

Analýza náhodných zložiek GPS signálu

Hodoň Michal · Elektrotechnika, Informačné technológie

18.10.2010



Lokalizácia vozidiel každého druhu sa nachádza v dnešnej dobe na veľmi vysokej úrovni. S využitím satelitných technológií (GNSS) v spolupráci s ďalšími podpornými systémami (INS, SBAS, AGPS) je možné dosiahnuť precíznosť, ktorá je vyhovujúca pre väčšinu súčasných aplikácií. Napriek tomu sa však stále nájdu prípady, kedy je dosiahnutá presnosť lokalizácie nepostačujúca. To je možné odstrániť buď použitím špeciálnych prijímačov (Carrier phase receivers; Dual frequency receivers) alebo návrhom vhodnej filtračnej metódy, ktorá bude vychádzať z dôkladnej analýzy lokalizačného signálu.

Tento signál môže byť degradovaný viacerými faktormi, ktoré je zo všeobecného hľadiska možné rozdeliť do dvoch skupín – systematické chyby (chyby časovania, atmosférický efekt, viaccestné šírenie, chyby orbity) a náhodné chyby. A nakoľko spôsoby eliminácie systematických chýb lokalizačných signálov sú v súčasnosti viacmenej známe, práve analýza náhodných chýb môže byť kľúčom k návrhu vhodných korekčných metód pre použitie v aplikáciách “safety-of-life”. V príspevku bude vykonaná analýza GPS signálu, ako signálu neovplyvneného systematickými chybovými zložkami.

1 Úvod

Ako je už všeobecne známe, lokalizácia vozidiel je v súčasnosti vykonávaná najmä globálnymi satelitnými navigačnými systémami – GNSS (Global Navigation Satellite System). Aj keď je určovanie pozície touto metódou celkom presné, na používanie v tzv. safety-of-life kritických aplikáciách je nutné mať buď prístup k šifrovanej zložke satelitného signálu (ktorý je ale pre bežného užívateľa nemožné získať), alebo použiť extra filtračné metódy (post-processing). Riešenie má priniesť tzv. druhá generácia GNSS (The Second Generation of GNSS), ktorej súčasťou má byť okrem iného aj európsky Galileo, a ktorá bude poskytovať služby vyhovujúce aj aplikáciám náročným na presnosť. Nakoľko sa však spustenie GNSS-2 neustále odkladá (podľa by mal byť Galileo funkčný od roku 2014; podľa GPS III plne funkčný v roku 2030), je nevyhnutné pracovať na metódach umožňujúcich zlepšenie lokalizačnej presnosti na úroveň vyhovujúcu safety-of-life situáciám.

V súčasnej dobe funguje v rôznych formách štádia niekoľko satelitných navigačných systémov. Čo sa týka globálneho pokrytia, funkčnosti a interoperability, je na území Európskej únie jediným prakticky využiteľným systémom americký GPS (Global

Positioning System). Samozrejme, bolo by možné využiť aj ruský GLONASS (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), ale kvôli unikátnej architektúre (prístup na vysielač kanál cez FDMA - Frequency Division Multiple Access, nie cez CDMA - Code Division Multiple Access ako väčšina GNSS) má veľmi slabú podporu od výrobcov, ktorá rezultuje do výslednej vysokej ceny GLONASS prijímačov. Čínsky COMPASS, Indický INRSS a Japonský QZSS majú stále iba charakter lokálnych navigačných systémov, čiže sú pre potrebu lokalizácie na území EÚ nevyhovujúce.

2 Chyby GPS

Presnosť GPS je ovplyvňovaná viacerými faktormi. Zo všeobecného hľadiska môžeme rozdeliť tieto faktory do dvoch skupín:

- systematické chyby
- náhodné chyby

Systematické chyby sú viac-menej rovnaké pre každé meranie, pričom skresľujú výsledok merania vždy určitým spôsobom. Z obvyčajného merania ich nie je možné odhaliť, nakoľko sú dôsledkom odlišného experimentálneho usporiadania od toho, čo sa predpokladá v teórii. Pri opakovaných meraniach ostávajú tieto chyby konštantné alebo sa menia spôsobom, ktorý sa dá predvídať. Pri lokalizácii cez GPS bolo do dnešnej doby identifikovaných viacero systematických chýb ako aj spôsobov ich eliminácie. (Tabuľka 1)

Tabuľka 1. Identifikované systematické chyby pri GPS lokalizácii a veľkosť odchýlky, ktorú spôsobujú.

Typ chyby	Veľkosť chyby
Atmosférický efekt	± 6 m
Orbitálne chyby	± 2.5 m
Chyby časovania	± 2 m
Viaccestné šírenie	± 1 m
Chyby zaokrúhľovania	± 1 m
Spolu	$\sim \pm 13$ m

Pri meraní náhodnej zložky GPS signálu a následnej analýze náhodných chýb je nutné zabezpečiť, aby sa každá z uvedených systematických chýb nachádzala na minimálnej alebo prinajmenšom na konštantnej úrovni. Jedná sa najmä o tzv. Atmosférický efekt, kedy je GPS signál degradovaný prechodom cez vrstvy zemskej atmosféry - Ionosféru a Troposféru, a ktorý spôsobuje najväčšiu nepresnosť pri lokalizácii. Signál je totižto „spomalený“ časticami elektrónov, vodných výparov a ďalšími inými čiastočkami atmosféry a tým dochádza k časovému oneskoreniu signálu a teda aj k odchýlke pri určovaní polohy. (Obr. 1)

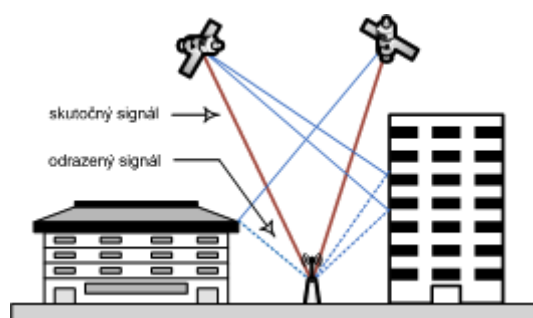


Obr. 1. Atmosférický efekt a jeho vplyv na šírenie signálu

Aby bol minimalizovaný vplyv tejto systematickej chyby, je nutné monitorovať stav atmosféry a meranie uskutočniť za približne rovnakých podmienok. Ako prvé je potrebné vziať do úvahy meteorologický aspekt (konkrétne oblačnosť, atmosférický tlak, vlhkosť vzduchu – humidity atď.), aby bola zabezpečená homogenita Troposféry. Čiže, zjednodušene povedané, meranie je potrebné vykonať za stáleho počasia.

Stav Ionosféry je možné taktiež odsledovať – je reprezentovaný hodnotou TEC (Total Electron Content), ktorá udáva hustotu elektrónov na orbite v jednotkách [TECU – TECunit], pričom platí: $1\text{TECU} = 1 \times 10^{16}$ elektrónov / m^2 . TEC je monitorovaný špecializovanými vesmírnymi centrami (napr. americká NASA, európska ESA), pričom sa vytvárajú tzv. TEC mapy, ktoré informujú o Ionosférických podmienkach, ktoré sú nad špecifickým územím. Tieto informácie sú verejne dostupné a vďaka nim je možné odsledovať prípadné nehomogenity v Ionosfére počas merania.

Vplyv chýb zaokrúhľovania (kvalita A/D prevodníka GPS prijímača,...) a chýb časovania (v GPS prijímačoch sa nepoužívajú kvalitné atómové hodiny ako na GPS družiciach – vznikajú jemné nepresnosti) na lokalizáciu je možné minimalizovať použitím jedného GPS prijímača pre všetky merania. Tzv. viaccestné šírenie (alebo multipath), kedy signál dorazí od zdroja k cieľu rôznymi cestami, pričom časť signálu dorazí k cieľu priamo, zatiaľ čo iná časť sa odrazí na prekážke, a dorazí k cieľu oneskorene (Obr. 2), je možné odstrániť výberom vhodného miesta merania.



Obr. 2 Viaccestné šírenie (multipath)

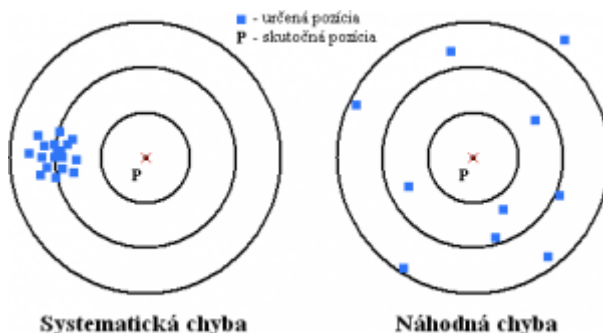
Aby bola minimalizovaná táto systematická chyba, miesto merania sa musí nachádzať mimo akejkoľvek zástavby, najlepšie na vyvýšenom mieste s priamym výhľadom na oblohu. (Obr. 3)



Obr. 3. Použité miesto merania (A)

Poslednou ponímanou skupinou systematických chýb sú tzv. orbitálne chyby (alebo chyby efemeridy), ktoré vznikajú dôsledkom chybných interpretácií orbitálnej polohy GPS družice. Nakoľko v súčasnosti disponuje GPS 32 družicami (čo je maximálny možný stav, zvýšenie by bolo možné len použitím ďalšej frekvencie), je v každom časovom okamihu, z ktoréhokolvek miesta na Zemi viditeľných minimálne 6 GPS družíc – čo je dostatočný počet na minimalizáciu vplyvu tejto chyby. Aby bol vplyv tejto systematickej chyby potlačený úplne, je vhodné opakovať meranie periodicky v 24-hodinových intervaloch, nakoľko konštelácia GPS družíc je každých 24 hodín rovnaká.

Kým systémové chyby skresľujú výsledky merania vždy určitým spôsobom, náhodné chyby sa prejavujú tým, že opakované merania danej veličiny dávajú rôzne, nepredvídateľné výsledky. (Obr. 4)



Obr. 4. Vplyv systematických a náhodných chýb na presnosť lokalizácie polohy

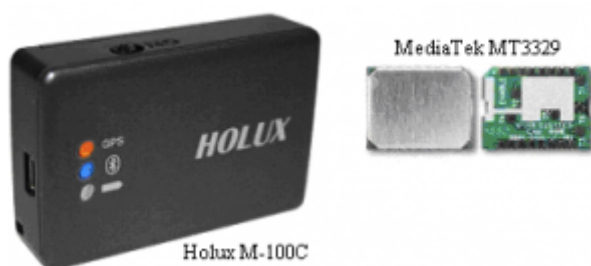
Náhodné chyby sú spôsobené náhodnými vplyvmi na meranie, pričom každá nameraná hodnota je nimi viac či menej ovplyvnená. Náhodné chyby sú štatistickými chybami (majú pravdepodobnostné rozdelenie). Pravdepodobnosť výskytu náhodných chýb je funkciou ich veľkosti, pričom pravdepodobnosť výskytu chyby klesá s narastaním jej veľkosti, t. j. malé chyby sa v súbore vyskytnú vo väčšom počte ako veľké chyby. So vzrastajúcim počtom meraní veľkosť náhodnej chyby klesá.

A práve popis a analýza náhodnej zložky GPS signálu (cez teóriu pravdepodobnosti a štatistiky) môže viesť k návrhu vhodných korekčných metód pre použitie v safety-of-life aplikáciách. Aby však mohla byť táto analýza uskutočnená, je potrebné najskôr premerať presnosť GPS signálu ako presnosť dvojzložkového systému (zemepisná šírka a zemepisná dĺžka zvlášť) za homogénnych podmienok tak, aby bol minimalizovaný vplyv systematických chýb.

3 Meranie

Meracia metóda bola založená na dostatočnom počte zmeraní pozície počas špecifických časových úsekov v štyroch 6-hodinových intervaloch (opakujúcich sa každých 24 hodín) na geodeticky známom, určenom mieste za cca. rovnakých podmienok tak, aby bol minimalizovaný vplyv systematických chýb na meranie (úplná eliminácia je nemožná). Výsledkom mal byť „čistý signál“ obsahujúci len náhodnú chybovú zložku.

Ako meracie zariadenie bol použitý GPS prijímač od firmy Holux s typovým označením M-1000C, s implementovaným čipom MediaTek MT3329. Jedná sa o klasický GPS datalogger s vnútornou Flash pamäťou veľkosti 4MB (dokáže zaznamenať 200 000 údajov), vybavený 850mAh Li-ion akumulátorom, ktorý umožňuje nepretržitú prevádzku zariadenia po dobu 20 hodín (dostatočný čas na vykonanie jedného merania). (Obr. 5)



Obr. 5. Použitý GPS prijímač čipom

MT3329 sa okrem iného vyznačuje aj veľmi dobrou citlivosťou – výrobca udáva až -165dBm, čím by mala byť zaručená relatívne vysoká presnosť celého zariadenia a tým aj merania.

Výber referenčného bodu, na ktorom prebiehalo meranie, bol realizovaný ako výber vhodného geodetického bodu zo špecializovanej geodynamickkej siete SGRN (Slovak Geodynamic Reference Network), ktorá je súčasťou európskeho terestrického súradnicového systému ETRS89 (The European Terrestrial Reference System 1989). Systém ETRS89 je odporúčaný Európskou komisiou pre všetky činnosti súvisiace s georeferencovaním v Európe. Zvolený referenčný bod, ID 2631ZA-1007, sa nachádza mimo okolitej zástavby, na vyvýšenom mieste (vrch kopca) (Obr. 3) a má súradnice:

- zemepisná šírka: B [ETRS89] 49° 12' 22";
- zemepisná dĺžka: L [ETRS89] 18° 45' 28".

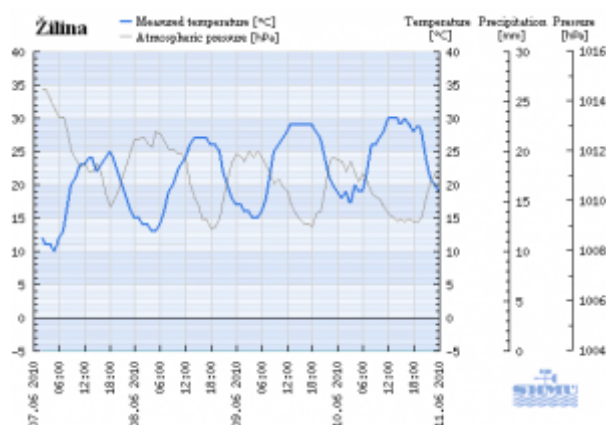
Meranie bolo realizované v dňoch 6. až 10. júna 2010, každých 24 hodín, vždy od cca. 6:15 do 12:30 (6-hodinové intervaly). Každý deň bolo vykonaných cca. 4000 meraní (každých 5 sekúnd 1 záznam), čo je dostatočný počet na vytvorenie štatistického súboru pre ďalšie spracovanie (konečná množina M objektov štatistického skúmania). (Tabuľka 2)

Tabuľka 2. Čas, doba a počet jednotlivých meraní

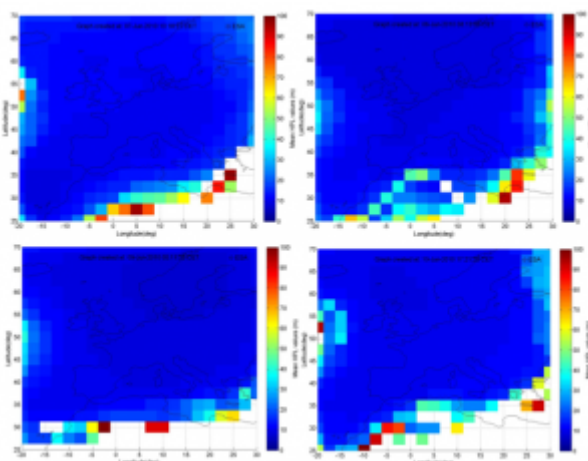
Dátum	Čas merania	Doba merania [hh:mm]	N [počet meraní]
-------	-------------	----------------------	------------------

7.6.2010	06:15 - 12:20	06:05	4380
8.6.2010	06:17 - 12:39	06:22	4584
9.6.2010	06:17 - 12:30	06:13	4480
10.6.2010	06:07 - 12:17	06:10	4442

Počas každého merania bolo približne rovnaké počasie – jasno, s takmer nulovou oblačnosťou, pričom teplota vzduchu stúpala z počiatočných ranných 12°C na poludňajších 25°C. Tlak vzduchu bol stály, cca. 1012hPa a vlhkosť vzduchu sa pohybovala okolo hodnoty 60%. Hodnoty TEC sa držali zhruba na konštantnej úrovni, pričom neboli zaznamenané žiadne vážnejšie výkyvy (napr. geomagnetická búrka). (Obr. 6 a Obr. 7)



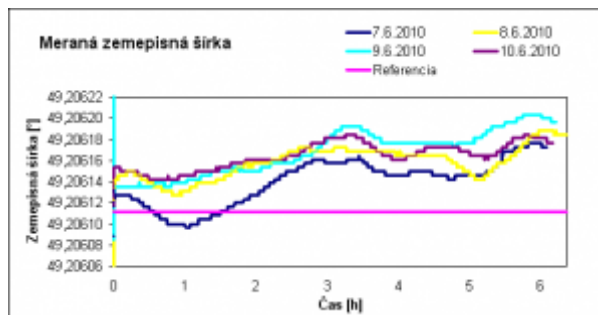
Obr. 6. Meteorologické podmienky merania monitorované Slovenským hydrometeorologickým ústavom (SHMÚ) v dňoch 6-10 júna 2010



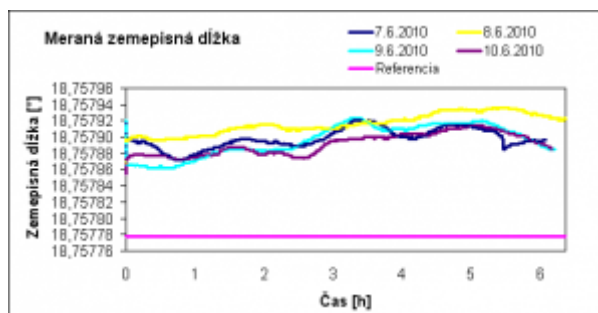
Obr. 7. Hodnoty TEC odmerané Európskou vesmírnou agentúrou (ESA) v dňoch 6-10 júna 2010

4 Výsledky meraní

Výsledky meraní sú ako časové priebehy jednotlivých zložiek (zemepisná šírka a zemepisná dĺžka zvlášť) zobrazené na Obr. 8 a Obr. 9.



Obr. 8. Časový priebeh zmeranej zemepisnej šírky



Obr. 9. Časový priebeh zmeranej zemepisnej dĺžky

Z uvedených časových priebehov je zrejماً analógia medzi jednotlivými meraniami. Čiže je viditeľné, že vplyv systematických chýb na meranie bol minimalizovaný a nachádzal sa zhruba na konštantnej úrovni. Vysoké zákmyty na začiatku merania boli spôsobené tzv. „studeným štartom“ alebo aj Time-To-First-Fix (TTFF) (v našom prípade udáva výrobca 36 sekúnd). TTFF popisuje čas, ktorý je potrebný pre GPS prijímač aby získal všetky informácie potrebné pre správnu lokalizáciu (signál, dáta,...). Je preto vhodné prvých 50 sekúnd merania odfiltrovať (nebrať do úvahy), aby bol vplyv tejto chyby na kvalitu merania odstránený.

Po identifikovaní všetkých možných (známych) systematických chýb a ich zredukovaní na minimálnu úroveň je signál ovplyvnený len náhodnými chybami, ktoré sa dajú detegovať opakovanými meraniami. Ak bolo vykonaných n meraní veličiny x , tak najlepší odhad skutočnej hodnoty nám dáva aritmetický priemer nameraných hodnôt $\bar{x}$ (1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Je pomerne jasné, že ak sa namerané hodnoty x_i budú líšiť len minimálne, $\bar{x}$ bude dobre aproximovať skutočnú hodnotu X . Ak budú mať namerané hodnoty veľký rozptyl (veľkú mieru nepresnosti), možno očakávať, že $\bar{x}$ bude odlišné od X . Rozptyl množiny pozorovaní popisuje rôznorodosť predstavovanú pozorovaniami a je charakterizovaný strednou kvadratickou odchýlkou merania σ (2).

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

Výsledné stredné hodnoty (aritmetické priemery) a stredné kvadratické odchýlky jednotlivých meraní sú uvedené v Tabuľka 3.

Tabuľka 3. Štatistické ukazovatele meraní – aritmetický priemer a stredná kvadratická odchýlka (rozptyl)

Dátum	Aritm. priemer		Rozptyl [$^{\circ}$](e^{-10})	
	z. šírka	z. dĺžka	z. šírka	z. dĺžka
7.6.2010	49,20614	18,75790	2,16936	1,38675
8.6.2010	49,20616	18,75792	1,35186	1,39872
9.6.2010	49,20617	18,75789	7,11023	3,87962
10.6.2010	49,20616	18,75789	0,38283	1,81096

Z uvedenej tabuľky je zrejmé, že rozdiely medzi jednotlivými štatistickými ukazovateľmi sú minimálne, čiže je možné konštatovať, že vplyv systematickej zložky na kvalitu signálu bol minimalizovaný.

5 Záver

V tomto príspevku bola vykonaná analýza GPS signálu ako analýza dvojzložkového systému (zemepisná šírka a zemepisná dĺžka separátne) s pokusom minimalizovať vplyv systematických chýb, ktoré sa môžu vyskytnúť počas lokalizácie. Boli použité všetky známe metódy eliminácie systematických chýb, no bez využitia podporných mechanizmov lokalizácie (SBAS – Satellite-Based Augmentation System, konkrétne je na území EÚ možné od 1.10.2009 bezplatne využívať službu EGNOS; DGPS – diferenčná GPS; AGPS – asistovaná GPS;...), aby bol analyzovaný len „čistý“ GPS signál.

Dá sa predpokladať, že vplyv systematických chýb na kvalitu merania bol minimalizovaný a namerané hodnoty boli ovplyvnené iba náhodnými chybami, nakoľko rozdiely medzi nameranými časovými charakteristikami signálov boli minimálne. V reáli však kompletnú elimináciu vplyvu systematických chýb na lokalizáciu dosiahnuť nemožno, pretože aj keď by boli podmienky na meranie približne rovnaké pre všetky merania, ich detailné časové charakteristiky sa pravdepodobne vždy budú líšiť (strmosť stúpania/klesania teploty vzduchu; zmena vlhkosti vzduchu; náhle zmeny v Ionosfére (TEC) – geomagnetické búrky; oneskorenie GPS družíc – obeh Zeme netrvá presne 24 hodín, ale 23h56min;...).

Homogenitou merania je však možné dosiahnuť, že všetky typy systematických chýb sa ustália na približne konštantnej úrovni, čo je postačujúce pre analýzu chovania sa náhodnej zložky GPS signálu. V ďalšom výskume bude vykonaná štatistická analýza GPS signálu z hľadiska stacionarity a ergodicity, ktorá by mala v konečnom dôsledku rezultovať do návrhu vhodných filtračných metód, ktoré umožnia používanie GPS aj v safety-of-life aplikáciách (kým nebude spustená druhá generácia GNSS).

References

1. EUROPA PRESS RELEASE Commission awards major contracts to make Galileo operational early 2014. 2010.
2. http://www.globalsecurity.org/space/systems/gps_3.htm
3. EUROPEAN SPACE AGENCY Real time performance of EGNOS. 2010.
http://www.egnos-pro.esa.int/IMAGETech/imagetech_realtime.html
4. DANA P. H. – Global Positioning System Overview. The Geographer's Craft Project, Department of Geography, The University of Colorado at Boulder. 2000.

-
5. Michalčák a kol. – Geodézia II, Teória chýb a vyrovnávací počet.
http://www.sgs.edu.sk/HTML/geodezia2_7.htm
 6. SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. 2010.
<http://www.shmu.sk/>
 7. GKÚ (Geodetický a kartografický ústav) – Geodetické základy. (2009)
<http://www.gku.sk/predmet-cinnosti/geodeticke-zaklady>

Katedra Technickej Kybernetiky, Žilinská Univerzita v Žiline, Fakulta Riadenia a Informatiky, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika
