

ROBUSTNE STATISTIČNE METODE, DOPPLERJEVA OPAZOVANJA IN VPLIV VEČPOTJA PRI OPAZOVANJIH GNSS V OTEŽENIH RAZMERAH

ROBUST STATISTICS, DOPPLER OBSERVATIONS AND MULTIPATH EFFECT IN GNSS IN ADVERSE CONDITIONS

Klemen Kozmus Trajkovski, Oskar Sterle, Bojan Stopar

UDK: 519.246
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 19. 1. 2016
Sprejeto: 24. 2. 2016

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.01.42-52
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 19. 1. 2016
Accepted: 24. 2. 2016

IZVLEČEK

Z visokoobčutljivimi sprejemniki se poskuša zagotoviti neprekinjena navigacija, tudi v oteženih razmerah za sprejem signalov. Posebna sestava teh sprejemnikov in posebne tehnike za njihovo obdelavo omogočajo sprejem zelo šibkih signalov. Vplivi na opazovanja, predvsem večpotje, lahko povzročijo velike pogoške položaja. V prispevku predstavljamo koncept delovanja visokoobčutljivih sprejemnikov GPS ter prikazujemo možnosti za uporabo obdelave opazovanj z robustnimi statističnimi metodami in Dopplerjevimi opazovanji. Na podlagi Dopplerjevih opazovanj lahko ocenimo velikost pogoška večpotja.

ABSTRACT

High sensitivity GPS receivers represent an attempt at seamless navigation in conditions that are not favourable for satellite reception. Reception of very weak signals is enabled through the special structure of these receivers and special signal processing techniques. Observation error sources, especially multipath, can cause large errors in position. The concept of high sensitivity GPS receivers operation is presented. The potential of signal processing using robust statistic methods and Doppler observables is discussed. The multipath error can be estimated using Doppler observables.

KLJUČNE BESEDE

visokoobčutljivi sprejemniki GNSS, otežene razmere, večpotje, robustne metode statistike, Dopplerjeva opazovanja

KEY WORDS

high sensitivity GNSS receivers, adverse conditions, multipath, robust statistics, Doppler observables

1 UVOD

Sistemi za določanje položaja na podlagi signalov s satelitov GNSS (angl. global navigation satellite system) omogočajo širokemu krogu uporabnikov določitev globalnih koordinat kjer koli na Zemlji. Najbolj razširjen GNSS je GPS (angl. global positioning system). Na področju navigacijskih naprav in drugih mobilnih naprav je GPS še vedno edini podprti GNSS, zato bomo v nadaljevanju govorili o sprejemnikih GPS.

Za opazovanja GNSS je včasih veljalo, da so omejena zgolj na območja, na katerih sprejem signalov ni moten. S pojavom tako imenovanih visokoobčutljivih sprejemnikov GPS (angl. High Sensitivity GPS, s kratico HS GPS) se je uporaba GPS razširila tudi na območja z oteženim sprejemom signala, kot so urbana območja, poraščena območja in celo notranjosti objektov.

Signali GPS so že ob prihodu na Zemljo šibki. Z vsakim prehodom skozi fizično oviro se signal še oslabi. Običajni sprejemniki GPS ne omogočajo sprejema zelo šibkih signalov. Zaradi posebne sestave njihovega sprejemnega dela in posebnih tehnik za obdelavo sprejetih signalov so jih sposobni sprejemati samo sprejemniki HS GPS.

Sprejemniki GPS v splošnem določajo položaj na podlagi kodnih psevdorazdalj ali s kombinacijo kodnih in faznih opazovanj. Podatek opazovanj je običajno tudi SNR (angl. signal-to-noise ratio), ki podaja moč signala. Za določitev položaja ali glajenje kodnih opazovanj lahko uporabimo tudi Dopplerjeva opazovanja.

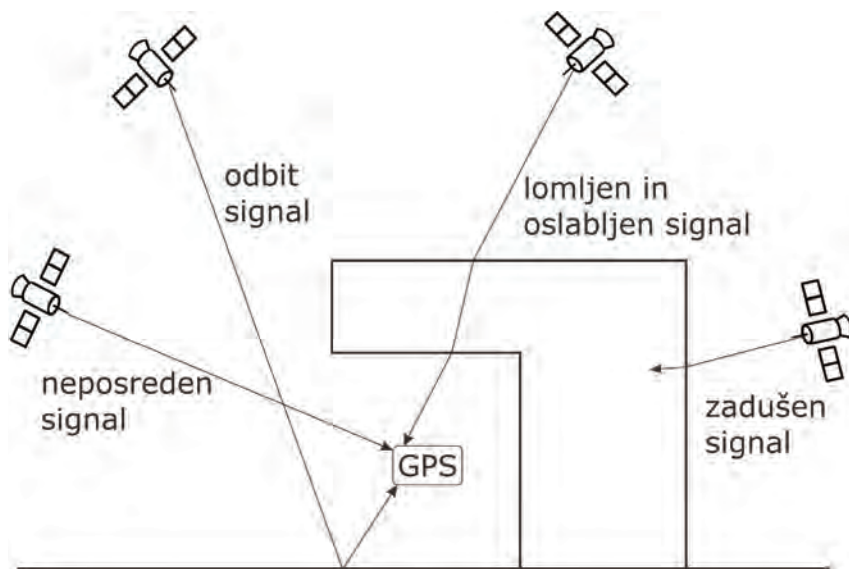
Določitev položaja na podlagi opazovanj GPS običajno temelji na obdelavi podatkov opazovanj po metodi najmanjših kvadratov (v nadaljevanju: MNK). V obdelavo lahko vključimo metode robustne statistike, ki so v splošnem manj občutljive za grobe in sistematične pogreške kot MNK.

2 GPS V OTEŽENIH RAZMERAH

Vplivi in pogreški na opazovanja GPS v oteženih razmerah so enaki kot v vseh drugih razmerah: pogreški tirnic satelitov, pogrešek stanja satelitove ure, ionosferska refrakcija, troposferska refrakcija, šum sprejemnika, pogrešek stanja sprejemnikove ure in odklon faznega centra antene. Vrednosti naštetih pogreškov so neodvisne od okolja sprejemnika.

Prevladujoč vpliv v oteženih razmerah je zagotovo pogrešek tako imenovanega večpotja (angl. multipath). Signal lahko do sprejemnika prispe nemoteno oziroma direktno, lahko se odbije od odbojnih površin, pri prehodu skozi fizične ovire se oslabi in lomi, lahko pa se celo zaduši oziroma toliko oslabi, da je preslaboten tudi za sprejemnike HS GPS. Primeri različnih poti signalov do sprejemnika so prikazani na sliki 1. V nekem trenutku lahko z istega satelita prispejo direkten signal, odbit signal (lahko jih je tudi več) ter lomljen in oslavljen signal (tudi teh je lahko več).

Nenadzorovano vedenje signalov v urbanih okoljih, območjih z gostim rastjem in znotraj objektov lahko povzroči odstopanje položaja od pravega tudi za sto metrov ali več.



Slika 1: Pogreški večpotja v oteženih razmerah.

2.1 Visokoobčutljivi sprejemniki GPS

Sateliti GPS oddajajo kodo C/A na nosilnem valovanju L1 s približno močjo 27 W, s čimer ustrezajo zahtevam po najmanjši moči signala na Zemljini površini, ki mora biti vsaj -160 dBW (ARINC, 2000). Enota dBW opisuje logaritmično razmerje moči v primerjavi z 1 W, enota dBm, ki se tudi pogosto pojavlja, pa razmerje moči v primerjavi z 1 mW. Vrednost -160 dBW ustreza moči 10^{-16} W in je enakovredna -130 dBm.

Sprejemniki GNSS so sposobni določiti svoj položaj samo, ko sprejemajo signale z vsaj štirih satelitov. Na območjih z gostim rastjem, v urbanih okoljih in znotraj objektov pogosto ni mogoče zagotoviti zadostnega števila signalov. Težavo rešujejo tako imenovani visokoobčutljivi sprejemniki GPS. Sprejemniki HS GPS lahko sprejemajo signale z močjo, manjšo od -180 dBW. Višjo občutljivost ti sprejemniki dosežejo s podaljševanjem časa integracije signala na več kot tipičnih 2–5 ms, kot navaja na primer Wieser (2006). Čas integracije lahko podaljšajo na več 100 ms.

Sprejemniki HS GPS vsebujejo veliko več korelatorjev kot običajni sprejemniki GPS. Običajne vrednosti za HS GPS so nekaj 100.000 korelatorjev, novejši sprejemniki HS GPS vsebujejo že več milijonov korelatorjev. Običajni sprejemniki delajo z 12, 24, 36, 48 oziroma 60 korelatorji. Pri teh signale s posameznega satelita praviloma obdeluje en sam korelator, medtem ko pri HS GPS delčke valovanj s posameznega satelita sprejema več korelatorjev.

Vrednost SNR pomeni razmerje moči nosilnega valovanja in šuma. Moč signala -160 dBW tipično ustreza vrednosti SNR med 41 dBHz in 44 dBHz. Običajni sprejemniki GPS sprejemajo signale, ki imajo vrednost SNR večjo od 33–35 dBHz, kar praktično pomeni, da lahko sprejemajo zgolj signale s satelitov, ki so v tako imenovani liniji vidnosti. Signali, ki prečijo fizično oviro, so praviloma preslabotni za običajne sprejemnike GPS, kot trdi Wieser (2006).

Moč signala upade ob prehodu skozi kateri koli medij razen brezračnega prostora. V normalnih razmerah že sama atmosfera oslabi signal za približno 1 dB, kot navaja Lachapelle (2004). Tipične vrednosti oslabitve signala ob prehodu skozi različne snovi, povzeto po Qinetiq (2005), so:

- 3,5 dB ... steklo (19 mm),
- 4,3 dB ... suh les (76 mm),
- 5,5 dB ... moker les,
- 5,0 dB ... suha opeka,
- 26,0 dB ... beton (203 mm),
- 29,0 dB ... armiran beton (203 mm).

Visokoobčutljivi senzori so vgrajeni v večini novejših naprav, ki jih uporabljamo v vsakdanjem življenju in vsebujejo senzor GPS. Največji proizvajalci čipov so SiRF, u-blox, QinetiQ in MTK. Moduli so tako majhni, da jih dejansko lahko vgradijo v vsako elektronsko napravo. Poleg namenskih navigacijskih naprav čipe GPS vgrajujejo v mobilne telefone, digitalne fotoaparate, zapestne ure, lahko so v obliki ključa USB ipd.

Vsi sprejemniki HS GPS imajo vgrajeno strojno programsko opremo (angl. firmware), ki na podlagi lastnih algoritmov določa položaj sprejemnika v vsakem trenutku. Položaj in ostale spremne podatke zunanjim odjemalcem pošilja v standardni obliki stavkov NMEA (angl. National Marine Electronics Association).

Zelo redki sprejemniki HS GPS omogočajo posredovanje surovih podatkov opazovanj, tj. kodnih psevdorazdalj, vrednosti faznih in Dopplerjevih opazovanj ter razmerje moči signala in šuma za posamezen signal. Lastne algoritme določitve položaja lahko razvijamo samo na podlagi surovih opazovanj. Kodne psevdorazdalje so pri tem nujne, če pridobimo še ostale podatke, jih lahko vključimo v postopek za izboljšanje kakovosti položaja. Podjetje u-blox je eden redkih ponudnikov tako imenovanih preizkusnih kompletov (angl. evaluation kit) za naprave HS GPS, ki poleg obdelanih opazovanj lahko uporabniku posredujejo tudi podatke surovih opazovanj: kodne psevdorazdalje, fazna in Dopplerjeva opazovanja ter vrednost SNR. Za razvoj lastnih postopkov obdelave opazovanj HS GPS smo uporabili modela AEK-4T in EVK-5T podjetja u-blox. Najnovejši čipi serij 7 in 8 tega podjetja, sodeč po navedbah na njihovi spletni strani (<https://www.u-blox.com/en>), sicer podpirajo tudi GLONASS.

3 RAZVOJ LASTNIH POSTOPKOV OBDELAVE

Osnovni način za avtonomno določitev položaja je izravnava podatkov kodnih psevdorazdalj po MNK. Metoda v nemotenih razmerah za sprejem signalov s satelitov omogoča horizontalno točnost do 10 metrov. V oteženih razmerah dosežena točnost zelo pade, tudi na več kot 100 metrov. Kodna opazovanja so v oteženih razmerah zelo obremenjena s pogreškom večpotja, zato lahko izračunani položaj zelo odstopa od dejanskega.

Izravnava po MNK je primerna za obdelavo opazovanj, ki vsebujejo zgolj slučajne pogreške. Kot trdita Basella in Garcia-Asenjo (2008), je ob prisotnosti sistematičnih in grobih pogreškov v opazovanjih MNK zelo občutljiva za tovrstne pogreške in lahko da napačne rezultate. Pri opazovanjih GPS v oteženih razmerah je prisotnost grobih in sistematičnih pogreškov zelo pogosta. Vpliv sistematičnih in grobih pogreškov lahko zmanjšamo z metodami robustne statistike. Bistvo uporabljenih metod robustne statistike je dodelitev

uteži opazovanjem z ustrezno utežno funkcijo, optimalno rešitev pa pridobimo v iterativnem postopku MNK. Obstaja več različnih utežnih funkcij, pogosto uporabljamo tako imenovano L1-normo, kjer utež izračunamo kot obratno absolutno vrednost popravka. Pri lastnih postopkih obdelave smo uporabili modificirano L1-normo, da smo se izognili morebitnemu deljenju z nič v primeru ničelnih popravkov:

$$w_i = \begin{cases} \frac{1}{|v_i|}, & |v_i| \geq 10^{-4} m \\ 10^4 m, & |v_i| < 10^{-4} m \end{cases}.$$

Če to utežno funkcijo vključimo v postopek MNK, gre za minimizacijo vsote absolutnih vrednosti popravkov, kot dokazujeta Baselga in Garcia-Asenjo (2008):

$$\min \sum v_i^2 w_i = \min \sum v_i^2 \frac{1}{|v_i|} = \min \sum |v_i|.$$

Robustne metode statistike lahko uporabimo tudi kot orodje za izločanje grobih pogreškov. V ta namen lahko uporabimo bikvadratno utežno funkcijo:

$$w_i = \begin{cases} (1 - v_{st}^2)^2, & |v_{st}| < 1 \\ 0, & |v_{st}| \geq 1 \end{cases}$$

kjer je v_{st} standardizirani izravnani popravek. Če njegova vrednost znaša več kot 1, popravek dobi utež 0, kar pomeni, da se v izravnavi ne upošteva. Pri opazovanjih GPS v oteženih razmerah se lahko zgodi, da bi tovrstna utež kot grobo pogrešena označila več opazovanj, kar lahko privede do kritičnega zmanjšanja števila opazovanj.

Dopplerjev pojav je v splošnem sprememba frekvence valovanja pri spremembi razdalje med opazovalcem in virom valovanja. Pri približevanju je sprejeta frekvenca višja od oddane, pri oddaljevanju pa nižja od oddane. Frekvenca se ne spreminja, če je oddaljenost stalna. Pri opazovanjih GNSS je Dopplerjev pojav posledica relativne spremembe razdalje med sprejemnikom in satelitom ter se kaže v spremembi frekvence sprejetega valovanja v sprejemniku (Kozmus Trajkovski, 2010).

Spremembo razdalje med sprejemnikom in satelitom na podlagi Dopplerjevega pojava izračunamo po enačbi, ki jo najdemo v Cheng (1999):

$$\Delta D = \frac{1}{2} (D1_{i-1} + D1_i) \cdot \lambda \cdot \Delta t,$$

kjer sta $D1_{i-1}$ in $D1_i$ Dopplerjevi opazovanji v predhodni in trenutni epohi, λ je valovna dolžina in Δt je časovni interval med zaporednima epohama. Dopplerjeva opazovanja lahko uporabimo tudi za glajenje kodnih opazovanj z različnimi filtri. Najbolj znan filter za glajenje kodnih opazovanj je tako imenovani Hatch-filter, ki ga opisujeta tudi Nie in Liu (2005).

Položaj sprejemnika lahko določimo na podlagi kodnih psevdorazdalj ali s kombinacijo kodnih psevdorazdalj in Dopplerjevih opazovanj. Ker eden od testnih sprejemnikov ne podpira faznih opazovanj, teh nismo vključili v postopek obdelave. Določitev začetnega položaja poteka le s kodnimi opazovanji. Po končanem iterativnem postopku z robustno metodo dobimo izravnane vrednosti za začetni položaj (X, Y, Z) in ocenjeno začetno stanje sprejemnikove ure.

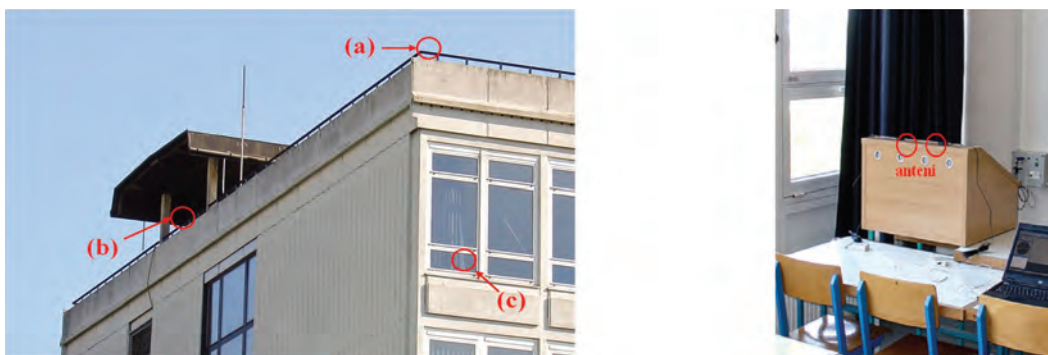
Določitev položaja v naslednjih epohah poteka relativno glede na začetni položaj, če v obdelavo vključimo kodna in Dopplerjeva opazovanja. Pri zgolj kodnih opazovanjih je določitev vsake epohe neodvisna od predhodnih, tj. poteka enako kot za začetni položaj.

Določitev neznank v epohah, ki sledijo začetni, poteka v dveh fazah. V prvi fazi iterativno določimo neznanko popravka sprejemnikove ure. Pri robustnem načinu obdelave je v prvi iteraciji utež L1-norme enaka 1, nato jo računamo enako kot v prvi epohi. Kadar v postopek vključimo Dopplerjeva opazovanja, za določitev popravka sprejemnikove ure uporabimo le Dopplerjeva opazovanja. Zaradi tega je pri tem načinu krivulja izračunanih vrednosti precej bolj gladka od krivulje, ki jo dobimo s skupno obravnavo popravka sprejemnikove ure in položaja ter vključitvijo kodnih opazovanj. Obenem zelo zmanjšamo nenadne večje spremembe popravkov.

V drugi fazi obdelave posamezne epohe določimo preostale tri neznanke položaja. Popravek sprejemnikove ure iz prve faze je vhodni podatek za drugo fazo obdelave.

4 PREIZKUSI IN ANALIZA REZULTATOV

Testiranja razvitih metod obdelave in raznih nastavitev parametrov smo izvedli v različnih razmerah: neoviran sprejem signalov, otežen sprejem signalov, znotraj objekta in kinematični način določanja položaja v mešanih razmerah.



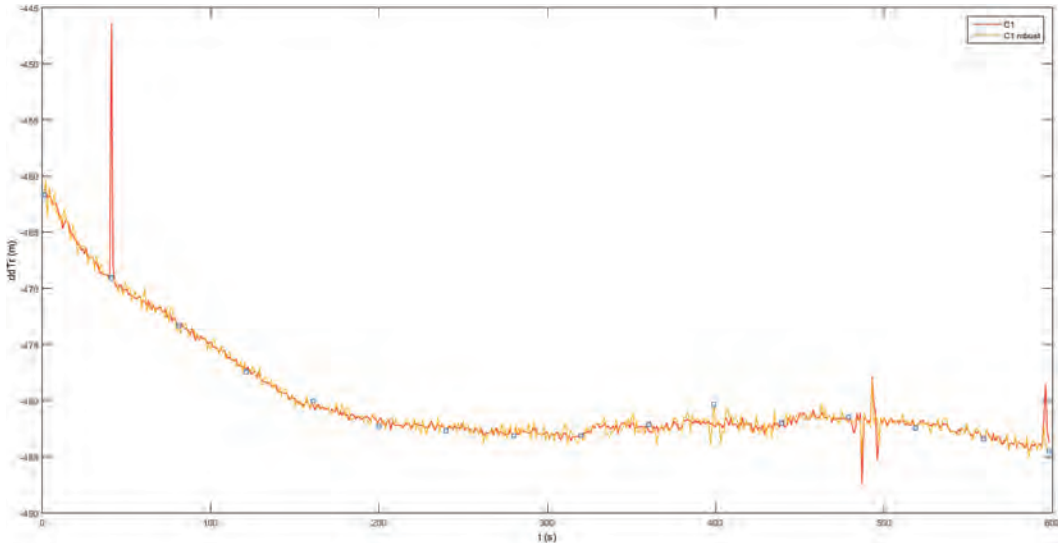
Slika 2: Izmeritvene točke v različnih razmerah.

Na sliki 2 levo so prikazane točke za testne izmere v različnih razmerah: (a) na odprtem, (b) na oviranem območju in (c) znotraj objekta. Na desni strani slike 2 je prikaz postavitve anten sprejemnika znotraj objekta.

4.1 Robustne metode obdelave

Učinkovitost metod robustne statistike prikazujeta primera, objavljena v Kozmus Trajkovski (2010). V obdelavi kodnih psevdorazdalj je bila ena razdalja namerno spremenjena za 50 metrov od dejansko izmerjene. Pri običajni obdelavi po MNK je odmik položaja, ki je izračunan s pokvarjeno psevdorazdaljo, od položaja, ki ga pridobimo z dejanskimi opazovanji, 27,8 metra. Pri robustni obdelavi je odmik obeh položajev 0,08 metra. Pokvarjeno je bilo samo eno od 18 opazovanj. Pri kodnih opazovanjih se lahko zaradi številnih vplivov, še posebej v oteženih razmerah, pogosto pojavijo nenadna odstopanja v psevdorazdaljah za več deset metrov.

Veliko prednost robustnih tehnik pred običajno MNK ponazarja tudi primer določanja popravkov sprejemnikov ure. Na grafu 1 so z rdečo barvo prikazane spremembe popravka sprejemnikove ure, pridobljene z MNK. Te so zelo občutljive za spremembo sestave satelitov. Veliko manj so občutljive robustne tehnike, spremembe popravka sprejemnikove ure ob uporabi robustne statistike so prikazane z oranžno barvo.



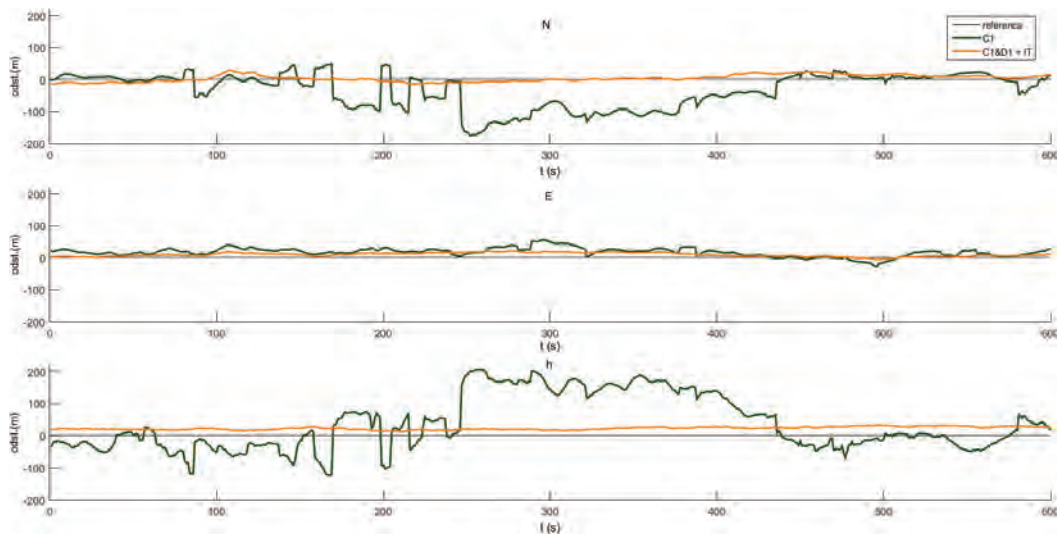
Graf 1: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure v neoviranih razmerah z MNK (rdeča – temnejša barva) in robustno metodo (oranžna – svetlejša barva).

Zgornji primer se nanaša na neoviran sprejem signalov s satelitov, medtem ko se v oteženih razmerah večkrat pripeti, da obdelava z robustnimi tehnikami v določenih epohah ne konvergira in zato ni vidne izboljšave rezultatov v primerjavi z MNK.

4.2 Dopplerjeva opazovanja

Začetni položaj vedno določamo samo s kodnimi opazovanj, saj lahko na podlagi Dopplerjevega pojava ocenimo zgolj spremembo razdalje in torej potrebujemo referenčno razdaljo. Oba tipa opazovanj lahko obravnavamo kot samostojna, lahko pa Dopplerjeva opazovanja uporabimo za filtriranje kodnih opazovanj. V enem ali drugem primeru moramo smiselno ovrednotiti oba tipa opazovanj, saj so Dopplerjeva opazovanja precej bolj natančna od kodnih, kljub temu pa še vedno nepopolna v oteženih razmerah. Glajenje kodnih opazovanj z Dopplerjevimi opazovanji največkrat poteka z že omenjenim Hatch-filtrom.

Na grafu 2 je prikazan primer rezultatov statične izmere na točki z znanim položajem v notranjosti objekta. Z zeleno barvo so prikazana odstopanja po koordinatnih komponentah obdelave kodnih psevdorazdalj po MNK, z oranžno pa odstopanja lastne metode obdelave kodnih in Dopplerjevih opazovanj z upoštevanjem modelov ionosferske in troposferske refrakcije.



Graf 2: Primerjava odstopanj položajev obdelave po MNK (zelena – temnejša barva) ter z lastno obdelavo kodnih in Dopplerjevih opazovanj (oranžna – svetlejša barva) v notranjosti stavbe.

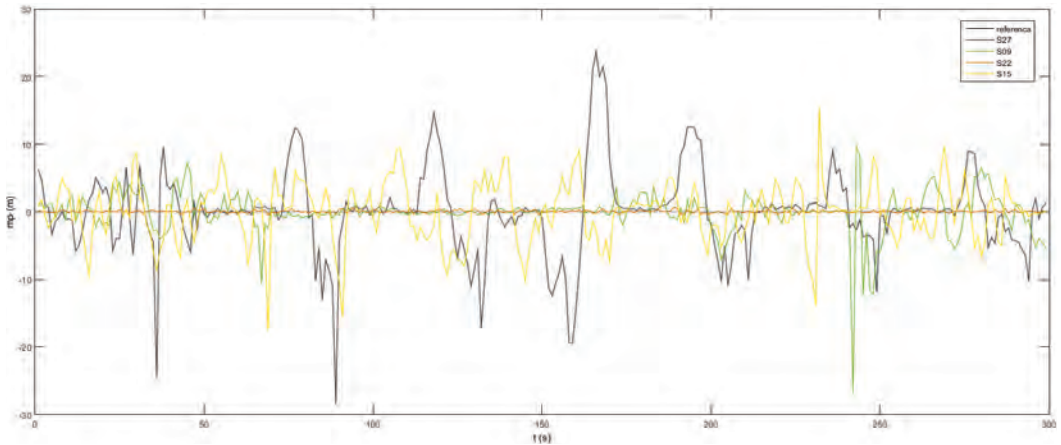
Povprečna absolutna vrednost odstopanja od pravega položaja pri obdelavi kodnih opazovanj po MNK je 45 metrov in 19 metrov po komponentah N in E ter 70 metrov po višinski komponenti, povprečna absolutna odstopanja pri lastni metodi so 9 metrov, 10 metrov in 24 metrov po istih komponentah. Razponi odstopanj po komponentah pri MNK so: za N med – 176 metri in + 49 metri, za E med – 29 metri in + 55 metri ter za h med – 123 metri in + 207 metri. Odstopanja po lastni metodi: za N med – 14 metri in + 29 metri, za E med – 5 metri in + 21 metri ter za h med 14 metri in 33 metri.

Največja odstopanja so po pričakovanjih v višinski komponenti (spodnji del grafa, oznaka h), kjer dosežejo tudi 200 metrov. Z ustrežno metodo obdelave jih lahko omejimo, v tem primeru do okvirno 30 metrov tudi v višinski komponenti.

4.3 Ocena vpliva večpotja na kodna opazovanja

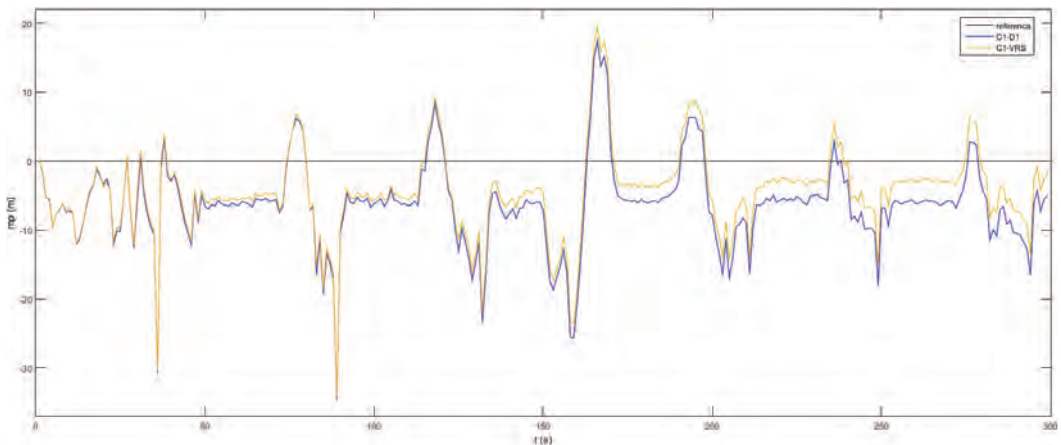
Pogrešek večpotja naj bi na Dopplerjeva opazovanja vplival neznatno. Sam pogrešek pa zelo močno vpliva na kodna opazovanja. Vpliv pogreška večpotja na kodna opazovanja lahko potemtakem ocenimo iz razlik psevdorazdalj, pridobljenih s kodnimi in Dopplerjevimi opazovanji.

Na grafu 3 so prikazane ocene vrednosti pogreška večpotja za kodna opazovanja na primeru opazovanja v oteženih razmerah, pod nadstrešnico. Prikazane so samo vrednosti le za najbolj značilne primere. Vrednosti za prikazane satelite S27, S09 in S15 so med – 28 metri in + 23 metri, medtem ko so vrednosti za satelit S22 med – 0,5 metra in + 0,7 metra. Glede na vrednosti za satelit S22 lahko sklepamo, da je bil signal s tega satelita vedno sprejet neposredno, torej brez predhodnega odboja, ali pa je vpliv odboja neznamen.



Graf 3: Ocena pogreška večpotja z Dopplerjevimi opazovanji.

Primernost metode za oceno pogreška večpotja dokazuje tudi primerjava z opazovanji VRS (angl. virtual reference system – sistem tvorjenja navideznih opazovanj GNSS), ki jih lahko generiramo za poljuben položaj in poljuben trenutek. Grafi ocenjenih vrednosti pogreška večpotja z Dopplerjevimi opazovanji in VRS so zelo podobni, kot dokazuje graf 4. Za satelit 27 so z modro barvo prikazane ocenjene vrednosti pogreška večpotja na podlagi Dopplerjevih opazovanj, z oranžno barvo pa vrednosti pogreška večpotja, ocenjene na podlagi navideznih opazovanj VRS. Začetni vrednosti sta nastavljeni na isto vrednost, postopoma pa se razideta zaradi drsenja (angl. drift) stanja sprejemnikove ure, ki tu ni določeno.



Graf 4: Primerjave določitve pogreška večpotja z Dopplerjevimi opazovanji (modra – temnejša barva) in z VRS (oranžna – svetlejša barva).

Tako ocenjene vrednosti pogreška psevdorazdalje sicer vsebujejo tudi druge pogreške, ne samo večpotja, vendar so drugi vplivi za več stopenjk manjši od večpotja, zato lahko trdimo, da velika večina teh vrednosti pripada ravno vplivu večpotja.

5 SKLEP

Z visokoobčutljivimi sprejemniki GPS se je uporaba satelitske navigacije dejansko razširila tudi na območja z oteženim sprejemom signala in celo v notranjost objektov. Dober primer je notranjost avtomobila, kjer običajni sprejemniki GPS ne zaznavajo dovolj satelitov, če sploh katerega, medtem ko navigacijske naprave ali telefoni oziroma tablični računalniki z vgrajenim senzorjem GPS v avtomobilu brez težav določijo položaj.

Razpoložljivost signalov GPS v notranjosti stavb je sicer zelo omejena, sprejem zadostnega števila satelitov je mogoč v bližini zunanjih sten in oken. Zavedati se je treba, da v tovrstnih razmerah lahko nastanejo veliki pogreški v položaju, tudi 100 metrov in več.

Z robustnimi metodami se dokazano izboljša kakovost določitve položaja na območjih brez ovir. V oteženih razmerah pa se lahko pripeti, da iterativen postopek ne konvergira, zaradi česar je določitev položaja nezanesljiva.

Dopplerjeva opazovanja v postopkih obdelave opazovanj GPS v splošnem redko uporabljamo. Z lastnimi postopki obdelave opazovanj smo pokazali, da so Dopplerjeva opazovanja koristna pri določanju popravka stanja sprejemnikove ure in določanju neznank položaja. Zaradi svojih značilnosti se lahko uporabljajo tudi za oceno velikosti pogreška večpotja za signale s posameznih satelitov.

Pri določanju položaja v oteženih razmerah je treba upoštevati, da potrebujejo sprejemniki za določitev prvega položaja oziroma zaznavanje satelitov močnejše signale kot kasneje za njihovo sledenje. Če tako sprejemnik zaženemo (tako imenovani hladni zagon) v nekem okolju z oteženim sprejemom, se lahko zgodi, da ne bo mogel določiti položaja, če pa začetne položaje določi na odprtem območju, mu bo uspelo določiti položaj tudi v oteženih razmerah.

Velika odstopanja položajev v oteženih razmerah lahko z ustreznimi metodami obdelave zmanjšamo na razumno raven, na stopnjo od 20 do 30 metrov tudi v zelo slabih razmerah. Vendar pa rešitev ni univerzalna in je odvisna od številnih dejavnikov. Kljub zelo občutljivim sprejemnikom pa navigacija GPS še vedno ni mogoča povsod, problematična je predvsem notranjost stavb.

Literatura in viri:

- ARINC (2000). Interface Control Document ICD-GPS-200 Revision IRN-200C-004. El Segundo, ZDA: ARINC Research Corporation.
- Baselga, S., García-Asenjo, L. (2008). Global Robust Estimation and Its Application to GPS Positioning. *Computers and Mathematics with Applications*, 56(3), 709–714. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2008.02.001>
- Cheng, P. (1999). Remarks on Doppler-Aided Smoothing of Code Ranges. *Journal of Geodesy*, 73(1), 23–28. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s001900050214>
- Kozmus Trajkovski, K. (2010). Razvoj postopkov obdelave opazovanj GNSS za navigacijo oseb v oteženih pogojih. Doktorska disertacija. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.
- Kozmus Trajkovski, K., Sterle, O., Stopar, B. (2010). Sturdy Positioning with High Sensitivity GPS Sensors Under Adverse Conditions. *Sensors* 2010, 10, 8332–8347. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s100908332>
- Lachapelle, G. (2004). GNSS Indoor Location Technologies. *Journal of Global Positioning Systems*, 3(1-2), 2–11.
- Nie, G., Liu, J. (2005). Application of Geodetic Receivers to Timing and Time Transfer. *Geo-spatial Information*, 8(1), 8–13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02826984>
- Qinetiq (2005). QinetiQ Q20 High Sensitivity GPS Receiver – Demonstration Kit User Guide. London: QinetiQ.
- Wieser, A. (2006). High-Sensitivity GNSS: The Trade-off between Availability and Accuracy. V: H. Kahmen in A. Chrzanowski (ur.), *Proceedings of the 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, 12th FIG Symposium on Deformation Measurement*, Baden.



Kozmus Trajkovski K., Sterle O., Stopar B. (2016). Robustne statistične metode, Dopplerjeva opazovanja in vpliv večpotja pri opazovanjih GNSS v oteženih razmerah. Geodetski vestnik, 60 (1): 42-52. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.01.42-52

asist. dr. Klemen Kozmus Trajkovski, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: klemen.kozmus@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: bojan.stopar@fgg.uni-lj.si

asist. dr. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: oskar.sterle@fgg.uni-lj.si