

# MODELIRANJE IONOSFERSKE REFRAKCIJE ZA IZBOLJŠAVO ABSOLUTNEGA GNSS-POLOŽAJA S KODNIMI INSTRUMENTI: PRIPRAVA NA

## 24. SONČEV CIKEL

IONOSPHERIC REFRACTION MODELING FOR BETTER AUTONOMOUS GNSS CODE POSITIONING: IN PREPARATION OF SOLAR CYCLE 24

*Oskar Sterle, Bojan Stopar, Polona Pavlovčič Prešeren*

UDK: 528.2

V prispevku opisujemo način izboljšane obdelave GNSS-opazovanj za določitev absolutnega položaja objekta na Zemlji ali v njeni bližini s kodnimi GNSS-instrumenti. Obdelava opazovanj poteka je izboljšana z upoštevanjem modeliranega vpliva ionosfere v realnem času, kar bo ključno ob prihajajočem višku 24. Sončevega cikla. Zanima nas, kako nenadne spremembe v ionosferi, ki so rezultat dogajanja na Soncu, vplivajo na določitev položaja v enostavnih navigacijskih nalogah. Prikazujemo tudi način modeliranja ionosferske refrakcije iz opazovanj večfrekvenčnih instrumentov, ki omogočajo izvajanje tako kodnih kot faznih opazovanj. Modelirano ionosfersko refrakcijo lahko enostavno uporabimo tudi pri obdelavi opazovanj iz enostavnih enofrekvenčnih kodnih instrumentov. Pri tem pokažemo vlogo stalnih GNSS-postaj, ki širšemu krogu uporabnikov omogočajo pridobivanje boljših podatkov o stanju v ionosferi skorajda v realnem času. V sklepu pokažemo izboljšanje določitve 3D-položaja s kodnimi instrumenti, če uporabimo tako modeliran vpliv ionosferske refrakcije v metodi diferencialnega GNSS. Študijo smo opravili, da bi izboljšali obdelavo kodnih opazovanj med prihajajočim viškom Sončevega cikla, ki naj bi po napovedih nastopil v maju 2013.

### KLJUČNE BESEDE

obdelava GNSS-opazovanj, 24. Sončev cikel, kodni GNSS-instrumenti, absolutna določitev položaja, modeliranje ionosferske refrakcije, diferencialni GNSS

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.01

This paper describes GNSS-processing optimisation for better autonomous single-point positioning using single frequency code receivers. GNSS processing improvement is carried out in terms of near-real time ionosphere delay modelling, which will be crucial during the upcoming 24th maximum solar cycle. The main scope of this article is to examine how sudden changes in the ionosphere, caused by events on the Sun, affect autonomous single-point positioning in simple navigation tasks. Further, the specific method of ionosphere delay modelling from actual two-frequency receivers, acquiring carrier phase and code observations, is shown. The modelled value of the ionospheric refraction, which is given in GNSS path delay, is further used in point positioning from single-frequency code instruments. In addition, we show the advantage of GNSS permanent stations that can supply a wide range of users with better ionosphere data in near real time. From actual experiments, the magnitude of the ionospheric impact on each specific 3D position component is shown and further improved using modelled ionosphere delay values. Finally, we show how to improve GNSS position determination from simple single- or two-frequency GNSS code or carrier-phase receivers in differential GNSS method. This study was conducted for preparations for the upcoming solar cycle maximum, expected to be held in May 2013.

### KEY WORDS

GNSS-processing, 24th Solar Cycle, code GNSS receivers, autonomous single-point positioning, ionospheric refraction modelling, differential GNSS

## 1 UVOD

Letos, najverjetneje maja, se približujemo vrhu enajstletnega Sončevega cikla, ki je že 24. zaporedni. Štetje Sončevih ciklov poteka od leta 1755, ko so pričeli beležiti dogajanja na Soncu, in sicer sprva predvsem v obliki štetja Sončevih peg. Danes znanstveniki poleg štetja Sončevih peg lahko spremljajo tokove plazme, ki kroži v Soncu, ter spremljajoče dogodke. Med spremljanjem časovne vrste dogajanj so ugotovili, da Sonce prehaja od minimalne do maksimalne aktivnosti, kar imenujemo Sončev cikel. Sončev cikel je vezan na povprečno periodo 10,7 leta. Zadnji minimum Sončevega cikla se je pričel v decembru 2008, kar pomeni, da je bil zadnji (23.) Sončev cikel najdaljši v zadnjih 200 letih in je trajal kar 12,6 leta. Znanstveniki navajajo, da je razlog za podaljšanje obdobja šibke aktivnosti Sonca v zadnjem ciklu sprememba tokov plazme, ki so se razširili tretjino poti dlje kot v prejšnjih ciklih, torej vse do polov. Zanimivo je tudi, da so v zadnjem ciklu opazili najmanj Sončevih peg v zadnjem stoletju.

Spremljanje dogajanja na Soncu je bilo včasih zanimivo, ne pa nujno. Sedaj pa na naše življenje močno vpliva tudi zanesljivost delovanja vesoljskih satelitskih tehnologij, od katerih je človeštvo vse bolj odvisno (navigacijski, komunikacijski sateliti, sateliti za opazovanje Zemlje ...). Na vesoljske/satelitske tehnologije dogajanje na Soncu vpliva tako močno, da ga moramo v obdelavi čim bolj upoštevati. Vreme v vesolju, ki vpliva na porazdelitev plazme v ionosferi, lahko negativno vpliva na navigacijske informacije in razširjanje elektromagnetnega signala. Zadnja dognanja so pokazala tudi povezavo med Sončevim ciklom, ultravijoličnim sevanjem in nenavadno mrzlimi zimami v severni Evropi (Sirocko et al., 2012). Zato je spremljanje dogajanja na Soncu zanimivo tudi z vidika razumevanja sprememb v Zemljini atmosferi.

V prispevku opisujemo študijo vpliva ionosfere na navigacijske tehnologije, oziroma na tehnologijo GNSS (angl. global navigation satellite system). Tehnologija GNSS je predvsem obremenjena z vplivom dogajanja na Soncu, ki se odraža v spremembah v plasti ionosfere, te pa imajo lahko daljše ali krajše periode. Spremembe v plasti ionosfere sicer potekajo dnevno in predvidljivo, obstajajo pa dogodki različnih intenzitet, ki se jih ne da hitro predvideti, a lahko občutimo njihove posledice. O takih dogodkih lahko sklepamo na podlagi drugih podatkov, vezanih na spremljanje dogajanja na Soncu, oziroma na podlagi spremljanja sprememb v razširjanju elektromagnetnega valovanja in posledično v določitvi položaja. Različni dogodki in njihova intenzivnost vplivajo na spremembo števila prostih elektronov v plasti ionosfere, zaradi česar se radijski signali razširjajo drugače od pričakovanega. Če želimo položaj objekta na Zemlji določiti korektno, moramo vpliv ionosfere na razširjanje signala upoštevati in pri izračunih čim bolj odstraniti. Na drugi strani pa značilne spremembe v dolžini poti razširjanja kodnih in faznih opazovanj v plasti ionosfere omogočajo učinkovito pridobitev bistvenih informacij o vremenskem dogajanju v vesolju (Jakowski et al., 2002), zato se danes GNSS-tehnologija poleg določanja položajev na Zemlji uporablja kot pomemben vir spremljanja »vremenskega dogajanja v vesolju« v realnem času.

Razumevanje delovanja tehnologije nam torej omogoča pridobivanje podatkov, na podlagi katerih lahko sklepamo o dogajanju na Soncu in jih lahko tudi nekoliko modeliramo. Na voljo imamo dva načina za določitev posredne motnje v ionosferi zaradi intenzivnejšega dogajanja na Soncu. Prvi način je ionosferski indeks I<sub>95</sub>, ki temelji na popravku položaja, določenega z GNSS, in

so ga za območje Slovenije podrobno obravnavali za leti 2011 in 2012 (Berk et al., 2013). Drugi način je sprememba dolžine poti razširjanja GNSS-signalov, ki lahko temelji na obravnavanju modelov ionosferske refrakcije ali pa na konkretnem modeliranju iz dejansko opravljenih GNSS-opazovanj. V prispevku se omejujemo na slednjega, medtem ko smo obravnavanje modelov ionosferske refrakcije že vrednotili (Sterle et al., 2012).

## 2 OBRAVNAVANJE IONOSFERSKE REFRAKCIJE

Za GNSS-opazovanja je značilno, da plast ionosfere deluje različno na isti tip opazovanj različnih frekvenc kot tudi različno na različne tipe opazovanj (fazna in kodna). Vpliv ionosfere na razširjanje elektromagnetnega valovanja je dan z ionosferskim refrakcijskim koeficientom. Ta ima na hitrost razširjanja faznih oziroma kodnih opazovanj v prvi vrsti razvoja po velikosti enak, vendar nasprotno predznačen vpliv. Plast ionosfere se odraža s prehitevanjem faze nosilnega valovanja in zakasnitvijo kodnih opazovanj. Hitrosti razširjanja kodnih in faznih GNSS-opazovanj tako lahko zapišemo z enačbami (Leick, 1991, Schaer, 1999):

$$v_{kodna} = v_{fazna} - \lambda \cdot \frac{dv_{fazna}}{d\lambda} \quad (1)$$

Z upoštevanjem zveze  $\frac{d\lambda}{\lambda} = -\frac{df}{f}$  pa velja:

$$v_{kodna} = v_{fazna} + f \cdot \frac{dv_{fazna}}{df} \quad (2)$$

kjer sta  $v_{kodna}$  in  $v_{fazna}$  hitrosti razširjanja kodnih oziroma faznih opazovanj,  $\lambda$  in  $f$  pa valovna dolžina in frekvenca elektromagnetnega valovanja.

Refrakcijski koeficient je definiran kot:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_{vakuum}}{\lambda} \quad (3)$$

Pri tem sta  $c$  in  $\lambda$  hitrost in valovna dolžina GNSS-signalov v vakuumu, medtem ko sta  $v$  in  $\lambda_{vakuum}$  hitrost in valovna dolžina GNSS-signalov v ionosferi. Če fazno hitrost odvajamo po  $\lambda$  in izraz vstavimo v enačbo (1), dobimo:

$$n_{kodna} = \frac{n_{fazna}}{1 - \left(\frac{dn_{fazna}}{df}\right) / \left(\frac{n_{fazna}}{f}\right)} \quad (4)$$

Dodatno enačbo razvijemo v vrsto:  $\frac{1}{1-x} = 1 + x - x^2 + \dots$  in upoštevamo le prva dva člena razvoja, da dobimo zvezo med lomnima količnikoma za kodna in fazna GNSS-opazovanja:

$$n_{kodna} = n_{fazna} + f \cdot \frac{dn_{fazna}}{df} \quad (5)$$

Med razširjanjem GNSS-signalov skozi plast ionosfere znaša razlika do prave geometrijske razdalje  $\Delta\rho$  in spremembe v fazi  $\Delta\phi$  zaradi spremembe refrakcijskega koeficienta:

$$\Delta\rho = \int_s (n_{kodna} - 1) ds$$

$$\Delta\varphi = \frac{f}{c} \int_s (n_{fazna} - 1) ds \quad (6)$$

Ionosferska refrakcija močno vpliva na natančnost določitve položaja objekta na ali v bližini zemeljskega površja. Pogrešek v dolžini poti zaradi vpliva ionosfere podnevi znaša 15 metrov, 3 metre proti večeru, največje vrednosti za kodna opazovanja pa lahko dosežejo tudi 50 metrov v zenitu in 150 metrov na horizontu (Zhou, 1995). To pomeni, da bi pri GNSS-opazovanjih vedno morali upoštevati vpliv ionosferske refrakcije in ga računsko odstraniti. Sedanji postopki temeljijo na uporabi modelov ionosferske refrakcije za enofrekvenčna opazovanja oziroma na oblikovanju linearne kombinacije opazovanj več frekvenc (trenutno še dveh, v novi generaciji tehnologije GNSS pa bodo znotraj posameznih tehnologij (GPS 2, Galileo) na voljo tri), ki je bolj neodvisna od vpliva ionosfere. Za navigacijske naloge je tako pojmovanje povsem dovolj, vendar velja poudariti, da je ionosfersko neodvisna linearna kombinacija opazovanj dveh frekvenc »skorajda« neodvisna za vpliv ionosfere, kar pomeni, da primer velja za razvoj enačbe ionosferske refrakcije v vrsto, kjer upoštevamo le prvi člen razvoja, naslednje pa zanemarimo.

### 3 MODELIRANJE IONOSFERE

Ionosfero modeliramo kot zelo tanko plast ionov na neki referenčni višini ( $H_{Ref} = 450$  km) z enačbo (Leick, 1991):

$$I = \frac{1}{\cos z'} I_{zen} \quad (7)$$

kjer so:

- $I$  zakasnitev kode (ali prehitvanje faze) zaradi vpliva ionosfere na opazovanju s satelita, ki je na zenitni razdalji  $z$  glede na anteno sprejemnika [m],
- $I_{zen}$  zakasnitev kode (ali prehitvanje faze), če bi bil satelit v zenitu [m],
- $z'$  zenitna razdalja satelita v točki ionosfere (angl. ionosphere point), kjer signal prebode plast ionosfere in ob polmeru Zemlje  $R$  velja:

$$z' = \text{asin} \left( \frac{R}{R + H_{Ref}} \sin(z) \right) \quad (8)$$

Cilj modeliranja vpliva ionosfere na razširjanje opazovanj GNSS je določiti, kakšen bi bil pogrešek opazovanja zaradi vpliva ionosfere, če bi bil GNSS-satelit glede na opazovališče točno v zenitu.

Pri drugem vidiku modeliranja ionosfere pa moramo upoštevati tudi časovno spremenljivost vpliva ionosfere na razširjanje signala GNSS. Plast ionosfere se čez dan spreminja, zato vpliva ionosfere ne moremo obravnavati kot linearne funkcije ali celo konstante. V izpeljavi (poglavje 4) smo za modeliranje izbrali zvezno kosoma linearno funkcijo, kjer se interval, na katerem se vpliv ionosfere na GNSS-opazovanja obravnava kot linearna funkcija, določi »ročno«. Vpliv ionosfere tako modeliramo kot:

$$I = \frac{1}{\cos z'} \cdot (I_{zen}^0 + \Delta t \cdot \Delta I) \quad (9)$$

kjer so:

$I_{zen}^0$  vpliv ionosfere [m] v zenitu za začetno točko intervala linearne funkcije predstavitve ionosfere,

$\Delta I$  sprememba vpliva ionosfere [m/s] skozi čas - določa naklon premice, ki modelira ionosfero,

$\Delta t$  izbrani časovni interval.

Najbolj enostavno upoštevanje vpliva ionosfere na GNSS-opazovanja poteka z uporabo modelov, in sicer: Klobuchar, Bent, IRI, ICED, FAIM, NEQUICK (koeficiente slednjega bo vključevalo navigacijsko sporočilo tehnologije GALILEO).

### 3. 1 Modela ionosferske refrakcije Klobuchar in IONEX

Navigacijsko sporočilo sistema GPS vsebuje koeficiente Klobucharjevega modela, tako da je uporabniku enofrekvenčnih instrumentov omogočeno upoštevanje vpliva ionosferske refrakcije v realnem času. Znano pa je, da z uporabo Klobucharjevega modela in koeficientov iz navigacijskega sporočila lahko odpravimo le od 50 do 60 % vpliva (Komjathy, 1997), kar je odvisno od stopnje Sončeve aktivnosti, položaja opazovališča ter letnega in dnevnega časa opazovanj.

Različne GNSS-službe podajajo podatke o stanju v plasti ionosfere v obliki datotek IONEX (\*.ION) (angl. ionosphere map exchange) (Schaer et al., 1997). Podatki, ki so vključeni v datoteke IONEX, so pridobljeni na podlagi informacij iz GNSS-postaj, razporejenih po celotni zemeljski obli. Drugače kot pri Klobucharjevem modelu, kjer je ionosferska refrakcija predstavljena v obliki funkcije, gre v primeru IONEX za način modeliranja v pravilni gridni mreži. Podatke podajajo s sfernimi harmoničnimi koeficienti, in sicer s časovno ločljivostjo 2 uri ter s prostorsko ločljivostjo 5° (geografska širina) in 2,5° (geografska dolžina).

## 4 OCENA VPLIVA IONOSFERE IZ GNSS-OPAZOVANJ

### 4. 2 Izpeljava lokalnega modela ionosferske refrakcije iz linearne kombinacije P3

Pri obdelavi kodnih opazovanj GNSS na dveh frekvencah lahko modeliramo vpliv ionosfere na GPS-opazovanja v smislu podaljšanja poti razširjanja signala. Ta vpliv izpeljemo z ionosfersko neodvisno linearno kombinacijo kodnih opazovanj na nosilnih valovanjih L1 in L2:

$$P_{i,3}^j = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot P_{i,1}^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot P_{i,2}^j \approx 2,5457 \cdot P_{i,1}^j - 1,5457 \cdot P_{i,2}^j \quad (10)$$

kjer sta  $f_1$  in  $f_2$  frekvenci nosilnih valovanj L1 in L2 v okviru sistema 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.

Obstaja še ena možnost modeliranja vpliva ionosfere na opazovanja GNSS, to je iz dejansko opravljenih opazovanj z večfrekvenčnimi GNSS-sprejemniki, ki omogočajo sprejem tako kodnih kot faznih opazovanj. Postopek modeliranja podrobno opisujemo v naslednjem podpoglavju.

## 4. 2 Izpeljava lokalnega modela ionosferske refrakcije s kombinacijo kodnih in faznih opazovanj na več frekvencah

Pri modeliranju ionosferske refrakcije izhajamo iz dejstva, kako ionosferska plast deluje na različne tipe opazovanj oziroma na opazovanja različnih frekvenc, kar je bilo opisano v prejšnjem poglavju. Pri tem izhajamo iz osnovnih enačb za posamezno opazovanje GNSS:

$$\begin{aligned}
 C1 &= \varrho + c\Delta t + I + T + DCB_{C1} + MP_{C1} \\
 P1 &= \varrho + c\Delta t + I + T + DCB_{P1} + MP_{P1} \\
 P2 &= \varrho + c\Delta t + \gamma I + T + DCB_{P2} + MP_{P2} \\
 L1 &= \varrho + c\Delta t - I + T + N_1 + MP_{L1} \\
 L2 &= \varrho + c\Delta t - \gamma I + T + N_2 + MP_{L2}
 \end{aligned} \tag{11}$$

kjer so  $C1$ ,  $P1$  in  $P2$  kodna opazovanja ( $C/A$  in  $P$ ) ter  $L1$  in  $L2$  fazna opazovanja (številka 1 se nanaša na frekvenco nosilnega valovanja  $L1$  in številka 2 na frekvenco nosilnega valovanja  $L2$ ). Nadaljnje oznake v enačbah so:

$\varrho$	geometrična razdalja satelit-sprejemnik [m],
$c\Delta t$	pogrešek ure sprejemnika [m],
$I$	vpliv ionosfere na opazovanje [m],
$T$	vpliv troposfere na opazovanje [m],
$DCB_{C1}$	kodni zamik na opazovanju $C1$ [m] (angl. differential code bias),
$DCB_{P1}$	kodni zamik na opazovanju $P1$ [m],
$DCB_{P2}$	kodni zamik na opazovanju $P2$ [m],
$N_1$	fazna nedoločenost (neznano število celih valov) na $L1$ [m],
$N_2$	fazna nedoločenost (neznano število celih valov) na $L2$ [m],
$MP_x$	vpliv večpotja oziroma odboja signala (angl. multi-path) na opazovanju $x$ [m],
$\gamma = f_1^2 / f_2^2$	kvadrat razmerja frekvence prvega ( $L1$ ) in drugega ( $L2$ ) nosilnega valovanja.

Vpliv ionosfere na GNSS-opazovanja ocenjujemo tako, da določimo linearne kombinacije faznih in kodnih opazovanj, in sicer  $L4$ ,  $P4$  in  $PC1$ :

$$\begin{aligned}
 L4 &= L1 - L2 = (\gamma - 1)I + N_1 - N_2 = (\gamma - 1)I + \Delta N_{12} \\
 P4 &= P2 - C1 = (\gamma - 1)I + DCB_{P2} - DCB_{C1} = (\gamma - 1)I + \Delta DCB_{C1P2} \\
 PC1 &= P1 - C1 = DCB_{P1} - DCB_{C1} = \Delta DCB_{P1C1}
 \end{aligned} \tag{12}$$

V zgornjih enačbah poleg neznanega vpliva ionosferske refrakcije nastopajo neznane količine, ki niso znane vnaprej, zato jih v obdelavi obravnavamo kot neznanke. To so:

- razlika faznih nedoločenosti na nosilnih valovanjih  $L1$  in  $L2$  ( $\Delta N_{12}$ ),
- razlika kodnih zamikov med  $P2$  in  $C1$  ( $\Delta DCB_{C1P2}$ ) ter
- razlika kodnih zamikov med  $P1$  in  $C2$  ( $\Delta DCB_{P1C1}$ ).

### 4.2.1 Ocenjevanje neznank

Ker v kodnih opazovanjih (prve tri enačbe skupine enačb (11) neznanka fazne nedoločenosti (neznano število celih valov v začetnem trenutku opazovanj) ne nastopa, moramo neznanke v

posameznih tipih opazovanj obravnavati drugače. Pri faznih opazovanjih tako kot neznanka poleg ionosferske refrakcije nastopa tudi razlika fazne nedoločenosti  $\Delta N_{12}$ . To pomeni, da moramo za vsak satelit določiti niz zaporednih trenutkov, v katerih je sprejemnik zabeležil opazovanja, med katerimi ni izpadov signala. Za vsak satelit tako nastavimo vsaj eno dodatno neznanko  $\Delta N_{12}$ .

Pri kodnih opazovanjih pa neznanko fazne nedoločenosti nadomesti neznanka kodnih zamikov, ki jo pri linearni kombinaciji  $P4$  obravnavamo kot kodni zamik  $\Delta DCB_{C1P2}$ , pri linearni kombinaciji  $P1C1$  pa kot kodni zamik  $\Delta DCB_{P1C1}$ . Kodni zamiki osnovnih opazovanj ( $DCB_{C1}$ ,  $DCB_{P1}$  in  $DCB_{P2}$ ) pravzaprav predstavljajo razliko med trenutkom, ko je bilo valovanje na satelitu oddano, in trenutkom, ko je opazovanje na sprejemniku sprejeto. So torej vsota zamika valovanja na satelitu in valovanja na sprejemniku glede na opazovanja ostalih satelitov. Tako lahko govorimo o časovnem neskladju (neujemanju) oddajanja posameznih satelitov na posameznih valovanjih. Tu moramo konceptualno razločevati med sistemoma GPS in GLONASS.

- V sistemu GPS (angl. global positioning system) vsi sateliti oddajajo enaki frekvenci nosilnih valovanj (način CMDA (angl. code division multiple access)). Na sprejemniku to pomeni obdelovanje signala na fizično isti radio-frekvenčni enoti. To pomeni, da je kodni zamik na sprejemniku za vse satelite enak, zato preide v popravek ure sprejemnika. Ker pa so kodni zamiki na posameznih satelitih različni, so različne tudi razlike kodnih zamikov ( $\Delta DCB_{C1P2}$  in  $\Delta DCB_{P1C1}$ ) za posamezne satelite na istem sprejemniku. Zato moramo za opazovanja vsakega satelita sestaviti po dve dodatni neznanki.
- Sistem GLONASS (rus. globalnaja navigacionnaja sputnikovaja sistema) pa je zasnovan tako, da oddajajo posamezni sateliti nosilna valovanja različne frekvence (način FMDA (angl. phase division multiple access)) za ista opazovanja (spet  $C1$ ,  $P1$ ,  $P2$ ). Na sprejemniku to pomeni ločeno obdelavo signala za vsak satelit na fizično ločenih radio-frekvenčnih enotah v sprejemniku. To pomeni, da je kodni zamik na sprejemniku različen za vsak satelit, prav tako so različni kodni zamiki na satelitih. Zato je treba za opazovanja vsakega satelita nastaviti po dve dodatni neznanki.

#### 4.2.2 Določitev enačb popravkov

Pri ocenjevanju vpliva ionosfere iz enačb linearnih kombinacij je ionosferska neznanka samo ena izmed neznank v obdelavi. Pri obdelavi faznih opazovanj imamo dodatno neznanko fazno nedoločenost, pri obdelavi kodnih opazovanj pa kodne zamike. Enačbe popravkov izpeljemo iz enačb opazovanj, ki izhajajo iz linearnih kombinacij:

$$\begin{aligned} L4 - (\gamma - 1) \frac{1}{\cos z'} \cdot (I_{zen}^0 + \Delta t \cdot \Delta I) - \Delta N_{12} &= 0 \\ P4 - (\gamma - 1) \frac{1}{\cos z'} \cdot (I_{zen}^0 + \Delta t \cdot \Delta I) - \Delta DCB_{C1P2} &= 0 \\ P1C1 - \Delta DCB_{P1C1} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Vpliv ionosfere nastopa samo v prvih dveh enačbah popravkov (skupina enačb (13)), v tretji enačbi vpliva ionosfere ni. Tretjo enačbo je treba vključiti, ker pripomore k bolj natančni določitvi vrednosti opazovanja  $C1$ , ki nastopa v drugi enačbi. Ker opazovanje  $C1$  nastopa v drugi in tretji enačbi, moramo upoštevati funkcijsko povezavo (korelacijo) med enačbama, zato za vse enačbe



(13) določimo variančno-kovariančno matriko:

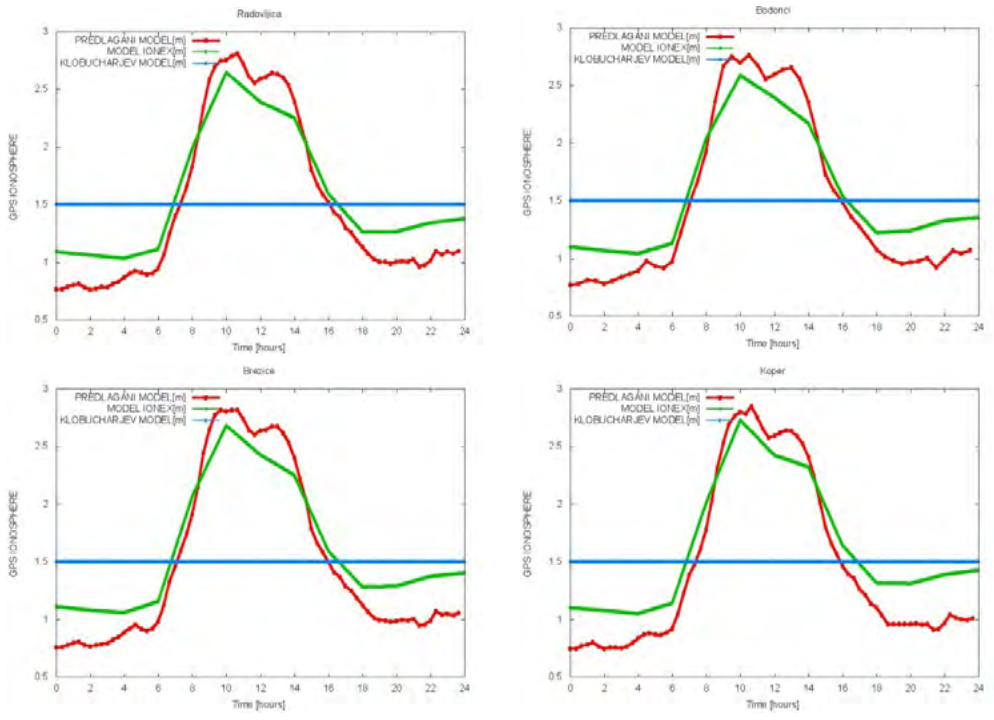
$$\Sigma = \frac{1}{p(z)} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{L4}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{P4}^2 & \sigma_{P4PC1} \\ 0 & \sigma_{P4PC1} & \sigma_{PC1}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{p(z)} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{L1}^2 + \sigma_{L2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{C1}^2 + \sigma_{P2}^2 & \sigma_{C1}^2 \\ 0 & \sigma_{C1}^2 & \sigma_{C1}^2 + \sigma_{P1}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Pri tem upoštevamo razmerje med natančnostjo kodnih in faznih opazovanj, ki je:  $\sigma_{koda} = 100 \times \sigma_{faza}$  (nekateri viri navajajo faktor od 100 do 1000 (Brown in Silva, 2000)). Dodatno moramo upoštevati še zenitno razdaljo satelita, saj predpostavljamo, da so opazovanja, ki prihajajo v smeri bliže zenitu, manj obremenjena z različnimi vplivi in torej bolj natančna. Opisano dejstvo v enačbi (14) upoštevamo z vključitvijo parametra  $p(z) = \cos^2(z)$ .

Enačbe popravkov opazovanj sestavimo z enačbami (13) v obliki  $\mathbf{v} + \mathbf{B} \cdot \Delta = \mathbf{f}$  in rešimo s postopkom posredne izravnave po metodi najmanjših kvadratov. Pri tem so:

- v** vektor popravkov opazovanj, dimenzije  $n \times 1$ , kjer je  $n$  število opazovanj,
- B** matrika koeficientov ob neznankah v enačbah popravkov, dimenzije  $n \times u$ , kjer je  $u$  število neznank,
- Δ** vektor neznank ( $u \times 1$ ),
- f** vektor odstopanj v enačbah popravkov ( $n \times 1$ ).

**5 PRIMERI**



Slika 1: Ionosferska refrakcija za položaje stalnih GNSS-postaj za 1. 1. 2013 – Klobucharjev model (modro), model IONEX (zeleno), predlagani lokalni model (rdeče).



V praktičnem primeru obravnavamo opazovanja GPS štirih točk državnega omrežja stalnih GNSS-postaj: Koper (KOPE), Radovljica (RADO), Bodonci (BODO) in Brežice (BREZ), in sicer za dan 1. 1. 2013 ter z intervalom registracije signala 30 s.

V prvem koraku smo po predlaganem algoritmu (enačbe (12) in (13)) za vsako točko posebej ocenili vpliv ionosfere na razširjanje signala GNSS na posamezni točki. Spodnji grafi predstavljajo primerjavo med tremi modeli ionosferske refrakcije, in sicer Klobucharjevim modelom, modelom IONEX in predlaganim modelom ionosfere, ki smo ga podrobneje opisali v poglavju 4.

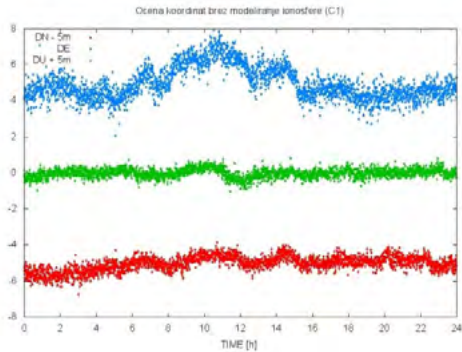
Iz grafično predstavljenih rezultatov izračunov lahko vidimo, da vpliv ionosfere na razširjanje GNSS-opazovanj za datum 1. 1. 2013 ni bil zelo izrazit. Pri Klobucherjevem modelu je vpliv modeliran preprosto kot konstantna vrednost – podaljšanje vrednosti kodnih opazovanj v zenitu za 1,5 metra. Primerjava med modelom IONEX in našim modelom pa kaže na ujemanje. Grafične predstavitve vplivov so za vse GNSS-postaje zelo podobne, kar potrjuje predpostavko, da je vpliv ionosfere na razširjanje opazovanj GNSS podoben za različne položaje točk manjšega območja (največja oddaljenost med točkami je približno 220 kilometrov).

## 5.1 Obdelava opazovanj

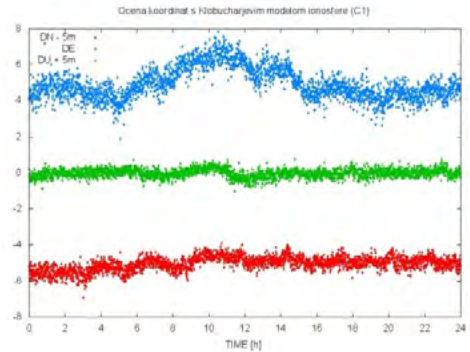
Pri testiranju uspešnosti modeliranja vpliva ionosfere smo obdelali opazovanja GNSS tako, da smo pridobili ocenjene koordinate točk za vsak trenutek registracije opazovanj. V vsaki datoteki smo imeli opazovanja za 2880 trenutkov (interval registracije 30 s). Izvedli smo pet različnih obdelav, in sicer:

1. obdelavo kodnih opazovanj C1 (splošno dostopna koda) na nosilnem valovanju L1. Modelirali ali odstranili smo vse vplive razen vpliva ionosfere. Ionosferske refrakcije tu nismo modelirali;
2. enako obdelavo kot v primeru 1, le da smo tu vpliv ionosfere modelirali s Klobucharjevim modelom;
3. obdelavo z modeliranjem vpliva ionosfere z modelom IONEX;
4. obdelavo s postopkom, ki je predlagan v tem prispevku;
5. zadnji primer pa obdelamo na podlagi linearne kombinacije P3, ki je neobčutljiva za vpliv ionosfere.

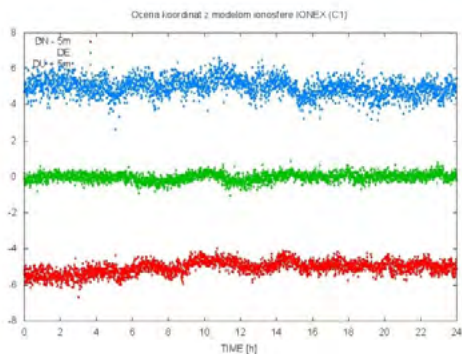
Spodnji prikazi predstavljajo razpršenost koordinat med dnevom, ki smo jih določili v petih postopkih, opisanih zgoraj. Razpršenost koordinat predstavljamo v lokalnem geodetskem koordinatnem sistemu, torej v smeri sever–jug (na grafih DN), vzhod–zahod (DE) in v smeri višine (DU). Zaradi preglednejšega prikaza smo vsem koordinatam v smeri sever–jug (DN) prišteli 5 metrov, vsem višinam pa odšteli 5 metrov. Razpršenost koordinat je določena glede na (uteženo) srednjo vrednost koordinat točke, določene za dan 1. 1. 2013.



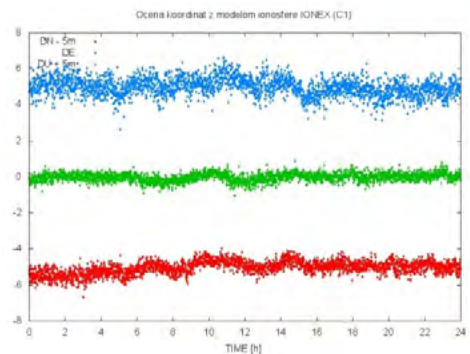
(1)



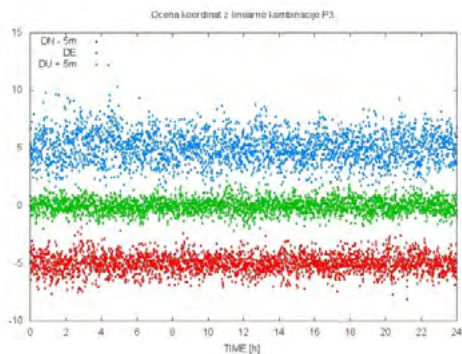
(2)



(3)

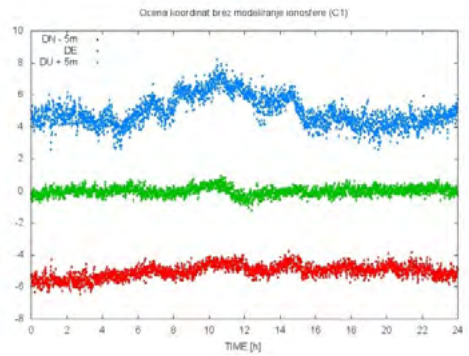


(4)

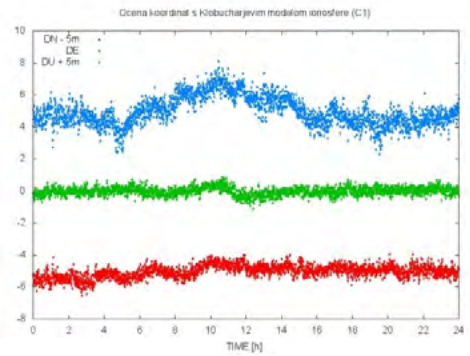


(5)

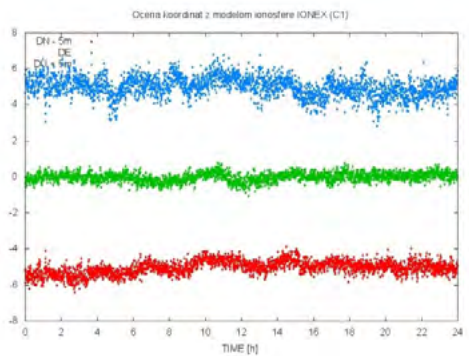
Slika 2: Določitev položajev za 24 ur opazovanj z vmesnim intervalom 30 s za 1. 1. 2013. Vsaka slika prikazuje položaje, pridobljene z različnimi postopki obdelave opazovanj GPS. **GNSS-točka: Bodonci**



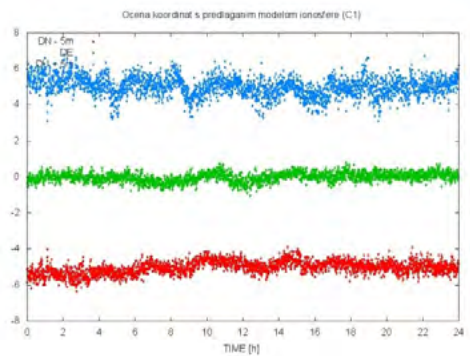
(1)



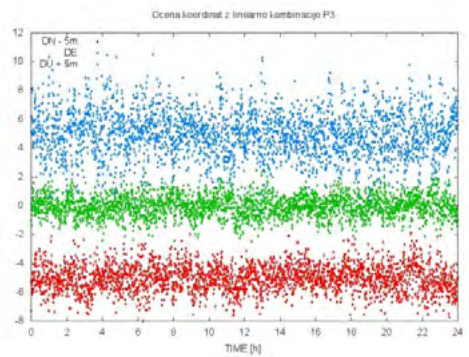
(2)



(3)

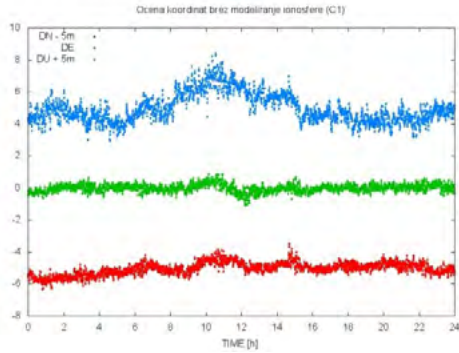


(4)

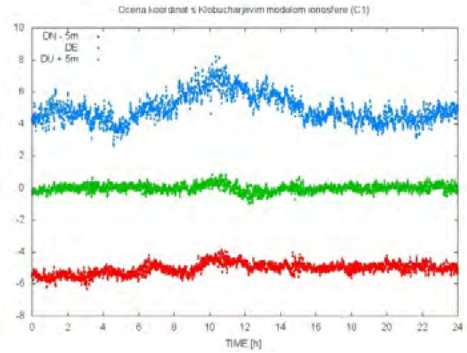


(5)

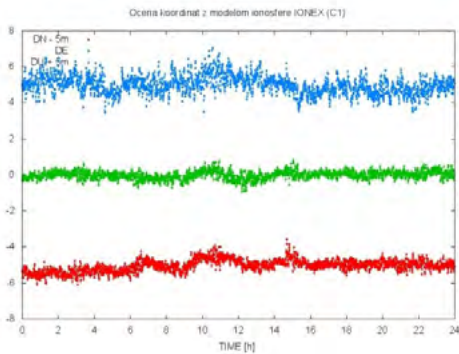
Slika 3: Določitev položajev za 24 ur opazovanj z vmesnim intervalom 30 s za 1. 1. 2013. Vsaka slika prikazuje položaje, pridobljene z različnimi postopki obdelave opazovanj GPS. GNSS-točka: Brežice



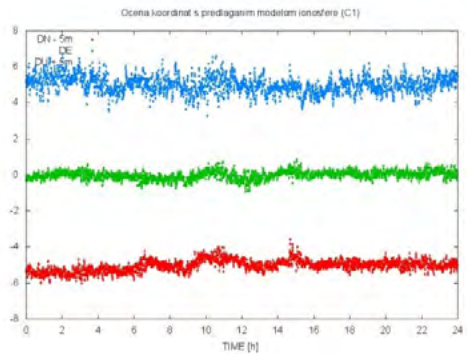
(1)



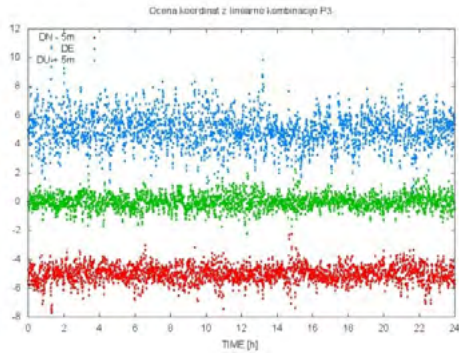
(2)



(3)



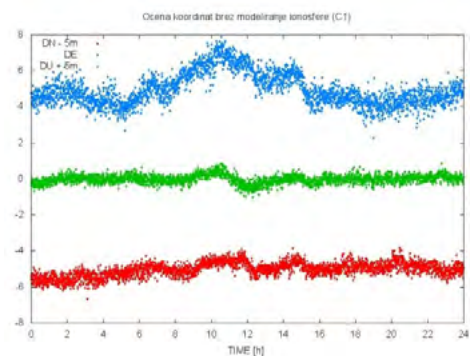
(4)



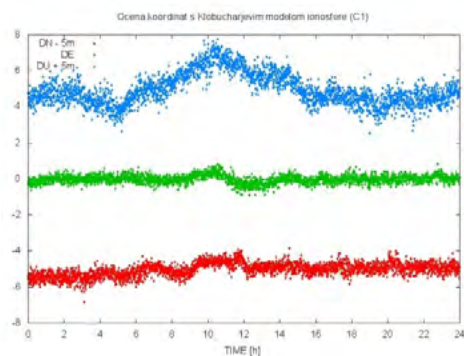
(5)

Slika 4: Določitev položajev za 24 ur opazovanj z vmesnim intervalom 30 s za 1. 1. 2013. Vsaka slika prikazuje položaje, pridobljene z različnimi postopki obdelave opazovanj GPS. GNSS-stalna postaja: Koper

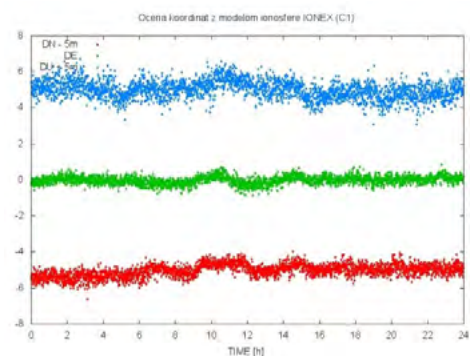




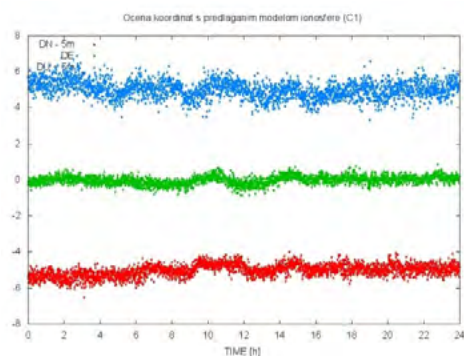
(1)



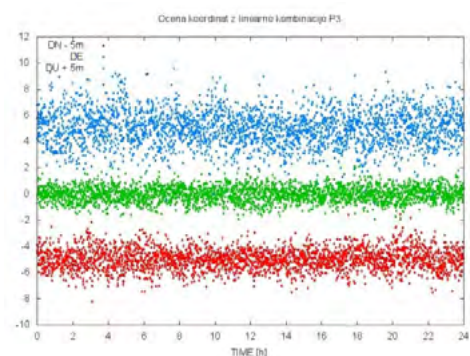
(2)



(3)



(4)



(5)

Slika 5: Določitev položajev za 24 ur opazovanj z vmesnim intervalom 30 s za 1. 1. 2013. Vsaka slika prikazuje položaje, pridobljene z različnimi postopki obdelave opazovanj GPS. GNSS-stalna postaja: Radovljica

Zgornji prikazi (slike 2–5) ponazarjajo razpršenost koordinat v posameznem trenutku glede na (uteženo) srednjo vrednost koordinat točke. Razvidno je, da v primeru, ko ne modeliramo vpliva ionosfere (primer slika 1) in ko vpliv ionosfere modeliramo s Klobucharjevim modelom (primer slika (2)), dobimo podobne rezultate. To je bilo pričakovati, saj smo pred tem ugotovili (slika 1),

da je s Klobucharjevim modelom določena vrednost ionosferske refrakcije bila konstanta. To pravzaprav pomeni, da je upoštevan model vplival samo na absolutne vrednosti in ne tudi na relativne vrednosti koordinatnih komponent (primerjalno med posameznimi trenutki). Zaradi visoke stopnje ujemanja modela IONEX in predlaganega modela so prikazi za oba načina modeliranja ionosfere zelo podobni (primer slik 3 in 4). Najbolj odstopa zadnji prikaz izračunov (za vse točke), pri katerem smo vpliv ionosfere odstranili z linearno kombinacijo  $P3$ . To je, vsaj kar zadeva vpliv ionosfere, najboljša možnost, a se šum oziroma razpršenost koordinat poveča. Večja razpršenost koordinat je posledica sestave linearne kombinacije, kjer se za približno faktor 3 poveča šum linearne kombinacije v primerjavi z neposredno pridobljenimi vrednostmi opazovanj.

V preglednici 1 predstavljamo primerjavo ocenjenih statičnih koordinat točk z različnim načinom modeliranja ionosfere. Referenčne vrednosti koordinat so bile določene z metodo PPP (angl. precise point positioning), ki zagotavlja ocenjene dnevne koordinate točke ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) s točnostjo enega centimetra. Za vse štiri točke imamo pet različnih nizov v lokalnem geodetskem koordinatnem sistemu (smer sever-jug (SJ), smer vzhod-zahod (VZ) in smer višine). Stolpec Brez ionosfere predstavlja razliko obdelave, ko vpliva ionosfere ne modeliramo, in obdelave PPP, stolpec Klobucharjev model predstavlja razliko modeliranja ionosfere s Klobucharjevim modelom in obdelave PPP, stolpec Model IONEX primerjavo med modeliranjem z modelom IONEX in obdelavo PPP, stolpec Predlagani model ionosfere primerjavo med našim predlogom modeliranja ionosfere in obdelavo PPP ter zadnji stolpec Linearna kombinacija  $P3$  primerjavo med obdelavo  $P3$  linearno kombinacijo in PPP.

TOČKA	SMER	Brez ionosfere	Klobucharjev model	Model IONEX	Predlagani model ionosfere	Linearna kombinacija P3
Bodonci	SJ	0,819 m	0,849 m	0,871 m	0,872 m	- 0,017 m
	VZ	0,026 m	0,038 m	0,024 m	0,022 m	0,060 m
	višina	2,112 m	- 0,676 m	- 0,563 m	- 0,432 m	0,654 m
Brežice	SJ	0,790 m	0,810 m	0,842 m	0,843 m	- 0,122 m
	VZ	0,024 m	0,037 m	0,023 m	0,021 m	0,048 m
	višina	2,123 m	- 0,687 m	- 0,624 m	- 0,441 m	0,790 m
Koper	SJ	0,768 m	0,785 m	0,820 m	0,821 m	- 0,059 m
	VZ	0,051 m	0,063 m	0,050 m	0,050 m	0,071 m
	višina	2,014 m	- 0,783 m	- 0,744 m	- 0,475 m	- 0,084 m
Radovljica	SJ	0,799 m	0,828 m	0,854 m	0,855 m	- 0,033 m
	VZ	0,026 m	0,037 m	0,024 m	0,023 m	0,035 m
	višina	2,156 m	- 0,616 m	- 0,540 m	- 0,384 m	0,776 m

Preglednica 1: Primerjava odstopanj statičnih koordinat glede na različne načine modeliranja vpliva ionosfere

Iz primerjav različnih obdelav GNSS-opazovanj v smislu obravnavanja ionosferske refrakcije je za vse točke razvidno, da se razlike pojavljajo predvsem v višinski komponenti. To pravzaprav ni tako presenetljivo, saj je vpliv atmosfere (tako ionosfere kot troposfere) izrazit v višinski

komponenti, veliko manj pa v horizontalnem smislu. Največjo napako v obdelavi opazovanj GNSS tako naredimo, če vpliva ionosfere na opazovanja sploh ne upoštevamo. Iz primera je razvidno, da sta Klobucharjev model in model IONEX primerljiva, čeprav ne v celoti. Razlika se pojavi pri velikem vplivu ionosfere, to je ob povečani Sončevi aktivnosti, kjer se izkaže, da je model IONEX veliko bolj točen kot Klobucharjev model. Ker smo predlagani model izračunali na podlagi opazovanj GNSS, je pričakovati, da bo ta model najbolje odstranil vpliv ionosfere, zato so razlike do rezultatov obdelave PPP najmanjši. Zadnji stolpec pa kaže na veliko ujemanje med metodo PPP in rezultati obdelave linearne kombinacije P3, predvsem v horizontalnem smislu. Višinska komponenta položaja je slabše določena, predvsem zaradi večjega šuma opazovanj.

## 6 ZAKLJUČEK

Iz zgoraj napisanega lahko ugotovimo, da je v določitvi položaja z GNSS ionosferska refrakcija ključni dejavnik, ki izrazito vpliva na določitev položaja, zato ga moramo v obdelavi vedno upoštevati. Med konstantnim dogajanjem v plasti ionosfere lahko vpliv zmanjšamo z uporabo globalnih modelov, v obdobju nenadnih in velikih sprememb v ionosferi, ki so rezultat dogajanja na Soncu, pa uporaba globalnih modelov ni dovolj. Predvsem zato, ker so globalni modeli določeni tako, da v realnem času lahko uporabimo le informacije, ki temeljijo na predpostavkah o dogajanju v ionosferi brez možnosti upoštevanja hitrih, nenadnih in tudi kratkotrajnih sprememb v ionosferi v realnem času. Globalni modeli (na primer Klobuchar in IONEX) tudi ne vključujejo informacij o lokalnih spremenljivostih vpliva ionosfere na opazovanja GNSS. Maja letos naj bi 24. Sončev cikel dosegel višek, zato bodo hitro pridobljene informacije o stanju v ionosferi na ožjem območju, ki bodo pridobljene iz obdelave lokalnih GNSS-postaj, za uporabnika tehnologije GNSS zelo pomembne.

Prednost modela ionosferske refrakcije, ki ga sestavimo iz dejanskih opazovanj GNSS, je možnost hitrega upoštevanja sprememb ionosferske refrakcije ter večja natančnost določitve vpliva, ki izhaja iz lokalnih značilnosti stanja v ionosferi. Vendar pa ima tako modeliranje lokalnega vpliva ionosfere na opazovanja GNSS tudi slabosti, ki izhajajo ravno iz dejstva, da je model omejen na manjše območje. Če bi želeli določiti model za širše območje, bi morali v obdelavo hkrati vključiti opazovanja večjega števila točk, s katerimi bi pridobili opazovanja GNSS za več različnih tipov in frekvenc. Druga slabost izhaja iz samega pristopa k obravnavanju vpliva ionosfere, ki jo obravnavamo kot sferično tanko plast nad točko, čeprav vemo, da je plast ionosfere časovno in lokalno spremenljiva. Tak način obravnavanja vpliva ionosfere na opazovanja GNSS ne opisuje realnega stanja, saj je časovna zakasnitev kodnih GNSS-opazovanj količina, katere vrednost je funkcijsko odvisna od zenitne razdalje in azimuta satelita GNSS.

## ZAHVALA

Prispevek je nastal v okviru temeljnega raziskovalnega projekta Določitev in ocena vplivov izrednih Sončevih aktivnosti na satelitsko določanje lokacije (J2-3625) in raziskovalnega programa Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.



## Literatura in viri:

- Berk, S., Bajec, K., Radovan, D. (2013). Spremljanje ionosferskih motenj nad Slovenijo s pomočjo omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL. Raziskave s področja geodezije in geofizike. 18. Strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana, 29. januar 2013. Zbornik predavanj, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 95–103.*
- Brown, A., Silva, R. (2000). A GPS receiver designed for carrier-phase time transfer. Proceedings of ION National Technical Meeting, januar 2000.*
- Jakowski, N., Mayer, C., Wilken, V., Hoque, M. M. (2008). Ionospheric Impact on GNSS Signals. Fisica de la Tierra, posebna izdaja »The Ionosphere and its Influence on Positioning and Satellite Navigation«, Vol. 20, 2008.*
- 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.*
- Leick, A. (1995). GPS satellite surveying. John Wiley & Sons.*
- Schaer, S., Gurtner, W., in Feltens, J. (1997). IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1, February 25, 1998, v Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop, ESOC, Darmstadt, Nemčija, 233–247.*
- Schaer, S. (1999). Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System. Disertacija, AIUB (angl. Astronomical Institute, University of Berne), Bern, Švica, marec 1999.*
- Sirocko, F., Brunck, H., Pfahl, S. (2012). Solar influence on winter severity in central Europe, Geophysical Research Letters, 39, L16704.*
- Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P (2012). Vplivi dogajanj na Soncu na določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi GNSS-instrumenti: priprava na vrh 24. Sončevega cikla. Raziskave s področja geodezije in geofizike. 17. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana, 26. januar 2012. Zbornik predavanj, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 79–90.*
- Zhou, Z. (1995). Principle and Practice of GPS Satellite Surveying. Surveying and Mapping, Peking.*

**Prispelo v objavo: 25. februar 2013**

**Sprejeto: 1. marec 2013**

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

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: oskar.sterle@fgg.uni-lj.si

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

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: bojan.stopar@fgg.uni-lj.si

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

FGG - Oddelek za geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

e-pošta: polona.pavlovic@fgg.uni-lj.si