri spracovaní sa jednotlivé observácie považujú za nezávislé a zdanlivo to spresňuje výsledky. Súčasné poznatky však poukazujú na to, že dlhodobé opakované merania uskutočňované na určitom stanovisku nemožno všeobecne považovať za vzájomne v čase nezávislé [12] kvôli závislosti meraní súvisiacich napr. s efemeridami družíc vplývajúcimi rovnakými systematickými chybami na všetky merania. Tento jav sa v geodetických časových radoch nazýva farebný šum, podrobnosti v [24].

Pri KF máme k dispozícii súbor apriórnych reziduí vypočítaný podľa (5.7), z ktorého kvartilovým testom vylúčime odľahlé hodnoty a určíme strednú chybu polohy. Túto hodnotu považujeme za presnú a jej podiel voči strednej chybe z výpočtu Bernese nazývame Faktor RMS. Faktor sa určuje zvlášť pre každú stanicu a súradnicu. Testovanie na výsledkoch spracovania permanentnej siete EPN preukázalo, že jeho hodnota sa pohybuje pre všetky súradnice okolo hodnoty 10.

## **7 Experimentálne overenie metódy**

Na overenie programu *kanses*, najmä jeho citlivosti na malé zmeny, bola v lete 2007 dočasne zriadená stanica PIL6 na pilieri č. 6 Astronomicko-geodetického observatória. Stanica bola vybavená posuvným zariadením na horizontálny posun antény umožňujúcim posúvať anténu v dvoch kolmých smeroch v rozsahu 3 cm s presnosťou 0,05 mm („simulácia zemetrasenia“).



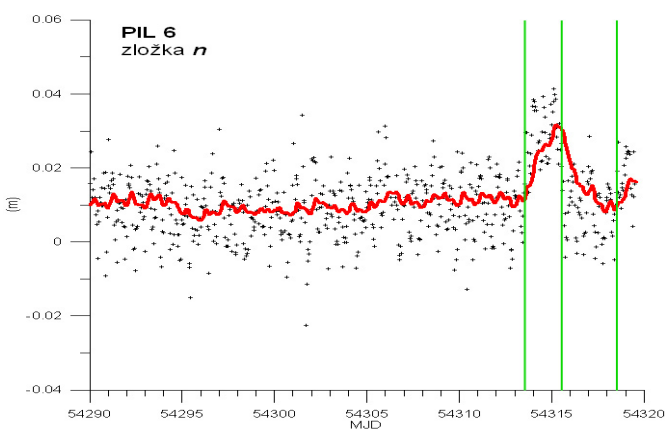
**Obr. 7.1** Osadenie antény na posuvnom zariadení

Od 4.júla 2007 (MJD 54285) do 7.augusta 2007 (MJD54319) tu prebiehalo nepretržité meranie GNSS. Namerané údaje boli v 1-hodinovom intervale spracované spolu s ďalšími 26 stanicami permanentnej siete EPN. Následne pomocou balíka programov *bs1* pripravil a vykonal výpočet programom *Bernese*. Výsledné súradnice a kovariančné matice ďalej analyzoval program *kanes*, ktorý pomocou Kalmanovho filtra predikoval budúce polohy stanice a porovnával ich s

pozorovanými. Na základe rozdielov medzi apriórnym odhadom a skutočnou polohou permanentnej stanice pomocou štatistických testov určoval, či išlo o skutočný posun, alebo chybu merania.

Spracovanie siete prebiehalo každú hodinu približne dvadsať minút po celej hodine. Do spracovania boli zahrnuté observačné rinexy z posledných 4 hodín z vybraných staníc a najnovšie hodnoty efemeríd družíc GPS či polohy pólu. Referenčná stanica siete, ktorá zabezpečuje naviazanie siete na medzinárodný referenčný systém ITRS, resp. jeho realizáciu ITRF2005, je poľská stanica BOR1. Jej alternatívou v prípade výpadku je švajčiarska stanica ZIMM.

Po štyroch týždňoch prevádzky - 1.augusta (MJD 54313) o 13:00 UTC bola anténa posunutá o 20 mm v smere na sever "n" a -20 mm v smere na východ "e". Približne po dvoch dňoch bola anténa vrátená do pôvodnej polohy. O tri dni neskôr bola anténa opäť vychýlená v smere "n" o 12 mm a v smere "e" o -8 mm. Súradnice vypočítané programom *Bernese* sú ďalej spracované metódou *kanes*.



**Obr. 7.2** Merania a odhady KF, súr. zložka „n“, zelené čiary označujú okamih, kedy nastal posun stanice

Na obr. 7.2 sú znázornené observované hodnoty súradnicovej zložky „n“ čiernou farbou a odhadnuté červenou. Okamihy kedy nastali zmeny sú na grafe naznačené zelenou farbou. Graf preukazuje, že systém je schopný prispôbiť sa novým podmienkam pomerne rýchlo. Ako však uvidíme v ďalšej stati, veľmi dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje latenciu pri identifikácii posunu je šumová matica *Q*.

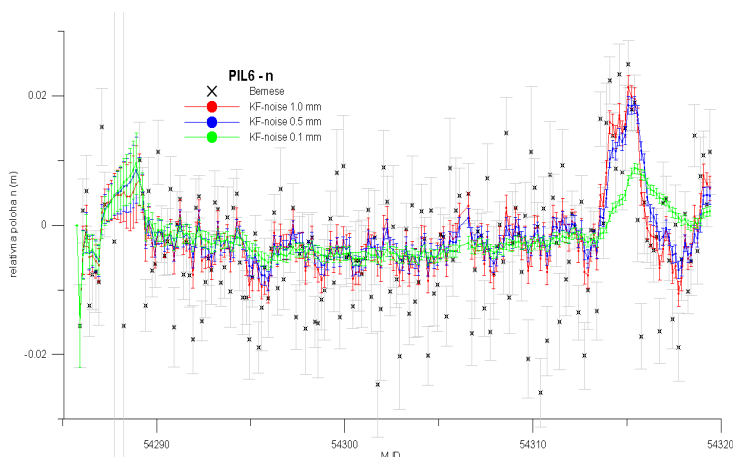
Program preukázal relatívne dobrú citlivosť na posuny v oblasti od 1 cm. Táto hodnota súvisí s dĺžkou observácie (4h) a s rozľahlosťou siete (stovky km). Je pravdepodobné, že pri kratších

základniciach (rádovo v km) by výsledky boli lepšie.

Hodinové riešenia upravenej subsiete EPN vykazovali relatívne veľké vzájomné odchýlky. Ak sú kritériá na určenie posunu príliš striktné, často môže byť za posun označená chyba merania. Ak by, naopak, boli príliš voľné, rozsah nedetekovateľného pohybu môže byť príliš veľký. Naše simulované zemetrasenie po 3 týždňoch posunulo stanicu o 35 mm. Odhady sa pomerne rýchlo adaptovali na novú polohu stanice, čo dáva dobrý predpoklad na detekciu posunu antény.

### Vplyv šumovej matice na výsledky

Postprocesná analýza polôh odhadnutých programom Bernese preukázala výrazný vplyv šumovej matice na výstup z KF. V nasledujúcom grafe sú vynesené namerané hodnoty (výstup z Bernese) a výsledok po spracovaní KF pre stanicu PIL6. Použitie rôznych šumových matíc je farebne odlišené – červená predstavuje výsledky s použitím šumovej matice  $Q$  ekvivalentnej 1mm, modrá predstavuje maticu šumu 0,5 mm a na záver zelená zobrazuje výsledky s použitím šumovej matice zodpovedajúcej 0,1 mm. Pri výrazne stabilnejších sieťach je možné tieto hodnoty ešte zmenšiť a naopak pri sieťach alebo stanicach s väčším rozptylom meraní je vhodnejšie použiť vyššie hodnoty. V súčasnom stave programu sa šumová matica určuje empiricky.



**Obr. 7.3** Odhad polohy dočasnej stanice PIL6 počas experimentu, zložka  $n$ , rôzne šумы, interval 4h

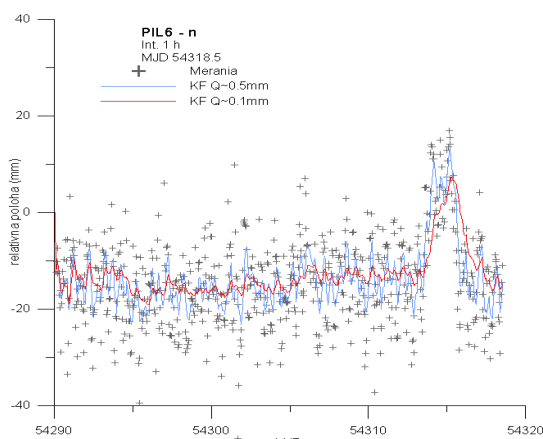
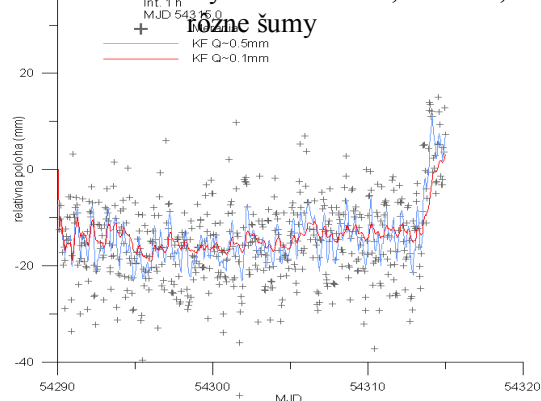
Na obr. 7.3 vidíme priebeh nameraných a filtrovaných polôh dočasnej stanice, v súradnicovej zložke  $n$ . V ľavej časti, zo začiatku experimentu došlo k dočasnému výpadku meraní a k nespoľahlivým výsledkom. Z grafu je evidentné, že výsledky sú podobné, ako stredné chyby, tak i trend. Ďalej sa však výsledky správajú podľa očakávaní, a teda najvyrovnanjší priebeh majú výsledky s

použitím najnižšieho šumu. Po posunutí stanice sa však preukázali nedostatky použitia menšieho šumu. Algoritmus považuje posun za odľahlé meranie a trvá pomerne dlho, kým sa hodnoty priblížia k skutočnej polohe stanice. Naopak, pri použití šumu 1 mm a 0,5 mm sa výsledky pomerne rýchlo adaptovali, ako pri prvom posune, tak i pri posune späť. Krivka šumu 0,5 mm prakticky kopíruje krivku šumu 1 mm, no s menšou amplitúdou. Na účely sledovania posunov je vhodné použiť šumovú maticu ekvivalentnú 0,5 mm.

Nasledujúce obrázky znázorňujú priebeh experimentu, ide opäť o 4-hodinové riešenia, no s intervalom 1 h. Boli použité šumové matice zodpovedajúce hodnotám 0,5 mm a 0,1 mm. V prvej

časti experimentu boli hodnoty odhadov KF už dlhodobo ustálené a oscilovali v rozsahu približne 0,5 cm v prípade šumu s amplitúdou 0,1 mm a približne 1,5 cm v prípade šumu 0,5 mm, zatiaľčo výsledky Bernese oscilovali v pásme o šírke približne 4 cm. Graf vľavo znázorňuje situáciu približne 36 hodín po posunutí stanice. Obe krivky už dosahujú podobné hodnoty, no krivka s nižším šumom vykazuje výraznú latenciu. Je potrebné si uvedomiť, že konvergencia k reálnym hodnotám nastala už po 24 hodinách vďaka hustému 1-hodinovému intervalu (24 epoch). Pri 4-hodinovom intervale, zobrazenom na obr. 7.3 odhad Kalmanovým filtrom dosiahol po 48 hodinách (12 epoch) približne polovicu hodnoty posunu.

**Obr. 7.5** GOPE – týždenné riešenia, zložka n,



**Obr. 7.4** Odhady polohy stanice PIL6 v priebehu experimentu – počas vychýlenia a po ňom, interval 1h.

Graf vpravo nám ukazuje situáciu po návrate antény do pôvodnej polohy. Červená krivka, zodpovedajúca odhadom s nižším šumom, sa aj 24 hodín po návrate stále nachádza približne 5 mm nad skutočnou polohou stanice. Na konci zobrazeného časového úseku už obe krivky opäť oscilujú okolo strednej hodnoty. Krivka odhadov so šumovou maticou zodpovedajúcou 0,1 mm sa vrátila opäť až približne po dvoch dňoch. Aj to je však stále dobrý výsledok v porovnaní s výsledkami 4-hodinového intervalu na obr. 7.3.

### Overenie metódy na denných riešeniach a týždenných kombináciách riešení LAC SUT

V predchádzajúcej kapitole sme sa zaoberali vplyvom šumovej matice na menej stabilnú dočasnú GNSS stanicu, ktorá bola navyše v priebehu merania kontrolované vychýlená. Program bol otestovaný aj na extrémne stabilných meraniach, kde boli použité týždenné riešenia českej permanentnej stanice GOPE.

Týždenné riešenia sa spravidla vyznačujú extrémne vysokou presnosťou a spravidla je už po niekoľkých epochách zrejмый trend v horizontálnych zložkách spôsobený pohybom eurázijskej litosferickej dosky [3]. Na obr. 6.11 sú znázornené týždenné riešenia stanice GOPE. Riešenia s použitím šumu 0.5 a 1.0 mm sa kryli s priebehom samotných meraní, preto boli vykonané ďalšie

výpočty so šumom 0.1, 0.05 a 0.01 mm. Tento graf v porovnaní s grafmi s predchádzajúcej kapitoly jasne dokumentuje význam šumovej matice a zároveň naznačuje v akom rozmedzí sa pohybujú hodnoty šumu pre rôzne aplikácie. V prvej časti grafu vidíme, ako sa priebeh všetkých kriviek prakticky kryje. Rozdiel začína byť evidentný asi po 10 epochách. Približne v polovici cyklu dochádza k pomerne veľkej zmene, ktorú opäť najlepšie kopírujú výsledky pri použití matice s väčším šumom.

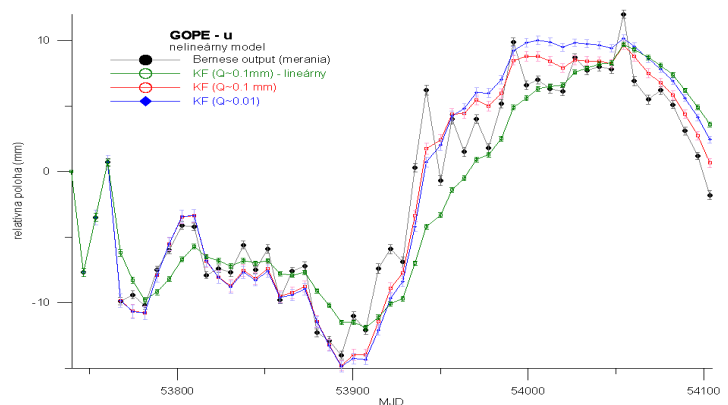
## Nelineárny model

Program *kane*s využíva na odhad súradníc lineárny model, teda predpokladá, že stanica sa pohybuje priamočiari. Tento prístup dáva pomerne dobré výsledky dokonca aj v prípade periodicky sa meniacej polohy, no s určitým oneskorením. Latencia je o to väčšia, o čo menší biely šum predpokladáme pre daný proces. Na nasledujúcom obrázku sú porovnávané lineárne odhady s nelineárnym odhadom, kde bola na modelovanie zmien vertikálnej polohy stanice použitá jednoduchá kombinácia lineárnej a periodickej harmonickej funkcie s transformačnou maticou

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & \sin(2\pi \Delta t) & \cos(2\pi \Delta t) \end{bmatrix}. \quad (7.1)$$

Takýto model je vhodné použiť v prípade periodickej variácie určitého parametra, napríklad pozvoľné zdvíhanie/klesanie lokality súvisiace so sezónnymi výkyvmi vlhkosti a pod.

Obr. 7.5 dokazuje, že periodický model lepšie popisuje priebeh výškových zmien permanentnej stanice GOPE. Nakoľko však primárnym súradnicovým systémom programu *kane*s, v ktorom prebiehajú všetky výpočty, je v súčasnosti geocentrický súradnicový systém, nie je zatiaľ možné ho jednoducho upraviť tak, aby používal zvlášť model pre horizontálne a vertikálne súr. zložky.

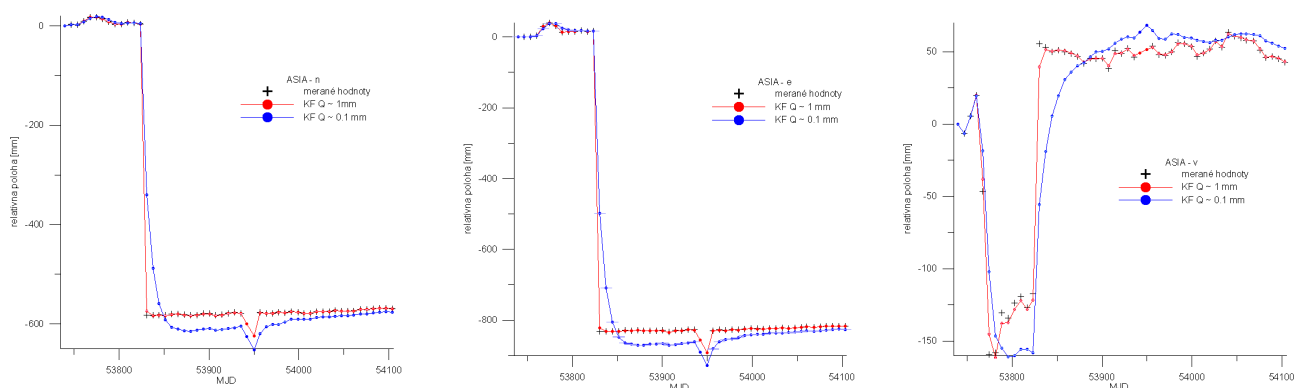


Obr. 7.5 GOPE - týždenné riešenia, zložka v, lineárny a periodický model

## Detekcia posunu

Na ďalšom obrázku je zobrazená súradnicová zložka *n* stanice ASIA, na ktorej sa pravdepodobne v priebehu sledovaného obdobia zmenil observačný pilier – zmeny dosahujú približne 60, 80 a 5 cm.

Program správne odhalil posuny pre všetky tri zložky pomocou apriórneho i aposteriórneho testu. Problém však je príliš pomalá konvergencia krivky nízkeho šumu. Autor práce predpokladá, že tento nedostatok by bolo možné odstrániť dočasným zvýšením šumu procesu.



Obr. 7.5 ASIA - týždenné riešenia, šum 0,1 a 1 mm

## 8 Prínos pre vedu a prax

Koncept dizertačnej práce vychádzal sčasti z potrieb Lokálneho analyzačného centra STU na Katedre geodetických základov na automatizáciu spracovania meraných údajov a automatizáciu výpočtového procesu čiastkovej siete EPN a čiastočne z potreby rýchlej analýzy údajov z ultrarýchlych spracovaní a stavu problematiky v roku 2004.

Hlavným cieľom tejto dizertačnej práce bolo vytvoriť funkčný model ultrarýchleho spracovania meraní siete permanentných staníc GNSS a následného vyhodnocovania výsledkov s možnosťou detekcie polohových odchýlok.

Na základe vytýčených kritérií možno konštatovať nasledovné prínosy pre vedu a prax:

1. Vytvorenie balíka programov umožňujúci získavanie observačných súborov, efemeríd družíc GNSS, rotačných parametrov Zeme a ďalších súborov potrebných pre automatizované spracovanie meraní permanentných staníc GNSS. Programy majú jednoduché nastavenia a môžu ich pomerne pohodlne modifikovať aj ľudia bez hlbších znalostí programovacích jazykov spravidla jednoduchou editáciou textových konfiguračných súborov. Časť programov sa po malých úpravách už využíva v projekte GPS meteorológie.
2. Práca obsahuje jeden z prvých podrobnejších a ucelenejších popisov princípu vyrovnania súboru opakovaných geodetických meraní pomocou Kalmanovho filtra v slovenskom jazyku.
3. Vytvorenie modifikácie Kalmanovho filtra vhodnej pre použitie pri analýze správania sa permanentných staníc GNSS alebo aplikácií skúmajúcich stabilitu monitorovaním polohy pomocou signálov GNSS. Matematické odvodenie zjednodušeného modelu spracovania a komplexného riešenia vhodné pre ďalšie spracovanie. Model zároveň zohľadňuje špecifiká údajov z permanentných staníc GNSS.
4. Realizácia matematického modelu v podobe programu kanes. Vďaka prepojeniu s programom Bernese na spracovanie meraní GNSS, umožňuje kanes detekovať zmeny v polohe aj na základniciach presahujúcich 1000 km.



5. Overenie správania sa filtrovaných hodnôt a detekcie polohových zmien na experimentálnom súbore údajov.
6. V priebehu vývoja softvéru bolo odhalených niekoľko dôležitých javov, z ktorými je nutné počítať aj pri iných podobných projektoch. Ide napríklad o nadhodnotenú vnútornú presnosť riešení permanentných sietí súvisiacu s neuvažovaním vplyvu farebného šumu alebo významný vplyv šumovej matice na výsledky spracovania. Tieto poznatky boli zdokumentované a môžu slúžiť ako východisko pri riešení tejto problematiky v budúcnosti.
7. Súčasťou programu kanes sú taktiež doplnkové programy a knižnice, ktoré poskytujú možnosť transformácie súradnicových a časových systémov, ale aj načítanie výstupov z Bernského softvéru. Vďaka tomu, že sú rozdelené do samostatných modulov, je ich možné využiť aj v iných programoch či projektoch.

## 9 Záver

S rozvojom internetu prichádzajú nové, rozsiahle možnosti pre odborníkov v každej oblasti vedeckého bádania. So stále sa zvyšujúcou rýchlosťou prenosu ako aj dostupnosťou bezdrôtového internetu na ťažko dostupných územiach sa neustále zvyšuje i počet permanentných staníc observujúcich signály vysielané z globálnych družicových systémov. Monitoring týchto pozorovacích stanovísk je nevyhnutným predpokladom na plnohodnotné využitie produktov, ktoré takéto observácie poskytujú.

Predložená dizertačná práca navrhuje spôsob spracovania siete permanentných staníc veľkého rozsahu. Navrhnutý matematický model vychádza z Kalmanovho filtra prispôbeného potrebám monitorovania polohy staníc GNSS, ktoré predpokladajú lineárny pohyb súvisiaci s pohybom tektonických platní s možnosťou prudkých odchýlok v prípade zemetrasenia, zosuvov pôdy alebo iných zmien polohy fázového centra antény.

Súčasťou dizertačnej práce je okrem matematických modelov aj samotný program kanes, ktorý bol otestovaný na viacerých typoch projektov. Práca tiež predstavuje aj možné modifikácie programu v budúcnosti za účelom efektívnejšieho a spoľahlivejšieho modelovania pohybu stanice.

Dizertačná práca poukázala na možnosti využitia Kalmanovho filtra v oblasti spracovania permanentných sietí GNSS. Okrem efektívneho odhadu aktuálnej polohy permanentnej stanice je možné monitorovať aj jej možný posun. Vďaka tomu je možné tento prístup k spracovaniu geodetických údajov aplikovať a efektívne využiť na riešenie množstva problémov z oblasti vedy aj praxe.

## Publikované práce

Bezručka, J.: *Automated data processing in GPS networks*. Sborník 8. odborné konferencie doktorského studia Juniorstav 2006. Díl 8. Brno, 2006. s. 165-170.

Hefty, J. - Gerhátová, L. - Igondová, M. - Bezručka, J.: *Nové poznatky o geokinematike strednej*

*Európy a Balkánu na základe dlhodobého monitorovania pomocou GPS.* In: GPS + GLONASS + Galileo : nové obzory geodézie : Zborník z konferencie s medzinárodnou účasťou. Bratislava, 8.11.2006. - Bratislava : STU v Bratislave SvF, 2006. - ISBN 80-227-2519-6. - S. 69-78

Bezručka, J.: *Automatická analýza vyrovnaní siete permanentných staníc GPS použitím Kalmanovho filtra.* Juniorstav 2007. Brno, 2007.

Bezručka, J.: *The use of Kalman Filter In Geodesy and Navigation.* Slovak Journal of Civil Engineering, Bratislava (in press) Slovenská verzia k dispozícii na <http://www.mimmon.net/mimo/dokumenty/kalman.pdf>

Hefty, J. - Gerháťová, Ľ. - Bezručka, J.: *Potential short-periodic variations in coordinates of Galileo permanent station - comparison with GPS experience.* In: Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme : 1st Colloquium/1.-4.10.2007, Toulouse, France. - Toulouse : ESA Publications Division, 2007. - nestr.

Hefty, J. – Bezručka, J. – Hipmanová, L. – Gerháťová, Ľ.: *Potential Short-periodic Variations in Coordinates of Galileo Permanent Station – Comparison with GPS Experience.* 1st Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme. Toulouse 2007.

Bezručka, J. - Hefty, J.: *Detekcia polohových zmien v takmer reálnom čase na základe kontinuálnych meraní GNSS.* In: Geodetické siete a priestorové informácie : Zborník referátov, Podbanské, 29.-31.10.2007. - Banská Bystrica : Topografický ústav Banská Bystrica, 2007. - ISBN 978-80-969757-5-4. - S. 59-64

Bezručka, J. - Hefty, J.: *Real-Time GPS Network Analysis Using the IGS Ultra-Rapid Satellite Orbits Applied for Displacements Monitoring.* In: INGENIO 2008: 4th International conference on engineering surveying. Bratislava, 23.-24.10.2008. ISBN 978-80-227-2971-0.

## Literatúra

1. Bezručka J.: *Automated data processing in GPS networks.* Sborník 8. odbornej konferencie doktorského štúdia Juniorstav 2006. Díl 8. Brno, 2006. s. 165-170.
2. Bond, J. - Chrzanowski, A. - Kim, D.: *Bringing GPS into harsh environments for fully automated deformation monitoring.* GPS Solutions (2008) Vol. 12, s. 1-11. Springer. Jan 2008
3. Drewes, H. - Angermann, D.: *The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model 2000 (APKIM2000) as a Geodetic Reference System,* IAG 2001 Scientific Assembly, Budapest, 2.-8.9.2001
4. Douša, J. - Mervart, L.: *Ultra-rapids and ultra-rapid predictions for GPS.* Proceedings of

- the IGS 2004 Workshop. Bern, 2004.
5. Estey, L.H. – Meertens C.M.: *TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data*. GPS Solutions (pub. by John Wiley & Sons), Vol. 3, No. 1, 1999, s. 42-49.
  6. EPNCB: <http://epncb.oma.be>, EUREF Permanent Network Central Bureau, Royal Observatory Brussels, Belgium.
  7. Ferienc, D. - Leitmannová, K. - Šalátová, E.: SKPOS – Slovenská priestorová observačná služba. GEOS 2007. Bratislava, 2007.
  8. Gauss, C. F. "*Theoria combinationis obsevationum erroribus minimis obnoxiae.*" [Werke, Vol. 4](#). Göttingen, Germany, 1823.
  9. Gelb A.: *Applied Optimal Estimation*. The M.I.T. Press, Boston, Mass., 1974
  10. Hatanaka, Y. (1996) *A RINEX Compression Format and Tools*, Proceedings of ION GPS-96, September 17–20, 1996, s. 177–183.
  11. Hefty, J.: *Globálny polohový systém v štvorrozmernej geodézii*. Slovenská technická univerzita. Bratislava, 2004.
  12. Hefty, J.: *Modelovanie náhodných chýb v časových radoch geodetických meraní*. Geodetický a kartografický obzor. 9/2007, s. 185-196. 2007
  13. Hefty, J. – Husár, L.: *Družicová geodézia*. Slovenská technická univerzita. Bratislava, 2001.
  14. Hugentobler, U. – Dach, R. – Fridez, P. (eds): *Bernese GPS software, Version 5.0*. Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2006.
  15. Igondová, M.: *Analysis of precision and accuracy of Precipitable Water Vapour derived from GPS observations*. In: Contributions to Geophysics and Geodesy. Vol. 39, No. 2, s. 121-132, 2009.
  16. Kalman, R.E.: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering, 82 (Series D): pp. 35-45, 1960.
  17. Leica Geosystems. <http://www.leica-geosystems.com>
  18. Maybech, P.S.: *Stochastic models, estimation and control*. Volume I, New York. s. 1-16, 1979
  19. Melicher, J. - Fixel, J. - Kabeláč, J. : *Geodetická astronómia a základy kozmickej geodézie*. Bratislava, 1993.
  20. Mervart, L.: *Sekvenční vyrovnání, kolokace, Kalmanův filtr*. Geodetický a kartografický obzor 40/82 1994, číslo 8.s. 155-157.
  21. Trimble Navigation Limited. *Managing GNSS Infrastructure Dynamics. Trimble Integrity Manager*. Raunheim, 2007.  
[http://www.trimble.com/pdf/022543-350\\_IntegrityManager\\_BRO\\_0707\\_lr.pdf](http://www.trimble.com/pdf/022543-350_IntegrityManager_BRO_0707_lr.pdf)

22. Welch, G. - Bishop, G.: An Introduction to the Kalman Filter. Siggraph 2001. University of North Carolina, 2001.
23. Wilkins, R. - Bastin, G. - Chrzanowski, A.: ALERT – A fully automated real time monitoring system. 11th FIG Symp. On Deformation Measurement, May 25-28, 2003, Santorini, Greece. <http://ccge.unb.ca/publications/downloads/CCGE%20-%202003%20-%20ALERT--A%20fully%20automated%20real%20time%20monitoring%20system.pdf> (6.7.2010)
24. Williams, S.D.P.: The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series. Journal of Geodesy (2003) 76. pp. 483-494.
25. <http://gipsy.jpl.nasa.gov/orms/goa/> Jet Propulsion Laboratory, Orbiter and Radio Metric Systems Group: GIPSY-OASIS (GOA II) Software Package
26. <http://147.175.80.68/pwv/> Katedra geodetických základov. PWD a ZTD na Slovensku.

## Summary

### The Analysis of Permanent GNSS Networks in Near Real Time and Its Applications

During the last decade the significant technological progress allowed processing and analysing the data from GNSS permanent networks in near real-time or even real time. The data can be processed every hour and thus provide an up-to-date information of current state of the selected location.

The thesis presents the automated GNSS network processing and further analysis. The first includes the data set up, integrity check and processing itself using existing programs and newly written scripts. The analysis, on the other hand, requires development of both theory and software. The presented thesis suggests the use of Kalman filter for analysis in near real time and develops also theoretical background for even more complex projects. The main output of this work is an analysing software based on Kalman filter. It uses the Bernese GNSS Software output to improve the estimated coordinate values and detect the possible outlying positions. The thesis also points out the importance of the white noise covariance matrix for different application.

The new software has been tested on several data sets including near real-time processing during the experiment with controlled displacement of GNSS antenna. It usually detects the displacement of 1+ cm and, depending on settings of the project, also adapts quite well to new positions.