

Vplivi dogajanj na Soncu na določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi GNSS-instrumenti: priprava na vrh 24. Sončevega cikla

Oskar Sterle¹, Bojan Stopar² in Polona Pavlovčič Prešeren³

Povzetek

V prispevku posredno način predstavljamo dogajanja na Soncu v času večje in manjše intenzitete prejšnjega 23. in trenutnega 24. Sončevega cikla. Sončeva aktivnost sledi periodi enajstih let, intenzivnost dogajanj pa med drugim opišemo s številom Sončevih peg in s številom različnih izbruhov na Soncu. Dogajanja na Soncu vplivajo tudi na spremembo števila prostih elektronov v plasti ionosfere, kar naprej vpliva na spremembo razširjanja radijskih valov, to je tudi GNSS-opazovanj. V obdelavi GNSS-opazovanj moramo vpliv upoštevati in ga odstraniti ali zmanjšati z uporabo ustreznih modelov. Vpliv plasti ionosfere na razširjanje GNSS-opazovanj je različen za različne tipe opazovanj. Poznamo različne pristope modeliranja in upoštevanja vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-opazovanja. V prispevku je opisan način uporabe GNSS-tehnologije za spremljanje dogajanj v ionosferi, saj nam konkretno izvedena GNSS-opazovanja lahko služijo za modeliranje dogajanj v ionosferi. Tako pridobljen potek dogajanj v ionosferi lahko primerjamo s podatki o Sončevih pegah, ki so pridobljeni z drugimi metodami. Glavni namen prispevka je pokazati, kako neupoštevanje ali pomanjkljivo upoštevanje vpliva ionosfere na razširjanje GNSS-opazovanj vpliva na točnost in natančnost določitve položaja na Zemlji. Predstavljene so prednosti in slabosti modeliranja ionosferske refrakcije. Iz podatkov opazovanj iz prejšnjega Sončevega cikla so prikazane situacije, ko večja nenadna aktivnost na Soncu lahko povzroči večmetersko spremembo določitve položaja, če le-ta temelji na obdelavi enofrekvenčnih kodnih opazovanj.

Uvod

V decembru 2008 smo prešli v 24. Sončev cikel, katerega vrh pričakujemo v maju 2013. V tem času bo povečana intenzivnost dogajanja na Soncu. Dogajanje na Soncu merimo s številom Sončevih peg in pojavom večjih izbruhov različnih tipov (izbruhi X, F, ...). Sončeva aktivnost ima cikel (periodo) enajstih let, zato nam študija dogajanj v prejšnjih ciklih lahko služi kot pomoč pri razumevanju dogajanj v trenutnem ciklu. Pojavi na Soncu vplivajo na spremembe v plasti ionosfere, kar vpliva na razširjanje radijskih signalov v okviru GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) in posledično na določitev položaja na Zemlji ali v njeni bližini. Uporabnik GNSS-tehnologije dogajanj na Soncu direktno ne zazna oziroma jih zazna šele v primeru izgube GNSS-signala in posledično v nezmožnosti določitve položaja. To pomeni, da tudi v primeru večjih nenadnih sprememb v ionosferi položaj na Zemlji še vedno lahko določimo, vendar je le-ta slabše kakovosti. Podatka o kakovosti določitve položaja pa uporabnik enofrekvenčnih GNSS-instrumentov nima na razpolago.

V prispevku podrobneje obravnavamo dogajanja na Soncu v prejšnjem 23. Sončevem ciklu in ugotavljamo, kako nenadne spremembe v ionosferi vplivajo na določitev položaja pri uporabi enostavnih navigacijskih GNSS-sprejemnikov. To je tistih GNSS-sprejemnikov, ki temeljijo izključno na določitvi absolutnega položaja iz kodnih opazovanj ene frekvence. Za študijo dejanskih opazovanj v zadnjem obdobju povečane Sončeve

¹ asist. mag. Oskar Sterle, univ.dipl. inž. geod

² prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.,

³ asist. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.,

(vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana)

aktivnosti smo kot osnovo privzeli parametre modelov ionosferske refrakcije, ki so bili na voljo v realnem času ali pridobljeni iz že opravljenih opazovanj, in jih nadalje primerjali z dejansko opravljenimi opazovanji. Na ta način lahko pokažemo, da vpliv ionosferske refrakcije na opazovanja lahko zmanjšamo tudi v času intenzivnejšega dogajanja v ionosferi. Iz konkretno izvedenih GNSS-opazovanj pa lahko pokažemo, kako ionosferska refrakcija vpliva na končno določitev položaja v različnih obdobjih Sončevega cikla.

Iz konkretnih opazovanj lahko zaključimo, da določanje položaja z GNSS-tehnologijo v primeru intenzivnega dogajanja v ionosferi, ki ima daljšo periodo, ni tako problematično kot situacije, ko se zgodijo hitre in nenadne spremembe v ionosferi, katerih rezultat je izguba satelitskega signala za določeno časovno obdobje. V prispevku nato pokažemo, da lahko določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi instrumenti izboljšamo z metodo diferencialnega GPS-a.

Vpliv ionosfere na razširjanje signala

Po odstranitvi t. i. motnje omejene dostopnosti (angl. Selective Availability) v okviru GPS (angl. Global Positioning System) v letu 2000 ima ionosferska refrakcija največji vpliv na kakovost določitve položaja na Zemlji. Velikost vpliva je odvisna od števila prostih elektronov v plasti ionosfere kot tudi od frekvence valovanja; višja kot je frekvenca, manjši je ionosferski vpliv. Znano je, da v primeru opazovanj GPS ionosfera povzroči prehitevanje faze nosilnega valovanja in zakasnitev moduliranega signala (PRN-kode in navigacijskega sporočila). Ionosferski refrakcijski koeficient predstavimo z vrsto (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001):

$$n = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots$$

kjer so koeficienti c_i odvisni od števila elektronov vzdolž poti razširjanja signala N_e . N_e predstavlja gostoto oz. število elektronov vzdolž poti razširjanja signala (enota: elektroni/m³).

Drugi člen v gornjem izrazu ($\frac{c_2}{f^2}$) podaja največji delež vpliva ionosferske refrakcije, tretji člen pa opisuje nekajcentimetrski vpliv na podaljšanje/skrajšanje poti razširjanja signalov iz smeri zenita. Če upoštevamo le največji del vpliva ionosferske refrakcije, lahko pokažemo, da je vpliv ionosfere na fazna (n_{ph}) in modulirana opazovanja (n_{gr}) enak po velikosti, vendar nasprotnega predznaka:

$$n_{ph} = 1 - \frac{40,3 \cdot N_e}{f^2}, n_{gr} = 1 + \frac{40,3 \cdot N_e}{f^2}$$

Število prostih elektronov (angl. Total Electron Content - TEC) vzdolž poti razširjanja signala s izračunamo kot:

$$TEC = \int N_e ds$$

Za predstavitev količine prostih elektronov največkrat uporabljamo število prostih elektronov nad točko v navpičnem stolpcu, katerega površina znaša 1 m². TECU (angl. TEC unit) predstavlja 10¹⁶ elektronov/m². Sprememba vrednosti za eno enoto TECU povzroči podaljšanje/skrajšanje poti razširjanja signala za 0,163 m za opazovanja na frekvenci L1 (1575,42 MHz) in 0,267 m spremembo poti za opazovanja na frekvenci L2 (1227,60 MHz), če signal prihaja iz zenita. Če tako primerjamo opazovanja na različnih frekvencah, lahko dogajanje v ionosferi, to je vrednost TEC, določimo iz GNSS-kodnih opazovanj (Dyrud *et al.*, 2006):

$$\text{TEC}_{gr} = \frac{\rho_{L2} - \rho_{L1}}{0,104 \text{ m} \cdot \text{TECU}^{-1}}$$

kjer sta ρ_{L1} and ρ_{L2} opazovani psevdorazdalji na frekvencah L1 in L2. Enako lahko določimo vrednost TEC iz faznih opazovanj na dveh frekvencah (ϕ_{L1} and ϕ_{L2}) (Dyrud *et al.*, 2006):

$$\text{TEC}_{ph} = \frac{-\phi_{L2} + \phi_{L1}}{0,104 \text{ m} \cdot \text{TECU}^{-1}}$$

Modeliranje ionosferske refrakcije

Ker večina enostavnih GNSS-sprejemnikov omogoča sprejem signalov le na eni frekvenci, vpliva ionosferske refrakcije ne moremo modelirati na način, kot je opisan zgoraj, ampak moramo v obdelavo GNSS-opazovanj do končne določitve položaja privzeti modeliran vpliv ionosferske refrakcije. Taki modeli/algoritmi so npr. Klobuchar, Bent, IRI, ICED, FAIM, NEQUICK (slednji je model, katerega koeficiente bo vključevalo navigacijsko sporočilo tehnologije GALILEO).

Klobucharjev model

V praksi najbolj uporabljen model ionosferske refrakcije je Klobucharjev model. Uporaben je zaradi preproste strukture (predstavljen je z osmimi spreminjajočimi se koeficienti: α_n in β_n , kjer je $n = 1, 2, 3, 4$), enostavnosti algoritma, predvsem pa zato, ker ga lahko v primeru tehnologije GPS uporabimo v realnem času. Klobucharjev model temelji na predpostavkah (Klobuchar, 1987):

- da so prosti elektroni skoncentrirani v plasti, ki se nahaja na višini 350 km in katere debelina je enaka 0;
- najvišjo vrednost TEC doseže ob 14.00 uri po lokalnem času;
- vrednost TEC je konstantna med 22.00 in 6.00 uro in znaša 9,24 enot TECU.

GPS-navigacijsko sporočilo vsebuje koeficiente Klobucharjevega modela, tako da je uporabniku enofrekvenčnih instrumentov omogočeno upoštevati vpliv ionosferske refrakcije v realnem času. Znano pa je, da s pomočjo uporabe Klobucharjevega modela in koeficientov iz navigacijskega sporočila lahko odpravimo le 50 do 60 % vpliva (Komjathy, 1997), kar je odvisno od stopnje Sončeve aktivnosti kot tudi od položaja opazovališča ter letnega in dnevnega časa opazovanj. Klobucharjev model namreč vključuje geomagnetno širino točke, kjer naj bi se pričela plast ionosfere. Ker je le-ta odvisna tako od letnih časov in geomagnetnega polja kot tudi od Sončeve aktivnosti, se v času spreminjajo tudi vrednosti koeficientov Klobucharjevega modela.

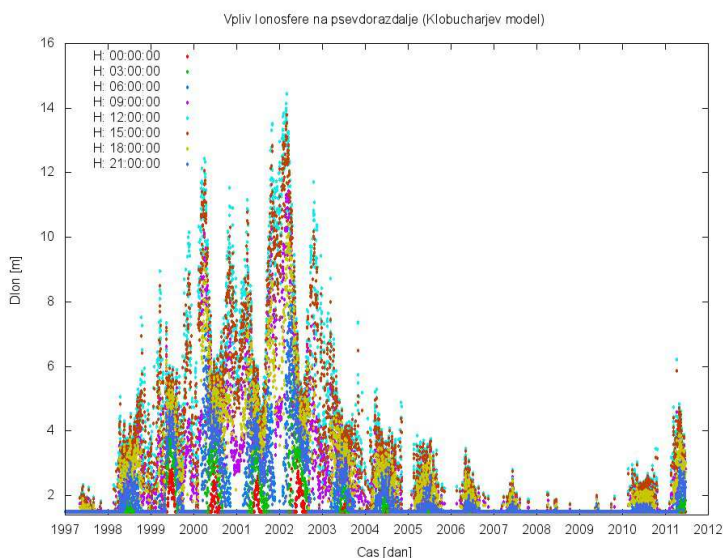
V okviru sistema GPS so koeficienti Klobucharjevega modela določeni na podlagi dveh kriterijev, in sicer (Ovstedal, 2002):

- časa opazovanj: v glavni kontrolni postaji eno leto razdelijo na 37 intervalov, vsakemu izmed teh pa priredijo niz koeficientov Klobucharjevega modela;
- srednje vrednosti aktivnosti Sonca, izračunane iz vrste zaporednih petih dni, vključujoč tudi zadnji dan. Trenutno Sončevo aktivnost uvrstijo v tabelo z 10

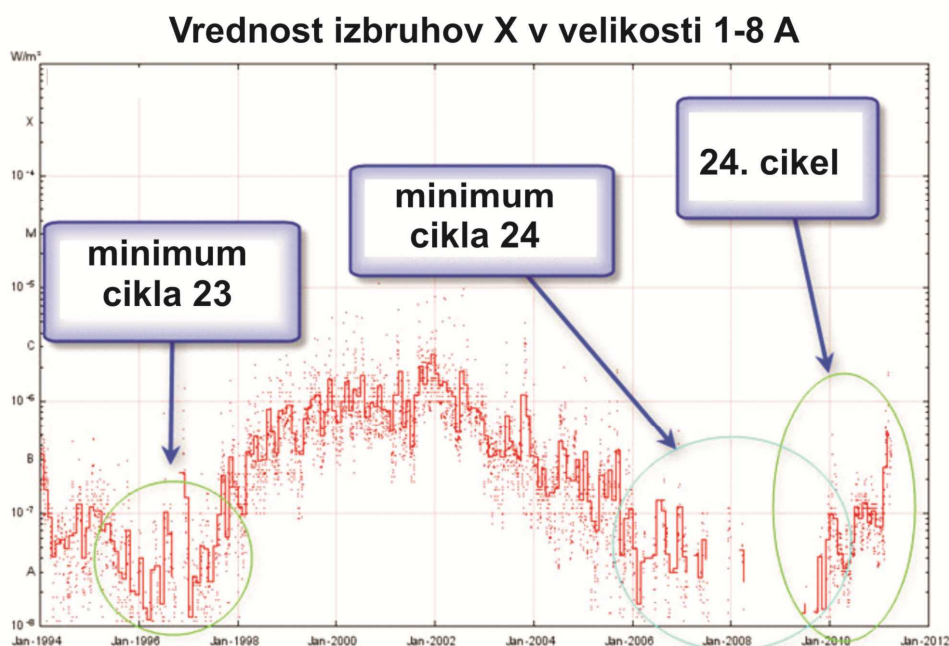
stopnjami, nadalje koeficiente Klobucharjevega modela določijo glede na uvrstitev Sončeve aktivnosti v tabeli.

Koeficienti Klobucharjevega modela so posredovani GPS-satelitom, le-ti pa podatke preko navigacijskega sporočila posredujejo uporabnikom. Odvisni so od uvrstitve časa opazovanj v enega izmed 37-ih intervalov in nadalje popravljeni glede na jakost Sončeve aktivnosti (določena z 10 stopnjami), ne vključujejo pa nenadnih sprememb v ionosferi, čeprav se le-te v času povečane aktivnosti Sonca pogosto dogajajo. Koeficienti Klobucharjevega modela v navigacijskem sporočilu vključujejo netočnosti, katerih perioda trajanja lahko znaša tudi 10 dni (Weiss *et al.*, 2002). Četudi uporabljamo podatke preciznih efemerid in natančne podatke satelitovih ur, je končna določitev položaja z uporabo koeficientov Klobucharjevega modela iz navigacijskega sporočila vezana na natančnost določitve položaja velikosti nekaj metrov (Ovstedal, 2002).

Boljša možnost zmanjšanja vpliva ionosfere je uporaba podatkov, posredovanih uporabniku v okviru t. i. SBAS (angl. Satellite Based Augmentation System) satelitov. Takšna sistema sta npr.: WAAS (angl. Wide Area Augmentation System) ali EGNOS (angl. European Geostationary Navigation Overlay Service), katerih navigacijsko sporočilo vsebuje izboljšane vrednosti koeficientov Klobucharjevega modela. V tem primeru mora imeti instrument možnost sprejema signalov WAAS oziroma EGNOS. Alternativa temu je uporaba koeficientov Klobucharjevega modela, ki jih posreduje služba CODE (angl. Center for Orbit Determination in Europe). Ta od julija 2000 preko spleta ponuja koeficiente Klobucharjevega modela, izračunane na podlagi GPS-opazovanj na postajah IGS, ki so razporejene po celotni Zemlji. Modeliranje ionosferske refrakcije so precej izboljšali, saj so za osnovo naknadne določitve privzeli tudi podatke iz datotek IONEX, vendar je bilo sprva koeficiente mogoče pridobiti šele z zakasnitvijo nekaj dni. Problem časovne zakasnitve pridobitve parametrov so v službi CODE rešili in tako je danes mogoče pridobiti tudi vnaprej napovedane vrednosti koeficientov Klobucharjevega modela, vendar njihova kakovost ne dosega kakovosti naknadno pridobljenih.



Slika 1: Časovna vrsta velikosti vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-opazovanja, izračunana s Klobucharjevim modelom.



Slika 2: Časovna vrsta izbruhov X na Soncu (SunSpotWatch.com)

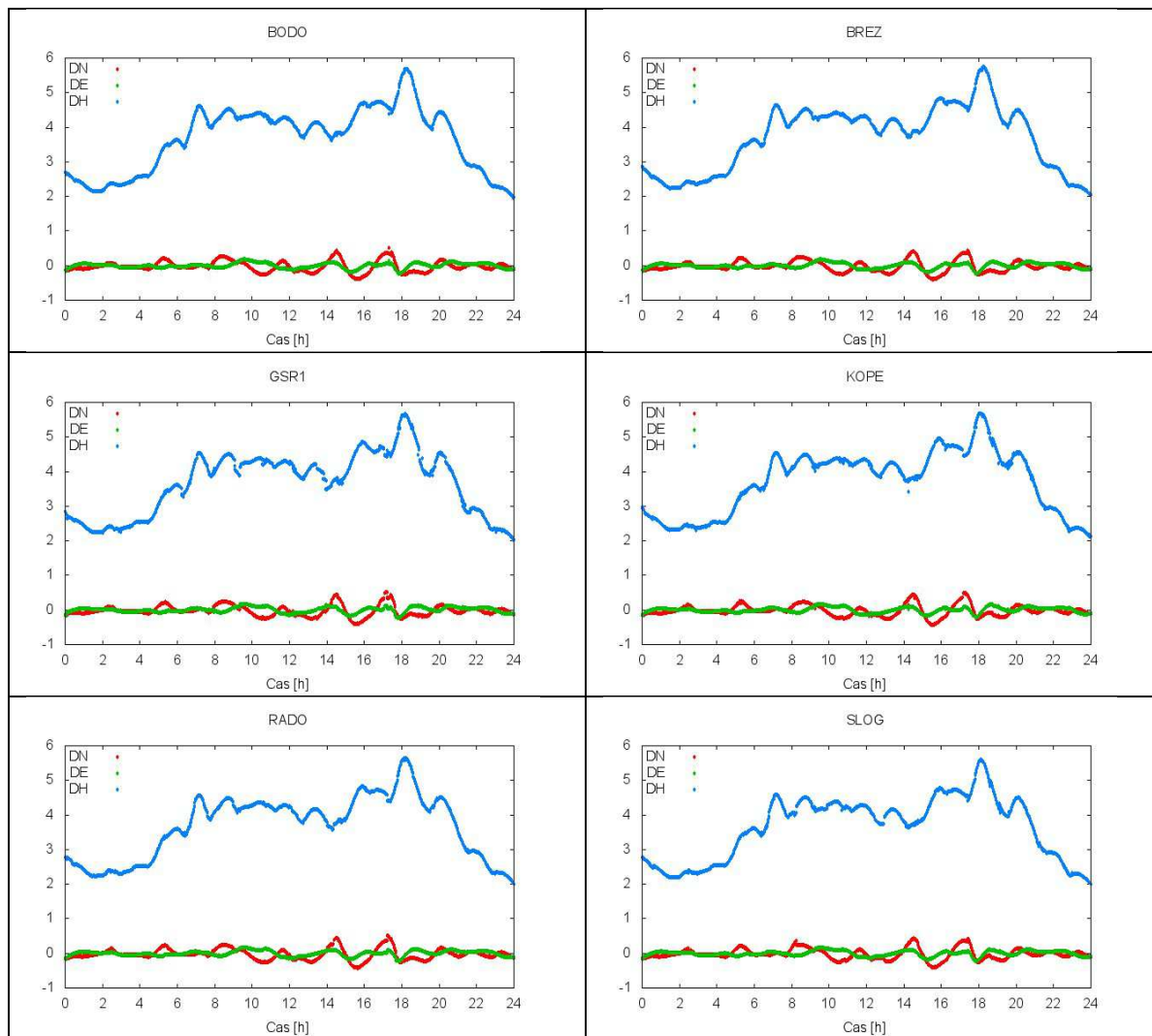
Med časovno vrsto vpliva ionosferske refrakcije, predstavljene s Klobucharjevim modelom (uporaba koeficientov iz navigacijskega sporočila) za obdobje 1997 do sredine 2011 (Slika 1), in Sončevo aktivnostjo, ki so jo spremljali z drugimi metodami (Slika 2), obstaja funkcijska odvisnost. Tako lahko iz izračunane časovne vrste vidimo, da je bil vrh 23. Sončevega cikla vezan na začetek leta 2002.

Model IONEX

Različne GNSS-službe podajajo podatke o stanju v atmosferi v obliki IONEX (angl. IONosphere Map Exchange) (Schaer *et al.*, 1997). Podatki so določeni na osnovi več postaj, razporejenih po celotni Zemlji (primer službe CODE: podatke določijo na podlagi 200 postaj GPS/GLONASS). Drugače kot pri Klobucharjevem modelu, kjer je ionosferska refrakcija predstavljena v obliki funkcije, gre v primeru IONEX za način modeliranja v pravilni mreži. Podatki o stanju v ionosferi so podani s sfernimi harmoničnimi koeficienti ter s časovno ločljivostjo 2 uri in s prostorsko ločljivostjo 5° (geografska širina) in 2,5° (geografska dolžina).

Služba CODE končne vrednosti podatkov posreduje z zakasnitvijo treh dni; hitrejše, vendar manj natančne podatke pa z zakasnitvijo 12 ur. Dodatno nudijo tudi predvidene podatke za en oziroma dva dni vnaprej. Služba IGS (angl. International GNSS Service) končne podatke v obliki datotek IONEX podaja s časovno zakasnitvijo 11 dni.

Ionosferska refrakcija vpliva na kodna opazovanja tako, da izmerjene psevdorazdalje med satelitom in sprejemnikom podaljša. Vpliv na položaj (t. j. na koordinate točke) je določen z razliko med izmerjeno vrednostjo razdalje satelit–sprejemnik in izračunano vrednostjo razdalje satelit–sprejemnik iz koordinat. Spodnja slika prikazuje velikost vpliva ionosferske refrakcije na koordinate točk v omrežju SIGNAL, če vpliv modeliramo s podatki IONEX.



Slika 3: Modeliran vpliv ionosferske refrakcije (iz datotek IONEX) na koordinate 6-ih stalnih postaj omrežja SIGNAL na dan 31. 7. 2011

Zgornje slike prikazujejo 6 točk omrežja SIGNAL (Bodonci (BODO), Brežice (BREZ), Ljubljana (GSR1), Koper (KOPE), RADO (Radovljica) in Slovenj Gradec (SLOG)) in odstopanje izračunanega od pravega položaja. Izračunani položaj je bil določen brez upoštevanja vpliva ionosferske refrakcije (212. dan leta 2011). Vidi se, da ionosferska refrakcija vpliva predvsem na višinsko komponento položaja (DH: višinska komponenta), vpliv na horizontalni položaj (DN: smer sever–jug in DE: smer vzhod–zahod) je bistveno manjši. Vidno je tudi, da je vpliv ionosferske refrakcije za vse prikazane točke zelo podoben, kar kaže na to, da je vpliv ionosfere močno prostorsko koreliran (ionosfera se lokalno bistveno ne spreminja). Iz narave vpliva ionosferske refrakcije (podaljšanje in/ali skrajšanje razdalj satelit–sprejemnik) sledi, da je največji vpliv ionosferske refrakcije pri relativni določitvi položaja povezan z merilom baznega vektorja ali geodetske mreže. Pri kodnih opazovanjih ionosferska refrakcija povzroči povečanje merila, pri faznih opazovanjih pa zmanjšanje merila baznega vektorja oziroma geodetske mreže. Del vpliva se sicer prelije tudi na popravek ure sprejemnika, vendar ta ne vpliva na popravke koordinat, zato problema v tem prispevku ne obravnavamo. Vpliv ionosferske refrakcije je

tako vezan samo na spremembo merila geodetske mreže. Kot že omenjeno, pa se največji vpliv ionosfere pri absolutni dločitvi položaja odraža v višinski določitvi položaja.

Modeliranje ionosferske refrakcije z linearno kombinacijo P3

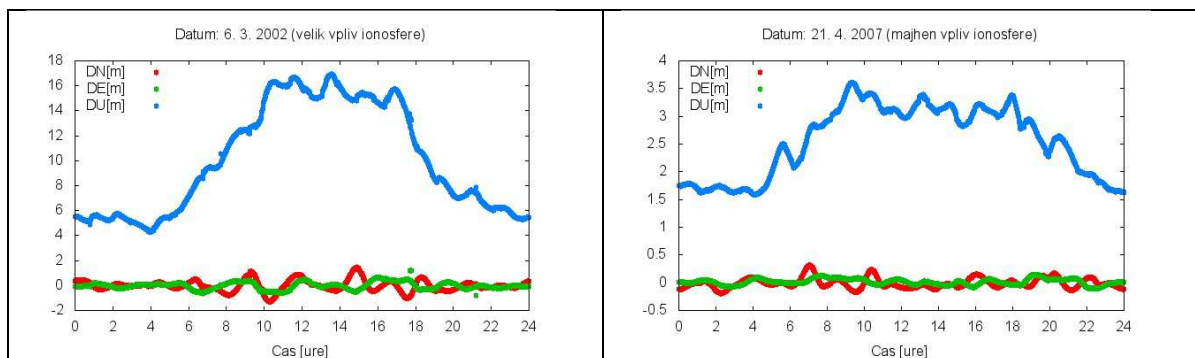
Pri obdelavi GNSS-kodnih opazovanj na dveh frekvencah lahko sami modeliramo vpliv ionosferske refrakcije in sicer z linearno kombinacijo kodnih opazovanj na nosilnih valovanjih L1 in L2, ki je (skoraj) neobčutljiva na vpliv ionosfere:

$$P_{i,3}^j = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot P_{i,1}^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot P_{i,2}^j \approx 2.5457 \cdot P_{i,1}^j - 1.5457 \cdot P_{i,2}^j$$

V zgornji enačbi sta f_1 in f_2 frekvenci nosilnih valovanj L1 in L2 v okviru GPS. Oznaki $P_{i,1}^j$ in $P_{i,2}^j$ predstavljata kodna opazovanja med satelitom j in stojiščem i ; oznaki 1 oziroma 2 pa določata, da gre za opazovanja na nosilnem valovanju L1 oziroma L2. $P_{i,3}^j$ označuje linearno kombinacijo P3. S sestavo linearne kombinacije P3 odstranimo vpliv ionosferske refrakcije 2. reda (člen $\frac{c^2}{f^2}$), ostali vplivi na opazovanja, tudi vplivi ostalih nadaljnjih členov (3., 4. ...) v vrsti za ionosferski refrakcijski koeficient v linearni kombinaciji, ostanejo, vendar so velikostnega reda cm, tako da jih pri obdelavi kodnih opazovanj lahko zanemarimo.

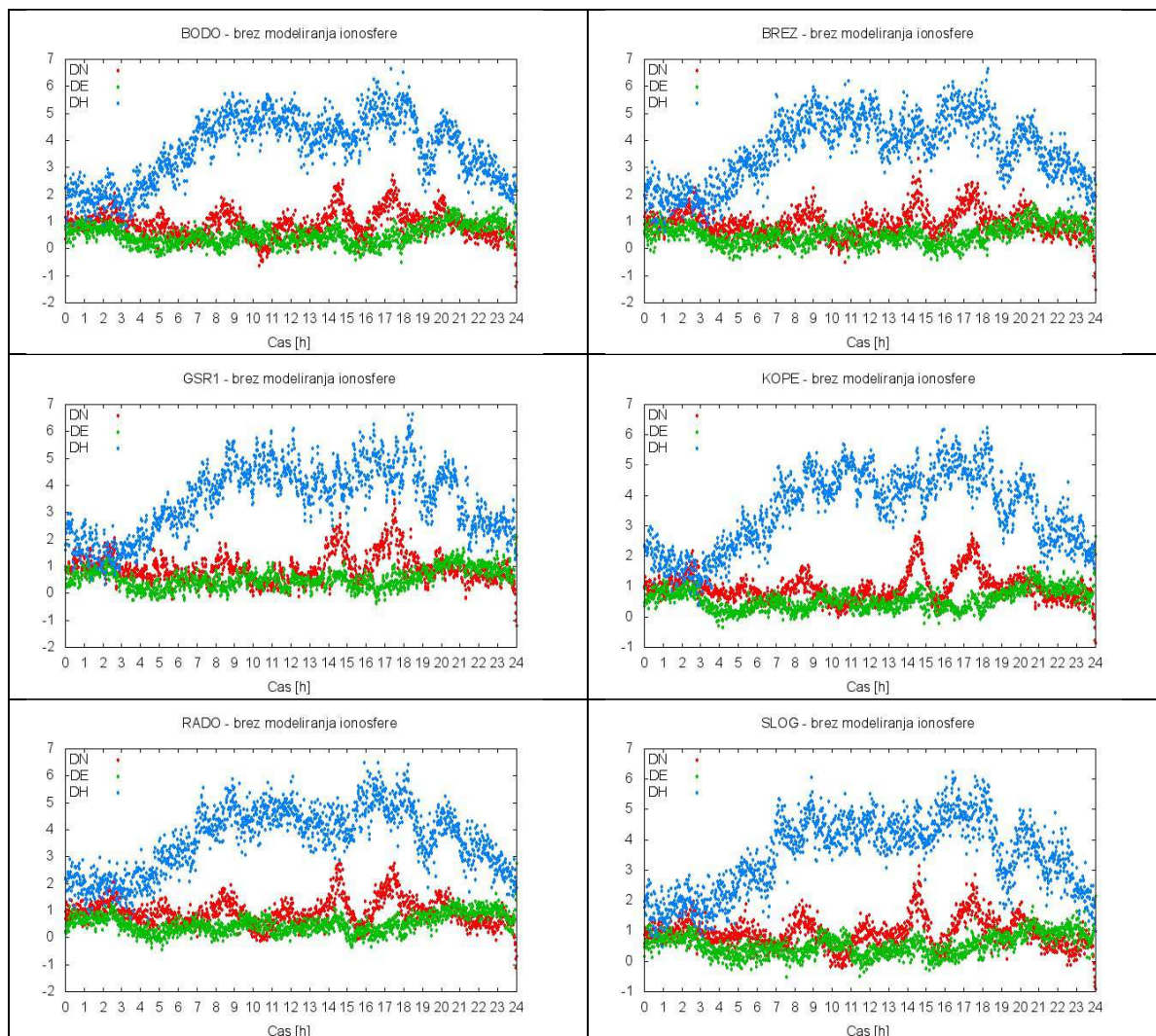
Vpliv upoštevanja ionosferske refrakcije na določitev položaja

Ionosferska refrakcija v času manjše Sončeve aktivnosti precej manj vpliva na končno določitev položaja kot v času povečane Sončeve aktivnosti. V času največje aktivnosti Sonca je vpliv ionosferske refrakcije na določitev položaja 4-krat večji kot v času manjše intenzivnosti dogajanj (v t. i. »tihih obdobjih«). Ionosferska refrakcija najbolj vpliva na višinsko komponento položaja; v času največje intenzivnosti dogajanj na Soncu vpliv na višinsko komponento lahko znaša več deset metrov (v našem primeru 18 m), medtem ko v času manjše intenzivnosti precej manj (v našem primeru do 4 m), če ionosferske refrakcije v obdelavi GNSS-opazovanj ne upoštevamo oziroma modeliramo. Rezultati izračuna veljajo za stalno postajo v Gradcu (GRAZ ($\varphi = 47^\circ 04' 01,56'' S$, $\lambda = 15^\circ 29' 36,60'' V$)) (Slika 4).



Slika 4: Odstopanje položaja od pravega za stalno postajo v Gradcu (oznaka GRAZ) zaradi nemodeliranega vpliva ionosferske refrakcije (65. dan leta 2002 (velik vpliv) in za 111. dan leta 2007 (majhen vpliv))

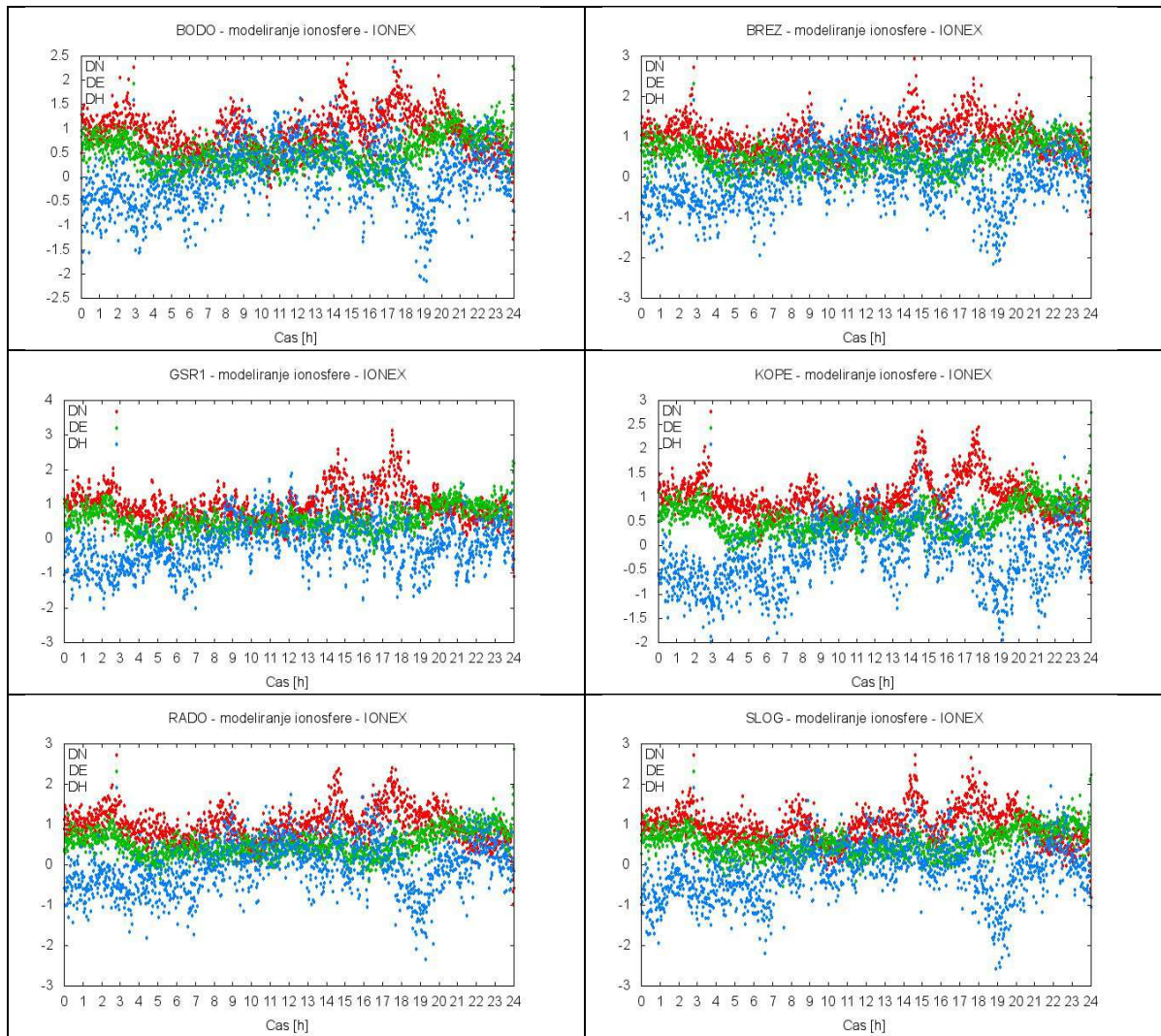
Spodnja slika prikazuje odstopanje položajev (v koordinatnih komponentah) za šest stalnih postaj omrežja SIGNAL in za primer, ko v obdelavi nismo upoštevali vpliva ionosferske refrakcije:



Slika 5: Odstopanje položajev točk zaradi neodstranjenega vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-opazovanja: izračun za 6 stalnih postaj omrežja SIGNAL na dan 31. 7. 2011.

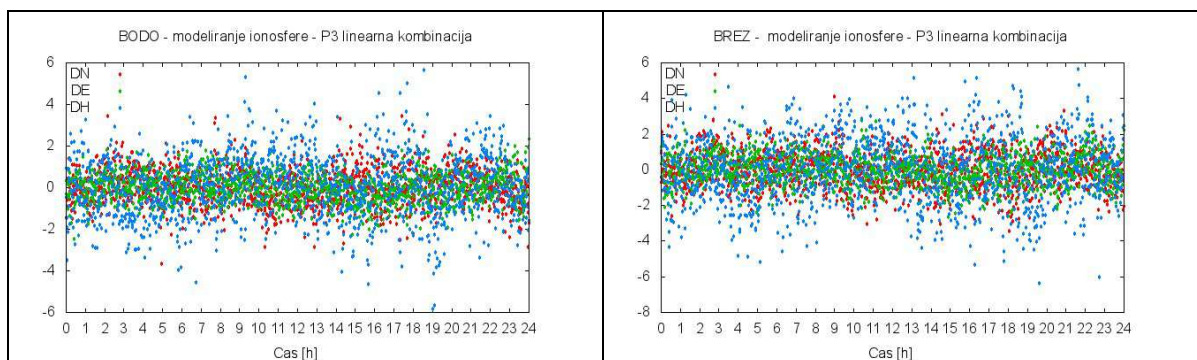
Vidi se, da so slike izredno podobne Slikam 3, kjer smo s pomočjo podatkov IONEX modelirali vpliv ionosferske refrakcije na točke omrežja SIGNAL. Ionosferska refrakcija najbolj vpliva na višinsko komponento položaja; v danem primeru so odstopanja do 7 m.

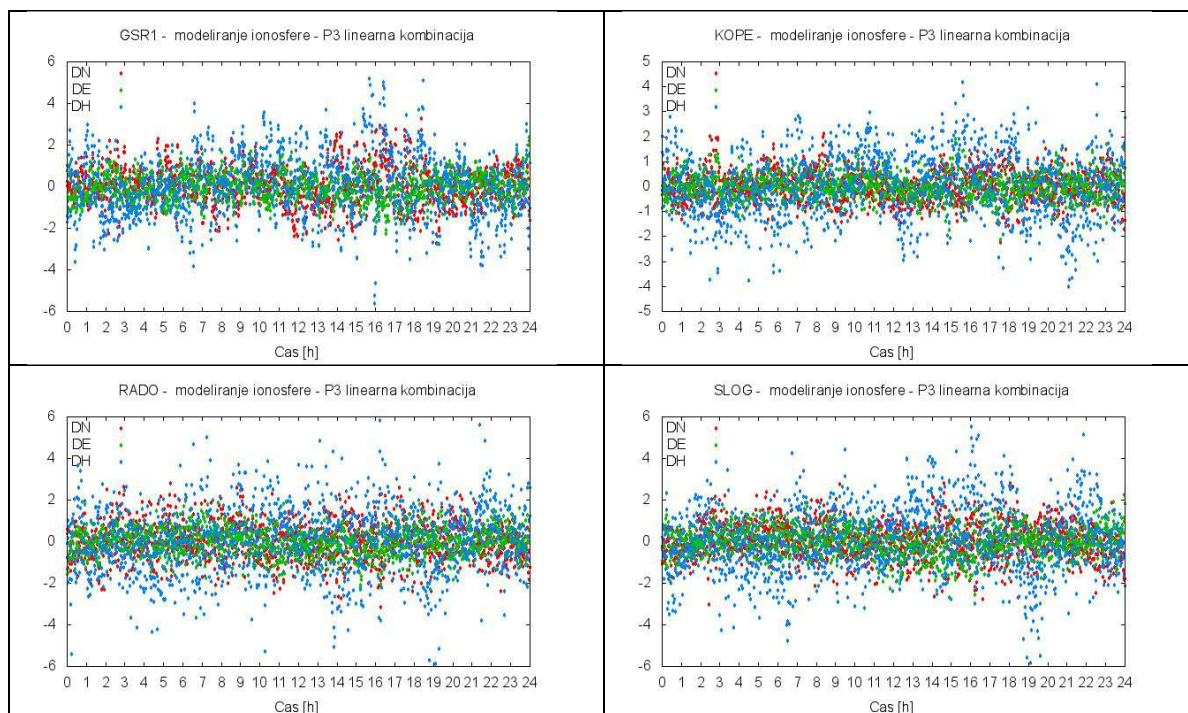
Če v obdelavo vključimo upoštevanje vpliva ionosferske refrakcije (model IONEX), končno določitev položaja precej izboljšamo; odstopanja v višinski komponenti položaja znašajo največ 3 m (Slike 6). Iz slik se vidi, da z uporabo podatkov IONEX odpravimo vpliv ionosferske refrakcije na opazovanja, vendar ne v celoti. S sestavo linearne kombinacije kodnih opazovanj P3 pa vpliv v večji meri odstranimo.



Slika 6: Ocenjeni popravki koordinat stalnih postaj omrežja SIGNAL, če ionosfersko refrakcijo modeliramo s podatki iz datotek IONEX.

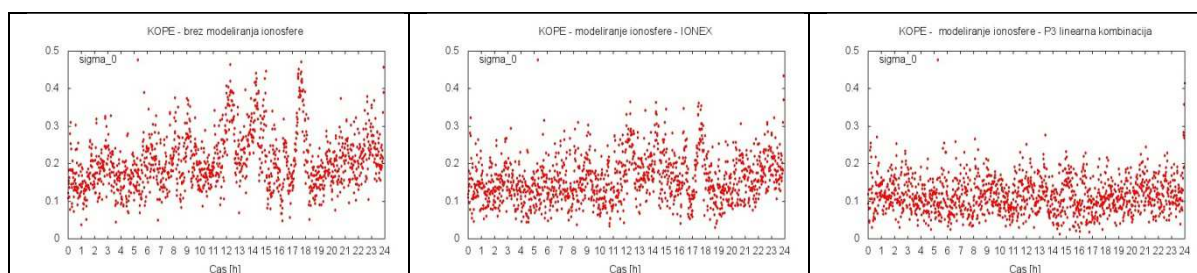
Slike 7 prikazujejo popravke koordinat točk omrežja SIGNAL, ki so dobljene na osnovi obdelave opazovanj z linearno kombinacijo P3. Razpršenost posameznih koordinat okoli njihove srednje vrednosti ima zelo naključen videz, kar kaže na dejstvo, da so iz opazovanj odstranjeni vsi sistematični vplivi (do reda velikosti 0,3 m) in so prisotni samo še slučajni vplivi (odboja signala od objekta tu nismo upoštevali).





Slika 7: Ocenjeni popravki koordinat stalnih postaj omrežja SIGNAL, če vpliv ionosferske refrakcije odstranimo z linearno kombinacijo P3.

Vpliv ionosferske refrakcije se v večini preljuje v ocenjene neznanke, to so koordinate točk, in popravke ure sprejemnika, manj pa na popravke psevdorazdalj po izravnavi. Slika 8 prikazuje ocenjene vrednosti standardnega odklona a-posteriori (računanega iz popravkov psevdoopazovanj) za stalno postajo v Kopru (oznaka KOPE) in za različne načine upoštevanja ionosferske refrakcije. Leva slika prikazuje vrednosti standardnega odklona a-posteriori, če ionosferske refrakcije ne upoštevamo v obdelavi, srednja slika prikazuje vrednosti standardnega odklona a-posteriori, če ionosfersko refrakcijo modeliramo z modelom IONEX, in zadnja, desna slika, vrednosti standardnega odklona a-posteriori, če ionosfersko refrakcijo odstranimo z linearno kombinacijo P3.



Slika 8: Ocenjene vrednosti referenčnega standardnega odklona a-posteriori za posamezne ocenjene položaje, če ne modeliramo ionosferske refrakcije (levo), če ionosfersko refrakcijo modeliramo z modelom IONEX (sredina) in če modeliramo ionosfersko refrakcijo z linearno kombinacijo P3 (desno).

Vidi se, da se vrednosti standardnega odklona a-posteriori ne zmanjšajo bistveno z odpravljanjem vpliva ionosferske refrakcije iz opazovanj. Iz največje vrednosti okoli 0,5 m

preidemo na okoli 0,2 m. Iz tega je razvidno, da je vpliv ionosferske refrakcije sistematičen in vpliva na točnost veliko bolj kot na natančnost ocenjenih koordinat in popravkov ure sprejemnika.

Zaključek

Iz študije lahko zaključimo, da je v procesu obdelave GNSS-opazovanj eden najpomembnejših faktorjev, ki vpliva na končno določitev položaja, korektno upoštevanje vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-signal, in sicer za vsa obdobja v Sončevem ciklu. Pristopi k modeliranju ionosferske refrakcije so različni, vendar se ti pri uporabi enofrekvenčnih kodnih GNSS-instrumentov pri absolutni določitvi položaja in brez možnosti komunikacije z drugim instrumentom (metoda diferencialnega GPS-a) omejujejo zgolj na uporabo modelov ionosferske refrakcije in koeficientov, ki so sestavni del navigacijskega sporočila (ali pa so pridobljeni preko interneta). Glede na to, da so študije pokazale, da se vpliv ionosferske refrakcije lokalno ne spreminja v veliki meri, bi lahko stalne GNSS-postaje uporabniku nudile dodatne podatke za izboljšanje določitve položaja tudi v času večjih in nenadnih sprememb v ionosferi. Stalno delujoče GNSS-postaje imajo namreč možnost izvajanja kodnih in faznih opazovanj na dveh nosilnih valovanjih L1 in L2, zato je v tem primeru mogoče vrednotiti vpliv ionosfere v realnem času. Obstajata dve možnosti, kako bi stalne GNSS-postaje lahko uporabniku nudile podatke v realnem času: prva možnost, to je določitev izboljšane nize koeficientov modela ionosferske refrakcije (npr. Klobucharjevega), bi bila primerna za uporabnike tistih GNSS-instrumentov, katerih programska oprema omogoča spreminjanje koeficientov modela. Če je programska koda v GNSS-instrumentu zaprtega tipa, bi uporabili drugo možnost, kjer bi uporabnik GNSS-instrumentov spremembe v ionosferi upošteval na indirektn način tako, da bi stalna GNSS-postaja nudila podatke o popravkih posamezne komponente določitve položaja zaradi dogajanj v ionosferi. Uporabnik GNSS-tehnologije bi te podatke vključil v končno določitev položaja tako, da bi koordinatne komponente popravil za velikost posredovane vrednosti. Učinek upoštevanja popravkov koordinat referenčne točke na položaj sprejemnika uporabnika bi bilo izboljšanje točnosti in natančnosti položaja sprejemnika uporabnika.

Zahvala

Študija je nastala v okviru temeljnega raziskovalnega projekta “*Določitev in ocena vplivov izrednih Sončevih aktivnosti na satelitsko določanje lokacije*”, katerega naročnik je Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

Literatura

- CODE: <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/#cgim>
- Dyrud, L., Bhatia, N., Ganguly, S. in Jovancevic (2006), Performance analysis of software based GPS receiver using a generic scintillation model, *19th International Technical meeting*, Satellite Division of the Institute of Navigation, Fort Worth, Texas, ZDA.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger H., in Collins J. (2001). *GPS Theory and Practice*, Springer Verlag, 370 str.
- IGS: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>
- Klobuchar, J.A. (1987), Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No.3, str. 325-331.

- Komjathy, A. (1997), Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System, doktorska disertacija, *Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report NO. 188*, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Kanada, 248 str.
- Ovstedal O. (2002), Absolute positioning with single-frequency GPS receivers, *GPS Solutions*, 5, str. 33-44.
- Schaer, S., Gurtner, W. in Feltens, J. (1997), IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1, February 25, 1998, in *Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop*, ESOC, Darmstadt, Nemčija, str. 233-247.
- SunSpotWach.com: Radio Propagation: Space Weather: Sunspot Cycle Information: <http://prop.hfradio.org/>
- Weiss, M., Zhang, V., Jensen, M., Powers, E., Klepczynski, W. in Lewandowski, W. (2002) , Ionospheric models and measurements for common-view time transfer. *IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition*.