

Doprinos određivanju jonosferskog kašnjenja GNSS satelitskih signala na teritoriji Republike Srbije

DUŠAN S. PETKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

LJILJANA M. BRAJOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

VIOLETA M. VASILIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

STANISLAVA M. BOSIOČIĆ, Univerzitet u Beogradu,

ATUSS odsek Visoka građevinsko
geodetska škola, Beograd

Stručni rad

UDC: 007:528.28]:004

528.28(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika2301021P

Višefrekvencijski GNSS satelitski signali i njihova dostupnost omogućavaju istraživanja u nediferenciranom i nekombinovanom modelu u kome je pojedinačni signal na svakoj frekvenciji odgovarajuće nezavisno opažanje. Ovakve mogućnosti izazivaju veliko interesovanje ne samo u geodetskim istraživanjima već i u mnogim oblastima primene GNSS opažanja. Na geometrijskoj putanji signala između satelita i prijemnika, značajni izvor grešaka GNSS merenja dolazi zbog sredine prostiranja elektromagnetskih talasa. Greške koje se pripisuju prostiranju signala su jonosferski i troposferski uticaji. Navedeni izvori grešaka značajno utiču na kvalitet određenih pseudodužina, pa samim time i na kvalitet određenog položaja prijemnika u vidu trodimenzionalnih koordinata. U radu je prikazana analiza i određivanje jonosferskog kašnjenja GNSS satelitskih signala na osnovu određivanja Total Electron Content – TEC na pet stanica (Beograd, Leskovac, Sombor, Zaječar i Kraljevo) na prostoru Republike Srbije. U cilju određivanja vrednosti TEC-a, korišćen je softver pod nazivom „GPS-TEC analysis“ razvijen u okviru Institute for Scientific Research, Boston College, USA, koji omogućava određivanje TEC vrednosti na putanji između satelita i prijemnika. Prikupljanje podataka izvršeno je u okviru 2022. godine tako da merne sesije obuhvate karakteristične datume u okviru godine kada se očekuju najveća kolebanja u kontekstu sezonskih varijacija.

Ključne reči: GNSS, jonosferska refrakcija, totalni sadržaj elektrona, ekvinočij, solsticij

1. UVOD

Globalni navigacioni satelitski sistemi (engl. Global Navigation Satellite Systems - GNSS) su sistemi za pozicioniranje bazirani na principu trilateracije – određivanju položaja na osnovu merenih rastojanja. Merenje rastojanja se vrši na osnovu permanentno emitovanih satelitskih signala registrovanih od strane prijemnika, korišćenjem dva osnovna principa (slika 1) [1]:

- određivanje vremena puta signala, i
- određivanje fazne razlike.

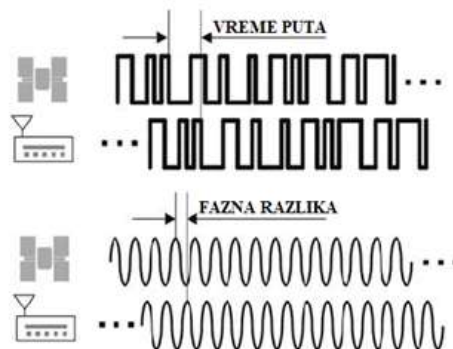
Adresa autora: Dušan Petković, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: d.petkovic@grf.bg.ac.rs

Rad primljen: 13.01.2023.

Rad prihvaćen: 19.01.2023.

Kod tehnologije GNSS-a razlikujemo dva osnovna tipa izmerenog rastojanja između satelita s i prijemnika r : kodne i fazne pseudodužine (dužine između satelita i prijemnika koje u sebi sadrže dodatne uticaje zbog kojih se njihova vrednost razlikuje od geometrijskog rastojanja).



Slika 1 – Princip merenja rastojanja [2]

Funkcionalni modeli kodnih P_r^S i faznih L_r^S pseudodužina imaju sledeći oblik [1]:

$$P_r^S = R_r^S + c_0 \delta t_r - c_0 \delta t^S + E^S + I_r^S + T_r^S + M_r + \varepsilon_p, \quad (1)$$

$$L_r^S = R_r^S + c_0 \delta t_r - c_0 \delta t^S + E^S - I_r^S + T_r^S + M_r + \varepsilon_p + \lambda N_r^S. \quad (2)$$

U prethodnim jednačinama se, pored geometrijskog rastojanja između satelita i prijemnika R_r^S , nalazi i niz drugih članova koji opisuju različite izvore grešaka koji opterećuju proces GNSS merenja. Sve navedene greške se mogu klasifikovati u tri osnovne grupe:

- greške koje potiču od satelita,
- greške sredine prostiranja, i
- greške prijemnika.

U greške satelitskog porekla spadaju greške satelitskih efemerida E^S , greške satelitskih časovnika δt^S , kašnjenje satelitskog hardvera, varijacija faznog centra satelitske antene i greška usled relativističkog efekta. Greške koje se pripisuju prostiranju signala su jonosfersko kašnjenje signala I_r^S i troposfersko kašnjenje signala T_r^S .

U greške prijemnika spadaju greška časovnika prijemnika δt_r , merni šum prijemnika, kašnjenje hardvera prijemnika, varijacija faznog centra antene i greška usled višestruke refleksije M_r [3]. Pored navedenog, funkcionalni modeli predstavljeni jednačinama (1) i (2) sadrže i članove koji se odnose na neizbežnu slučajnu grešku merenja ε_p , dok funkcionalni model faznih pseudodužina sadrži i član koji se odnosi na celobrojnu vrednost faznih neodređenosti λN_r^S .

Navedeni izvori grešaka značajno utiču na kvalitet određenih pseudodužina, pa samim time i na kvalitet određivanja položaja prijemnika u vidu trodimenzionalnih koordinata (X, Y, Z) u globalnom geocentričnom pravouglom koordinatnom sistemu¹

Kod grešaka koje nastaju kao posledica sredine kretanja, od ključnog značaja su promene osobina elektromagnetskih talasa (EM talasa) tokom prostiranja kroz Zemljinu atmosferu. Emitovani satelitski signali, odnosno EM talasi, se na svom putu do prijemnika ne kreću pravolinijski konstantnom brzinom, već interaguju sa definisanim sredinama Zemljine atmosfere i menjaju pravac i brzinu prostiranja [4].

¹ Globalni geocentrični pravougli koordinatni sistem je sistem čiji se koordinatni početak nalazi u centru mase Zemlje (zajedno sa masom okeana i atmosfere), Z osa se poklapa sa srednjom osom Zemljine rotacije, X osa se nalazi u ravni ekvatora i prolazi kroz početni meridijan, a -Y osa, koja se takođe nalazi u ravni ekvatora, je upravna na X i Z osu po pravilu desne ruke.

Struktura Zemljine atmosfere se za većinu praktičnih primena može opisati kao set koncentričnih sferičnih omotača Zemlje sa specifičnim fizičkim i hemijskim svojstvima.

Podela na slojeve je moguća na više načina, i to u zavisnosti od specifične pojave ili aspekta koji se posmatra. Sa aspekta prostiranja satelitskih signala, od značaja su dva sloja atmosfere: troposfera i jonosfera [5].

Jonosfera predstavlja jedan od glavnih izvora grešaka kod satelitskog pozicioniranja. Čak i prilikom upotrebe relativno visokih frekvencija ($f \approx 10^3$ MHz), kašnjenje signala usled uticaja jonosfere može dostići vrednost i do 300 ns, što može izazvati grešku i do 100 m prilikom određivanja pseudodužine [6].

S tim u vezi, predviđeno je da sateliti emituju signale na dve frekvencije, koje se mogu kombinovati na različite načine u cilju eliminacije određenih izvora grešaka, između ostalog i jonosfere [1, 5].

Takođe, pored sistema za globalno pozicioniranje postoje i razni sistemi kod kojih se određuje rastojanje na isti način – merenjem rastojanja do satelita. Takvi sistemi se naširoko koriste kod daljinske detekcije (engl. Remote Sensing), laserske altimetrije (engl. Laser altimetry), itd., i kod njih se atmosferski uticaj (a samim time i uticaj jonosfere) mora uzeti u obzir [7].

Uticaj jonosfere na prostiranje satelitskih signala se intenzivno proučavao u prethodnim decenijama, kako na globalnom tako i na regionalnom i lokalnom nivou.

Na globalnom nivou se izdvajaju globalni jonosferski modeli:

- IRI model (engl. International Reference Ionosphere) razvijen kao međunarodni projekat pod pokroviteljstvom Odbora za istraživanje svemira (engl. COmmittee on SPACE Research – COSPAR) i Međunarodne unije radio nauka (engl. International Union of Radio Science - USRI); Aktuelni model je IRI-2016 [8];
- NeQuick model razvijen od strane laboratorije ARPL (engl. Aeronomy and Radio Propagation Laboratory) u okviru Internacionalnog centra za teoretsku fiziku u Trstu i Instituta za geofiziku, astrofiziku i meteorologiju Univerziteta u Gracu [9].

Istraživanja na lokalnom i regionalnom nivou su usmerena na istraživanja jonosferskog kašnjenja za nediferenciranu i nekombinovanu obradu GNSS podataka korišćenjem dostupnih predviđanja broja Sunčevih pega [10], na modeliranje ekstremnih vrednosti totalnog sadržaja elektrona na teritoriji Srbije [11], kao i na određivanje uticaja jonosfere na podatke dobijene primenom GNSS tehnologije u RTK (engl. Real Time Kinematic) režimu [12].

2. JONOSFERA

Jonosfera je gornji sloj Zemljine atmosfere koji se prostire od 60 km do 1500 km iznad Zemljine površine. Glavni sastojci jonosfere su jonizovani gasovi koji nastaju uglavnom kao posledica Sunčevog zračenja. Ultraljubičasto zračenje Sunca pobuđuje molekule atmosfere da proizvode slobodne elektrone i jone [4]. Uticaj jonosfere na prostiranje signala sa satelita je upravo posledica slobodnih negativno naelektrisanih čestica (elektrona). Gustina elektrona nije jedinstvena za celu jonosferu. Zbog različitih vrsta atoma i molekula nastaje nekoliko različitih slojeva sa karakterističnom gustinom elektrona. S tim u vezi, jonosfera se može podeliti na tri glavne regije (sloja): D , E i F (F_1 i F_2) [5]. Osnovne karakteristike glavnih jonosferskih slojeva prikazane su u sledećoj tabeli (tabela 1).

Tabela 1. Glavni jonosferski slojevi sa karakterističnim odlikama [5]

| Sloj | Visina sloja [km] | Gustina elektrona [el/cm ³] | |
|-------|-------------------|---|----------------|
| | | dan | noć |
| D | 60 – 90 | $10^2 - 10^4$ | – |
| E | 85 – 140 | 10^5 | $2 \cdot 10^3$ |
| F_1 | 140 – 200 | $5 \cdot 10^5$ | $5 \cdot 10^4$ |
| F_2 | 200 – 1000 | 10^6 | $3 \cdot 10^5$ |

Zbog značajnije veće gustine elektrona u višim jonosferskim regijama, F regija predstavlja najveći uzrok kašnjenja satelitskih signala i predstavlja najvažniji sloj za navigaciju i svemirsku komunikaciju. Međutim, uticaj nižih jonosferskih slojeva (D sloja) se takođe mora uzeti u obzir u proračunima pogotovo kada je jonosfera pogođena solarnim flerovima [12, 13]. Stanje jonosfere može da odstupa od takozvanog uobičajenog stanja. Takva odstupanja se nazivaju jonosferskim varijacijama koje mogu biti kratkoročne ili dugoročne, i koje su direktno ili indirektno povezana sa specifičnim događajima na Suncu i promenama geomagnetskog polja [14]. Generalno, jonosferske varijacije se mogu podeliti na [4, 12]:

- varijacije usled solarnog ciklusa Sunca – varijacije u emisiji zračenja sa Sunca sa periodom od 11 godina (solarni ciklus 25 je započeo u decembru 2019. godine),
- varijacije usled geomagnetske aktivnosti,
- dnevne i sezonske varijacije – nastaju usled rotacije i revolucije Zemlje,
- varijacije sa promenom latituda – sa promenom geografske latituda (širine), sunčevo zračenje dolazi u atmosferu pod određenim uglom, što rezultira promenama u gustini elektrona.

Jonosfera je disperziona sredina - sredina u kojoj fazna brzina talasa zavisi od talasne dužine, odnosno

frekvencije [15]. Ova odlika jonosfere ima za posledicu kašnjenje signala koji pristižu na Zemlju.

3. VREMENSKO KAŠNENJE SIGNALA

Jonosfera je sredina sa velikom koncentracijom elektrona. U njoj su dominantne električne osobine, pa su od velikog značaja izrazi koji se koriste za prostiranje elektromagnetnih talasa u slučaju metala [7].

Kako bi odredili kašnjenje signala prouzrokovano uticajem jonosfere, neophodno je pre svega definisati relativnu dielektričnu konstantu (relativnu dielektričnu propustljivost) sredine. Relativna dielektrična konstanta sredine se definiše kao odnos dielektrične konstante vakuuma i dielektrične konstante posmatrane sredine, odnosno:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (3)$$

gde je:

- ε_r – relativna dielektrična konstanta,
- ε – dielektrična konstanta sredine,
- ε_0 – dielektrična konstanta vakuuma.

Kada govorim o homogenim sredinama koje ne apsorbuju energiju EM talasa, relativna dielektrična konstanta je realni broj. Međutim, ako postoji apsorpcija energije, neophodno je koristiti kompleksni oblik dielektrične konstante:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' - i\varepsilon'', \quad (4)$$

gde je:

- $\varepsilon' = \text{Re}(\varepsilon_r)$ – realni deo relativne dielektrične konstante,
- $\varepsilon'' = \text{Im}(\varepsilon_r)$ – imaginarni deo relativne dielektrične konstante.

Relativna dielektrična konstanta jonosfere, odnosno njen realni i imaginarni deo, se može predstaviti sledećim izrazima [7]:

$$\varepsilon' = 1 - \frac{\sigma\tau}{\varepsilon_0(1+\omega^2\tau^2)}, \quad (5)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega(1+\omega^2\tau^2)}, \quad (6)$$

$$\tau = \frac{m_e\sigma}{N_e e^2}, \quad (7)$$

gde je:

- σ – specifična električna provodnost [S/m],
- τ – srednje vreme između dva sudara [s],
- m_e – masa elektrona [kg],
- e – naelektrisanje elektrona [C],
- N_e – koncentracija slobodnih elektrona [$1/\text{m}^3$],
- $\omega = 2\pi f$ – kružna (ugaona) frekvencija [Hz=rad/s],
- f – frekvencija talasa [Hz].

Jednačine (5) i (6) se mogu pojednostaviti u zavisnosti od vrednosti ω i τ . Srednje vreme τ je reda veličine od 10^{-15} do 10^{-14} , pa možemo diskutovati zavisnost od ugaone frekvencije ω , i to kroz dva karakteristična slučaja:

1. $\omega \gg 1/\tau$;
2. $\omega \ll 1/\tau$.

U prvom slučaju, vrednost ugaone frekvencije odgovara visokim frekvencijama, pa relativna dielektrična konstanta postaje [7]:

$$\varepsilon_r \approx 1 - \frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e \omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}. \quad (8)$$

Jednačina (8) opisuje dielektričnu konstantu plazme, stanja materije u kojoj su svi atomi jonizovani. Veličina ω_p predstavlja frekvenciju plazme, koja je definisana izrazom:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}. \quad (9)$$

Na osnovu izraza (8) se može zaključiti da je plazma transparentan (nema apsorpcije) samo u slučaju $\omega \gg \omega_p$. Tada je indeks prelamanja sredine n realni broj, koje se može predstaviti sledećim izrazom:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2}. \quad (10)$$

Na osnovu prethodnog izraza, možemo doći do izraza za frekvenciju signala:

$$\omega = \frac{c_0 k}{n} = ck \left(1 - \frac{N_e e^2}{2\varepsilon_0 m_e \omega^2}\right)^{-1}. \quad (11)$$

gde je:

- c_0 – brzina prostiranja svetlosti u vakuumu [m/s],
- $k = 2\pi/\lambda$ – talasni broj [rad/m],
- λ – talasna dužina [m].

Sada možemo upotrebiti izraz za brzinu prostiranja talasa v_g (grupna brzina²), odnosno:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = c_0 \left(1 - \frac{N_e e^2}{2\varepsilon_0 m_e \omega^2}\right)^{-1}, \quad (12)$$

i na osnovu njega definisati vreme T koje je potrebno da talas pređe određeni sloj atmosfere (npr. jonosfera):

$$T = \int \frac{ds}{v_g} = \frac{s}{c_0} + \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m_e \omega^2 c_0} \int N_e ds. \quad (13)$$

Prethodna jednačina se može interpretirati na sledeći način [7]:

- prvi član predstavlja vreme potrebno da talas pređe rastojanje s u vakuumu,
- drugi član predstavlja vreme kašnjenja signala usled uticaja sredine.

² Grupna brzina predstavlja brzinu protoka (prenosa) informacija.

Vremensko kašnjenje signala usled uticaja sredine može se odrediti na osnovu sledećeg izraza:

$$\delta t = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 m_e \omega^2 c_0} \int N_e ds. \quad (14)$$

U cilju određivanja vremenskog kašnjenja signala, pored poznatih fizičkih konstanti, potrebno je poznavati veličinu koja se naziva totalni sadržaj elektrona (engl. Total Electron Content - TEC). Totalni sadržaj elektrona predstavlja ukupan broj elektrona u zamišljenom cilindru sa osnovom površine 1 m^2 čija je osovina putanja signala od emitera do prijemnika.

U literaturi se često definiše i kao integralni ili ukupni sadržaj elektrona, i matematički se može definisati sledeći izrazom [16]:

$$TEC = \int N_e ds. \quad (15)$$

Jedinice u kojima se izražava totalni sadržaj elektrona naziva se TECU (engl. Total Electron Content Unit) i iznosi 10^{16} slobodnih elektrona po kvadratnom metru [1, 6].

Na osnovu vrednosti vremenskog kašnjenja signala može se na jednostavan način sračunati i vrednost greške izmerenog rastojanja, odnosno greška pseudodužine. Do greške u izmerenom rastojanju može se doći na osnovu sledećeg izraza:

$$\delta s = c_0 \cdot \delta t. \quad (16)$$

Bitno je napomenuti da je tokom proračuna neophodno voditi računa o jedinicama. Ako se kod izraza (14) i (16) sve veličine izraza u osnovnim jedinicama SI sistema (m, s, kg, Hz, C, m/s, ...), a vrednost ukupnog sadržaja elektrona u [$1/\text{m}^2$], dobijeni rezultati za vremensko kašnjenje signala δt i greške u određivanju rastojanja δs biće izraženi u sekundama [s] i metrima [m], respektivno.

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

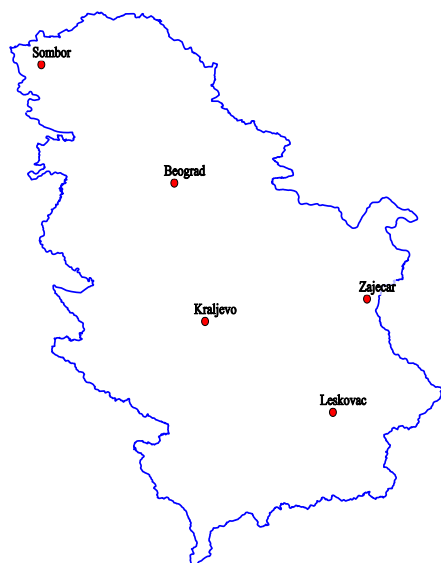
Eksperimentalna istraživanja u ovom radu usmerena su na određivanje vremenskog kašnjenja GNSS signala i analizu rezultata.

Sam eksperiment je realizovan u okviru sledećih faza:

- Prikupljanje podataka;
- Obrada podataka u cilju određivanja vrednosti TEC-a; i
- Određivanja vremenskog kašnjenja signala i greške merenog rastojanja.

4.1. Prikupljanje podataka

Faza prikupljanja podataka podrazumevala je primenu tehnologije GNSS-a. S tim u vezi, na teritoriji Republike Srbije izabrano je 5 ravnomerno raspoređenih tačaka čiji je prostorni raspored prikazan na sledećoj slici (slika 2).



Slika 2 – Prostorni raspored izabranih tačaka

Prikupljanje podataka izvršeno je 2022. godine i to na osnovu sledeće strategije:

- merne sesije su definisane tako da obuhvate karakteristične datume u okviru godine kada se očekuju najveća kolebanja u kontekstu sezonskih varijacija [12]:
 - početak prolećne ravnodnevnice (prolećni ekvinocij) - 20.03.2022;
 - početak letnje dugodnevnice (letnji solsticij) - 21.06.2022;
 - početak jesenje ravnodnevnice (jesenji ekvinocij) - 23.09.2022;
 - početak zimske kratkodnevne (zimski solsticij) - 21.12.2022;
- kako bi obuhvatili dnevne varijacije, trajanje merne sesije iznosilo je 24 sata;
- merenja su realizovana tako da obuhvataju izabrani datum, jedan dan pre i jedan dan nakon izabranog datuma (3x24h);
- interval registracije u okviru merne sesije iznosio je 30 sekundi.

4.2. Obrada podataka – određivanje vrednosti TEC

U cilju određivanja vrednosti TEC-a, korišćen je softver pod nazivom „GPS-TEC analysis“ razvijen u okviru Univerziteta u Bostonu [17, 18]. Ovaj softver omogućava određivanje TEC vrednosti na putanji između satelita i prijemnika na osnovu prikupljenih podataka u vidu RINEX (engl. Receiver Independent Exchange Format) datoteka.

Na osnovu ulaznih podataka softver generiše izlazne datoteke u vidu .cmn i .std fajlova (tekstualne datoteke) koji sadrže podatke o stanici, vremenu, azimutu i vertikalnom uglu satelita, položaju jonosferske tačke preseka, vrednosti TEC-a i njegovog

standardnog odstupanja. Vrednosti TEC-a se dobijaju u trajanju merne GNSS sesije (u ovom slučaju 24 h) izražene za svaki minut (1440 TEC vrednosti dnevno) [17, 18].

4.3. Određivanje vremenskog kašnjenja signala i greške merenog rastojanja

Nakon određivanja konkretnih vrednosti TEC-a, izraz (14) je direktno primenjen u cilju određivanja vremenskog kašnjenja signala. U okviru definisanog izraza figurišu fizičke konstante opisane u prethodnim poglavljima, i njihove vrednosti su date u tabeli 2.

Tabela 2. Fizičke veličine neophodne za određivanje vremenskog kašnjenja signala, njihove vrednosti i jedinice

| Oznaka | Vrednost | Jedinica |
|-----------------|-------------------------|----------------------|
| c_0 | 299 792 456 | m/s |
| e | $-1.603 \cdot 10^{-19}$ | C |
| ω | 8805.947 | MHz |
| m_e | $9.109 \cdot 10^{-31}$ | kg |
| ε_0 | $10^{-9}/36\pi$ | F/m ili $C^2/(Nm^2)$ |

Bitno je napomenuti da je vrednost kružne frekvencije prikazane u prethodnoj tabeli određena na osnovu izraza $\omega = 2\pi f$, gde je za vrednost f usvojena srednja vrednost frekvencija L_1 i L_2 korišćenih kod sistema GPS (Global Positioning System), odnosno, $f = 1401.51$ MHz.

Na osnovu dobijenih rezultata, moguće je odrediti i grešku merenog rastojanja na osnovu izraza (16). Slika 3 prikazuje dobijene rezultate u okviru eksperimenta – grešku izmerenog rastojanja u zavisnosti od trenutka merenja u toku dana, za jednu od izabranih stanica (Beograd) i to za svaki od ukupno 12 definisanih dana. Takođe, tabela 3 sadrži osnovne statističke parametre (minimum, maksimum i srednja vrednost) dobijenih rezultata na svim stanicama.

5. ZAKLJUČAK

Iz rezultata prikazanih u okviru rada može se zaključiti sledeće:

- dobijeni rezultati prikazani za stanicu Beograd u toku svih eksperimentalnih mernih sesija su u skladu sa već dokazanim rezultatima, odnosno, uticaj jonosferske refrakcije na dnevnom nivou najveći u periodu lokalnog podneva;
- maksimalne vrednosti uticaja jonosferske refrakcije su vidljive u periodu jesenjeg ekvinocija

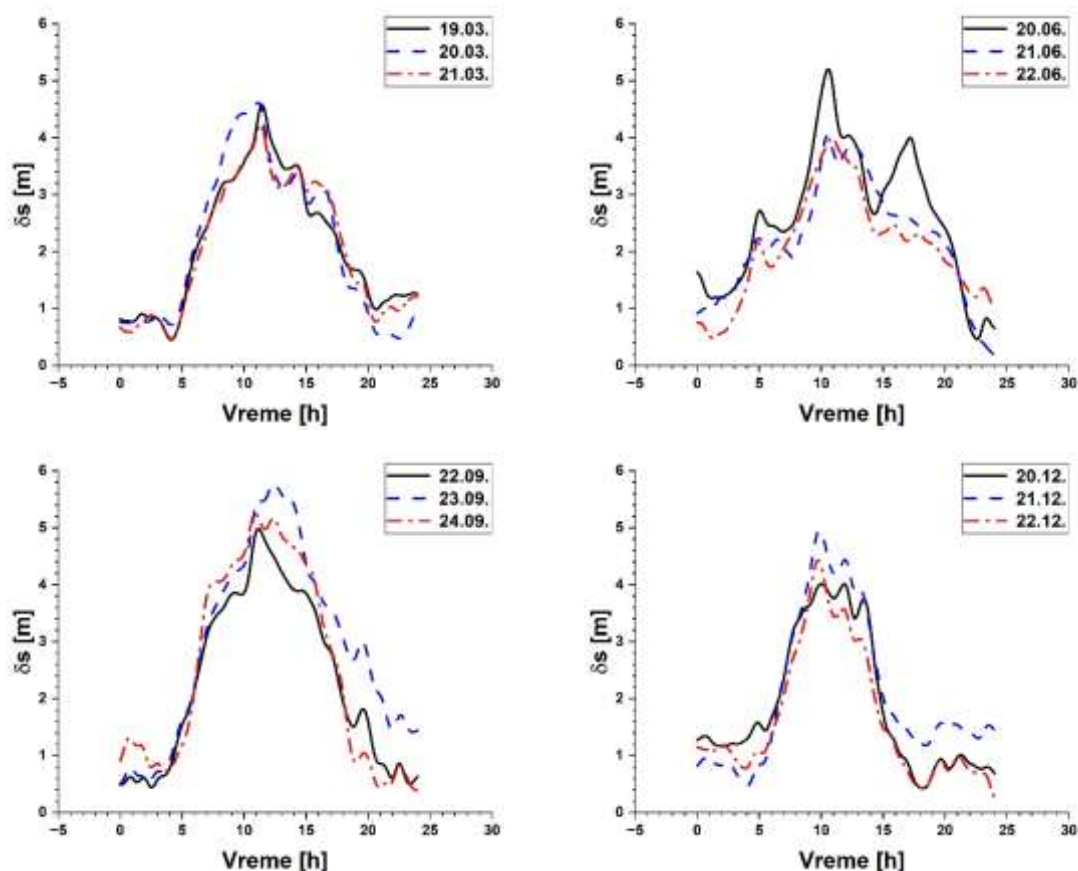
- (sesija 3) na svim stanicama izuzev stanice Zaječar kod koje je maksimalna vrednost u periodu prolećnog ekvinocija (sesija 1);
- minimalne vrednosti uticaja su u periodu zimskog solsticija (sesija 4) za sve stanice, a vrednosti uticaja u periodu letnjeg solsticija (sesija 2) se nalaze između ovih maksimalnih i minimalnih vrednosti;

- promene vrednosti TEC-a između uzastopnih dana nisu beznačajne, i one variraju u zavisnosti lokacije, tj. u zavisnosti od izabrane stanice.

Maksimalne vrednosti 25. solarnog ciklusa se prema predviđanju mogu očekivati 2024. i 2025. godine, pa bi se u tom smislu mogla vršiti dalja ispitivanja uticaja jonosferske refrakcije obuhvatajući duži višegodišnji vremenski period.

Tabela 3. Osnovni statistički parametri na svim stanicama (Beograd, Leskovac, Sombor, Zaječar i Kraljevo) po mernim sesijama u trajanju od 72h (3x24h)

| Sesija (3x24h) | Naziv stanice | δt [ns] | | | δs [m] | | | Naziv stanice | δt [ns] | | | δs [m] | | |
|----------------|---------------|-----------------|------|-------|----------------|------|------|---------------|-----------------|-------|-------|----------------|------|------|
| | | MIN | AVG | MAX | MIN | AVG | MAX | | MIN | AVG | MAX | MIN | AVG | MAX |
| Sesija 1 | NBGD | 1.54 | 7.03 | 14.93 | 0.46 | 2.11 | 4.48 | ZAJE | 1.46 | 12.24 | 27.79 | 0.44 | 3.67 | 8.33 |
| Sesija 2 | | 1.26 | 7.67 | 14.73 | 0.38 | 2.30 | 4.42 | | 1.45 | 9.39 | 17.09 | 0.44 | 2.58 | 4.46 |
| Sesija 3 | | 1.48 | 8.70 | 17.81 | 0.45 | 2.61 | 5.34 | | 1.44 | 11.12 | 22.78 | 0.43 | 3.33 | 6.83 |
| Sesija 4 | | 1.31 | 6.29 | 14.90 | 0.39 | 1.89 | 4.47 | | 0.79 | 8.62 | 19.02 | 0.24 | 1.99 | 5.70 |
| Sesija 1 | LESK | 1.52 | 7.23 | 16.19 | 0.45 | 2.17 | 4.85 | KRLJ | 1.72 | 6.82 | 14.60 | 0.52 | 2.13 | 4.38 |
| Sesija 2 | | 1.38 | 7.85 | 15.58 | 0.41 | 2.35 | 4.67 | | 0.95 | 7.02 | 13.96 | 0.29 | 2.22 | 4.19 |
| Sesija 3 | | 1.30 | 8.07 | 16.87 | 0.39 | 2.42 | 5.06 | | 1.16 | 7.46 | 15.13 | 0.35 | 2.24 | 4.54 |
| Sesija 4 | | 1.31 | 5.62 | 13.73 | 0.39 | 1.69 | 4.12 | | 1.39 | 6.67 | 16.19 | 0.42 | 2.00 | 4.85 |
| Sesija 1 | SOMB | 1.43 | 6.22 | 13.87 | 0.43 | 1.86 | 4.16 | | | | | | | |
| Sesija 2 | | 1.35 | 7.36 | 14.88 | 0.41 | 2.21 | 4.46 | | | | | | | |
| Sesija 3 | | 1.44 | 7.40 | 15.37 | 0.43 | 2.22 | 4.61 | | | | | | | |
| Sesija 4 | | 1.56 | 5.75 | 14.17 | 0.47 | 1.86 | 4.25 | | | | | | | |



Slika 3 – Dobijeni rezultati na osnovu prikupljenih podataka sa stanice u Beogradu

6. ZAHVALNICA

Posebnu zahvalnost autori rada duguju geodetskoj organizaciji „GentooARS“ koja je ustupila podatke neophodne za realizaciju opisanih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Blagojević D. *Uvod u Satelitsku geodeziju*. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu; 2014.
- [2] Blagojević D. Teorija satelitskog pozicioniranja. Pisana predavanja.
- [3] Elsobeiey M. *An Improved Model for Precise Point Positioning with Modernized Global Positioning System*. Ryerson University; Toronto, Ontario, Canada; 2012.
- [4] Elmunim N, Abdullah M. *Ionospheric Delay Investigation and Forecasting*. Springer, Singapore; 2021.
- [5] Seeber G. *Satellite Geodesy - 2nd completely revised and extended edition*. Walter de Gruyter, Berlin, New York; 2003.
- [6] Klobuchar J. *Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems; 1987.
- [7] Rees W. *Physical Principles of Remote Sensing - 3rd edition*. Cambridge University Press; 2012.
- [8] Bilitza D, Altadill D, Truhlik V, Shubin V, Galkin I, Reinisch B, Huang X. *International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions*. Space Weather; 2017.
- [9] Nava B, Coisson P, Radicella S. M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*; 2008.
- [10] Zhao Q, Wang Y, Gu S, Zheng F, Shi C, Ge M, Schuh H. Refining ionospheric delay modeling for undifferenced and uncombined GNSS data processing. *Journal of Geodesy*, 93(4),
- [11] Todorović M, Samardžić M, Grekulović S, Odalović O, Blagojević D. *Modeling extreme values of total electron content: Case study of Serbia*. Geofizika; 2017.
- [12] Todorović-Drakul M. *Modelovanje jonosfere za potrebe određivanja uticana na GPS signale u mrežnom RTK okruženju*. Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu; 2016.
- [13] Nina A, Nico G, Odalović O, Čadež V, Todorović-Drakul M, Radovanović M, Popović L. GNSS and SAR Signal Delay in Perturbed Ionospheric D-Region During Solar X-Ray Flares. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020.
- [14] Schunk R, Nagy A. *Ionospheres - Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press, New York; 2009.
- [15] Šašić R, Lončar B, Osmokrović P. *Maksvelove jednačine - Predavanja iz fizike*. Tehnički fakulteti Univerziteta u Beogradu; Građevinski fakultet u Beogradu; 2005.
- [16] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. *GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer, Vienna; 2008.
- [17] Seemala G. K. *GPS-TEC Analysis Application. Institute for Scientific Research*, Boston College, USA; 2014.
- [18] Gopi Seemala Blog [Internet]. Dostupno na: <https://seemala.blogspot.com/>, 2023.[citirano 10.01.2023].

SUMMARY

DETERMINATION OF THE SATELLITE SIGNALS TIME DELAY CAUSED BY THE IONOSPHERIC INFLUENCE DURING THE YEAR 2022

Multi-frequency GNSS satellite signals and their availability enable research in undifferentiated and uncombined models in which a single signal at each frequency is a corresponding independent observation. Such possibilities are reflected by the significant interest in geodetic research as well as in many areas of application of GNSS observation. On the geometric path of the signal between the satellite and the receiver, a significant source of GNSS measurement errors comes from the medium of propagation of electromagnetic waves. Errors attributed to signal propagation are ionospheric and tropospheric signal delay. The mentioned error sources significantly affect the quality of certain pseudorange and, thus, the quality of the receiver's position in the form of three-dimensional coordinates. This paper presents the analysis and determination of the ionospheric delay of GNSS satellite signals based on the determination of Total Electron Content - TEC at five stations (Beograd, Leskovac, Sombor, Zaječar, and Kraljevo) in the territory of the Republic of Serbia. In order to determine TEC values, the software called "GPS-TEC analysis" developed within the Institute for Scientific Research, Boston College, USA was used, which enables the determination of the TEC value on the path between the satellite and the receiver. The data collection was carried out within the year 2022 so that the measurement sessions include characteristic dates when the most significant fluctuations are expected in the context of seasonal variations.

Key Words: GNSS, ionospheric refraction, Total Electron Content, equinox, solstice