

Komparativna analiza odstupanja položaja pri korištenju različitih GNSS sustava

Uroda, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:220389>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**MARIN URODA
KOMPARATIVNA ANALIZA ODSTUPANJA POLOŽAJA
PRI KORIŠTENJU RAZLIČITIH GNSS SUSTAVA
DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**KOMPARATIVNA ANALIZA ODSUPANJA POLOŽAJA
PRI KORIŠTENJU RAZLIČITIH GNSS SUSTAVA
COMPARATIVE ANALYSIS OF POSITIONING
DEVIATIONS USING VARIOUS GNSS SYSTEMS
DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Primijenjena satelitska navigacija

Mentor: prof. dr. sc. Serđo Kos

Komentor: izv. prof. dr. sc. David Brčić

Student: Marin Uroda

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112068273 2

Rijeka, veljača 2022.

Student: Marin Uroda

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112068273

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom KOMPARATIVNA ANALIZA Odstupanja položaja pri korištenju različitih GNSS sustava izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Serđa Kosa, te komentorstvom izv. prof. dr. sc. Davida Brčića.


U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan sam s trajnom pohranom diplomskog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:

- a) rad u otvorenom pristupu
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Student


Marin Uroda

SAŽETAK

Uporaba sustava GLONASS (rus. *GLOBAL'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* – GLONASS), BeiDou i Galileo očituje se u sve većem broju aplikacija i usluga, gdje se donedavno koristio samo Globalni sustav za određivanje položaja (engl. *Global Positioning System* - GPS). U pomorstvu, satelitska navigacija predstavlja primarno sredstvo za određivanje položaja na brodovima, kao i jednu od glavnih komponenti integriranih unutar osnovne navigacijske opreme. Ovo, naravno, nije prva studija ovakve vrste. Istraživanje je obuhvatilo blisko područje, danas – u vrijeme kada se smatra da su svi sustavi potpuno operativni. Odstupanja geografske širine, geografske dužine i nadmorske visine analizirana su u razdoblju od sedam uzastopnih dana, od 1. siječnja do 7. siječnja 2021. godine. Procjena se temeljila na tri stanice EUREF (engl. *Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe* – EUREF) mreže referentnih stanica - Budimpešte, Mađarska (BUTE00HUN), Sarajeva, Bosna i Hercegovina (SRJV00BIH) i Podgorice, Crna Gora (DGOR00MNE). Korištene su uobičajene matematičke procedure određivanja položaja kao i formulacije pseudoudaljenosti. Rezultati su prikazani putem srednjih vrijednosti (engl. *Mean*), standardnih devijacija (engl. *Standard Deviation* - SD) i interkvartilnih razlika (engl. *Interquartilerange* - IQR) vrijednosti odstupanja pozicioniranja utvrđenih jednofrekventnim rješenjima za pozicioniranje, kao i broja satelita (engl. *Number of satellites* - NSAT) i analizom geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Dilution of Precision* - DOP). Doprinos troposferskog i ionosferskog kašnjenja proračunu pogreške pozicioniranja procijenjen je za svaki od sustava zasebno. Ukratko, korištena su četiri sustava, zajedno s kombinacijom svih sustava u četiri različita scenarija. Imajući na umu da je istraživanje bilo prilično kratko, provedeno na rezultatima u samo sedam dana, treba biti oprezan u proglašavanju „*najboljih*“ i „*najgorih*“ sustava. No, na temelju prikupljenih podataka može se zaključiti da je, osim očite kombinacije svih sustava, GPS najpouzdaniji sustav na svim postajama. U budućnosti bi se moglo provesti istraživanje s različitim svemirskim vremenskim uvjetima, te ako podaci konačno postanu dostupni, istraživanje bi se moglo provesti i na hrvatskim stanicama.

Ključne riječi: globalni navigacijski satelitski sustavi, korisnička razdioba pogrešaka, odstupanje položaja, prijenosni medij, razdioba točnosti

SUMMARY

The utilization of GLONASS (rus. *GLO*bal'*naya N*avigatsionnaya *S*putnikovaya *S*istema – GLONASS), BeiDou and Galileo satellite navigation systems is manifesting in a growing number of applications and services, where until recently only Global Positioning System (GPS) was used. In maritime, satellite navigation represents the primary positioning means on-board vessels, as well as one of the main components integrated with essential navigational equipment. This, of course, is not the first study of its kind. The research covered an area close to us, now, as stated before, that all systems are considered to be fully operational. Latitude, longitude and height deviations were analysed during seven consecutive days, in the period 1-7 January 2021. The evaluation was based on multi-GNSS ground-truth data from three European Reference Frame Permanent GNSS Network (EUREF) stations: Budapest, Hungary (BUTE00HUN), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (SRJV00BIH), and Podgorica, Montenegro (DGOR00MNE). Common mathematical positioning procedures were used as well as the pseudorange formulation. The results were presented in terms of mean, standard deviation and IQR values of positioning deviations as determined with single-frequency positioning solutions, together with analysis of number of satellites and Dilution of Precision (DOP). The tropospheric and ionospheric delay contribution to the positioning error budget was evaluated for each of the systems separately. To summarise, four systems were used along with the combination of all systems in four different scenarios. Bearing in mind that this was a fairly short research conducted on the results across only seven days, we must be careful in proclaiming the „*best*“ and “*worst*” systems. However, using the gathered data we saw that apart from the obvious combination of all systems, GPS and Galileo were the most reliable systems across all stations. In the future, a research with different space weather conditions could be conducted. Also, if the data finally becomes available, the research could be conducted with Croatian stations as well.

Keywords: global navigation satellite system, user equivalent ranging error, positioning deviations, propagation medium, dilution of precision

SADRŽAJ

SAŽETAK	III
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKT ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA I POMOĆNE HIPOTEZE	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	2
1.4. ZNANSTVENE METODE	2
1.5. STRUKTURA RADA.....	3
2. SATELITSKA NAVIGACIJA.....	4
2.1. PARAMETRI SATELITSKE NAVIGACIJE	4
2.2. SEGMENTI SATELITSKE NAVIGACIJE	5
2.3. SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA	7
3. GLOBALNI NAVIGACIJSKI SATELITSKI SUSTAVI	14
3.1. PODJELA GNSS SUSTAVA	16
3.1.1. Globalni sustav za određivanje položaja	17
3.1.2. GLONASS.....	22
3.1.3. Galileo	24
3.1.4. BeiDou.....	27
3.2. IZVORI POGREŠAKA GNSS SUSTAVA	29
3.2.1. Ukupni proračun pogreške određivanja položaja	29
3.2.1.1. Korisnička razdioba pogrešaka	30
3.2.1.2. Geometrijska razdioba točnosti.....	32
3.2.2. Utjecaj prijenosnog medija.....	34
3.2.2.1. Ionosfersko kašnjenje.....	35
3.2.2.2. Troposfersko kašnjenje	38
3.2.3. Pokazatelji svemirskog vremena	40
4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	44
4.1. VREMENSKO RAZDOBLJE ISTRAŽIVANJA	44
4.2. GEOGRAFSKO PODRUČJE ISTRAŽIVANJA.....	45
4.3. KORIŠTENE METODE PRILIKOM ISTRAŽIVANJA	47
4.3.1. Statistička analiza	51
4.3.2. Grafički prikazi.....	53
5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	55

6. ZAKLJUČAK.....	87
LITERATURA.....	89
POPIS KRATICA	92
POPIS SLIKA	95
POPIS TABLICA.....	96

1. UVOD

Tehnologija je posljednjih desetljeća doživjela značajan razvoj, a taj razvoj posebno je vidljiv unutar područja navigacije, te satelitskih i komunikacijskih sustava. Značajan korak u razvoju pozicioniranja i navigacije započet je razvojem globalnih navigacijskih satelitskih sustava, bez kojih bi svakodnevni život bio nezamisliv. Od prvobitne ideje za isključivo vojnu primjenu, globalni navigacijski satelitski sustavi (engl. *Global Navigation Satellite System* – GNSS) danas imaju širok spektar primjene, te stoga i potrebu za visokom točnošću. Iz tog razloga provode se brojna istraživanja kako bi se otkrili i spriječili uzroci pogrešaka koje nastaju. Korištenjem metode generiranja rezultata odstupanja položaja različitih GNSS sustava koji će biti obrađeni u nastavku rada, pokušavaju se dobiti najtočnija i najpovoljnija rješenja u promatranom vremenu.

1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKT ISTRAŽIVANJA

Problem istraživanja ovog rada proizlazi iz razlika u vrijednostima pri određivanju položaja pojedinih GNSS sustava.

Relevantne spoznaje o problemu istraživanja predstavljaju podlogu za definiranje predmeta istraživanja: koliko se pojedini GNSS sustavi razlikuju prilikom određivanja položaja.

Iz problema i predmeta istraživanja proizlaze objekti istraživanja – GNSS sustavi i njihova točnost pri određivanju položaja, ionosfera, ionosfersko kašnjenje, troposfera, troposfersko kašnjenje, pogreške položaja, DOP vrijednosti, položajni zapisi, položajna odstupanja, modelirane i nemodelirane vrijednosti položajnih odstupanja.

1.2. RADNA HIPOTEZA I POMOĆNE HIPOTEZE

Istraživanje je provedeno u svrhu dokazivanja sljedeće znanstvene hipoteze:

Unatoč činjenici da se GLONASS, Galileo i BeiDou koriste u velikoj mjeri, te očekivanjima za dobru međusobnu korelaciju između istih, GPS i dalje predstavlja najpouzdaniji sustav za satelitsko određivanje položaja.

Uz radnu hipotezu, dokazane su podhipoteze:

Satelitska navigacija uvelike je pojednostavila i poboljšala određivanje položaja; Kombinacijom svih sustava smanjuju se pogreške pojedinačnih sustava;

Isključivanjem korekcija prijenosnih medija dolazi do povećanja odstupanja položajnih zapisa.

1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha diplomskog rada je predstaviti presjek određivanja položaja GNSS sustava na širem području Jadrana, sada (2021.) kada se usluge pozicioniranja, navigacije i mjerenja vremena (engl. *Positioning, Navigation and Timing* - PNT) smatraju globalnim i potpuno operativnim za sve sustave. Također, istražiti kako različiti satelitski navigacijski sustavi funkcioniraju na promatranom području, te dokazati njihovu sličnost, odnosno različitost u određivanju položaja. Cilj diplomskog rada je testiranje četiri različita GNSS sustava u određenom vremenskom periodu kako bi se analizirala njihova točnost i preciznost.

1.4. ZNANSTVENE METODE

Prilikom istraživanja, formuliranja i predstavljanja rezultata istraživanja, u odgovarajućim kombinacijama korištene su brojne znanstvene metode. U drugom i trećem poglavlju koje se odnose na uvod u satelitsku navigaciju i globalne navigacijske satelitske sustave korištene su metoda deskripcije, metoda klasifikacije, te metoda analize i sinteze. U četvrtom dijelu diplomskog rada u velikoj je mjeri korištena metoda studije slučaja s obzirom da se cijelo istraživanje temelji na studiji određenog vremenskog razdoblja, na određenom području. Ovdje su u najvećoj mjeri korištene statističke i komparativne metode, neophodne za potrebe prikupljanja, obrade, proračuna i usporedbe podataka u određenom vremenskom razdoblju. Ove su metode detaljnije opisane u odnosnom poglavlju. Metode analize i sinteze, te metoda generalizacije korištene su u posljednjem poglavlju.

1.5. STRUKTURA RADA

Rad se sastoji od šest cjelina. U prvom, uvodnom dijelu diplomskog rada navedeni su problem, predmet i objekt istraživanja, dana je radna hipoteza, te su navedeni svrha i ciljevi istraživanja, kao i znanstvene metode korištene tijekom pisanja diplomskog rada.

Drugi dio diplomskog rada obuhvaća teorijsku podlogu gdje se detaljnije opisuje satelitska navigacija. Zatim se nabrajaju i opisuju parametri i segmenti satelitske navigacije, te se detaljnije objašnjava satelitsko određivanje položaja.

U trećem dijelu detaljnije se opisuju globalni navigacijski satelitski sustavi, njihove osnovne komponente i princip rada. Poglavlje se nastavlja podjelom, te opisivanjem svakog sustava zasebno. Zatim se nabrajaju izvori pogrešaka GNSS sustava pri čemu su posebno opisane korisnička razdioba pogrešaka i geometrijska razdioba točnosti. Nakon toga slijedi definiranje ionosferskog i troposferskog kašnjenja. Poglavlje se zaključuje objašnjenjem svemirskog vremena i njegovim pokazateljima.

U četvrtom dijelu predočena je metodologija u kojoj se definiraju vremensko razdoblje i geografsko područje istraživanja. Poglavlje se nastavlja tako da se opisuju sve korištene metode pomoću kojih se vršio proračun prikazane putem statističkih analiza i grafičkih prikaza.

Peti dio predstavlja glavni dio ovog diplomskog rada u kojem su provedeni proračuni, analiza, te usporedba rezultata dobivenih pri korištenju različitih GNSS sustava. Ti rezultati prikazani su statističkom obradom putem tablica, grafova vremenskih nizova, horizontalnih odstupanja i histograma.

U šestom, zaključnom dijelu, na temelju provedenog istraživanja daje se kratak osvrt i vlastito mišljenje, te se iznose zaključci do kojih se došlo nakon provedenog istraživanja.

2. SATELITSKA NAVIGACIJA

Svaka vrsta navigacije koja uključuje satelit koji korisnicima šalje referentne informacije iz kojih se izravno mogu izvesti navigacijski parametri poput položaja, brzine i vremena, naziva se satelitska navigacija. Satelitska navigacija je metoda koja pruža informacije o točnom položaju na zemlji ili izvan nje. Signali koji se prenose s navigacijskih satelita koriste se za dobivanje potrebnog skupa parametara položaja pomoću navigacijskog prijammnika. Zauzvrat, zajedno s dodatnim informacijama, ti se parametri koriste za daljnje odlučivanje o tijeku kretanja.¹

Odaslani signal od svakog satelita mikrovalni je radio val koji sadrži vrijeme prijenosa i trenutni orbitalni položaj satelita. Dok signali putuju brzinom svjetlosti, izračunavanjem vremenske razlike između satelitskog signala i prijammnika, može se izvesti precizna udaljenost koju je signal prešao od satelita do prijammnika.

Prednost upotrebe satelita u svrhu navigacije je u tome što sateliti imaju široku prostornu pokrivenost omogućavajući istovremeno uslugu dostupnom mnogim korisnicima. Satelitski navigacijski sustavi pružaju navigacijske usluge svojim korisnicima nudeći im dovoljno informacija da s odgovarajućim resursima mogu izvući ili poboljšati procjenu vlastite pozicije i vremena na svim lokacijama u opsegu područja pružanja usluge sustava.

2.1. PARAMETRI SATELITSKE NAVIGACIJE

Parametri koji definiraju kvalitetu navigacijske usluge su:²

- Točnost,
- Kontinuitet,
- Dostupnost,
- Integritet.

¹ Acharya, R.: *Understanding Satellite Navigation*, Academic Press, 2014., p. 29

² Kos, T., Grgić, S., Krile, S.: "Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju" *Poboljšanje sustava satelitske navigacije*, 2004. <https://hrcak.srce.hr/file/12784> (12.03.2021.)

Točnost je mjera ispravnosti pozicije i drugih procjena koje korisnik provodi s obzirom na njihov pravi položaj. Jednostavnim riječima opisuje koliko su procjene bliske istinskim vrijednostima korištenjem usluge. Točnost ovisi o mnogim tehničkim čimbenicima, kao što su kvaliteta signala, ispravnost podataka o navigaciji i učinci širenja, satelitska geometrija itd.

Kontinuitet je vjerojatnost da će usluga, nakon što postane dostupna, i dalje biti dostupna i obavljati se tijekom trajanja faze rada. Prema tome, kontinuitet predstavlja omjer broja puta koje usluga održava tijekom ukupnog razdoblja korištenja nakon što korisnik počne koristiti uslugu / ukupnog broja korištenja, mjereno kroz konačni vremenski interval.

Dostupnost se definira vjerojatnošću da će navigacijski sustav korisne resurse navigacijskog signala učiniti dostupnim korisniku unutar određenog područja pokrivenosti zajamčene kvalitete, tako da korisnik može odrediti svoj položaj i vrijeme. Dakle, vrijeme koje istodobno ispunjava uvjet dostupnosti signala te kvalitete i integriteta usluge uzima se u obzir pri izračunavanju dostupnosti sustava. Dostupnost je i funkcija fizičkih karakteristika okoliša i tehničkih mogućnosti pružene usluge.

Integritet je sposobnost sustava da pokaže može li usluga nastaviti s obećanim performansama u smislu kvalitete. Budući da se bilo koja usluga provodi uz neke minimalne kvantitativne specifikacije kvalitete usluge, potrebno je da sustav u bilo kojem trenutku širi informacije o tome jesu li tehnički parametri unutar određenih zajamčenih granica ili ne. Uključuje i mogućnost pravodobnog upozoravanja na bilo koji neuspjeh. Cjelovitost predstavlja važan koncept u navigaciji jer korisnik na temelju vrijednosti cjelovitosti može odlučiti o upotrebljivosti usluge.

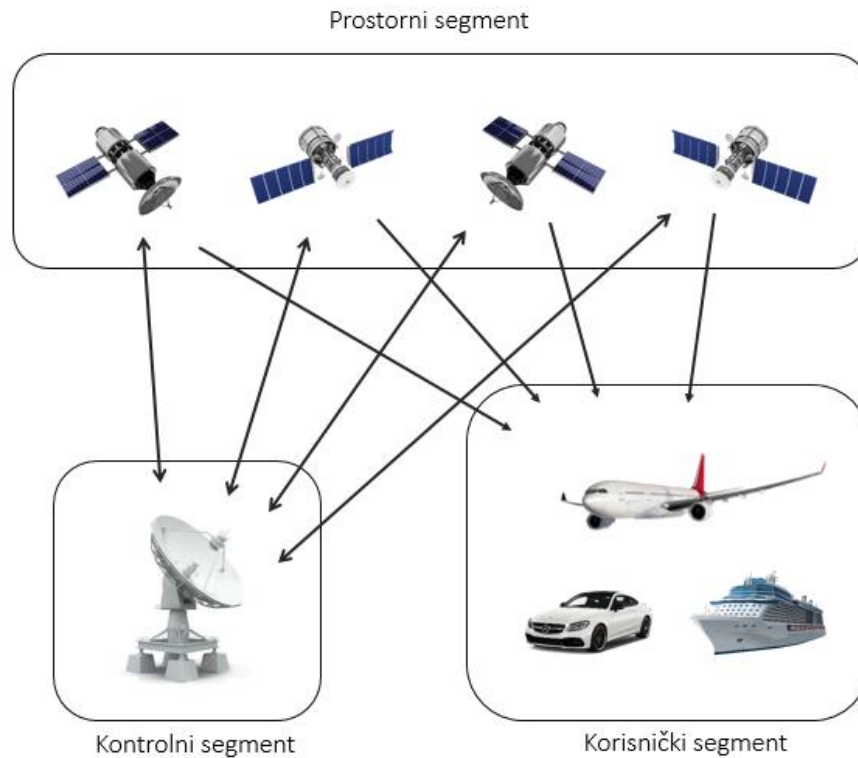
2.2. SEGMENTI SATELITSKE NAVIGACIJE

Komponente tipičnog satelitskog navigacijskog sustava sastoje se od sljedećih segmenata:³

- Prostorni segment – sastoji se od konstelacije satelita koji kruže oko Zemlje i odašiljanja potrebnih signala iz kojih korisnik može odrediti svoj položaj,

³Acharya, R.: op. cit., p. 34

- Kontrolni segment – sastoji se od resursa i sredstava koja na zemlji nadgledaju, kontroliraju i održavaju satelite svemirskog segmenta,
- Korisnički segment – sastoji se od korisnika koji stupaju u interakciju sa signalom kako bi odredili vlastiti položaj i tako iskoristili navigacijsku uslugu.



Slika 1. Segmenti satelitske navigacije

Izvor: Izrada autora

Shematski prikaz segmenata i njihove interakcije prikazani su na Slici 1. Kako bi se objasnila potreba za ovakvom arhitekturom, potrebno je krenuti od korisničkog segmenta. U navigacijskoj usluzi korisnik bi trebao biti u potpunosti sposoban odrediti svoj položaj interakcijom sa signalom koji se prenosi sa satelita. Za određivanje vlastitog položaja korisnik mora znati položaj reference, koja je u ovom slučaju satelitska i to primiti s više od jednog satelita. Raspon se izračunava pomoću vremena širenja, a potomje se dobiva usporedbom vremena prijenosa signala sa satelita s vremenom primanja signala na prijammniku. Dakle, satelitski sat iz kojeg je izveden prijenos također mora biti vrlo stabilan i precizan. Čak je i trivijalno pomicanje sata na satelitu potrebno ispraviti na prijammniku tijekom procjene.

Sve te podatke, uključujući satelitsku poziciju, vrijeme prijenosa signala, faktor korekcije satelitskog sata i još mnogo sličnih podataka, treba distribuirati uporabnikom pomoću radio pomagala gdje god se on nalazi u području pružanja usluge. Oni bi se trebali prenositi u takvom obliku da se informacije mogu dobiti iz signala ili iz njega izvesti pravilnom obradom. Ovo širenje informacija i istodobno zadovoljavanje zahtjeva za višestrukom vidljivošću na cijelom području pružanja usluge danonoćno su mogući korištenjem konstelacije satelita. To opravdava uspostavljanje svemirskog segmenta koji se sastoji od flote satelita.

Međutim, mora postojati određena postavka za čuvanje ovih satelita. Izvedeni položaj, koji je osjetljiva funkcija položaja satelita, mora biti precizno poznat. Položaj ovih satelita stoga se mora izvesti pravilnim praćenjem njihove dinamike. Svaka anomalija u dinamičkom ponašanju satelita mora se ispraviti u odgovarajuće vrijeme. Slično tome, potrebno je održavati sistemsko vrijeme, dok se za ispravke procjenjuje svaka aberacija satelitskog sata s obzirom na sistemsko vrijeme. To čini zemaljski upravljački segment.

2.3. SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA

Osnovni princip na kojem se temelji satelitsko određivanje položaja je mjerenje vremena (ΔT) koje je potrebno satelitskom signalu da dođe od satelitske (vrijeme odašiljanja signala) do korisničke (vrijeme prijama signala) antene. Prividnu udaljenost između satelita i korisnika moguće je izračunati putem sljedeće formule:⁴

$$R = c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Gdje je:

- R – udaljenosti između satelitske i korisničke antene;
- c – brzina svjetlosti;
- ΔT – vrijeme širenja satelitskog signala.

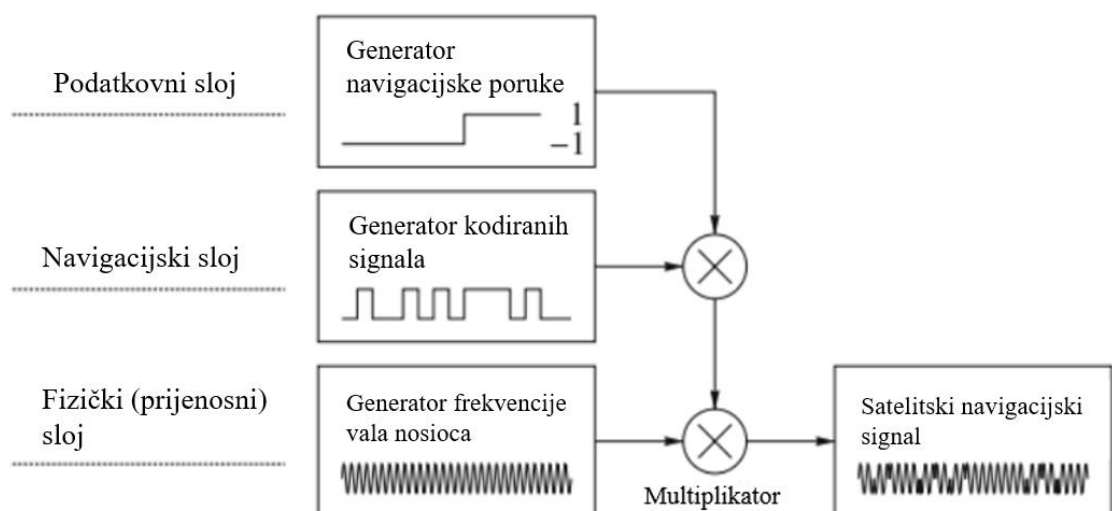
Za određivanje položaja korisnika moraju biti poznati sljedeći elementi:

⁴ Brčić, D.: *Model nespecifičnog dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja*, Doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2015., p. 9

- Vrijeme odašiljanja signala,
- Položaj satelita,
- Stalna brzina prostiranja satelitskog signala,
- Vrijeme prijama satelitskog signala.

Sateliti odašilju signale u pravilnim vremenskim razmacima. Prijemom satelitskih signala prijamnik identificira pojedini satelit, njegov položaj, vrijeme odašiljanja i vrijeme prijama satelitskog signala. Na temelju izmjerenog vremena širenja signala, proračunava se udaljenost između satelita i korisničkog prijamnika.

Fizički sloj karakterizira fizička svojstva odaslanih signala. Kodirani signal opisuje metodu mjerenja vremena propagacije. Umjesto korištenja vremenskog impulsa za promatranje vremena širenja, kodirani signal temelji se na kontinuiranom, ali periodično moduliranom signalu koji se koristi unutar korelacijskih tehnika. Periodičnost je strogo sinkronizirana s vremenskim sustavom satelita i s podatkovnom porukom. Konačno, navigacijska poruka sadrži vrijeme prijenosa, satelitske efemeride, itd. Navigacijska poruka također može biti ostvarena drugim satelitskim ili zemaljskim komunikacijskim vezama. To, međutim, još uvijek zahtijeva visoku razinu sinkronizacije između slojeva koda raspona i podatkovne veze.



Slika 2. Kompozicija satelitskog navigacijskog signala

Izvor: *Satellite signals*, In: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*, 2008. https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1_4 (10.03.2021.)

Udaljenost između satelitske i prijamničke antene određena mjerenjem vremena propagacije signala naziva se pseudoudaljenost i kao takva ne predstavlja pravu geometrijsku udaljenosti između satelita i korisnika, već udaljenost uvećanu za pogrešku korisničkog sata i ostale nezavisne pogreške. Pseudoudaljenost se stoga može izraziti na sljedeći način:⁵

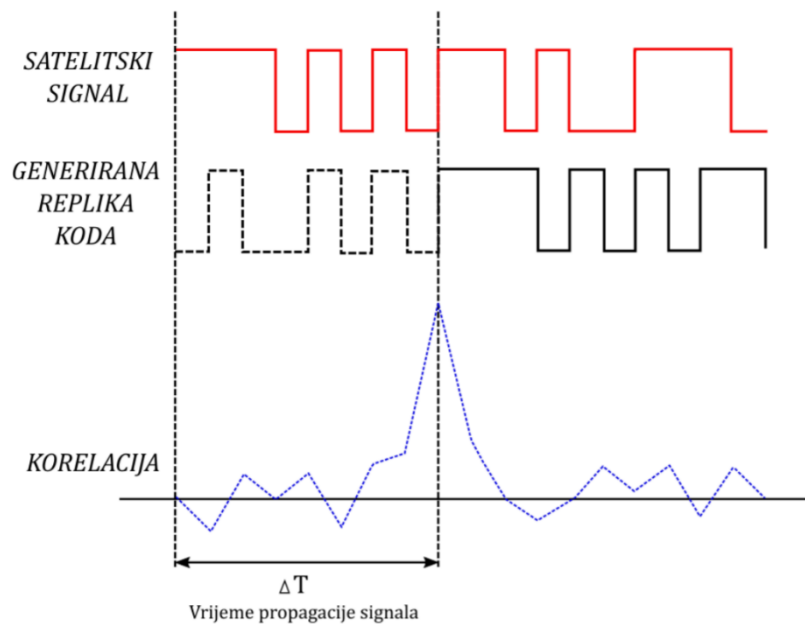
$$Rp = rp + c \cdot \sigma_{k.sat} + c \cdot \delta_t \quad (2)$$

Gdje je:

- Rp – pseudoudaljenost;
- rp – geometrijska udaljenost;
- c – brzina svjetlosti;
- $\sigma_{k.sat}$ – pogreška korisničkog sata [s];
- δ_t – ukupna pogreška mjerenja vremena prilikom širenja signala uslijed nezavisnih pogrešaka koje utječu na satelitsko određivanje položaja [s].

Satelitski signali sastoje se od kodova za određivanje udaljenosti pomoću kojih korisnički prijamnik određuje vrijeme širenja satelitskog signala. Određivanje vremena širenja satelitskog signala (ΔT) dobije se uspoređivanjem primljenog satelitskog signala i generiranih replika kodnih signala svih satelita u samom korisničkom prijamniku. Točno vrijeme širenja satelitskog signala dobiva se kada se postigne najbolja korelacija, odnosno najveća vrijednost korelacijskog faktora (Slika 3.).

⁵ Parkinson, B. W., Spilker Jr., J. J.: *Global Positioning System: Theory and Applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, 1996. p. 129

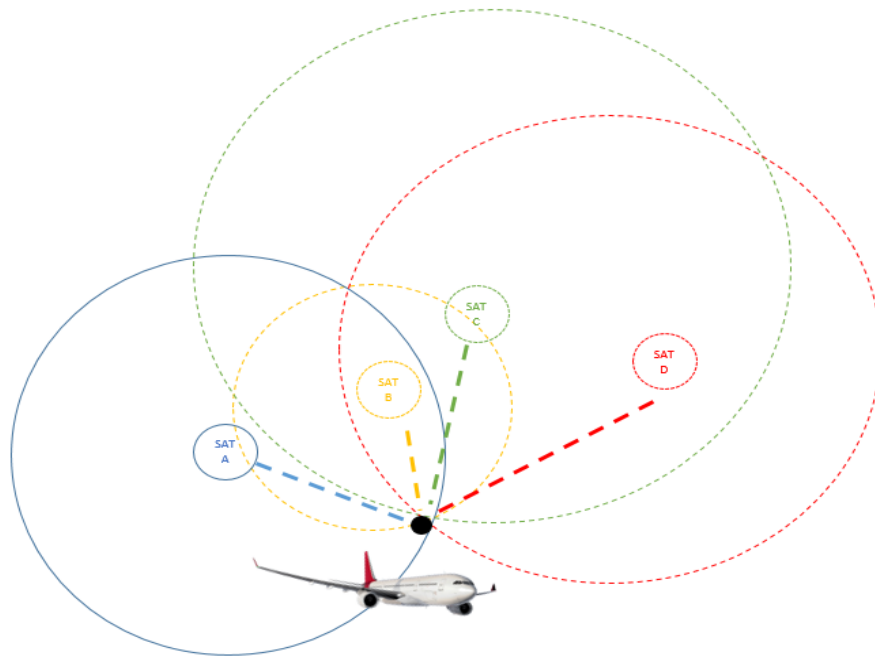


Slika 3. Vrijeme propagacije satelitskog signala

Izvor: Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M., Hernandez-Pajares M.: *GNSS Basic Observables*, 2011.

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Basic_Observables (10.03.2021.)

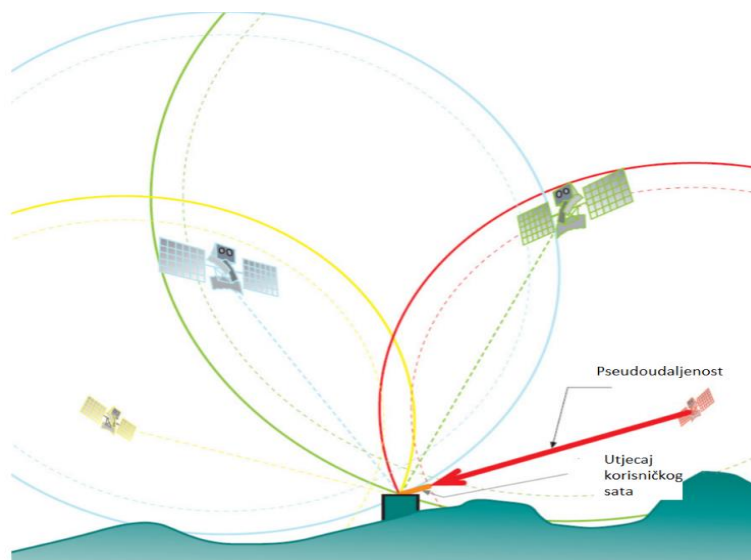
Identifikacijom satelita putem njegova PRN koda i stvaranjem veze između satelita i korisnika počinje izdvajanje navigacijske poruke. Iz navigacijske poruke procjenjuju se položaji satelita. Satelitski signal sadrži točan trenutak odašiljanja signala u satelitskom vremenu, a korisnički prijammnik sadrži točan trenutak prijama satelitskog signala u prijammničkom vremenu. Pomoću trenutka odašiljanja satelitskog signala može se procijeniti položaj satelita, a izdvajanjem položaja satelita iz navigacijske poruke može se odrediti prividna udaljenost od satelita do korisnika.



Slika 4. Princip satelitskog određivanja položaja

Izvor: Izrada autora

Rasponi svakog satelita presijecaju se u jednoj jedinoj točki samo ako je utjecaj korisničkog sata ispravno procijenjen i primijenjen na svaki izmjereni relativni raspon. Ako je korisnički sat izvan raspona, svi krugovi bi se ili smanjili ili rasli zajedno, a pseudo rasponi se ne bi sjekli u jednoj točki.



Slika 5. Sinkronizacija korisničkog sata

Izvor: Mok, E., Retscher, G.: *Satellite-Based Positioning*, 2001. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6183-8_7 (14.03.2021.)

Točno pozicioniranje zahtijeva dodatno određivanje udaljenosti od strane četvrtog satelita kako bi se uklonila greška korisničkog sata.

Postoje tri preduvjeta za određivanje položaja satelitskim navigacijskim sustavima:⁶

- Zajednički referentni koordinatni sustav,
- Zajednički vremenski okvir,
- Konstantna brzina širenja satelitskih signala.

Postoje dva osnovna koordinatna sustava koja se upotrebljavaju u satelitskoj navigaciji:

- Rotacijski zemaljski referentni sustav (engl. *Earth Centered Earth-Fixed* - ECEF),
- Inercijalni zemaljski koordinatni sustav (engl. *Earth Centered Inertial* - ECI).

Oba sustava imaju ishodište u središtu Zemlje što omogućava pretvorbu koordinata iz jednog koordinatnog sustava u drugi i obrnuto. Rotacijski zemaljski referentni sustav ima ishodište u središtu Zemlje s osi x koja se proteže kroz sjecište nultog meridijana (Greenwich) i ekvatora (0,0). Os z proteže se sjevernim i južnim polom, a os y prolazi kroz ekvator u smjeru istoka za 90° istočne zemljopisne dužine, u blizini otoka Maldivi u Indijskom oceanu. Inercijalni zemaljski koordinatni sustav fiksiran je u odnosu na zvijezde. Slovo „ I “ u ECI označava inercijalno, odnosno „*ne ubrzavajuće*“, za razliku od rotacijskog zemaljskog referentnog sustava, koje ostaje fiksno u odnosu na Zemljinu površinu u svom okretanju, a zatim se rotira u odnosu na zvijezde. Službeni referentni koordinatni sustav koji koristi GPS sustav je WGS.84 (engl. *World Geodetic System 1984* – WGS.84) koji omogućava pretvorbu pravokutnih koordinata korisnika u sferne koordinate.⁷ WGS.84 se temelji na dosljednom skupu konstanti i parametara modela koji opisuju veličinu Zemlje, oblik, te gravitacijska i geomagnetska polja, te je kompatibilan sa Međunarodnim zemaljskim referentnim sustavom (engl. *International Terrestrial Reference System* - ITRS).

⁶ Brčić, D., op.cit., p. 9

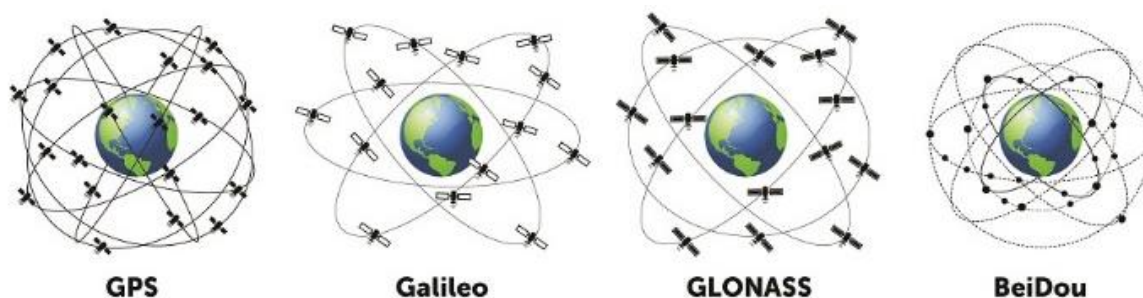
⁷ Kaplan, E. D., Hegarty, C. J.: *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2. izdanje, Artech House, Inc., 2006.

Sljedeći preduvjet satelitskog određivanja položaja je postojanje zajedničkog vremenskog okvira i kontrolnog segmenta koji odašilje podatke satelitima, dakle, satelit i korisnički prijamnik moraju imati isti vremenski okvir. Obično svaki satelit ima ugrađena četiri atomska sata (dva cezijeva i dva rubidijeva) od kojih jedan služi za generiranje signala (10.23 MHz). Satelitski atomski satovi nisu dovoljno stabilni sami za sebe, stoga je potreban kontrolni segment koji neprestano mjeri njihov pomak i sinkronizira ih s GPS sustavnim vremenom (engl. *GPS Time* – GPST). Kao i kod UTC vremena, GPST vrijeme se također temelji na nizu atomskih satova ugrađenih u satelite i stanice za promatranje. U 2016. godini razlika između UTC i GPST vremena iznosila je 17 sekundi, a ta se razlika svaki puta promjeni kada se *leap* sekunde dodaju ili oduzmu UTC vremenu.

Treći i osnovni preduvjet satelitskog određivanja položaja je konstantna brzina širenja signala. Satelitski signali su elektromagnetski valovi koji se u vakuumu šire brzinom svjetlosti c koja iznosi 299,792,458 m/s. Općenito, brzina satelitskog signala u mediju je manja od brzine satelitskog signala u vakuumu.

3. GLOBALNI NAVIGACIJSKI SATELITSKI SUSTAVI

Globalni navigacijski satelitski sustav odnosi se na konstelaciju satelita koji pružaju signale iz svemira, koji prenose podatke na GNSS prijamnike, a prijamnici zatim koriste te podatke za određivanje lokacije i ostale usluge. Globalne konstelacije su GPS (SAD), GLONASS (Rusija), Galileo (Europa) i BeiDou (Kina) prikazane na Slici 6.

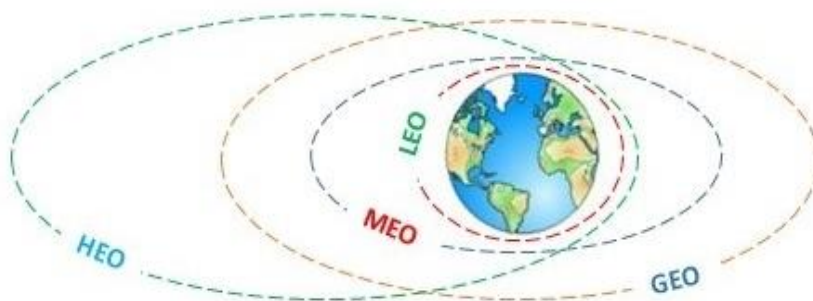


Slika 6. GNSS sateliti

Izvor: Data, A.: *Modern Civilization would be lost without GPS*, 2021. <https://spacenews.com/wp-content/uploads/2021/07/GNSS-graphic.jpg> (14.11.2021.)

S obzirom na udaljenost satelita od Zemljine površine, postoje četiri orbite u kojima se sateliti kreću (Slika 7.), a to su:⁸

- Niska Zemljina orbita (engl. *Low Earth Orbit*– LEO),
- Srednja Zemljina orbita (engl. *Medium Earth Orbit* – MEO),
- Geostacionarna orbita (engl. *Geostationary Earth Orbit* – GEO),
- Visokoeliptična orbita (engl. *Highly Elliptical Orbit*– HEO).



Slika 7. Vrste satelitskih orbita

Izvor: <https://article1000.com/types-satellite-based-orbits/> (09.03.2021.)

⁸ *Types of Satellite Systems* <https://www.javatpoint.com/types-of-satellite-systems> (09.03.2021.)

LEO sateliti orbitiraju na visini od 100 – 2000 kilometara, a zbog male udaljenosti od Zemlje nemaju veliku pokrivenost zemljine površine, odnosno potrebna je orbitalna konstelacija od najmanje 48 svemirskih letjelica da pokrije čitav teritorij Zemlje. Sateliti na tim orbitama obiđu Zemlju u razdoblju od 80 – 120 minuta i iako imaju neke prednosti u odnosu na ostale letjelice u pogledu energetske karakteristike, imaju kratak vijek trajanja (5 – 8 godina).

GNSS orbite, koje su manje-više kružne, te vrlo stabilne i predvidljive, spadaju u kategoriju MEO. MEO sateliti orbitiraju na visini od 2000 – 35.800 kilometara, slabiji su od geostacionarnih, te je stoga za potpuno pokrivanje zemljine površine potrebna orbitalna skupina od 8 – 12 satelita. Sateliti na tim orbitama obiđu Zemlju u razdoblju od dva sata do osam sati. Imaju dugi vijek trajanja, no zbog veće udaljenosti od Zemlje dolazi do većeg kašnjenja signala. GPS i GLONASS sateliti kruže na visinama blizu 20.000 km, dok BeiDou i Galileo sateliti orbitiraju nešto više, BeiDou na 21.500 km, a Galileo 23.000 km. Na 20.000 km nema puno otpora, ali gravitacijski učinci i pritisak sunčevog zračenja pomalo utječu na GNSS orbite, pa se orbite povremeno moraju korigirati. Dok se njegova orbita prilagođava, status GNSS satelita se mijenja u "izvan uporabe" tako da korisnička oprema zna da ne koristi zahvaćene signale.

GEO zemaljska orbita pruža veliku vidljivost uz pomoć samo nekoliko satelita. GEO sateliti orbitiraju na 35.800 kilometara iznad Zemljine površine, a imaju stalnu, odnosno 24 – satnu vidljivost. GEO sateliti ne zahtijevaju prekide u radu zato što nema međusobnog kretanja svemirske letjelice i njezine zemaljske stanice. Sustav koji se sastoji od tri satelita ove vrste ima pokrivenost preko cijele zemljine površine. Kao i MEO sateliti, imaju dugi vijek trajanja.

HEO sateliti su sateliti koji dosežu visinu veću od 35.800 kilometara iznad Zemljine površine, odnosno lete iznad GEO satelita, a imaju vidljivost oko 12 sati.

GNSS sateliti prenose informacije o svom položaju i vremenu kada je poslan svaki pojedinačni signal. GNSS prijammnici tada mogu koristiti signale s više satelita za

trilateraciju položaja koristeći njihovu udaljenost od najmanje četiri GNSS satelita što dovodi do veće preciznosti.⁹

Učinak GNSS sustava procjenjuje se pomoću četiri kriterija:¹⁰

- Točnost - razlika između izmjerenog i stvarnog položaja, brzine ili vremena prijammnika,
- Integritet - sposobnost sustava da pruži prag povjerenja i pošalje upozorenje u slučaju anomalije u podacima o pozicioniranju,
- Kontinuitet - sposobnost sustava da funkcionira bez prekida,
- Dostupnost - postotak vremena kada signal ispunjava gore navedene kriterije točnosti, integriteta i kontinuiteta.

3.1. PODJELA GNSS SUSTAVA

Trenutno postoje četiri globalna navigacijska satelitska sustava, koji su opisani u Tablici 1.

Tablica 1. Trenutno stanje službeno potpuno operativnih sustava

GNSS	Pokrivenost	Prvo lansiranje	Trenutni broj u orbiti
GPS	Cijeli svijet	1974.	31
GLONASS	Cijeli svijet	1982.	24
Galileo	Cijeli svijet	2011.	24
BeiDou	Cijeli svijet	2000.	35

Izvor: Izrada autora prema *List of Positioning Satellites*, 2021.

<https://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html> (08.03.2021.)

U Tablici 1. prikazana je pokrivenost i trenutni broj GNSS satelita pojedinog satelitskog navigacijskog sustava. Treba napomenuti da od trenutnog broja satelita u orbiti,

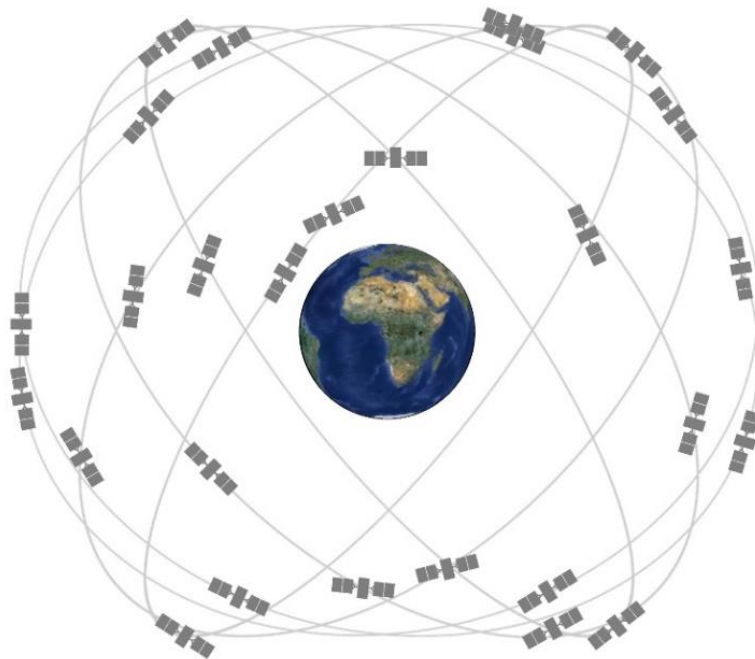
⁹ *How does GNSS work?* <https://www.globalpos.com.au/what-is-gnss> (08.03.2021.)

¹⁰ *What is GNSS?* <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> (08.03.2021.)

postoji i određeni broj satelita koji su na održavanju ili trenutno nisu u uporabi radi nekog drugog razloga. Trenutno, GPS ima 33 satelita, od kojih je 31 u orbiti i u funkciji, a održava ih američko ratno zrakoplovstvo. Do danas, GPS je lansirao 72 satelita. Što se tiče sustava GLONASS, od ukupno 26 satelita, 24 je trenutno u orbiti, a njime upravljaju ruske zrakoplovno-svemirske obrambene snage i on je drugi alternativni navigacijski sustav u radu. Galileo ima ukupno 30 satelita od kojih je 24 trenutno u orbiti, dva su nedostupna i dva više nisu u uporabi. BeiDou ima 27 satelita u srednjoj Zemljinoj orbiti, pet u geostacionarnoj i tri u nisko orbitalnoj.

3.1.1. Globalni sustav za određivanje položaja

GPS je američki satelitski navigacijski sustav koji je razvilo ministarstvo obrane SAD-a početkom 1970-ih. U početku je bio razvijen kao vojni sustav za ispunjavanje američkih vojnih potreba. Međutim, kasnije je postao dostupan i civilima, a danas označava sustav dvostruke namjene kojem mogu pristupiti i vojni i civilni korisnici.

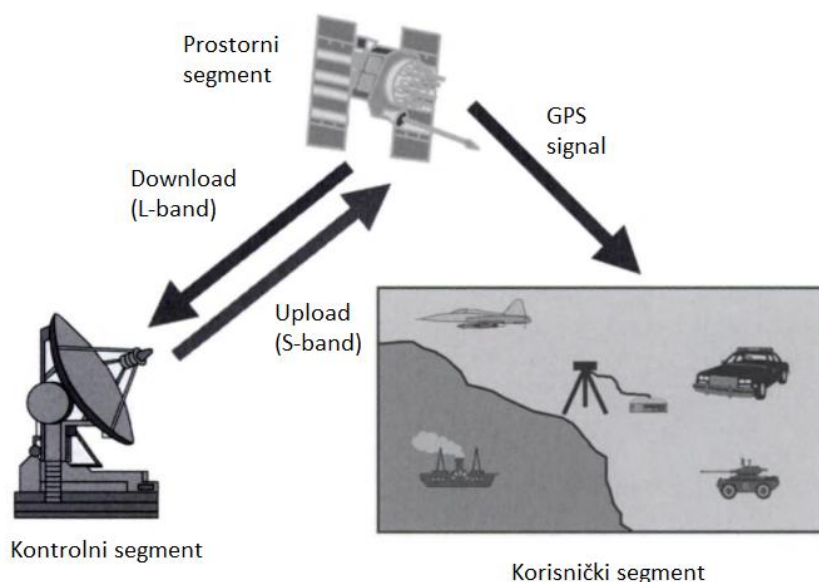


Slika 8. GPS konstelacija

Izvor: *GPS: The Global Positioning System – A global public service brought to you by the U.S. government*,
Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics
<https://www.gps.gov/multimedia/images/constellation.jpg> (30.06.2021.)

GPS pruža kontinuirane podatke o pozicioniranju i mjerenju vremena bilo gdje u svijetu po svim vremenskim uvjetima. Budući da služi neograničenom broju korisnika i koristi se iz sigurnosnih razloga, GPS označava jednosmjerni sustav rangiranja.

GPS se sastoji od prostornog, kontrolnog i korisničkog segmenta (Slika 9.).



Slika 9. GPS segmenti

Izvor: El-Rabbany, A.: *Introduction to GPS, The Global Positioning System*, Artech House, Inc., 2002, p. 3

Prostorni segment GPS sustava čini minimalna konstelacija od 24 satelita koji se nalaze u srednje visokoj orbiti oko Zemlje na visini od približno 20.200 kilometara. Za normalan rad GPS sustava potrebna je nominalna konstelacija od 24 satelita, no uobičajeno je da se u GPS konstelaciji nalazi više od 24 (do 33) satelita koji poboljšavaju rad samog sustava, no ne smatraju se osnovnim dijelom konstelacije. Svaki GPS satelit odašilje signal koji ima niz komponenti: dva sinusna vala, dva digitalna koda i navigacijsku poruku. Kodovi i navigacijska poruka dodani su nosačima kao binarne dvofazne modulacije. Nosači i kodovi koriste se uglavnom za određivanje udaljenosti od prijamnika korisnika do GPS satelita. Navigacijska poruka sadrži, zajedno s ostalim podacima, koordiniranu (lokaciju) satelita u ovisnosti o vremenu. Prijenos signala kontrolira se vrlo preciznim atomskim satovima na satelitima. Svaki satelit kruži oko Zemlje dva puta dnevno. Sateliti u GPS konstelaciji podijeljeni su u šest jednako raspoređenih orbitalnih ravnina koje okružuju Zemlju, a svaka

ravnina sadrži četiri "utora" zauzeta osnovnim satelitima. Ovaj razmještaj s 24 utora omogućava korisnicima da mogu pogledati najmanje četiri satelita s gotovo bilo koje točke na planeti. Svemirske snage obično lete s više od 24 GPS satelita kako bi održale pokrivenost kad god se osnovni sateliti servisiraju ili ne koriste. Dodatni sateliti mogu povećati performanse GPS sustava, ali se ne smatraju dijelom jezgre.

Kontrolni segment GPS sustava sastoji se od svjetske mreže stanica za praćenje, uključujući glavnu kontrolnu stanicu (engl. *Master Control Station* - MCS) smještenu u američkoj vojnoj zrakoplovnoj bazi u Colorado Springsu, zamjensku glavnu kontrolnu stanicu (engl. *Alternate Master Control Station* – AMCS) smještenu u Vandenbergu, te globalne mreže stanica za praćenje satelita (engl. *Monitoring Stations* – MCs) i predajnih antena (engl. *Ground Antennas*). Predajne antene moraju biti dovoljno velike i usmjerene ka određenom satelitu kako bi se predaja uspješno izvršila. Primarni zadatak kontrolnog segmenta je praćenje GPS satelita radi određivanja i predviđanja satelitskih lokacija, integriteta sustava, ponašanja satelitskih atomskih satova, atmosferskih dana i drugih razmatranja. Te se informacije zatim prenose na GPS satelite putem veze unutar S-pojasa. Glavna kontrolna stanica pomoću predajnih antena uspostavlja kontakt sa svakim satelitom jednom dnevno.

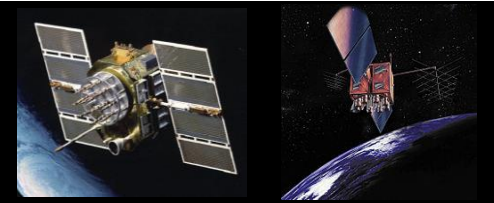
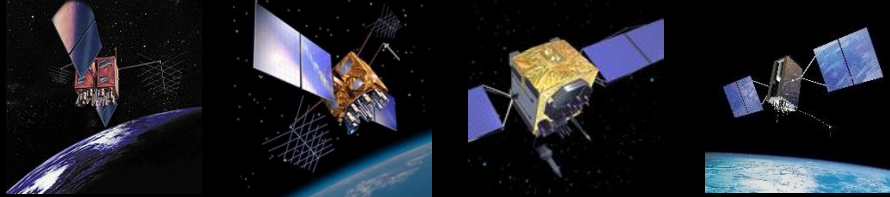
GPS korisnički prijamnik označava uređaj koji se koristi za obradu satelitskih signala, a sastoji se od šest osnovnih dijelova: prijamničke antene, radio-frekvencijskog segmenta, segmenta obrade signala, upravljačkog dijela, grafičkog sučelja i izvora električne energije. Korisnički segment uključuje sve vojne i civilne korisnike. S GPS prijamnikom spojenim na GPS antenu, korisnik može primiti GPS signale koji se mogu koristiti za određivanje njegovog položaja bilo gdje na svijetu. GPS je trenutno dostupan svim korisnicima širom svijeta bez izravne naknade.

U lipnju 2011. ratno zrakoplovstvo SAD-a uspješno je dovršilo proširenje GPS konstelacije poznato pod nazivom „*Expandable 24*“. Tri od 24 utora su proširena, a šest satelita je premješteno, tako da su tri dodatna satelita postala dio osnovne konstelacije. Kao

rezultat toga, GPS sada učinkovito djeluje kao konstelacija od 27 satelita s poboljšanom pokrivenošću u većini dijelova svijeta.¹¹

Početna i buduća generacija GPS satelita, i njezine značajke prikazane su u Tablici 2.

Tablica 2. Početna i buduća generacija GPS satelita

Početna konfiguracija satelitskog segmenta		Buduća konfiguracija satelitskog segmenta		
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIIF
0 operativnih	8 operativnih	7 operativnih	12 operativnih	4 operativnih
Kod grube akvizicije (Coarse Acquisition C / A) na frekvenciji L1 za civilne korisnike	C/A kodna L1 frekvenciji	All legacy signals(?)	Svi Block IIR-M signali	Svi Block IIF signali
Precizan P (Y) kod na L1 i L2 frekvencijama za vojne usluge	P(Y) kod na L1 & L2 frekvencijama	Drugi korisnički signal na L2 (L2C) frekvenciji	Treći korisnički signali na L5 frekvenciji (L5)	Četvrti korisnički signali na L1 (L1C) frekvenciji
7,5-godišnji životni vijek dizajna	On-board clock monitoring	Novi vojni signali M koda za pojačanu otpornost na zaglavljivanje	Napredni atomski satovi	Poboljšana pouzdanost, točnost i integritet signala
Pokrenut 1990-1997	7,5-godišnji životni vijek dizajna	Fleksibilne razine snage za vojne signale	Poboljšana točnost, jačina i kvaliteta signala	Nema selektivne dostupnosti
Posljednji raskinut 2019	Pokrenut 1997-2004	7,5-godišnji životni vijek dizajna	12-godišnji životni vijek dizajna	15-godišnji životni vijek dizajna
		Pokrenut 2005-2009	Pokrenut 2010-2016	IIIF: laserski reflektori; traganje i spašavanje
				Pokrenut 2018.

Izvor: Izrada autora prema *Space Segment*, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, 12.06.2021.

<https://www.gps.gov/systems/gps/space/?fbclid=IwAR1gJ1EK6BMpMu5mdWfsPGTsjzA-nd4Culnot0pKx14rK-4Gy6SCyx0zbnA> (30.06.2021.)

¹¹ *Space Segment*, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, 12.06.2021.
<https://www.gps.gov/systems/gps/space/?fbclid=IwAR1gJ1EK6BMpMu5mdWfsPGTsjzA-nd4Culnot0pKx14rK-4Gy6SCyx0zbnA> (30.06.2021.)

Sateliti Block IIA predstavljaju poboljšane verzije serije Block II, osmišljene da omogućuju rad od 180 dana bez kontakta iz upravljačkog segmenta. Lansirano je devetnaest satelita u Block IIA seriji, prvi 26. studenog 1990. i posljednji 06. studenog 1997. Dva satelita u ovoj seriji, brojevi 35 i 36, opremljeni su laserskim reflektorima koji im omogućuju praćenje neovisno o radijskim signalima, čime se nedvosmisleno razdvaja greška sata i efemeride. SVN-34, posljednji satelit Block IIA, emitiran na signalu PRN 18 uklonjen je iz upotrebe 09. listopada 2019., ali je zadržan kao rezervni dio na orbiti do travnja 2020. godine.¹²

Block IIR serija su pričuvni sateliti. Prvi pokušaj lansiranja satelita Block IIR bio je neuspješan kada je raketa Delta II eksplodirala nakon 12 sekundi u letu. Prvo uspješno lansiranje bilo je 23. srpnja 1997, te je uspješno lansirano dvanaest satelita u nizu. Najmanje deset satelita u ovom bloku nosilo je eksperimentalni teret S-pojasa za pretraživanje i spašavanje, poznat kao satelitski sustav za upozoravanje na opasnost.¹³

Sateliti Block IIR-M uključuju novi vojni signal i snažniji civilni signal, poznat kao L2C. U seriji Block IIR-M postoji osam satelita. Prvi satelit Block IIR-M lansiran je 26. rujna 2005. Posljednje lansiranje blocka IIR-M bilo je 17. kolovoza 2009.¹⁴

Block IIF serija su "*follow-on*" sateliti koje je razvio Boeing. Satelit ima masu od 1630 kg i dizajnerski vijek od 12 godina. Prvo svemirsko vozilo Block IIF lansirano je u svibnju 2010. godine na raketi Delta IV. Dvanaesto i posljednje lansiranje IIF -a bilo je 5. veljače 2016.¹⁵

GPS Block III prva je serija GPS satelita treće generacije, koja uključuje nove signale i omogućuje emitaciju na većim razinama snage. Dana 23. prosinca 2018. godine, lansiran je prvi GPS satelit III, dok je četvrti satelit lansiran 5. studenog 2020. godine.¹⁶

¹² *Space Segment*, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, 12.06.2021. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/?fbclid=IwAR1gJ1EK6BMpMu5mdWfsPGTsjszA-nd4Culnot0pKx14rK-4Gy6SCyx0zbnA> (30.06.2021.)

¹³ "*Journal of the Institute of Navigation*", 2015. <https://www.ion.org/publications/upload/NAVI.123.pdf> (30.06.2021.)

¹⁴ Ibidem.

¹⁵ Sickle, J., V.: *Block IIF and Block III*, <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1865> (30.06.2021.)

¹⁶ Ibidem.

Serijski blok IIIF drugi je set GPS blokova III satelita, koji će se sastojati od do 22 svemirska vozila. Očekuje se da će lansiranje Bloka IIIF početi najranije 2026. godine i nastaviti do 2034. godine.

3.1.2. GLONASS

Kratica GLONASS potječe od ruskog „*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*”, a označava sustav razvijen sredinom 1970-ih od strane SSSR-a kao odgovor, odnosno konkurencija GPS sustavu. GLONASS se koristi za pružanje informacija o položaju, brzini i vremenu u pomorskom, zračnom, kopnenom i svemirskom sektoru, kao i za postizanje dodatnih informacijskih funkcija.¹⁷

Prvi satelit konstelacije GLONASS lansiran je 1984. godine, a prvu generaciju satelita čine blokovi IIa, IIb i IIv. Drugu generaciju satelita čini GLONASS-M, pri čemu „M” označava modernizaciju. Sateliti druge generacije imaju duži životni vijek, no i dalje zaostaju za GPS-om. Značajniji iskorak postiže se trećom generacijom satelita GLONASS-K, čiji je životni vijek od 10 do 12 godina. Osim duljeg životnog vijeka, uz FDMA (engl. *Frequency Division Multiple Access* – FDMA) tehniku, krenulo je korištenje CDMA (engl. *Code-division multiple access* – CDMA) tehnike višestrukog pristupa. Prednosti tehnike višestrukog pristupa s kodnom raspodjelom ogledaju se u mogućnosti razlikovanja različitih signala na istoj frekvenciji što omogućuje praćenje velikog broja signala s različitih satelita koji se kontinuirano odašilju na istoj frekvenciji.

Prostorni segment sustava GLONASS nominalno se sastoji od 24 do 30 operativnih svemirskih letjelica srednje visoke orbite oko Zemlje u kružnim orbitama nominalne nadmorske visine 19.100 kilometara, nagiba $64,8^\circ$ i orbitalnog razdoblja od 11 h 15 min 44 s. Sateliti su postavljeni u orbitalnim ravninama odabranim kako bi se osigurao neprekidni signal Zemljine površine i bliskog Zemljinog prostora do 2000 kilometara. Potpuno postavljena konstelacija GLONASS sustava sastoji se od 24 satelita u tri orbitalne ravnine čiji su uzlazni čvorovi udaljeni 120° . Osam satelita je podjednako razmaknuto u svakoj

¹⁷ Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E.: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo & more*, Springer, New York, 2018., p. 343

ravnini. Razmak satelita omogućuje kontinuirano i globalno pokrivanje zemljine površine i bliskog Zemljinog prostora.



Slika 10. GLONASS konstelacija

Izvor: European Space Agency (ESA), *GLONASS Space Segment*, 2011.

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Space_Segment (05.07.2021.)

Broj rezerviranih kodnih brojeva omogućuje proširenje orbitalne konstelacije na 64 svemirske letjelice (engl. *Space Vehicles* – SV). SV ID broj koji se prenosi u uslužnom dijelu nizova CDMA signalnih navigacijskih poruka jednak je rangiranom kodnom broju navedenom u tablici povezanog ICD-a (engl. *Interface Control Document* – ICD). Komunikacijske granice unutar GPS sustava kao i između GPS sustava i drugih sustava, poznate su kao sučelja. ICD su formalna sredstva za uspostavljanje, definiranje i kontroliranje sučelja i za dokumentiranje detaljnih informacija o dizajnu sučelja za GPS program. Orbitalna konstelacija može se proširiti dodavanjem SV-a unutar orbitalne ravnine ili između orbitalnih ravnina, te izgradnjom MEO, geosinkronog (engl. *Geosynchronous Orbit* - GSO) i HEO orbitalnog proširenja.

Svrha GLONASS sustava je pružiti neograničen broj korisnika u zračnom, pomorskom i bilo kojem drugom sektoru s trodimenzionalnim pozicioniranjem, mjerenjima brzine i vremenskim ograničenjem bilo gdje u svijetu u svim vremenskim prilikama.

Kontrolni segment uključuje kontrolni centar i mrežu postaja za praćenje rada satelita smještenih diljem Rusije. Kontrolni segment omogućuje praćenje statusa konstelacije GLONASS sustava, korekciju parametara orbite i prijenos podataka o navigaciji. Korisnička oprema sastoji se od prijmnika i procesora koji primaju i obrađuju GLONASS navigacijske signale omogućavajući korisniku izračunavanje koordinata, brzine i vremena. Ispravci se ažuriraju dva puta dnevno.

Korisnički segment GLONASS sustava sastoji se od prijmnika različitih karakteristika koji pružaju usluge mjerenja navigacijskih parametara, izračun koordinata položaja, izračun brzine kretanja i mjerenje vremena na osnovu obrade primljenih signala tj. mjerenja i navigacijske poruke.¹⁸

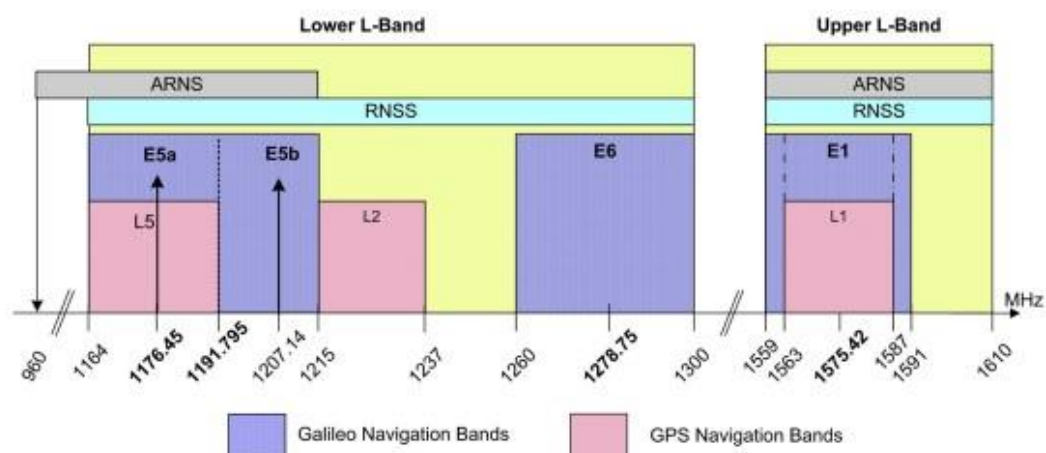
3.1.3. Galileo

Galileo je europski globalni satelitski navigacijski sustav koji pruža vrlo preciznu i globalnu uslugu pozicioniranja pod civilnom kontrolom. Specificiran je za upotrebu kao samostalan globalni sustav, ali je također interoperabilan s drugim sustavima, poput sustava GPS i GLONASS. Za razliku od sustava GPS, GLONASS i BeiDou orijentiranih u vojne svrhe, Galileo je sustav namijenjen isključivo civilnoj upotrebi.

Postavljeni sustav Galileo sastoji se od 24 operativna satelita i do šest aktivnih rezervnih dijelova, smještenih u tri kružne ravnine srednje visoke Zemljine orbite. Glavne funkcije prostornog segmenta Galileo sustava su generiranje i odašiljanje signala koda i faze nositelja sa specifičnom strukturom Galileo signala, te pohrana i ponovni prijenos navigacijske poruke koju šalje kontrolni segment. Ove prijenose kontroliraju visoko stabilni atomski satovi na satelitima.

Galileo navigacijski signali prenose se u četiri frekvencijska opsega označena na slici 5. Ova četiri frekvencijska opsega su opsezi E5a, E5b, E6 i E1, a omogućuju široku propusnost za prijenos Galileo signala.

¹⁸ “*GLONASS Interface Control Document (ICD): General Description of Code Division Multiple Access Signal System*”, Russian Institute of Space Device Engineering, Moscow, 2016. <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf> (20.09.2021.)



Slika 11. Galileo frekvencijski plan

Izvor: “*European GNSS (Galileo) Open Service, Signal-In-Space Interface Control Document*”, siječanj 2021. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf?fbclid=IwAR30k_MZBf_nCtYHGkF1OQzMuSiraz1J_8xvIatgVvivi_Hf68cdzuM8TMk (05.07.2021.)

Kad Galileo postane potpuno operativan (2022.), bit će ukupno 30 satelita u srednjoj Zemljinoj orbiti na nadmorskoj visini od 23.222 kilometara. Sateliti će zauzimati svaku od tri orbitalne ravnine nagnute pod kutom od 56° u odnosu na ekvator. Sateliti će biti ravnomjerno raspoređeni i bit će im potrebno oko 14 sati da obiđu Zemlju. Svaka orbitalna ravnina uključuje osam satelita jednako raspoređenih unutar ravnine. Kutni pomak između satelita u dvije susjedne ravnine je 15° . Jedan satelit u svakoj ravnini bit će rezervan, u stanju pripravnosti u slučaju kvara bilo kojeg operativnog satelita. Ovi rezervni sateliti mogu se aktivirati i dodijeliti određenom operativnom utoru ovisno o aktivnostima održavanja ili razvoja usluga. Period ponavljanja geometrije konstelacije koji odgovara nominalnim orbitalnim parametrima je 10 dana (što odgovara 17 okretaja u orbiti). To znači da se za svakog fiksnog korisnika Galilea lokalna geometrija satelita u danom trenutku ponavlja svakih 10 bočnih dana.¹⁹

Sustav Galileo koristi frekvenciju sata kao vrlo stabilnu referencu pomoću koje druge jedinice mogu generirati točne signale koje će Galileo sateliti emitirati. Emitirani signali također pružaju referencu pomoću koje manje stabilni satovi korisničkog prijammnika mogu kontinuirano poništavati svoje vrijeme.

¹⁹ European Space Agency (ESA), *Galileo architecture*, 2011. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Architecture (20.09.2021.)

Zemaljski segment odgovoran je za ispravan rad GNSS sustava. Sastoji se od dva kontrolna centra, globalne mreže postaja za odašiljanje i primanje koje provode funkcije nadzora i upravljanja te niz uslužnih objekata koji podržavaju pružanje usluga Galileo.

Jezgra zemaljskog segmenta su dva Galileo kontrolna centra (engl. *Ground Control Centres* - GCC). Svaki kontrolni centar upravlja kontrolnim funkcijama koje podržava kontrolni segment Galilea (engl. *Galileo Control Segment* - GCS) i misijskim funkcijama, koje podržava misijski segment Galilea (engl. *Galileo Mission Segment* - GMS). GCS upravlja održavanjem svemirskih letjelica i održavanjem konstelacija, dok GMS upravlja kontrolom navigacijskog sustava. GCS i GMS povezuju satelite sa svjetskom mrežom zemaljskih postaja koje implementiraju funkcije upravljanja i nadzora.²⁰

Kontrolni segment odgovoran je za veliki raspon funkcija koje podržavaju upravljanje satelitskim sazviježdem i upravljanje Galileo satelitima. Opseg ove funkcionalnosti uključuje kontrolu i nadzor satelita i korisnog tereta, funkcije planiranja i automatizacije koje omogućuju sigurne i ispravne operacije. GCS pruža funkciju telemetrije, telekomande i upravljanja za cijelu satelitsku konstelaciju Galileo. Njegovi funkcionalni elementi raspoređeni su unutar Galileo kontrolnih centara i šest globalno distribuiranih stanica za praćenje i kontrolu telemetrije (engl. *Telemetry Tracking and Control* - TT&C). Kako bi to riješio, GCS koristi TT&C postaje za komunikaciju sa svakim satelitom na shemi koja kombinira redovne, zakazane kontakte, dugoročne probne kampanje i kontakte za nepredviđene situacije.²¹

Misijski segment Galilea sastoji se od objekata raspoređenih u dva Galileo kontrolna centra plus niz misijskih stanica za povezivanje (engl. *Up-Link Stations* - ULS) i Galileo senzorskih stanica (engl. *Galileo Sensor Stations* - GSS) raspoređenih na udaljenim lokacijama širom svijeta. GMS je odgovoran za utvrđivanje i uzlaznu vezu poruka navigacijskih podataka potrebnih za pružanje navigacijskih i vremenskih podataka. U tu svrhu koristi globalnu mrežu senzorskih stanica Galileo za kontinuirano praćenje navigacijskih signala svih satelita, kroz opsežnu komunikacijsku mrežu koja koristi komercijalne satelite, kao i kabelaške veze u kojima svaka se veza duplicira radi redundancije.

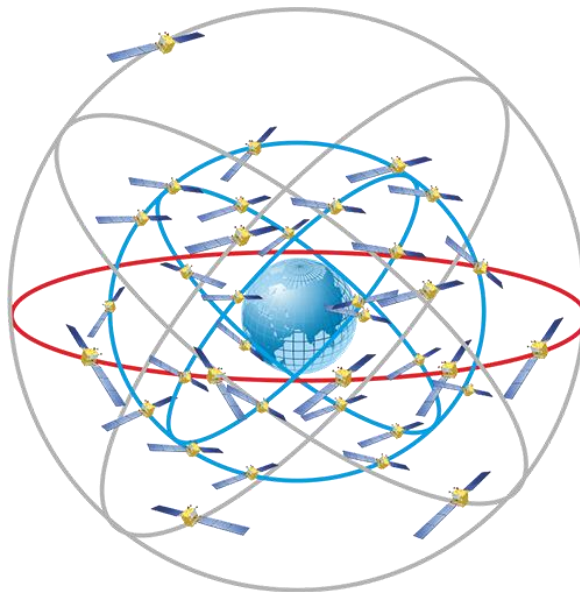
²⁰ European Space Agency (ESA), op.cit.

²¹ European Space Agency (ESA), *BeiDou, General Introduction*, 2011. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction (21.09.2021.)

Korisnički segment Galilea sastoji se od Galileo prijamnika. Njihova glavna funkcija je primanje Galileo signala, određivanje pseudodometra i rješavanje navigacijskih jednadžbi kako bi se dobile njihove koordinate i osiguralo vrlo točno vrijeme.

3.1.4. BeiDou

BeiDou satelitski navigacijski sustav (engl. *BeiDou Navigation Satellite System* – BDS) konstruirala je Kina s obzirom na potrebe nacionalne sigurnosti, te ekonomskog i gospodarskog razvoja. BeiDou je jedan od najmlađih sustava te je ujedno i najmoderniji satelitski navigacijski sustav u upotrebi. Razvoj BeiDou satelitskog navigacijskog sustava započeo je 1980. godine, a odvija se u tri faze. Prva faza završena je do 2000. godine konstrukcijom sustava BDS – 1, a pruža usluge na razini države. Druga faza završila je konstrukcijom sustava BDS – 2, a pokriva Pacifički dio Azijskog kontinenta. Treća faza BDS – 3 predstavlja potpunu operativnost sustava na globalnoj razini, te je završena 2020. godine lansiranjem 35-og, te ujedno i posljednjeg satelita 23. lipnja 2020.²²



Slika 12. BeiDou konstelacija

Izvor: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/beidou.php> (05.07.2021.)

²² European Space Agency (ESA), *BeiDou, General Introduction*, 2011. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction (21.09.2021.)

BeiDou konstelacija sastoji se od ukupno 35 satelita, od kojih je pet GEO satelita, 27 MEO satelita i tri IGSO satelita.

BeiDou zemaljski upravljački segment sastoji se od:²³

- Glavne kontrolne stanice - odgovorna za kontrolu satelitske konstelacije i obradu mjerenja primljenih od nadzornih stanica za generiranje navigacijske poruke,
- Stanice za prijenos - odgovorne za prijenos orbitalnih ispravka i navigacijske poruke na BeiDou satelite,
- Nadzorne stanice - koje prikupljaju BeiDou podatke za sve satelite koji se vide s njihovih lokacija.

Nominalna svemirska konstelacija BDS-2 sastoji se od 5 GEO satelita, 5 IGSO satelita i 4 MEO satelita. Prema stvarnoj situaciji, rezervni sateliti mogu biti raspoređeni u orbiti. GEO sateliti djeluju u orbiti na nadmorskoj visini od 35.786 kilometara i nalaze se na 58,75° E, 80° E, 110,5° E, 140° E i 160° E. Sateliti IGSO djeluju u orbiti na nadmorskoj visini od 35.786 kilometara i nagibu orbitalnih ravnina od 55 stupnjeva u odnosu na ekvatorijalnu ravninu. MEO sateliti djeluju u orbiti na nadmorskoj visini od 21.528 kilometara i nagibu orbitalnih ravnina od 55 stupnjeva u odnosu na ekvatorijalnu ravninu. Nominalna svemirska konstelacija BDS-3 sastoji se od 3 GEO satelita, 3 IGSO satelita i 24 MEO satelita. Prema stvarnoj situaciji, rezervni sateliti mogu biti raspoređeni u orbiti. GEO sateliti djeluju u orbiti na nadmorskoj visini od 35.786 kilometara i nalaze se na 80 ° E, 110,5 ° E, odnosno 140 ° E. Sateliti IGSO djeluju u orbiti na nadmorskoj visini od 35.786 kilometara i nagibu orbitalnih ravnina od 55 stupnjeva u odnosu na ekvatorijalnu ravninu. MEO sateliti djeluju u orbiti na nadmorskoj visini od 21.528 kilometara i nagibu orbitalnih ravnina od 55 stupnjeva u odnosu na ekvatorijalnu ravninu. Svemirska konstelacija BDS postupno će prijeći s BDS-2 na BDS-3 i pružati otvorene usluge za korisnike širom svijeta.²⁴

²³ European Space Agency (ESA), *BeiDou Ground Segment*, 2011. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction (21.09.2021.)

²⁴ “*BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document*”, 2019. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf?fbclid=IwAR0qLaTTARNVLh9MVLCoELxSovlAnK1-j7tPzH3epJ-RFYjeJg40o35YUO8> (05.07.2021.)

3.2. IZVORI POGREŠAKA GNSS SUSTAVA

Prilikom određivanja položaja pomoću GNSS sustava nastaje niz pogrešaka. Pogreške se mogu opisati kao posljedica niza utjecajnih čimbenika koji djeluju na mjerenje vremena širenja signala od satelita do prijammnika. Ukupnu pogrešku točnosti položaja koja se određuje satelitskim navigacijskim sustavima čini korisnička razdioba pogrešaka - UERE (engl. *User Equivalent Ranging Error*- UERE) i geometrijska razdioba točnosti (engl. *Geometric Dilution of Precision* – GDOP). Točnost proračuna pseudoudaljenosti izravno je proporcionalna GDOP parametru, te se može izraziti sljedećom formulom:²⁵

$$\sigma T = \sigma R \cdot GDOP \quad (3)$$

Gdje je:

- σT – ukupna pogreška položaja;
- σR – korisnička razdioba pogrešaka;
- $GDOP$ – geometrijska razdioba točnosti.

3.2.1. Ukupni proračun pogreške određivanja položaja

U nastavku je navedena formula za izračun pseudoudaljenosti sa svim pogreškama od kojih se sastoji.

$$\rho_i = \sqrt{\left(x_u(t_u) - x_{s_i}(t_{s_i})\right)^2 + \left(y_u(t_u) - y_{s_i}(t_{s_i})\right)^2 + \left(z_u(t_u) - z_{s_i}(t_{s_i})\right)^2} + c \cdot b_u + \delta_{t_D} \quad (4)$$

Gdje je:

- ρ_i – izmjerena pseudoudaljenost;
- t_{s_i} – vrijeme odašiljanja signala;
- t_u – vrijeme primitka signala;
- $c \cdot b_u$ – pogreška korisničkog sata;

²⁵ Brčić, D., op. cit., p. 17

- x_u, y_u, z_u – koordinate primatelja za vrijeme primitka signala;
- $x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i}$ – koordinate satelita za vrijeme primitka signala;
- δt_D – kompozicija individualnih parametara koji utječu na određivanje pseudoudaljenosti.

Tablica 3. Pogreške mjerenja pseudoudaljenosti

Izvor pogreške	Ukupna vrijednost pogreške
Pogreške u efemeridama	2,1
Satelitski sat	2,1
Ionosfersko kašnjenje	4,0
Troposfersko kašnjenje	0,7
Višestruki putovi	1,4
Šum prijamnika	0,5
Korisnička razdioba pogrešaka (UERE), rms	5,3
Vertikalna razdioba 1 σ uz parameter VDOP = 2,5	12,8
Horizontalna pogreška 1 σ uz parameter HDOP = 2,0	10,2

Izvor: Izrada autora prema Brčić, D., op. cit., p. 20

U Tablici 3. prikazani su izvori pogrešaka pseudoudaljenosti - orbitalni, satelitski sat, šum prijamnika, ionosfersko i troposfersko kašnjenje i višestruke greške, te njihovi doprinosi izraženi u kvadratnim srednjim vrijednostima. Može se vidjeti da pogreške nastale uslijed ionosferskog kašnjenja satelitskog signala dominiraju nad svim ostalim pogreškama.

3.2.1.1. Korisnička razdioba pogrešaka

Korisnička razdioba pogrešaka osnovni je parametar performansi GPS sustava, a nastaje kao rezultat različitih utjecaja kojima je izložen satelitski signal prilikom propagacije od satelitske do korisničke antene. Uzroci UERE pogrešaka dijele se na:

- Pogreške satelitske i kontrolne komponente,
- Pogreške korisničke komponente,
- Pogreške nastale uslijed širenja satelitskog signala kroz prijenosni medij.

Pogreške satelitske komponente čine pogreške u procijenjenim položajima satelita, odstupanja satelitskih satova od GPS vremenskog sustava (uključujući relativistički učinak) te sklopovska kašnjenja satelitske opreme. Netočne satelitske efemeride stvaraju pogrešku u određivanju položaja zato što se u postupku određivanja položaja korisnika, netočnosti u poznavanju položaja satelita direktno prenose i na određivanje položaja korisnika. Bez obzira na to što satelitski sustavi za određivanje položaja korisnika koriste zajedničko vrijeme sustava (npr. vrijeme GPS sustava) koje osiguravaju precizni atomski satovi, satelitski satovi s protokom vremena počinju odstupati od zajedničkog vremena te tako dolazi do nastanka pogrešaka.

Pogreške korisničke komponente čine pogreške uslijed termalnog šuma prijamnika, sklopovskih kašnjenja korisničke opreme i višestrukih putova satelitskog signala.

Pogreške nastale uslijed širenja satelitskog signala kroz prijenosni medij mogu se podijeliti na ionosfersko i troposfersko kašnjenje. Do ionosferskog kašnjenja dolazi zbog složenih fizikalnih i kemijskih pojava nastalih na Suncu, a čiji se učinci manifestiraju u Zemljinim ionosferskim slojevima. Ionosfersko kašnjenje predstavlja najznačajniji pojedinačni uzrok pogrešaka satelitskog određivanja položaja, čak i u uvjetima mirnog svemirskog vremena. Ionosfersko kašnjenje teško je predvidivo, stohastično i ovisno kako o globalnim, tako i o lokalnim značajkama ionosferske dinamike. Do troposferskog kašnjenja dolazi zbog promjene brzine širenja signala uslijed promjena u temperaturi, tlaku i relativnoj vlažnosti neutralne atmosfere te međusobnog položaja korisničkog prijamnika i satelita.²⁶ Za razliku od ionosferskog kašnjenja, uzrok troposferskog kašnjenja nalazi se u donjim neutralnim dijelovima atmosfere, a do promjene brzine širenja radiovalova dolazi zbog promjena temperature, tlaka i relativne vlažnosti zračnih masa u troposferi kroz koje se prenos satelitski signali.

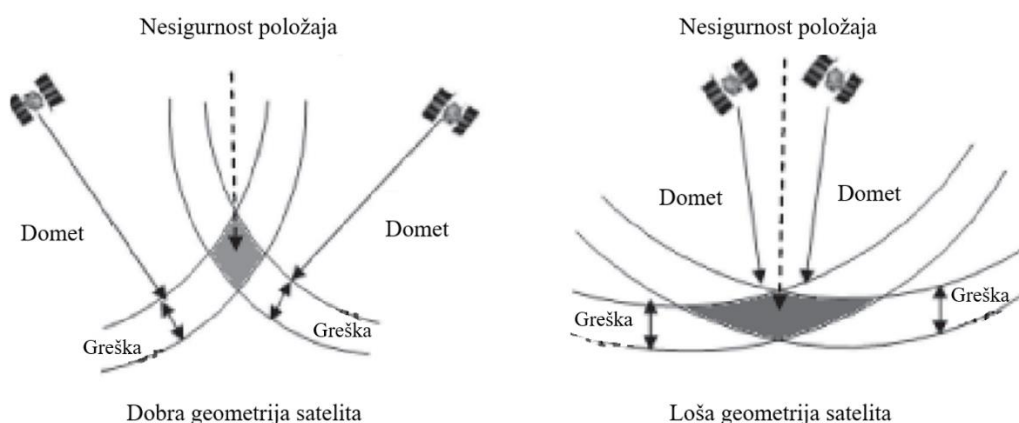
²⁶Brčić, D., op. cit., p. 18

3.2.1.2. Geometrijska razdioba točnosti

GDOP nastaje kao rezultat trenutnog prostornog rasporeda satelita. Parametar geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Dilution of Precision* – DOP) predstavlja omjer točnosti mjerenja pseudoudaljenosti i određivanja položaja.²⁷

U okviru DOP dijela pogrešaka može se definirati niz komponenata DOP pogreške:

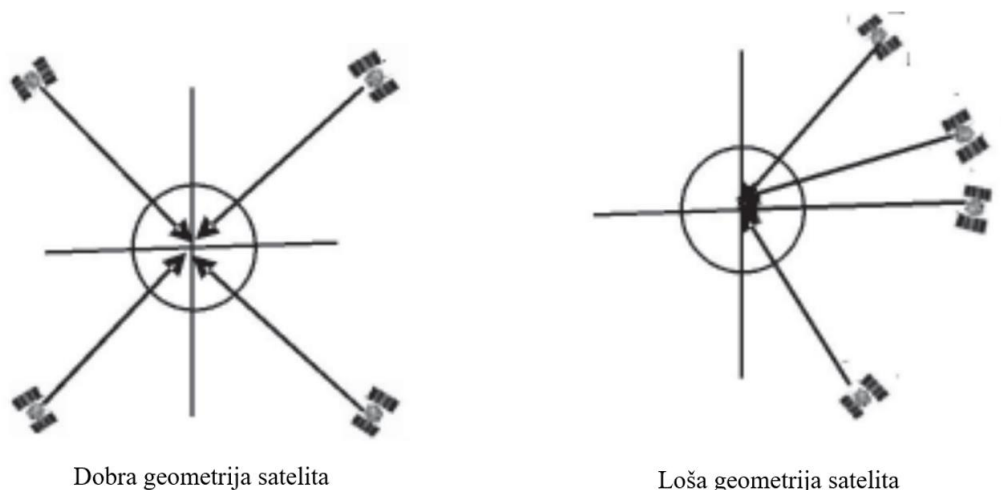
- Prostorna komponenta geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Positioning Dilution of Precision* – PDOP),
- Vremenska komponenta geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Time Dilution of Precision* – TDOP),
- Horizontalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Horizontal Dilution of Precision* – HDOP),
- Sjeverna komponenta geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Northing Dilution of Precision* – NDOP),
- Istočna komponenta geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Easting Dilution of Precision* – EDOP),
- Vertikalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Vertical Dilution of Precision* – VDOP).



Slika 13. Prikaz geometrije satelita za dva satelita

Izvor: Dutt S., I., et al.: *Investigation of GDOP for Precise user Position Computation with all Satellites in view and Optimum four Satellite Configurations*, 2009. https://www.researchgate.net/figure/a-Satellite-Geometry-Representation-for-two-satellites_fig1_267257339 (09.01.2022.)

²⁷ Brčić, D., op. cit., p. 19



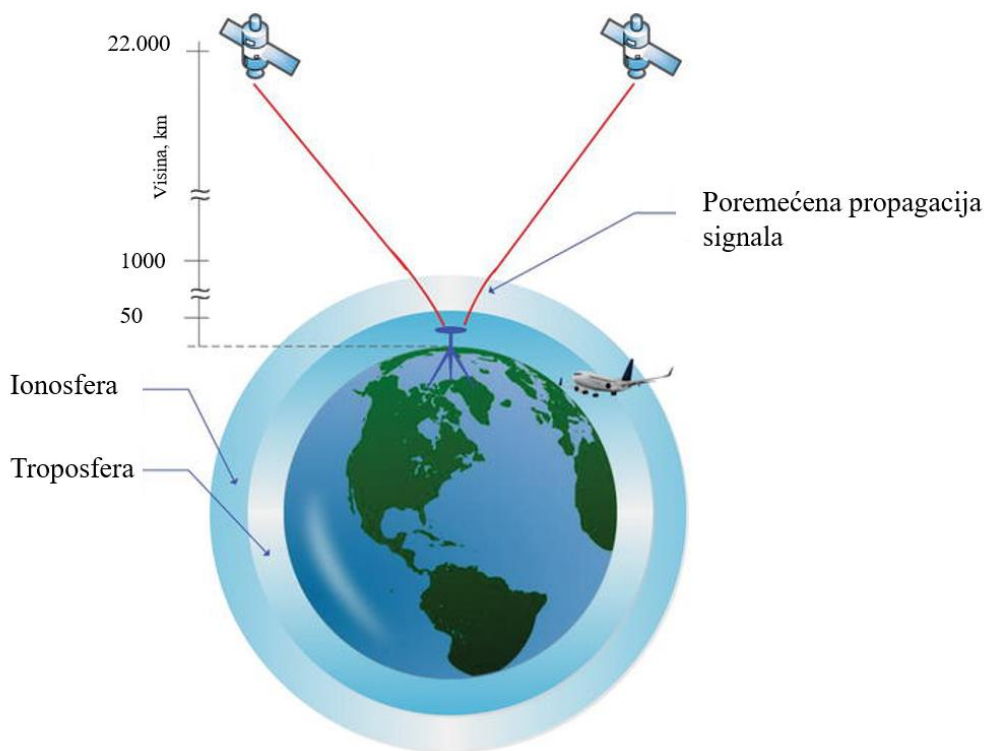
Slika 14. Prikaz geometrije satelita

Izvor: Dutt S., I., et al.: *Investigation of GDOP for Precise user Position Computation with all Satellites in view and Optimum four Satellite Configurations*, 2009. https://www.researchgate.net/figure/a-Satellite-Geometry-Representation-for-two-satellites_fig1_267257339 (09.01.2022.)

Točnost navigacijskog rješenja može biti narušena geometrijom satelita koja predstavlja geometrijske položaje satelita koje vidi prijamnik. Kao primjer, prikaz geometrije satelita ilustriran je za dva satelita na Slici 13. Iz svakog satelita su nacrtana dva luka, smatrajući satelit središtem. Unutarnji luk je nacrtan uzimajući u obzir pravi raspon kao polumjer, a vanjski luk je nacrtan s pseudorasponom kao polumjerom. Područje sjecišta ovih lukova dvaju satelita predstavlja moguću lokaciju korisnika. Kada su dva satelita postavljena dalje, područje raskrižja je malo što ukazuje na nisku nesigurnost položaja, što označava bolju geometriju satelita. Kada su dva satelita postavljena bliže, područje raskrižja je veliko što ukazuje na visoku nesigurnost položaja, odnosno lošu geometriju satelita. Na sličan način, s mnogo satelita na vidiku, dobra geometrija se formira kada se sateliti šire u prostoru. Kako GPS zahtijeva najmanje četiri satelita za određivanje korisničkog položaja, Slika 14. predstavlja geometriju satelita s četiri satelita ako su četiri satelita razmaknuta, dobiveni GDOP je minimalan i to čini dobru geometriju satelita. Kada su sateliti blizu, dobiveni GDOP je maksimalan što ukazuje da je geometrija loša.

3.2.2. Utjecaj prijenosnog medija

Usluge koje pružaju globalni navigacijski satelitski sustavi koriste se u velikom broju aplikacija – i civilnih i vojnih. Svi GNSS sustavi obuhvaćaju mnoge satelite koji kruže oko Zemlje. U jednom trenutku postoji nekoliko satelita s kojih prijammnik može imati jasnu liniju vidljivosti za primanje signala i izgradnju vlastitog navigacijskog rješenja. Međutim, na te signale utječe nekoliko izvora smetnji, uzrokujući pogreške u mjerenjima koja se generiraju unutar prijammnika, što posljedično smanjuje točnost pozicioniranja.



Slika 15. Prijenosni mediji

Izvor: M. Karaim, M. Elsheikh, and A. Noureldin: "GNSS Error Sources", in *Multifunctional Operation and Application of GPS*, 2018. <https://www.intechopen.com/chapters/60049> (10.01.2022.)

U svim GNSS sustavima signal putuje tisućama kilometara između satelitske antene i njezinog odredišta, prijammnika. Prvi i najduži dio ovog putovanja je kroz svemir gdje signal dobiva svoje karakteristike. Ipak, kada signal putuje kroz atmosferu, ovaj medij nameće neke neželjene učinke. Slojevi atmosfere dodaju kašnjenja u vrijeme propagacije satelitskog signala, uzrokujući neke pogreške u mjerenjima.

3.2.2.1. Ionosfersko kašnjenje

Kad signal dosegne visinu od oko 1000 km iznad Zemljine površine, prodire u gornji sloj atmosfere, odnosno u ionosferu. Ovaj sloj atmosfere uključuje različite vrste plinova koji se lako ioniziraju sunčevim zračenjem. Intenzitet solarne aktivnosti, uz utjecaj godišnjeg doba i doba dana, ključni je faktor koji određuje stanje ionosfere. Sukladno tome, ova tri parametra definiraju razinu ionizacije, mijenjajući reflektirajuće indekse loma slojeva ionosfere i utječući na vrijeme prolaska signala izmjereno prijamnikom.

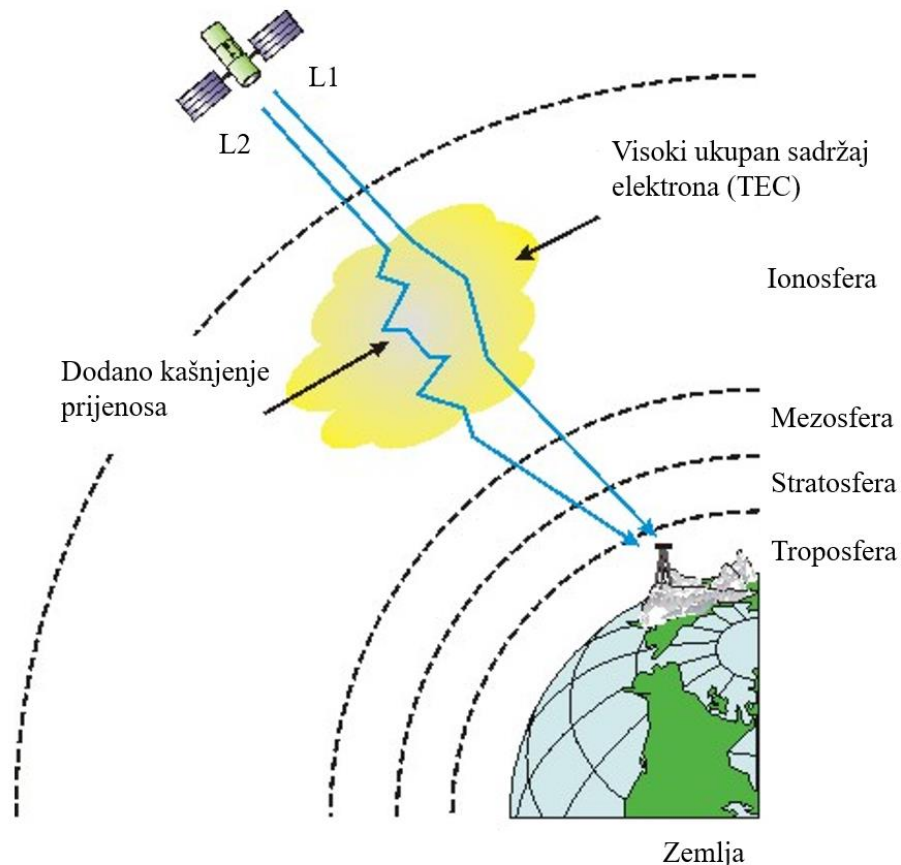
Ionosfera djeluje kao disperzivni medij, što znači da kašnjenje ionosfere ovisi o frekvenciji. Ona je ne homogena i nepromjenjiva, u stalnom toku, zbog čega ju je nemoguće statički ispraviti. UV i EUV zračenje glavni su uzrok formiranja ionosfere. Ovo kašnjenje predstavlja jednu od značajnijih pogrešaka raspona u određivanju položaja GNSS sustavima i u nekim situacijama može doseći vrijednost od 100 m. Ionosfersko kašnjenje prvog reda I , u metrima, predstavljeno je jednadžbom:

$$I = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad (7)$$

Gdje su:

- TEC – ukupni sadržaj elektrona definiran kao broj elektrona u cijevi presjeka 1 m^2 u smjeru širenja signala;
- f – frekvencija signala.

Ionosfersko kašnjenje je proporcionalno količini elektrona sadržanoj na ukupnoj udaljenosti puta, te obrnuto proporcionalno kvadratu prijenosne frekvencije satelitskih signala koji uglavnom utječu na vertikalnu komponentu položaja korisnika (VDOP). Ionosfersko kašnjenje, u usporedbi s troposferskim, značajno više utječe na rasprostiranje signala, mjerenje vremena, određivanje pseudoudaljenosti i određivanje položaja.



Slika 16. Prikaz ionosferskog kašnjenja

Izvor: *Ionospheric Delay* <http://www.wirelessdictionary.com/Wireless-Dictionary-Ionospheric-Delay-Definition.html> (10.01.2022.)

Na Slici 16. prikazano je kako ionosfersko kašnjenje može utjecati na prijenos GPS signala. Količina ionosferskog kašnjenja varira ovisno o gustoći elektrona, a gustoća elektrona može se razlikovati ovisno o geografskom položaju i aktivnosti sunčevih pjega. Također, količina ionosferskog kašnjenja različita je za različite GPS frekvencije.

S obzirom da je ionosfersko kašnjenje obrnuto proporcionalno kvadratu prijenosne frekvencije satelitskih signala, mjerenjem pseudoudaljenosti istodobno na dvije (L1 i L2) ili više frekvencija ono se može značajno ukloniti, od 95 % do 99 %, ovisno o izvoru.²⁸ Najjednostavniji način je korištenje emitiranih modela koji se prenose u satelitskoj navigacijskoj poruci, poput Klobuchar i NeQuick modela. Ipak, ti modeli mogu ispraviti oko 50% RMS (engl. *Root Mean Square* – RMS) pogrešaka ionosferskog kašnjenja, a čak i

²⁸ Brčić, D., op. cit., p. 47

najtočniji teoretski model može ispraviti samo do 80%. Za potrebe ovog istraživanja, korišten je Klobuchar model koji je u nastavku detaljnije opisan.

Klobucharov model temelji se na dnevnoj dinamici ukupnog sadržaja elektrona iznad korisnika. Može se opisati konstantnom vrijednošću ionosferskog kašnjenja tijekom noćnih sati i kosinusnom krivuljom tijekom dana. Koeficijenti Klobucharovog modela definiraju se temeljem Sunčeve aktivnosti, a ažuriraju se jednom dnevno. Postoje četiri pokazatelja koji definiraju Klobucharov model, a to su:

- Konstantna vrijednost tijekom noćnih sati,
- Amplituda kosinusne komponente,
- Faza kosinusne komponente,
- Period kosinusne komponente.

Klobucharov algoritam glasi:²⁹

$$t_{iV} \begin{cases} t_n + A \cdot \cos \left[\frac{2\pi - (t - t_0)}{P} \right] \text{ (dan)} \\ t_n, \text{ ako } \left[\frac{2\pi - (t - t_0)}{P} \right] \geq \frac{\pi}{2} \text{ (noć)} \end{cases} \quad (8)$$

Gdje je:

- t_{iV} – vertikalno ionosfersko kašnjenje;
- t_n – noćna vrijednost ionosferskog kašnjenja;
- A – vršna vrijednost ionosferskog kašnjenja (amplituda);
- P – period kosinusne komponente;
- t – lokalno vrijeme za koje se računa ionosfersko kašnjenje;
- t_0 – konstantni fazni pomak.

A i P pokazatelji definirani su Klobucharovim α_n i β_n koeficijentima:³⁰

²⁹ Brčić, D., op. cit., p. 61

³⁰ Brčić, D., op. cit., p. 61

$$A = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi^n; \quad P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi^n \quad (9)$$

Gdje je:

- φ_n – geomagnetska širina.

Drugi pristup je korištenje mreže dvofrekvencijskih globalnih ili lokalnih prijamnika za procjenu korekcija ionosfere u mrežnom modelu. Ova mreža obično procjenjuje vertikalni ukupni sadržaj elektrona (engl. *Vertical Total Electron Content* - VTEC). VTEC vrijednosti izračunavaju se iz TEC vrijednosti dobivenih s bilo kojeg drugog kuta satelita u odnosu na zenit. Dobivene TEC vrijednosti odnose se na ukupni sadržaj elektrona gdje je zenitni kut satelita različit od 0, te ih je potrebno pretvoriti u odgovarajuće vertikalne ekvivalente. Ako jednofrekvencijski prijamnik ima sposobnost primanja ovih ispravaka, modeliranje ionosferskih pogrešaka biti će točnije od korištenja emitiranih modela.³¹

3.2.2.2. Troposfersko kašnjenje

Troposfera označava najniži dio atmosfere, koji se proteže od Zemljine površine do maksimalne visine od 20 km iznad razine mora. Do troposferskog kašnjenja dolazi zbog promjene brzine širenja signala uslijed promjena u temperaturi, tlaku i relativnoj vlažnosti neutralne atmosfere te međusobnog položaja korisničkog prijamnika i satelita. Ovaj dio atmosfere sastoji se od suhih plinova i vodene pare. Budući da se radi o lomnom sloju, troposfera također odgađa GNSS signale. Međutim, troposfera je također i električno neutralan sloj, što znači da je nedisperzivna za neke GNSS frekvencije.

Troposfersko kašnjenje ima dvije komponente: vlažnu (mokru) i hidrostatsku (suhu). Vlažnu je teško modelirati, ali srećom, ona čini samo 10 % kašnjenja. Hidrostatska komponenta, koja je odgovorna za ostatak kašnjenja (oko 90 %), može se lakše modelirati.

³¹ M. Karaim, M. Elsheikh, and A. Noureldin: "GNSS Error Sources", in *Multifunctional Operation and Application of GPS*, 2018. <https://www.intechopen.com/chapters/60049> (10.01.2022.)

Ovisno o nadmorskoj visini, troposfersko kašnjenje dodaje otprilike 2,5 m do 25 m mjerenjima raspona. Troposfersko kašnjenje je frekvencijski neovisno, stoga se, za razliku od ionosferskog kašnjenja ne može ukloniti kombiniranjem mjerenja iz L1 i L2 GPS signala, već samo upotrebom modela i/ili opservacija. Utjecaj troposferskog kašnjenja kod jednofrekvencijskih GPS prijamnika umanjuje se modeliranjem hidrostatske (suhe) i vlažne (mokre) komponente kašnjenja, pri čemu se kod hidrostatske komponente primjenjuju zakoni idealnih plinova dok je za vlažnu komponentu potreban proračun meteoroloških parametara.

Za smanjenje ukupnog troposferskog kašnjenja, prilikom određivanja položaja do preciznosti od jednog metra može se koristiti nekoliko modela, poput Hopfieldovog i Saastamoinenovog modela. Ovi modeli obično izračunavaju kašnjenje u zenitu (za kut nadmorske visine = 0), a zatim koriste funkciju mapiranja za dobivanje ukupnog nagiba kosine, ovisno o kutu nadmorske visine satelita. Za primjene kojima je potrebna veća razina točnosti u procjeni troposferske pogreške, modelira se suha komponenta, dok se zenitna mokra komponenta procjenjuje kao dodatna nepoznanica u navigacijskom filtru. Za potrebe ovog istraživanja, korišten je Saastamoinen model koji je u nastavku detaljnije opisan.

Standardni model Saastamoinen obično se koristi pri izračunavanju suhog kašnjenja s obzirom na podatke o površinskom tlaku. Na određenoj nadmorskoj visini odnos između suhog kašnjenja i tlaka je linearan, a na razini mora promjena tlaka od 1 mbar odgovara promjeni kašnjenja od oko 2,3 mm. U nedostatku podataka o lokalnom tlaku, globalni modeli suhog kašnjenja mogu biti relativno precizni s obzirom na zemljopisnu širinu, visinu elipsoida i dana u godini. Tlak može varirati do oko +/- 5 %, što dovodi do usporedivih pogrešaka u modeliranom suhom kašnjenju. Jednadžba za Saastamoinen model za izračun troposferskog kašnjenja glasi:³²

$$Tr = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - \tan^2 z \right] \quad (5)$$

³² Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., op. cit., p. 135

Gdje je:

- Tr – troposfersko kašnjenje [m];
- z – zenitni kut satelita;
- p – atmosferski pritisak [mb];
- T – temperatura [K];
- e – djelomični pritisak vodene pare [mb].

Došlo je do promjene modela troposferskog kašnjenja nakon što je Saastamonien u izvornu formulu uvrstio vrijednosti parametra koji ovise o visini na kojoj se promatrač nalazi, te zenitnom kutu, pa stoga ona glasi:³³

$$Tr = \frac{0,002277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \cdot \tan^2 \cdot z \right] + \delta R \quad (6)$$

Gdje B i δR predstavljaju korekcijske parametre koji se dobivaju iz interpolacijske tablice.

3.2.3. Pokazatelji svemirskog vremena

Svemirsko vrijeme označava fizičko i pojavno stanje prirodnog svemirskog okruženja, uključujući Sunce te međuplanetarna i planetarna okruženja. Cilj s njime povezane discipline je opažanje, razumijevanje i predviđanje stanja Sunca, planetarnih i međuplanetarnih okruženja i njihovih poremećaja, uz obraćanje posebne pažnje potencijalnim utjecajima tih poremećaja na biološke i tehnološke sustave.

Pokazatelji svemirskog vremena dijele se na:³⁴

- Solarne pokazatelje,
- Geomagnetske pokazatelje,
- Ionosferske pokazatelje.

³³ Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., op. cit., p. 135

³⁴ Brčić, D., op. cit., p. 41

Svaki od navedenih pokazatelja dodatno se sastoji od više pokazatelja ovisno o načinu mjerenja i pojavi čiji se intenzitet mjeri.

Postoje dva osnovna pokazatelja sunčeve aktivnosti, a to su broj Sunčevih pjega (engl. *Sun Spot Number* - SSN) i solarno radio zračenje (engl. *Solar Flux*- SF). Dva navedena pokazatelja vrlo dobro koreliraju jedan s drugim, odnosno solarno radio zračenje proporcionalno prati broj Sunčevih pjega, a broj Sunčevih pjega mijenja se unutar Solarnog ciklusa aktivnosti.

Tablica 4. Odnos broja sunčevih pjega i sunčeve aktivnosti

Broj Sunčevih pjega (SSN)	Solarna aktivnost
> 250	Ekstremna
150 – 250	Vrlo snažna
80 - 150	Snažna
40 - 80	Umjerena
20 - 40	Slaba
0 - 20	Vrlo slaba

Izvor: Izrada autora prema Scherer, K., et al.: *Space Weather The Physics Behind a Slogan*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.

Broj Sunčevih pjega može se prikazati pomoću empirijskog izraza:³⁵

$$R = k * (10 * g + i) \quad (10)$$

Gdje je:

- R – broj Sunčevih pjega;
- k – faktor redukcije zbog kvalitete instrumenta, opažачa i atmosferskih uvjeta;
- g – broj grupa pjega;
- i – broj pojedinačnih pjega na vidljivoj strani Sunca.

³⁵ *What is the Sunspot Number?* <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/2/3/3> (12.11.2021.)

Broj Sunčevih pjega kao indeks može se definirati na dnevnoj bazi, ali se zbog velikih dnevnih varijacija obično uzima prosjek tijekom dužih razdoblja, najčešće na mjesečnoj ili godišnjoj bazi. Broj sunčevih pjega glatko varira ucrtavajući napredak solarnog ciklusa. S druge strane, dnevni i mjesečni prosjek pokazuju znatne varijacije u odnosu na godišnju krivulju. Ova varijacija je posljedica naleta brzog rasta solarne regije često povezanog sa sunčevim bakljama i drugim zanimljivim događajima.³⁶

Solarno radio zračenje mjeri se na valnoj duljini od 10,7 cm i frekvenciji od 2800 MHz, a izražava se jedinicama toka Sunčevog zračenja (engl. *Solar Flux Unit* – SFU). Izvori solarnog radio zračenja su sunčeva kromosfera i korona.

Pokazatelji geomagnetske aktivnosti opisuju kratkoročne i dugotrajne promjene u geomagnetskom polju koje uzrokuju neki vanjski poremećaji. Postoji pet službenih pokazatelja geomagnetske aktivnosti: Kp, Ap, aa, DST (engl. *Disturbance Storm Time* - DST) i AE.³⁷ Kp pokazatelj predstavlja srednju vrijednost Ks pokazatelja prikupljenih s trinaest stanica smještenih između 48° i 63° geomagnetske širine. Vrijednosti Kp pokazatelja su prirodni brojevi čija se vrijednost kreće između 0 do 9, pri čemu 0 predstavlja najmanje, a 9 najveće poremećaje. Ap pokazatelj predstavlja linearni ekvivalent K pokazatelja. Aa pokazatelj služi za opisivanje amplitude globalne geomagnetske aktivnosti tijekom trosatnih vremenskih intervala, a proračunat je pomoću K pokazatelja i dobiven s dva međusobno antipodalna magnetska opservatorija. Dst pokazatelj označava satni pokazatelj koji služi za opisivanje stanja uzbude magnetosfere na području geomagnetskog ekvatora, a mjeri se magnetogramima s četiri opservatorija smještena na niskim geomagnetskim širinama. AE označava satni pokazatelj aktivnosti auroralnog mlaza, a dobiva se od opservatorija smještenih u polarnim područjima.

³⁶ *What is the Sunspot Number?* <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/2/3/3> (12.11.2021.)

³⁷ Ibidem.

Tablica 5. Povezanost vrijednosti geomagnetskih pokazatelja sa stanjem svemirskog vremena

Razina	Dst [nT]	Kp, ap	Ae [nT]
Jaka	$Dst \leq -100$	$Kp \geq 7$ $ap \geq 111$	$Ae \geq 1000$
Umjerena	$-50 \leq Dst \leq -100$	$5 \leq Kp \leq 7$ $56 \leq ap \leq 111$	$500 \leq Ae \leq 1000$
Slaba	$-30 \leq Dst \leq -50$	$4 \leq Kp \leq 5$ $32 \leq ap \leq 56$	$200 \leq Ae \leq 500$
Mirna	$Dst \geq -30$	$Kp < 4$ $ap < 32$	$Ae < 200$

Izvor: Izrada autora prema Echer, E., Gonzalet, W. D., Alves, M. V.: *On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures*, 4. izdanje, Space Weather, 2006.

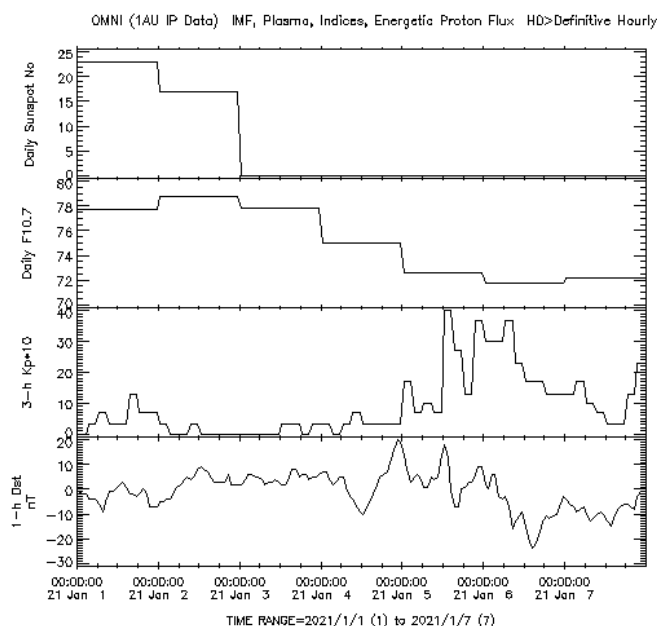
Posljednju skupinu pokazatelja svemirskog vremena čine ionosferski pokazatelji koji služe za opisivanje područja najveće gustoće elektrona, karakteristične točke u ionosferi, ukupni profil gustoće elektrone, te trodimenzionalni prikaz medija kojim se šire signali. Ako je frekvencija vala manja od frekvencije plazme val se odbija od ionosferskog sloja, dok u drugom slučaju, ako je frekvencija veća, val prolazi kroz pojedini sloj što znači da će val upućen sa Zemlje proći kroz slojeve ionosfere sve do trenutka u kojem je na visinu na kojoj je frekvencija plazme jednaka frekvenciji vala, nakon čega slijedi njegovo reflektiranje prema Zemlji. Kod modeliranja ionosferskih maša često se koristi propagacijski pokazatelj M(3000)F2 koji predstavlja omjer najviše iskoristive frekvencije signala koji može biti primljen na udaljenosti od 3000 km i kritične frekvencije f0F2.

4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju prikazana je metodologija koja je primijenjena prilikom pripreme i provedbe istraživanja te prikaza rezultata. Priprema istraživanja započinje procesom odabira vremenskog razdoblja istraživanja, svemirskim uvjetima određenog razdoblja te pokazateljima svemirskog vremena. Zatim slijedi odabir geografskog područja istraživanja odnosno referentnih stanica na temelju kojih se istraživanje vršilo. Svi korišteni alati prilikom istraživanja opisani su u daljnjem djelu poglavlja kao i statistički i grafički prikazi koji su bili korišteni za obradu i prikaz rezultata.

4.1. VREMENSKO RAZDOBLJE ISTRAŽIVANJA

Prvi kriterij određen za potrebe ovoga istraživanja bio je vremenski period. Analiza je provedena u razdoblju od 01. siječnja 2021. do 07. siječnja 2021. Tijekom cijelog promatranog perioda prevladavali su mirni svemirski uvjeti bez značajnijih poremećaja.



Slika 17. Pokazatelji svemirskog vremena

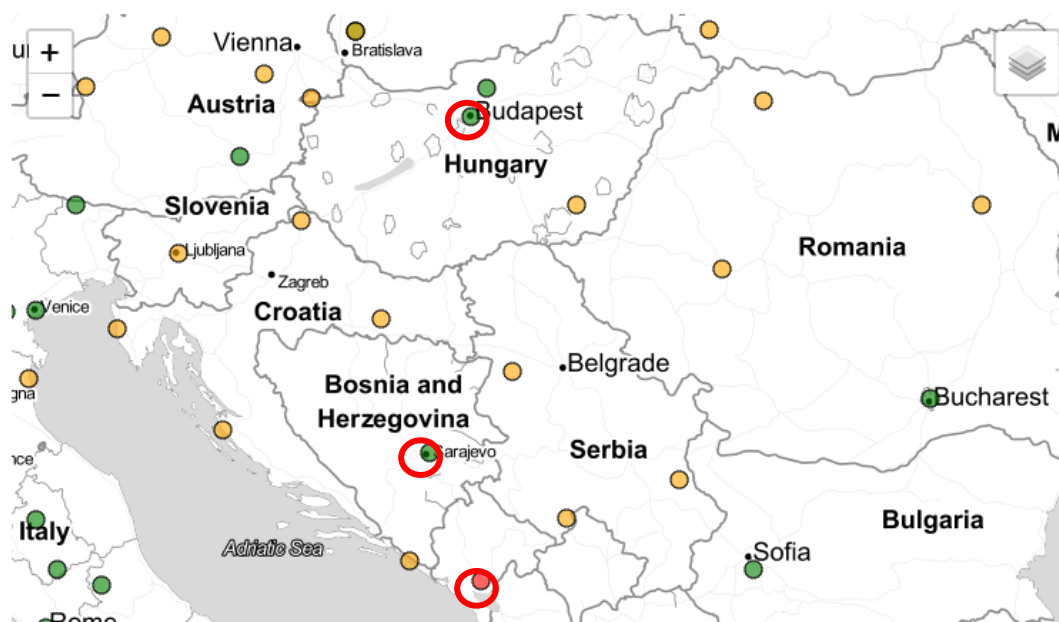
Izvor: National Aeronautics and Space Administration <https://www.nasa.gov/> (06.09.2021.)

Na Slici 17. prikazani su pokazatelji koji su se koristili za utvrđivanje uvjeta svemirskog vremena te njihove vrijednosti. Može se vidjeti kako je svemirsko vrijeme tijekom promatranog razdoblja bilo mirno. Uvjeti su prikazani dnevnim brojem Sunčevih

pjega, Solarnim radio zračenjem, Kp indeksom i DST indeksom. Na vrhu slike nalaze se vrijednosti dnevnog broja sunčevih pjega. Prvog dana istraživanja zabilježena je slaba solarna aktivnost (broj sunčevih pjega 20-40), dok je u ostatku istraživanja zabilježena vrlo slaba solarna aktivnost (broj sunčevih pjega 0-20). Vrijednosti za solarno radio zračenje kreću se između 50-300 SFU gdje niske vrijednosti ukazuju na to da će maksimalna korisna frekvencija biti niska te ukupni uvjeti neće biti dobri. Trosatne Kp vrijednosti su kroz cijeli period istraživanja imale vrijednosti ispod 40 ukazujući na jako male poremećaje te mirno stanje svemirskog vremena. Dst vrijednosti kretale su se između 20 i -20 te također ukazivale na mirno stanje svemirskog vremena.

4.2. GEOGRAFSKO PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

Nakon što se odredio vremenski period i ustanovilo da su svemirski uvjeti za vrijeme tog perioda bili mirni, prešlo se na odabir geografskog područja istraživanja. Istraživanje se vršilo na tri različite referentne stanice: BUTE00HUN (Budimpešta, Mađarska), SRJV00BIH (Sarajevo, Bosna i Hercegovina) i DGOR00MNE (Podgorica, Crna Gora). Prvotni plan bio je napraviti istraživanje na isključivo hrvatskim stanicama, međutim, za potrebe istraživanja, uvjet za odabir stanica bio je da posjeduju podatke od svih četiri promatranih GNSS sustava, što nijedna hrvatska stanica nije zadovoljila.



Slika 18. Geografsko područje istraživanja i prikaz položaja korištenih EUREF stanica

Izvor: EUREF Permanent GNSS Network <https://www.epncb.oma.be/> (06.09.2021.)

Na Slici 18. označene su promatrane stanice u Budimpešti, Sarajevu i Podgorici.

Referentne koordinate stanica preuzete su sa stalne GNSS mreže potkomisije za regionalni referentni okvir za Europu. EUREF mreža potkomisija Međunarodnog udruženja za geodeziju (engl. *International Association of Geodesy - IAG*), a bavi se definiranjem, realizacijom i održavanjem Europskog geodetskog referentnog okvira. Cilj EUREF mreže je uspostaviti jedinstveni geodetski podatak i konstantnu mrežu referentnih postaja u cijeloj Europi. EUREF se pokreće dobrovoljnim sporazumom znanstvenih organizacija i nacionalnih geodetskih/geografskih agencija zemalja članica koje su spremne zamijeniti svoje naslijeđene nacionalne geodetske podatke jedinstvenim europskim referentnim okvirom i pridružiti se svojim nacionalnim mrežama referentnih postaja u zajedničkoj europskoj mreži. Mandat EUREF mreže je poticanje i koordiniranje aktivnosti zemalja članica koje se financiraju i upravljaju na nacionalnoj razini. Osnovan je 1987. godine u Vancouveru te ima više od 30 zemalja članica.

Tablica 6. Podaci promatranih stanica

ID stanice	Lokacija	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina (m)	GNSS
BUTE00HUN	Budimpešta, Mađarska	47,4809	19,0565	180,9	GPS+GLO+GAL+BDS+SBAS
SRJV00BIH	Sarajevo, Bosna i Hercegovina	43,8679	18,4139	645,1	GPS+GLO+GAL+BDS
DGOR00MNE	Podgorica, Crna Gora	42,4175	19,2034	95,0	GPS+GLO+GAL+BDS

Izvor: Izrada autora

U Tablici 6. prikazani su svi podaci promatranih stanica, njihov ID, lokacija, geografska širina, geografska duljina, visina te pokrivenost pojedinim GNSS sustavom.

4.3. KORIŠTENE METODE PRILIKOM ISTRAŽIVANJA

Za potrebe kreiranja položajnih zapisa koristile su se opservacijske i navigacijske datoteke koje su preuzete i arhivirane u RINEX (engl. *Receiver Independent Exchange Format* - RINEX) formatu.³⁸

Verzija 3.XX RINEX formata sastoji se od tri vrste ASCII datoteka:³⁹

- Opservacijskih datoteka,
- Navigacijskih datoteka,
- Meteoroloških datoteka.

Svaka vrsta datoteke sastoji se od odjeljka zaglavlja i odjeljka podataka. Odjeljak zaglavlja sadrži globalne informacije za cijelu datoteku i stavlja se na početak datoteke. Odjeljak zaglavlja sadrži oznake zaglavlja u stupcima 61-80 za svaki redak koji se nalazi u tom odjeljku. Ove oznake su obvezne i moraju se pojaviti točno onako kako je navedeno u ovim opisima i primjerima.

Format je optimiziran za minimalne zahtjeve prostora neovisno o broju različitih vrsta promatranja određenog prijavnika ili satelitskog sustava. U računalnim sustavima koji dopuštaju promjenjive duljine zapisa, zapisnici promatranja mogu se držati kratkim koliko je moguće. Prazna polja se mogu ukloniti iz zapisa. Ne postoji ograničenje za maksimalnu duljinu zapisa za opservacijske datoteke.

Svaka opservacijska i meteorološka datoteka u osnovi sadrži podatke s jednog mjesta i jednu sesiju. Počevši s verzijom 2, RINEX također omogućuje uključivanje opservacijskih datoteka iz više od jednog mjesta koje je kasnije zauzeo roving prijavnik u brzim statičkim ili kinematičkim primjenama. Iako verzija 2 i novije verzije dopuštaju umetanje određenih zapisa zaglavlja u odjeljak s podacima, ne preporučuje se spajanje podataka s više od jednog prijavnika (ili antene) u istu datoteku, čak i ako se podaci ne preklapaju na vrijeme.

³⁸ "RINEX – The Receiver Independent Exchange Format", 2018. <http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf> (13.10.2021.)

³⁹ Ibidem.

Prilikom razmjene podataka s više primatelja, nije ekonomično uključivanje identičnih poruka satelitske navigacije prikupljenih s različitih prijamnika nekoliko puta. Stoga se navigacijska datoteka s jednog prijamnika može razmjenjivati ili sastavljati u stvorenu navigacijsku datoteku koja sadrži nepotrebne informacije s nekoliko prijamnika kako bi se napravila najpotpunija datoteka.

Navigacijske datoteke RINEX verzije 3 mogu sadržavati navigacijske poruke nekoliko satelitskih sustava: GPS, GLONASS, Galileo, kvazizenitni satelitski sustav (engl. *Quasi Zenith Satellite System* - QZSS), BDS, i Indijski regionalni navigacijski satelitski sustav (engl. *Indian Regional Navigation Satellite System* - IRNSS).

U području geodezije, format neovisne razmjene prijamnika (RINEX) format je razmjene podataka za sirove podatke satelitskih navigacijskih sustava. To omogućuje korisniku naknadnu obradu primljenih podataka kako bi se dobio precizniji rezultat - obično s ostalim podacima nepoznatima izvornom prijamniku.

Pomoću RTKLIB programskog alata dobivale su se položajne datoteke (.pos) i grafički prikazi odstupanja u horizontalnoj ravnini. Za potrebe istraživanja kreirane su .pos datoteke za svaki GNSS sustav zasebno te kombinacija svih četiri sustava. Također su se koristila četiri različita scenarija s obzirom na ionosfersku i troposfersku korekciju, pa stoga postoji scenarij s modeliranim korekcijama, scenarij sa nemodeliranim korekcijama, scenarij sa modeliranom isključivo ionosferskom korekcijom i scenarij sa modeliranom isključivo troposferskom korekcijom. Nakon izrade svih datoteka, podaci su statistički obrađeni i grafički prikazani korištenjem programskog okruženja R.

R je programski jezik i okruženje slobodnog softvera za statističko računanje i grafiku. R se široko koristi među statističarima i rudarima podataka za razvoj statističkog softvera i analize podataka. Ankete, istraživanja o rudarstvu podataka i studije baza podataka znanstvene literature pokazuju znatan porast popularnosti.

Rstudio je integrirano razvojno okruženje za R, a dostupan je u dva formata: Rstudio Desktop uobičajena je radna površina, dok Rstudio Server radi na udaljenom poslužitelju i omogućuje pristup Rstudiju putem web preglednika. Rstudio djelomično je napisan na programskom jeziku C++ i koristi Qt okvir za svoje grafičko korisničko sučelje. Veći

postotak koda napisan je na Javi. JavaScript je također među jezicima koji se koriste. Rad na Rstudiju započeo je oko prosinca 2010., a prva javna beta verzija (v0.92) službeno je najavljena u veljači 2011.

Određivanje pseudoudaljenosti $P_{r,i}^S$ može se izraziti korištenjem vremena prijama signala \bar{t}_r (s) koje mjeri prijammnik i vremena odašiljanja signala \bar{t}^S (s) kao:⁴⁰

$$P_{r,i}^S = c(\bar{t}_r - \bar{t}^S) \quad (11)$$

Gdje je:

- $P_{r,i}^S$ – kodno mjerenje pseudoudaljenosti [m];
- c – brzina svjetlosti [m/s];
- \bar{t}_r – vrijeme prijama navigacijskog signala unutar prijammnika [s];
- \bar{t}^S – vrijeme odašiljanja navigacijskog signala [s].

Jednadžba se može napisati korištenjem geometrijskog raspona ρ_r^S između satelitskih i prijammnih antena, odstupanja prijammnika i satelitskog sata dt_r , dT^S , ionosferskog i troposferskog kašnjenja $I_{r,i}^S$, T_r^S i pogreške mjerenja ε_P kao:⁴¹

$$\begin{aligned} P_{r,i}^S &= c \left((t_r + dt_r(t_r)) - (t^S + dT^S(t^S)) \right) + \varepsilon_P \\ &= c(t_r - t^S) + c(dt_r(t_r) - dT^S(t^S)) + \varepsilon_P \\ &= (\rho_r^S + c(dt_r(t_r) - dT^S(t^S)) + I_{r,i}^S + T_r^S + \varepsilon_P) \\ &= \rho_r^S + c(dt_r(t_r) - dT^S(t^S)) + I_{r,i}^S + T_r^S + \varepsilon_P \end{aligned} \quad (12)$$

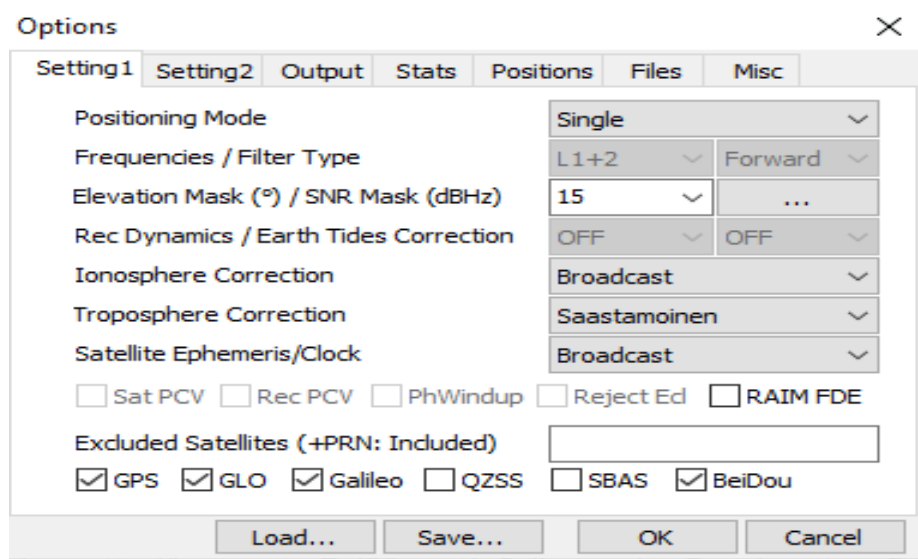
Gdje su:

- dt_r – odstupanje korisničkog sata u trenutku t [s];
- dT^S – odstupanje satelitskog sata u trenutku t [s];
- ε_P – pogreške mjerenja pseudoudaljenosti [m];
- ρ_r^S – geometrijska udaljenost između prijammne i satelitske antene [m];
- $I_{r,i}^S$ – ionosfersko kašnjenje [m];

⁴⁰ RTKLIB manual, p. 137

⁴¹ Ibidem, p. 138

- T_r^S – troposfersko kašnjenje [m].



Slika 19. Postavke programskog alata RTKPOST prilikom postupka proračuna položajnih zapisa

Izvor: RTKLIB programski alat RTKPOST

Na Slici 19. prikazane su korištene postavke u aplikaciji RTKPOST koji je dio programskog paketa RTKLIB. Korišteno je jednofrekvencijsko određivanje položaja, i nova verzija RINEX formata koja omogućuje kombinirane podatke, a utjecaj troposferskog i ionosferskog kašnjenja pri proračunu pogreške pozicioniranja procjenjivan je za svaki od sustava zasebno. Najčešći kutovi maskiranja se obično kreću između 10 - 15° zato što bi postavljanjem previsokog kuta maskiranja moglo doći do isključenja nekih satelita potrebnih za postizanje potrebnog minimuma od četiri, stoga je kut maskiranja postavljen na 15°. Interval zapisa podešen je na 60 sekundi. Za ispravku ionosferskog kašnjenja korišten je Klobucharov model, dok je troposfersko kašnjenje modelirano Saastamoinen modelom ispravke.

Također treba napomenuti da su nakon definiranja referentnih koordinata, te računanja odstupanja, geografska širina i dužina bile izražene u lučnim vrijednostima te ih se trebalo pretvoriti u metre, dok su vrijednosti nadmorskih visina, odnosno njezinih odstupanja bili izraženi u metrima. Za pretvorbu lučnih vrijednosti u metre koristile su se sljedeće formule:

$$\cos_lat < - (\cos(lat*pi/180)) \quad (13)$$

$$\text{lat}_m < -(d_{\text{lat}} \cdot 60 \cdot 1852) \quad (14)$$

$$\text{lon}_m < -(d_{\text{lon}} \cdot 60 \cdot 1852 \cdot \cos \text{lat}) \quad (15)$$

Gdje su:

- lat_m – odstupanje geografske širine u metrima;
- d_{lat} – odstupanje geografske širine;
- lon_m – odstupanje geografske dužine u metrima;
- d_{lon} – odstupanje geografske dužine.

4.3.1. Statistička analiza

Kod naknadne obrade proračunatih položajnih zapisa, uspoređivane su srednje vrijednosti odnosno prosječne vrijednosti odstupanja pojedine varijable, koje se izračunavaju sljedećom formulom:⁴²

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (16)$$

Gdje je:

- x_i – vrijednost numeričkog obilježja;
- N – ukupan broj statističkih jedinica.

Zatim su se uspoređivale i standardne devijacije koje su pokazale mjeru raspršenosti odstupanja, odnosno prosječno odstupanje od srednje vrijednosti. Standardna devijacija izražena je u apsolutnim vrijednostima, bez obzira na negativne predznake, a može se izračunati pomoću sljedeće formule:⁴³

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (17)$$

Gdje je:

⁴² Zenzerović, Z.: *Predavanja iz statistike*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, p. 19

⁴³ Ibidem, p. 26

- x_i – vrijednost numeričkog obilježja;
- \bar{X} – aritmetička sredina;
- N – ukupan broj statističkih jedinica.

Također su se uspoređivale i interkvartilne razlike. Interkvartilna razlika predstavlja razliku između donjeg i gornjeg kvartila, odnosno raspon unutar kojeg se nalazi središnjih 50% podataka.⁴⁴

$$Q_2 = Q_3 - Q_1 \quad (18)$$

Gdje je:

- IKR – interkvartilna razlika (IKR = Q_2);
- Q_1 – donji kvartil;
- Q_3 – gornji kvartil.

Omjer donjeg kvartila je 1:3 te 25% statističkog niza ima vrijednost manju ili jednaku donjem kvartilu, a 75% statističkog niza ima vrijednost veću ili jednaku donjem kvartilu. Donji kvartil izračunava se na temelju sljedeće formule:⁴⁵

$$Q_1 = L_1 + \frac{\frac{N}{4} - \sum f_1}{fkvar} \cdot i \quad (19)$$

Gdje je:

- L_1 – donja granica kvartilnog razreda;
- N – ukupan broj statističkih jedinica;
- $\sum f_1$ – zbroj frekvencija u kumulativnom nizu do kvartilnog razreda;
- $fkvar$ – frekvencija kvartilnog razreda;
- i – veličina kvartilnog razreda.

⁴⁴ *Interquartile Range (IQR) Formula* <https://www.cuemath.com/interquartile-range-formula/> (13.11.2021.)

⁴⁵ Zenzerović, Z., op. cit., p. 29

S druge strane, gornji kvartil ima omjer 3:1 te 75% statističkog niza ima vrijednost manju ili jednaku gornjem kvartilu, odnosno 25% statističkog niza ima vrijednost veću ili jednaku gornjem kvartilu. Gornji kvartil izračunava se na temelju sljedeće formule:⁴⁶

$$Q_3 = L_1 + \frac{\frac{3N}{4} - \sum f_1}{fkvart} \cdot i \quad (20)$$

Dakle, IKR govori kolika je raspršenost podataka oko medijana. Ako se većina podataka nalazi blizu medijana, IKR vrijednosti će biti male, a u slučaju da je raspršenost, odnosno odstupanje podataka od medijana bilo veće/šire, to će IKR vrijednosti biti veće.

Osim IKR, promatrane su i geometrijske razdiobe točnosti (DOP vrijednosti). Ovisno o prostornoj raspodjeli satelita, DOP vrijednosti se mijenjaju, a time i područje određenosti, odnosno neodređenosti položaja. Kao što je već spomenuto postoje različite komponente DOP pogrešaka, a to su:

- GDOP – geometrijska razdioba točnosti,
- PDOP – prostorna komponenta geometrijske razdiobe točnosti,
- TDOP – vremenska komponenta geometrijske razdiobe točnosti,
- HDOP – horizontalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti,
- VDOP – vertikalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti.

Uz DOP vrijednosti, uspoređivani su i brojevi vidljivih satelita te je razmatrana korelacija između DOP i NSAT vrijednosti za svaku referentnu stanicu i svaki promatrani GNSS sustav uz ponovnu kombinaciju svih sustava.

4.3.2. Grafički prikazi

Za potrebe prikaza statističkih parametara pogreške položaja te njihovog ponašanja u promatranom razdoblju korišteni su vremenski nizovi, distribucija učestalosti odstupanja (histogrami) te horizontalna odstupanja.

⁴⁶ Zenzerović, Z., op. cit., p. 29

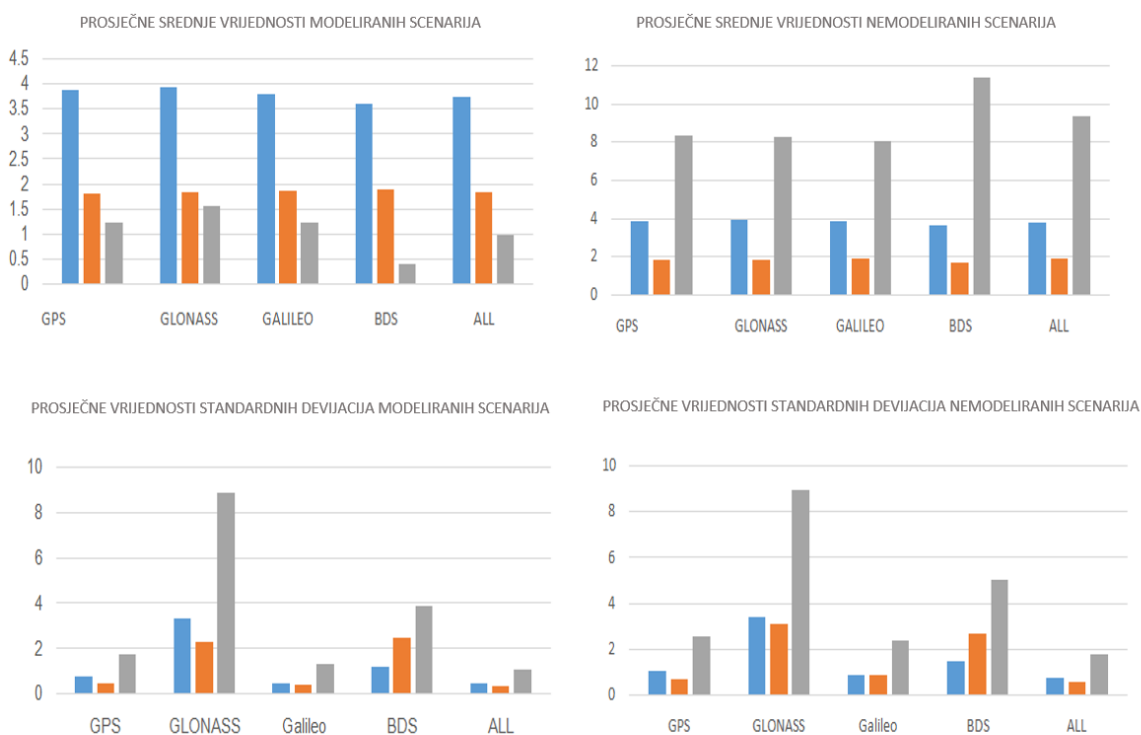
Histogram pomaže grupirati numeričke vrijednosti u intervale. To je grafički prikaz učestalosti određene pojave između dva intervala koji definiraju skupinu. Odstupanje u metrima prikazano je na apscisi koja ima vrijednosti nezavisne varijable, dok se na ordinati vrijednosti zavisne varijable može vidjeti učestalost mjerenja unutar položajne (.pos) tablice. Histogram pokazuje distribuciju podataka iz kojih se lako određuju najčešće vrijednosti koje su u ovom slučaju bile odstupanje položaja.

Također su korišteni i grafovi horizontalnih odstupanja koji su klasični primjer prikazivanja odstupanja, kao i horizontalnog položaja koji je definiran geografskom širinom i geografskom duljinom. Pomoću funkcije „*smoothscatter*“, uz prikaze odstupanja širine i duljine, prikazana je i gustoća. Paleta plave boje pokazuje učestalost odstupanja po pojedinim točkama. Što je nijansa plave boje tamnija, to je više opažanja bilo na tome mjestu. Tako se od dvodimenzionalnog grafa, pomoću plave palete dobila i treća dimenzija, odnosno njezina dubina, koja prikazuje gdje su odstupanja bila najveća.⁴⁷

⁴⁷ Brčić D.: *Predavanja iz primjenjene satelitske navigacije*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka

5. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Za potrebe rada provedeno je istraživanje u periodu od sedam dana s pet različitih scenarija s obzirom na GNSS sustav, te četiri scenarija s obzirom na modeliranje ionosferskih i troposferskih korekcija. Razmatrane su srednje vrijednosti, standardne devijacije, IKR, te DOP vrijednosti s tri različite EUREF stanice. Svi navedeni statistički prikazi prikazani su i grafički u nastavku.



Slika 20. Prosječne srednje vrijednosti i vrijednosti standardnih devijacija modeliranih i nemodeliranih scenarija položajnih zapisa

Izvor: Izrada autora

Na Slici 20. prikazane su prosječne srednje vrijednosti i standardne devijacije sve tri promatrane stanice. S lijeve strane prikazane su srednje vrijednosti i standardne devijacije modeliranih zapisa, dok se s desne strane nalaze nemodelirani rezultati.

Tablica 7. Prosječne srednje vrijednosti modeliranih i nemodeliranih scenarija

Srednje vrijednosti modeliranih scenarija	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	3,8733	1,8179	1,2417
GLONASS	3,9187	1,8305	1,5711
Galileo	3,7943	1,8688	1,2283
BDS	3,5842	1,8966	0,3998
All	3,7357	1,8443	0,9964
Srednje vrijednosti nemodeliranih scenarija			
GPS	3,8213	1,8377	8,3205
GLONASS	3,9281	1,8425	8,2752
GALILEO	3,8341	1,8983	8,0459
BDS	3,6242	1,6536	11,3718
ALL	3,774	1,8533	9,3252

Izvor: Izrada autora

U Tablici 7. prikazane su prosječne srednje vrijednosti modeliranih i nemodeliranih scenarija.

Kod modeliranih rezultata najveće srednje vrijednosti uočene su kod geografskih širina, gdje su kod svakog sustava kao i kod kombinacije svih sustava te vrijednosti bile ispod 4 m. Vrijednosti geografskih dužina kretale su se kod svih sustava oko 2 m, dok su vrijednosti nadmorske visine bile najniže, a posebice kod BDS sustava.

Promatrajući zatim nemodelirane rezultate, može se uočiti utjecaj koji su korekcije ionosfere i troposfere imale na vrijednosti nadmorske visine. Uspoređujući modelirane i nemodelirane rezultate, primjećuje se da su vrijednosti geografskih širina i geografskih dužina ostale relativno jednake, dok su vrijednosti nadmorskih visina od najnižih vrijednosti kod modeliranih rezultata dosegle najveće vrijednosti kod nemodeliranih rezultata. Interesantno je istaknuti da je BDS sustav imao najniže vrijednosti nadmorske visine kod

modeliranih rezultata, a zatim najveće kod nemodeliranih. Detaljniji grafički uvid ovih rezultata obrađen je u nastavku poglavlja na individualnim stanicama.

Posječne standardne devijacije modeliranih i nemodeliranih scenarija prikazane su u Tablici 8.

Tablica 8. Prosječne vrijednosti standardnih devijacija modeliranih i nemodeliranih scenarija

Vrijednosti standardnih devijacija modeliranih scenarija	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	0,7853	0,5141	1,7337
GLONASS	3,325	2,317	8,8261
Galileo	0,4826	0,4348	1,3433
BDS	1,1926	2,481	3,8566
All	0,4882	0,3655	1,0823
Vrijednosti standardnih devijacija nemodeliranih scenarija			
GPS	1,0247	0,6714	2,5506
GLONASS	3,3596	3,0707	8,917
Galileo	0,8161	0,8262	2,372
BDS	1,435	2,6642	5,0053
ALL	0,732	0,5362	1,7196

Izvor: Izrada autora

Što se tiče standardnih devijacija, kod svih sustava i u modeliranim i u nemodeliranim scenarijima, najveće vrijednosti imala je nadmorska visina. Valja istaknuti da je GLONASS sustav imao znatno veće vrijednosti geografske širine, a posebice nadmorske visine u odnosu na ostale sustave, praćen BDS sustavom koji je imao najveće vrijednosti zabilježene kod geografskih dužina. S druge strane, slične vrijednosti zabilježene su kod sustava GPS i Galileo, te kombinacije svih sustava gdje su sve vrijednosti bile relativno male.

Isključivanjem korekcija uočava se blagi porast svih vrijednosti, za razliku od srednjih vrijednosti gdje su zabilježene drastične promjene u vrijednostima isključivo nadmorskih visina.



Slika 21. Modelirane i nemodelirane srednje vrijednosti promatranih stanica

Izvor: Izrada autora

Promatrajući rezultate po pojedinačnim stanicama može se vidjeti koliko je koja stanica utjecala na prethodno prikazane prosjeke GNSS sustava.

S lijeve strane prikazani su modelirani rezultati srednjih vrijednosti po pojedinačnim stanicama, a nemodelirani s desne.

Tablica 9. Modelirane srednje vrijednosti promatranih stanica

Srednje vrijednosti - Budimpešta	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	-5,9429	-2,8796	1,4879
GLONASS	-5,8228	-2,8854	1,7113
Galileo	-6,0511	-2,8339	1,4953
BDS	-7,0048	-2,6614	0,3847
ALL	-6,2572	-2,7773	1,1782
Srednje vrijednosti - Sarajevo			
GPS	4,5259	0,0965	0,6575
GLONASS	4,6937	0,1014	1,0475
Galileo	4,3585	0,1782	0,6470
BDS	3,3599	0,4175	-0,4591
ALL	4,1833	0,2296	0,3039
Srednje vrijednosti - Podgorica			
GPS	1,1510	2,4775	1,5797
GLONASS	1,2397	2,5046	1,9544
Galileo	0,9733	2,5944	1,5427
BDS	-0,3878	2,6110	0,3554
ALL	0,7665	2,5261	1,5070

Izvor: Izrada autora

Tablica 10. Nemodelirane srednje vrijednosti promatranih stanica

Srednje vrijednosti - Budimpešta	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	-5,9751	-2,8507	-8,2006
GLONASS	-5,9521	-2,8636	-8,0111
Galileo	-6,1740	-2,8120	-7,8923
BDS	-7,2331	-2,7436	-10,6409
ALL	-6,2679	-2,7743	-9,2421
Srednje vrijednosti - Sarajevo			
GPS	4,4337	0,1361	-8,5798
GLONASS	4,6282	0,1228	-8,5122
Galileo	4,3483	0,2074	-8,4624
BDS	3,3697	0,3303	-10,7916
ALL	4,2198	0,2294	-9,6998
Srednje vrijednosti - Podgorica			
GPS	1,0550	2,5263	-8,1810
GLONASS	1,2039	2,5412	-8,3023
Galileo	0,9802	2,6756	-7,7829
BDS	-0,2699	1,8869	-12,6829
ALL	0,8344	2,5563	-9,0338

Izvor: Izrada autora

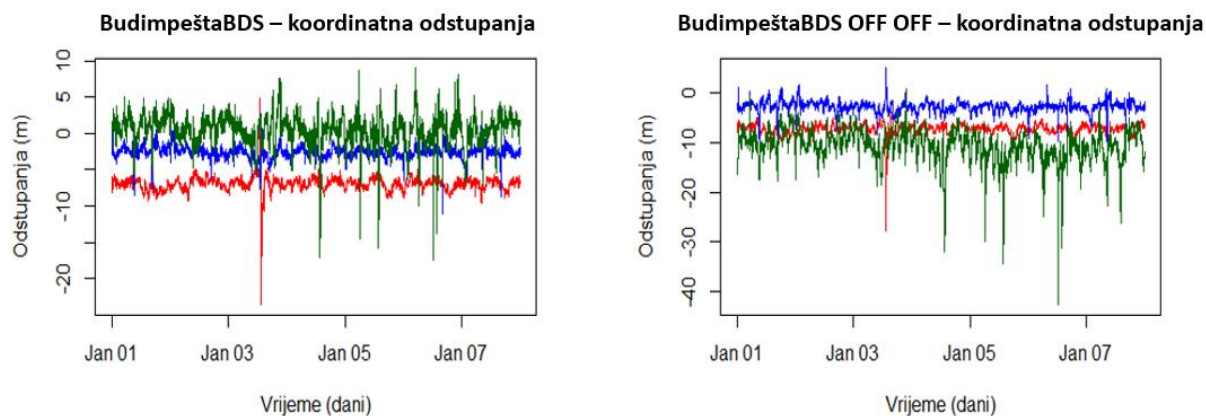
U prvom redu prikazani su rezultati za stanicu u Budimpešti. Pri modeliranim rezultatima negativne vrijednosti sa svim sustavima imale su geografska širina i geografska dužina dok je samo nadmorska visina imala pozitivne rezultate. Najveće vrijednosti zabilježene su kod geografske širine, zatim geografske dužine te najmanje vrijednosti kod nadmorske visine. Kod nemodeliranih rezultata nadmorska visina je također imala negativne

vrijednosti, štoviše, s najmanjih vrijednosti je skočila na najveće, dok su vrijednosti geografske širine i geografske dužine ostale relativno nepromijenjene. Također, BDS je ponovno imao najmanje vrijednosti nadmorske visine u modeliranom scenariju, a najveće u nemodeliranom. Isti slučaj bio je vidljiv i u prosječnim rezultatima svih stanica.

Promatrajući rezultate iz Sarajeva, situacija je nešto drugačija. Izuzevši vrijednosti nadmorske visine kod BDS sustava, sve ostale vrijednosti bile su pozitivnog predznaka pri modeliranom scenariju. Najveće vrijednosti ponovno su zabilježene kod geografskih širina, dok su vrijednosti geografskih dužina i nadmorskih visina bile relativno male. Kod nemodeliranih scenarija geografska širina i dužina ponovno su ostale relativno jednake dok je nadmorska visina imala značajan porast, te je pri svim sustavima imala negativne vrijednosti.

Kod Podgorice je u modeliranom scenariju geografska dužina imala najveće vrijednosti, praćena s nadmorskim visinama te su najniže vrijednosti zabilježene u geografskim širinama. Kod nemodeliranih rezultata se ponovno uočio isti slučaj, geografske širine i dužine su ostale relativno jednake dok je drastična razlika zabilježena u vrijednostima nadmorskih visina.

Jednaki slučaj se ponavljao kako u prosječnim vrijednostima, tako i u vrijednostima pojedinačnih stanica. U svim slučajevima isključivanjem korekcija geografska širina i dužina ostale su slične dok je velika razlika uočena u vrijednostima nadmorskih visina, posebice kod BDS sustava koji je u modeliranim scenarijima imao najniže vrijednosti nadmorske visine, a zatim isključivanjem korekcija najveće. Stoga se obavila detaljnija analiza i uvid u BDS sustav kroz navedeni period od sedam dana.

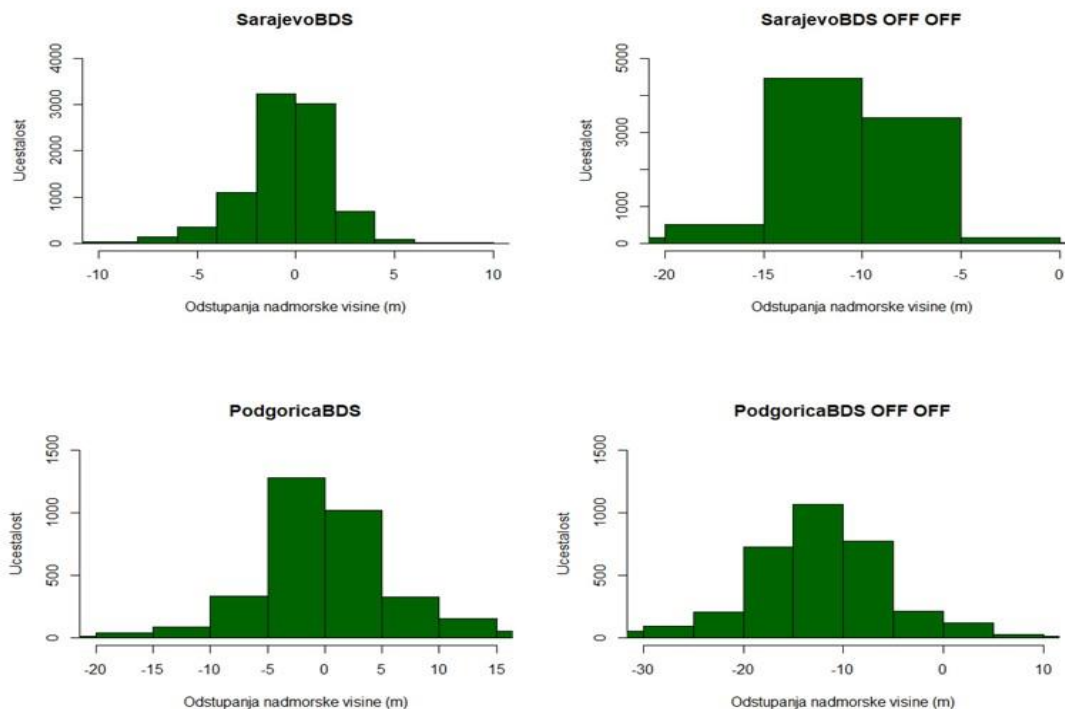


Slika 22. Vremenski nizovi modeliranih i nemodeliranih zapisa sustava BDS opaženih na stanici Budimpešta

Izvor: Izrada autora

Na Slici 22. prikazani su vremenski nizovi sustava BDS opaženih na stanici Budimpešta. S lijeve strane se nalaze modelirani rezultati, a s desne nemodelirani. Na osi apscisa prikazan je vremenski period u danima između 01. - 07. siječnja, dok se na osi ordinata nalaze odstupanja u metrima. Crvenom bojom je označeno kretanje geografske širine, plavom geografske dužine i zelenom nadmorske visine.

U modeliranom scenariju, geografska širina je imala najveća odstupanja koja su bila relativno konstantna isključujući povećana odstupanja koja su nastupila u jednom periodu 03. siječnja. Iz grafikona se može vidjeti da je geografska dužina imala veća odstupanja od nadmorske visine, što se ne bi moglo zaključiti promatrajući vremenske nizove. Geografska dužina imala je konstantna odstupanja kroz cijeli period dok je nadmorska visina imala značajna odstupanja između 04.- 07. siječnja. U nemodeliranom scenariju ponovila su se značajnija odstupanja nadmorske visine u navedenom periodu, međutim ona su bila više nego dva puta veća nego ona u modeliranom scenariju. Također, prosječna, konstantna odstupanja nadmorske visine bila su najveća od sve tri varijable.

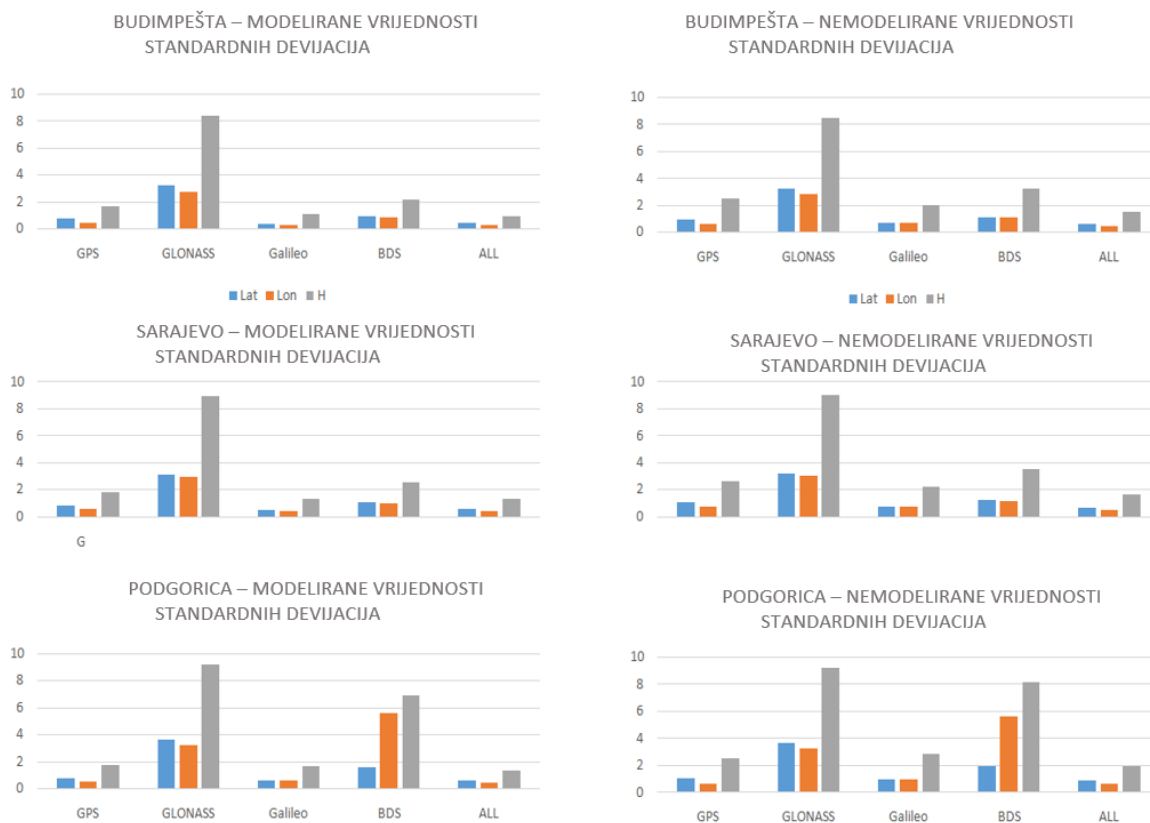


Slika 23. Histogrami nadmorske visine modeliranih i nemodeliranih scenarija opaženih na stanicama Podgorica i Sarajevo

Izvor: Izrada autora

Iako je na vremenskim nizovima izgledalo drugačije, grafikoni su prikazali kako je nadmorska visina imala najmanje vrijednosti u modeliranom scenariju. Iz tog razloga, obrađeni su i histogrami nadmorske visine kako bi se vidjelo kolika je bila učestalost pojedinih odstupanja. Na Slici 18. su tako prikazani histogrami nadmorske visine na stanicama Podgorica i Sarajevo. Prikazani su histogrami modeliranih i nemodeliranih scenarija.

Kao što je već napomenuto, vremenski nizovi su izgledali kao da je nadmorska visina imala veća odstupanja od geografske širine, međutim, histogrami nam pokazuju da unatoč tome što je došlo do većih odstupanja, ta odstupanja su bila iznimno rijetka. Na primjeru stanice u Sarajevu, većina učestalosti smještena je oko 0, dok su odstupanja od 10 m skoro pa nepostojeća. Isti slučaj je vidljiv i na primjeru stanice u Podgorici, gdje je većina odstupanja smještena u rasponu od 5 m do -5 m.



Slika 24. Standardne devijacije modeliranih i nemodeliranih vrijednosti odstupanja na promatranim stanicama

Izvor: Izrada autora

S druge strane, isključivanjem korekcija ponovno se može vidjeti koliko su se odstupanja nadmorske visine povećala, pa je tako najveća učestalost kod stanica u Sarajevu i Podgorici između 10 i 15 m, a najveća odstupanja sezala su i preko 40 m.

Tablica 11. Modelirane vrijednosti standardne devijacije promatranih stanica

BUDIMPEŠTA SD	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	0,7759	0,4899	1,7227
GLONASS	3,2229	2,7972	8,3932
Galileo	0,4145	0,3544	1,1426
BDS	0,9801	0,9075	2,1899
ALL	0,4540	0,3093	0,9667
SARAJEVO SD			
GPS	0,8267	0,5499	1,7907
GLONASS	3,1242	2,9301	8,9321
Galileo	0,4704	0,3939	1,2747
BDS	1,0648	0,9561	2,5220
ALL	0,5386	0,4385	1,2950
PODGORICA SD			
GPS	0,7535	0,5026	1,6877
GLONASS	3,6278	3,2238	9,1530
Galileo	0,5629	0,5563	1,6128
BDS	1,5330	5,5793	6,8580
ALL	0,5386	0,4385	1,2950

Izvor: Izrada autora

Tablica 12. Nemodelirane vrijednosti standardne devijacije promatranih stanica

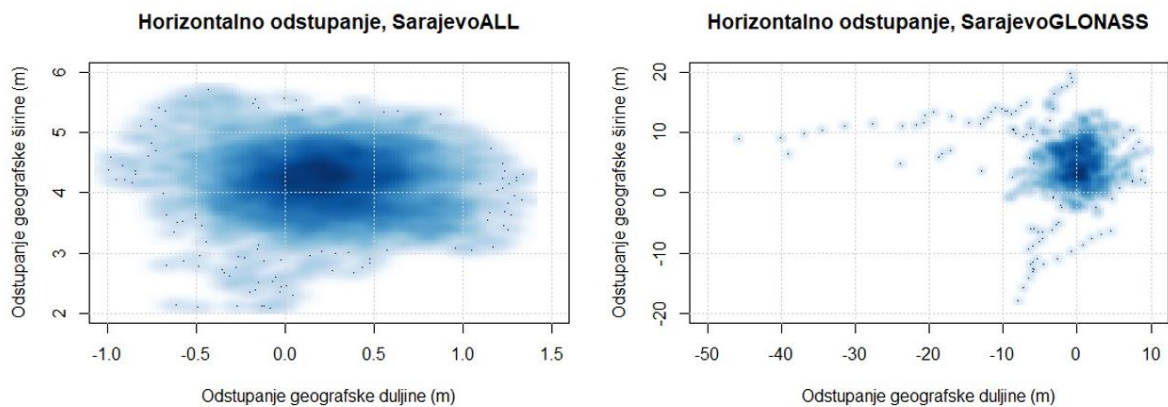
BUDIMPEŠTA SD	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	0,9958	0,6556	2,5048
GLONASS	3,2660	2,8751	8,4582
Galileo	0,7171	0,7608	2,0110
BDS	1,1345	1,1446	3,2853
ALL	0,6598	0,4737	1,5646
SARAJEVO SD			
GPS	1,0467	0,6968	2,6128
GLONASS	3,1565	3,0628	9,0079
Galileo	0,7495	0,7557	2,2513
BDS	1,1892	1,1761	3,5150
ALL	0,6731	0,4932	1,6638
PODGORICA SD			
GPS	1,0315	0,6619	2,5342
GLONASS	3,6564	3,2743	9,2851
Galileo	0,9816	0,9621	2,8538
BDS	1,9814	5,6720	8,2157
ALL	0,8631	0,6418	1,9304

Izvor: Izrada autora

Promatrajući standardne devijacije pojedinačnih stanica s modeliranim i nemodeliranim scenarijem može se uočiti da su vrijednosti s isključivanjem korekcija blago porasle u sve tri varijable, za razliku od srednjih vrijednosti gdje su vrijednosti nadmorskih visina imale puno značajniji porast.

U Budimpešti i Sarajevu GLONASS je imao najveće vrijednosti odstupanja kod sve tri varijable u oba scenarija. Svi ostali sustavi, uključujući i kombinaciju svih sustava, imali su slična, relativno niska prosječna odstupanja od srednjih vrijednosti.

Kod rezultata u Podgorici se može primijetiti da je BDS imao iznimni porast vrijednosti geografskih dužina i nadmorskih visina u usporedbi s ostalim stanicama. Unatoč tome, GLONASS je i dalje imao najveće vrijednosti geografskih širina i nadmorskih visina, dok je BDS imao najveće vrijednosti geografskih dužina. Isti slučaj opaža se u grafikonu prosječnih vrijednosti standardnih devijacija, ali se grafikonom po pojedinačnim stanicama ukazalo da su vrijednosti standardnih devijacija BDS sustava u Podgorici utjecale na prosječne vrijednosti standardnih devijacija, te da je BDS sustav u Budimpešti i Sarajevu imao slične rezultate kao i GPS, Galileo i kombinacija svih sustava koji su imali relativno male vrijednosti sve tri varijable u oba scenarija.



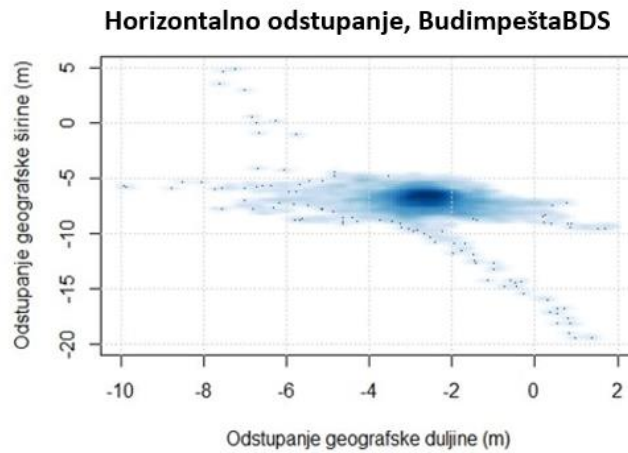
Slika 25. Usporedba horizontalnih odstupanja modeliranog scenarija na stanici Sarajevo

Izvor: Izrada autora

Na Slici 25. prikazana su horizontalna odstupanja modeliranog scenarija stanice u Sarajevu. S lijeve strane prikazana su odstupanja geografske širine i geografske duljine kombinacije svih sustava koji je zabilježio najniže vrijednosti standardnih devijacija, a s desne strane odstupanja sustava GLONASS gdje su zabilježene najveće vrijednosti standardnih devijacija.

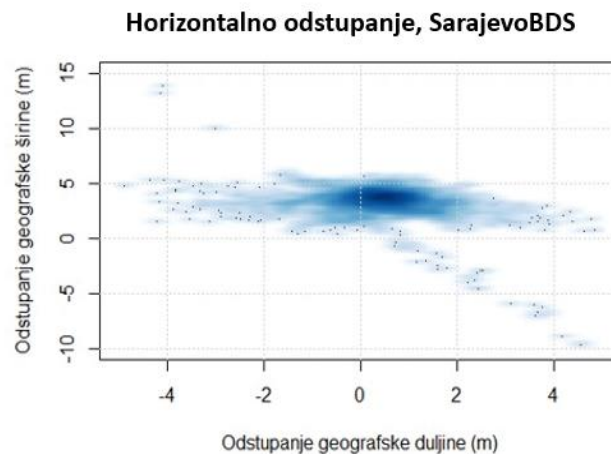
Raspon odstupanja geografske širine kod kombinacije svih sustava kretao se od 2 do 6 m dok je isti raspon kod GLONASS sustava bio od 20 do -20 m. Također, raspon odstupanja geografske duljine kod kombinacije svih sustava kretao se između 1.5 i -1 m, a kod GLONASS sustava između 10 i -50 m. Uzimajući u obzir da su ova dva sustava imala

slične rezultate srednjih vrijednosti može se zaključiti da je učestalost većih odstupanja GLONASS sustava relativno mala. Međutim i s relativno malom učestalosti odstupanja, mjera raspršenosti odstupanja, odnosno prosječno odstupanje od srednje vrijednosti geografskih širina i duljina bilo je više nego sedmerostruko veće u odnosu na ostale sustave.



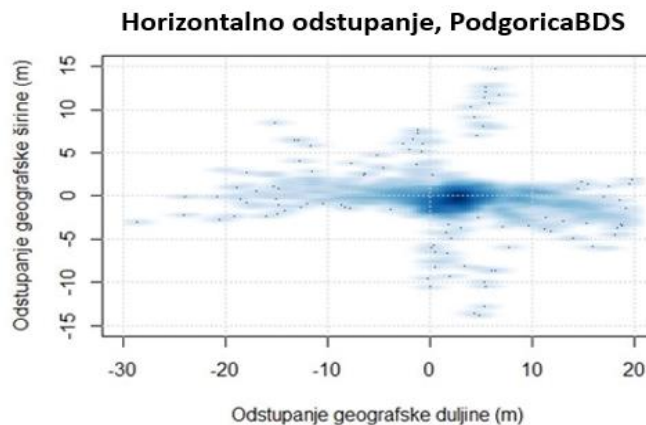
Slika 26. Usporedba horizontalnog odstupanja BDS sustava na stanici Budimpešta (a)

Izvor: Izrada autora



Slika 27. Usporedba horizontalnog odstupanja BDS sustava na stanici Sarajevo (b)

Izvor: Izrada autora



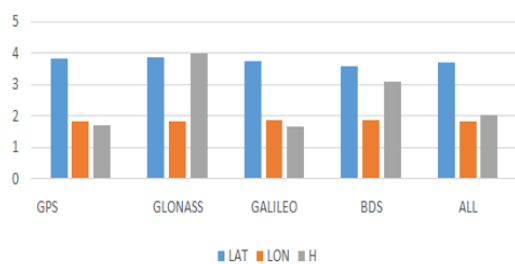
Slika 28. Usporedba horizontalnog odstupanja BDS sustava na stanici Podgorica (c)

Izvor: Izrada autora

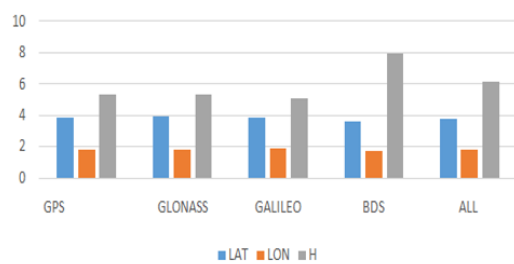
Usporedbom horizontalnih odstupanja BDS sustava svih stanica dobila se jasnija slika i uvid koliko se zapravo razlikovala mjera raspršenosti odstupanja geografskih duljina između Podgorice i preostale dvije stanice. Dok je sveukupni raspon odstupanja geografskih duljina stanica Budimpešte i Sarajeva bio 4 m do -10 m, ista odstupanja su kod Podgorice imala raspon od 20 m do -30 m. Odstupanja geografskih širina nisu se previše razlikovala, kod Budimpešte i Sarajeva raspon je bio 25 m dok je isti kod Podgorice bio svega 30 m.

Isključivanjem korekcija vrijednosti standardnih devijacija se nisu previše promijenile dok je kod srednjih vrijednosti nadmorska visina imala i 20 puta veći porast u nekim slučajevima. Koliko je na spomenute vrijednosti utjecala ionosferska korekcija, a koliko troposferska, istraženo je u nastavku ovoga rada.

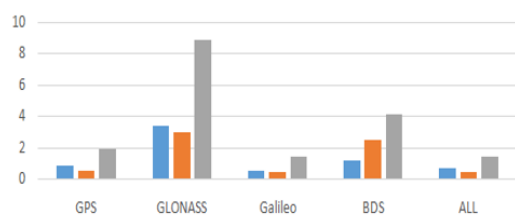
PROSJEČNE SREDNJE VRIJEDNOSTI NEMODELIRANE IONOSFERE



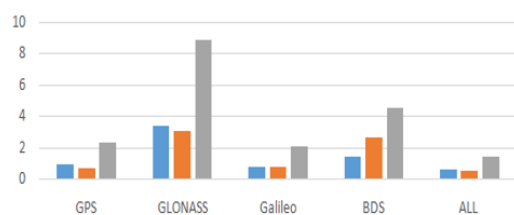
PROSJEČNE SREDNJE VRIJEDNOSTI NEMODELIRANE TROPOSFERE



PROSJEČNE VRIJEDNOSTI STANDARDNIH DEVIJACIJA NEMODELIRANE IONOSFERE



PROSJEČNE VRIJEDNOSTI STANDARDNIH DEVIJACIJA NEMODELIRANE TROPOSFERE



Slika 29. Prosječne srednje vrijednosti i standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere

Izvor: Izrada autora

Na Slici 29. prikazani su grafikoni prosječne srednje vrijednosti i prosječne vrijednosti standardnih devijacija svih stanica. S lijeve strane prikazan je scenarij s isključenim ionosferskim modelom, a s desne strane scenarij s isključenim troposferskim modelom.

Tablica 13. Prosječne srednje vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere

MEAN IONO OFF	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	3,8354	1,8288	1,722
GLONASS	3,8895	1,8389	1,345
GALILEO	3,7659	1,8816	1,678
BDS	3,6262	1,8692	3,1002
ALL	3,7181	1,8554	2,0489
MEAN TROPO OFF			
GPS	3,8609	1,8246	5,2909
GLONASS	3,9571	1,8348	5,3502
GALILEO	3,8608	1,8855	5,1189
BDS	3,5831	1,6805	7,9555
ALL	3,7981	1,8417	6,142

Izvor: Izrada autora

Tablica 14. Prosječne vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere

SD IONO OFF	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	0,8361	0,5185	1,8783
GLONASS	3,3282	2,9777	8,8303
Galileo	0,4845	0,4288	1,3902
BDS	1,1745	2,4862	4,0738
ALL	0,6479	0,4235	1,4158
SD TROPO OFF			
GPS	0,9102	0,6183	2,2667
GLONASS	3,346	3,043	8,8611
Galileo	0,7091	0,706	2,0459
BDS	1,3804	2,5911	4,5487
ALL	0,6031	0,4709	1,3748

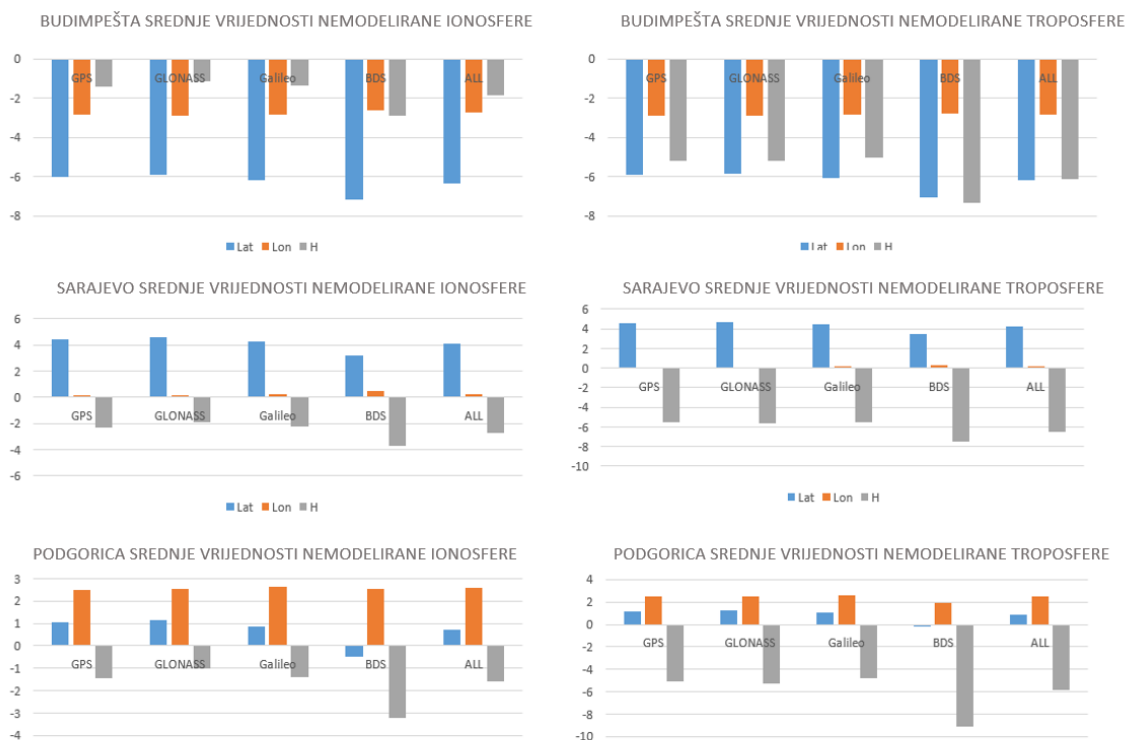
Izvor: Izrada autora

U ranijoj usporedbi modeliranog i nemodeliranog scenarija dalo se uočiti da se srednje vrijednosti geografskih širina i duljina nisu previše razlikovale, te da su vrijednosti nadmorskih visina jedine imale značajniji porast. Uspoređujući prikazane scenarije, može se zaključiti da je za većinu odstupanja nadmorske visine odgovoran bio troposferski učinak koji je imao više nego duplo veći utjecaj u odnosu na ionosferski učinak za sve sustave osim GLONASS sustava gdje je ta razlika bila nešto manja.

Promatrajući vrijednosti srednjih odstupanja nadmorskih visina, ionosferski učinak imao je svoj najveći utjecaj na BDS sustavu. S druge strane, troposferski učinak bio je značajan kod svih sustava, a svoj najveći utjecaj je također imao kod BDS sustava.

Što se tiče standardnih devijacija, prosječne vrijednosti standardnih devijacija ponovno se nisu pretjerano razlikovale. Troposferski učinak bio je nešto veći za sve 3 varijable u usporedbi s ionosferskim učinkom, međutim, razlike su bile relativno male.

GLONASS sustav je ponovno imao najveće vrijednosti, praćen BDS sustavom dok su svi ostali sustavi imali slične, relativno male vrijednosti.



Slika 30. Srednje vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere promatranih stanica

Izvor: Izrada autora

Na Slici 30. prikazane su srednje vrijednosti odstupanja po pojedinačnim stanicama s dva različita scenarija. S lijeve strane prikazan je scenarij s isključenim ionosferskim modelom dok se s desne strane nalaze vrijednosti s isključenim troposferskim modelom.

Tablica 15. Srednje vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere promatranih stanica

BUDIMPEŠTA MEAN	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	-6,0243	-2,8531	-1,4326
GLONASS	-5,9179	-2,8615	-1,1224
Galileo	-6,1548	-2,8075	-1,3554
BDS	-7,1880	-2,6342	-2,9016
ALL	-6,3383	-2,7416	-1,8270
SARAJEVO MEAN			
GPS	4,4319	0,1241	-2,3081
GLONASS	4,6012	0,1256	-1,8797
Galileo	4,2625	0,2066	-2,2653
BDS	3,2177	0,4436	-3,7120
ALL	4,1137	0,2589	-2,7440
PODOGRICA MEAN			
GPS	1,0501	2,5091	-1,4253
GLONASS	1,1494	2,5295	-1,0323
Galileo	0,8804	2,6308	-1,4133
BDS	-0,4729	2,5298	-3,2269
ALL	0,7023	2,5657	-1,5758

Izvor: Izrada autora

Tablica 16. Srednje vrijednosti scenarija nemodelirane troposfere promatranih stanica

BUDIMPEŠTA MEAN	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	-5,8918	-2,8808	-5,2140
GLONASS	-5,8541	-2,8870	-5,1641
Galileo	-6,0645	-2,8387	-5,0184
BDS	-7,0687	-2,7650	-7,3067
ALL	-6,1824	-2,8071	-6,1088
SARAJEVO MEAN			
GPS	4,5321	0,1029	-5,5525
GLONASS	4,7221	0,1003	-5,5780
Galileo	4,4451	0,1787	-5,5274
BDS	3,4946	0,3115	-7,4741
ALL	4,2994	0,1989	-6,5096
PODGORICA MEAN			
GPS	1,1588	2,4900	-5,1062
GLONASS	1,2952	2,5172	-5,3084
Galileo	1,0727	2,6390	-4,8108
BDS	-0,1861	1,9650	-9,0857
ALL	0,9124	2,5190	-5,8077

Izvor: Izrada autora

Kod Budimpešte su ponovno svi sustavi imali negativan predznak vrijednosti, kako u jednom, tako i u drugom scenariju. Najveća odstupanja kod scenarija s isključenim ionosferskim modelom imala je geografska širina, zatim geografska duljina i na kraju nadmorska visina. To je bio slučaj sa svim sustavima osim BDS sustava, gdje je nadmorska visina ipak imala nešto veće vrijednosti u odnosu na geografsku duljinu.

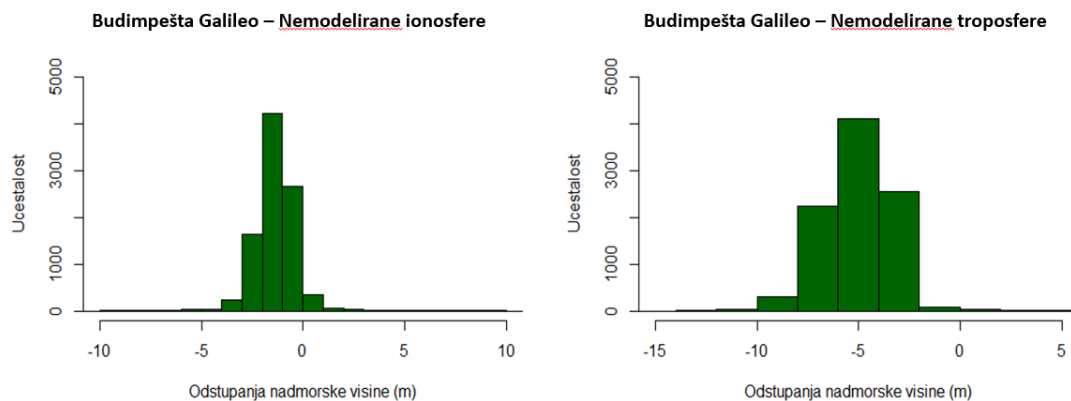
U scenariju s isključenim troposferskim modelom, osim kod BDS sustava gdje je nadmorska visina imala najveća odstupanja, u svim ostalim sustavima geografska širina je ponovno imala najveće vrijednosti, dok je geografska duljina imala uvjerljivo najmanja odstupanja.

Kod Sarajeva je zabilježena nešto drugačija situacija. Nadmorska visina imala je negativan predznak kod svih sustava u oba scenarija, a također je imala i najveća odstupanja kod svih sustava u scenariju s isključenim troposferskim modelom. Najmanje vrijednosti u oba scenarija imala je geografska duljina dok je u scenariju s isključenim ionosferskim modelom ponovno geografska širina imala najveća odstupanja.

Kod Podgorice je u scenariju s nemodeliranom ionosferom najveća odstupanja zabilježila geografska duljina u svim sustavima osim BDS gdje je najveće vrijednosti imala nadmorska visina, dok je geografska širina u prosjeku imala najmanja odstupanja.

U scenariju s nemodeliranom troposferom uvjerljivo najveća odstupanja imala je nadmorska visina, posebice u BDS sustavu gdje su srednja odstupanja prelazila 8 m.

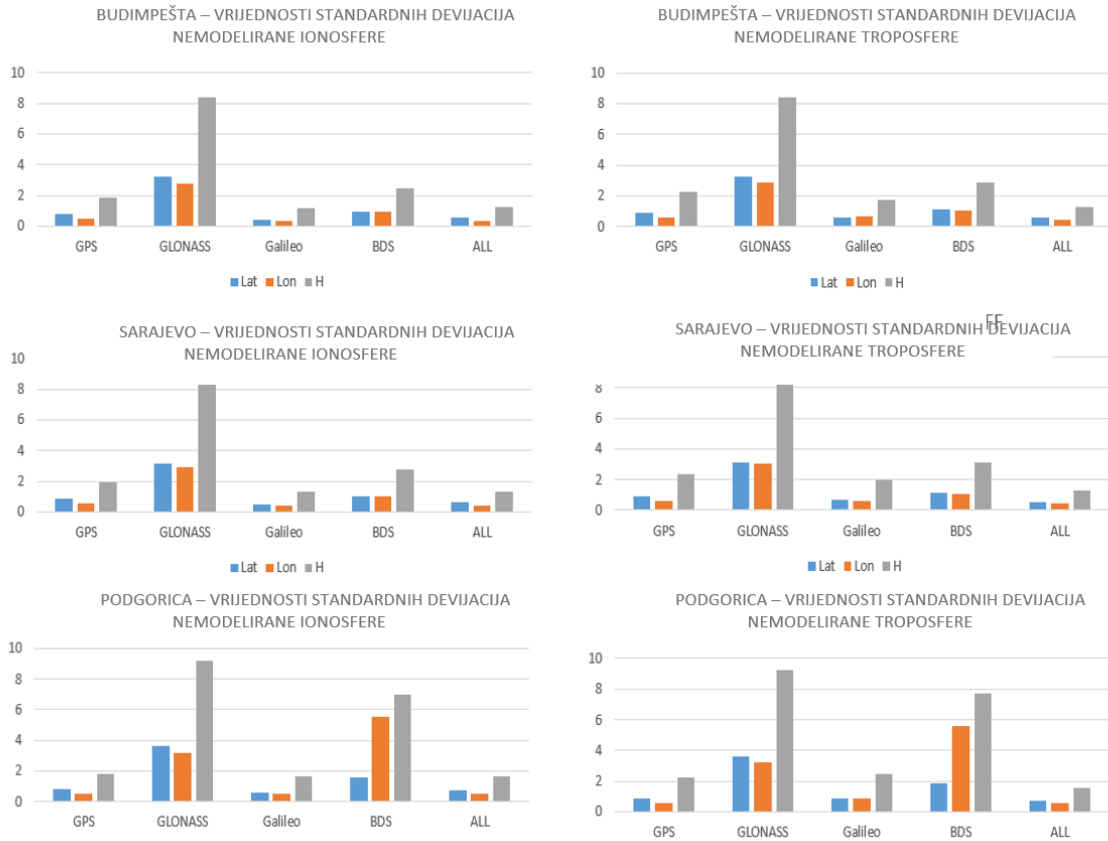
Uspoređujući ova dva scenarija, ponovno se uočilo kako se geografska širina i geografska duljina nisu pretjerano mijenjale ovisno o isključenom modelu, međutim nadmorska visina je isključivanjem troposferskog modela imala višestruko veće vrijednosti odstupanja u odnosu na rezultate nemodelirane ionosfere. Također, BDS sustav je očekivano ponovno bio najviše pogođen isključivanjem modela, posebice kod stanice u Podgorici.



Slika 31. Histogrami nadmorske visine scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere Galileo sustava na stanici Budimpešta

Izvor: Izrada autora

Na Slici 31. prikazani su histogrami nadmorskih visina sustava Galileo na temelju stanice u Budimpešti. S lijeve strane prikazani su rezultati scenarija nemodelirane ionosfere, a s desne scenarija nemodelirane troposfere. Kao što je prikazano ranije, u oba scenarija odstupanja su bila negativna te su imala podjednake učestalosti, međutim može se uočiti kako se najveća odstupanja u scenariju nemodelirane ionosfere kreću oko -2 m dok je u slučaju nemodelirane troposfere najveća učestalost odstupanja kod -5 m. Dakle, isključivanjem troposferskog modela najveća učestalost odstupanja povećala se za skoro 3 puta u odnosu na odstupanja s isključenim ionosferskim modelom.



Slika 32. Vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere promatranih stanica

Izvor: Izrada autora

Standardne devijacije imale su relativno slične vrijednosti u oba scenarija. Kod Budimpešte i Sarajeva, GLONASS je imao uvjerljivo najveća odstupanja sve tri varijable, s najvećim odstupanjima zabilježenim kod nadmorske visine. U svim ostalim sustavima nadmorska visina je također imala najveća odstupanja, dok su geografska širina i duljina imale relativno male vrijednosti u svim sustavima isključujući ranije spomenuti GLONASS.

Tablica 17. Vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere promatranih stanica

BUDIMPEŠTA SD	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	0,8077	0,4940	1,8453
GLONASS	3,2259	2,7900	8,3967
Galileo	0,4017	0,3528	1,1782
BDS	0,9303	0,9413	2,432
ALL	0,5780	0,3558	1,2729
SARAJEVO SD			
GPS	0,8817	0,5563	1,9439
GLONASS	3,1287	2,9327	8,9339
Galileo	0,4830	0,3914	1,3413
BDS	1,0240	0,9901	2,7961
ALL	0,6098	0,3928	1,3320
PODGORICA SD			
GPS	0,8188	0,5053	1,8458
GLONASS	3,6300	3,2103	9,1602
Galileo	0,5688	0,5421	1,6510
BDS	1,5693	5,5272	6,9932
ALL	0,7560	0,5226	1,6424

Izvor: Izrada autora

Tablica 18. Vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane troposfere promatranih stanica

BUDIMPEŠTA SD	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	0,8896	0,6029	2,2317
GLONASS	3,2505	2,8498	8,4073
Galileo	0,6289	0,6358	1,7507
BDS	1,0872	1,0635	2,8496
ALL	0,5548	0,4151	1,2421
SARAJEVO SD			
GPS	0,9357	0,6454	2,3290
GLONASS	3,1422	3,0255	8,9530
Galileo	0,6484	0,6365	1,9384
BDS	1,1614	1,1011	3,0830
ALL	0,5559	0,4380	1,3106
PODGORICA SD			
GPS	0,9054	0,6066	2,2393
GLONASS	3,6452	3,2537	9,2229
Galileo	0,8501	0,8456	2,4487
BDS	1,8927	5,6087	7,7136
ALL	0,6985	0,5596	1,5718

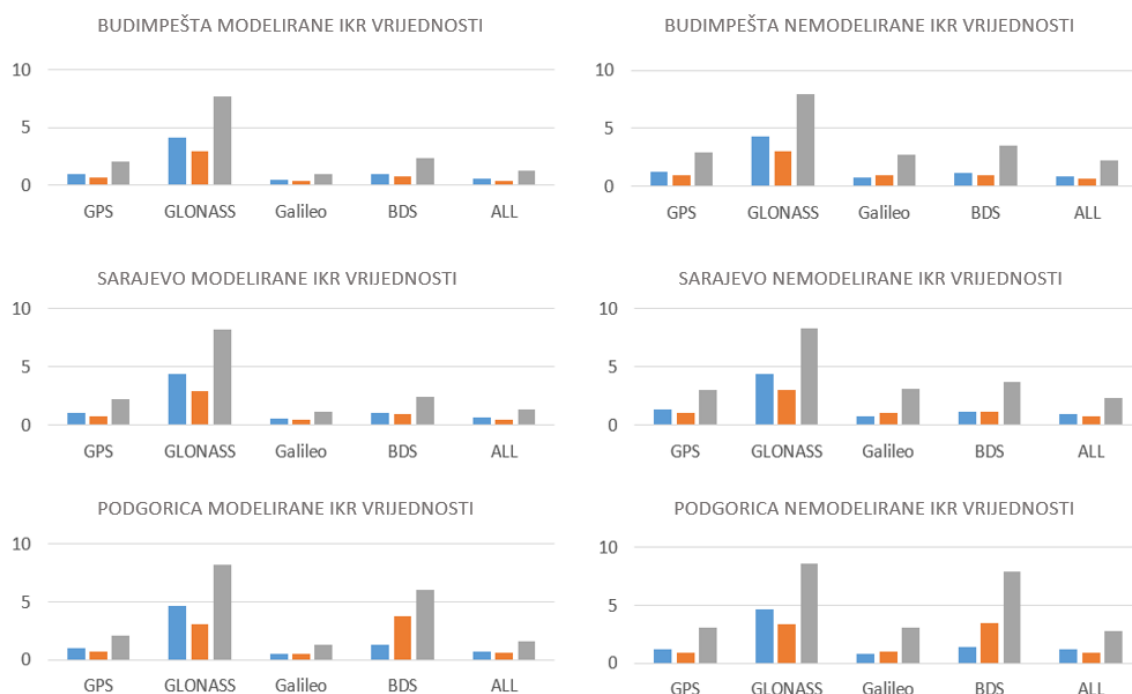
Izvor: Izrada autora

Kod Podgorice je BDS sustav ponovno imao određenih problema koji su ranije bili detaljnije prikazani, pa je tako ponovno zabilježio značajan porast u odstupanjima geografske duljine i nadmorske visine.

Uspoređujući standardne devijacije između prikazana dva scenarija može se uočiti da su vrijednosti svih stanica i sustava bile podjednake s blagim porastom sve tri varijable u scenariju nemodelirane troposfere, uz iznimku vrijednosti nadmorske visine kod

kombinacije svih sustava gdje su isključivanjem troposferskog modela ostvarene nešto manje vrijednosti.

Usporedbom prikazana dva scenarija dobio se uvid koliko je isključivanje pojedinog modela imalo utjecaj na povećanje odstupanja pojedinih varijabla. Iako je isključivanje ionosferskog modela imalo svoj učinak, ipak su puno veća odstupanja bila zabilježena nakon isključivanja troposferskog modela, posebice kod vrijednosti nadmorskih visina. Promatrajući srednje vrijednosti odstupanja, ponovno su najveće promijene zabilježene kod BDS sustava, dok je GLONASS još jednom imao najveća prosječna odstupanja od srednjih vrijednosti.



Slika 33. Modelirane i nemodelirane IKR vrijednosti promatranih stanica

Izvor: Izrada autora

Na Slici 33. prikazane su IKR vrijednosti modeliranog i nemodeliranog scenarija koje pokazuju kolika je bila razlika između donjeg i gornjeg kvartila, odnosno kolika je bila raspršenost podataka oko medijana.

Tablica 19. Modelirane IKR vrijednosti promatranih stanica

BUDIMPEŠTA IKR	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	0,9509	0,6559	2,0989
GLONASS	4,1733	2,9313	7,6465
Galileo	0,5158	0,4067	0,9570
BDS	0,9497	0,8006	2,3855
ALL	0,5965	0,4090	1,2823
SARAJEVO IKR			
GPS	1,0481	0,7749	2,2167
GLONASS	4,3402	2,8923	8,1967
Galileo	0,5281	0,4633	1,1283
BDS	1,0595	0,9574	2,4160
ALL	0,6371	0,4690	1,2789
PODGORICA IKR			
GPS	0,9498	0,6948	2,0965
GLONASS	4,6430	3,0912	8,2081
Galileo	0,5386	0,4727	1,3047
BDS	1,2745	3,7475	5,9980
ALL	0,7367	0,5901	1,5342

Izvor: Izrada autora

Tablica 20. Nemodelirane IKR vrijednosti promatranih stanica

BUDIMPEŠTA IKR	Geografska širina	Geografska dužina	Nadmorska visina
GPS	1,2877	0,9349	2,9186
GLONASS	4,2636	2,9937	7,9600
Galileo	0,7970	0,9660	2,6955
BDS	1,1240	1,0095	3,5320
ALL	0,8783	0,6712	2,2783
SARAJEVO IKR			
GPS	1,2913	1,0027	3,0393
GLONASS	4,3400	3,0412	8,3434
Galileo	0,7530	1,0070	3,0527
BDS	1,1500	1,0961	3,6473
ALL	0,9487	0,6865	2,3433
PODGORICA IKR			
GPS	1,1791	0,9272	3,0666
GLONASS	4,6078	3,3165	8,5501
Galileo	0,8279	0,9950	3,0970
BDS	1,3584	3,4666	7,9002
ALL	1,1720	0,8756	2,7764

Izvor: Izrada autora

Može se uočiti kako IKR vrijednosti imaju slične rezultate kao prethodno prikazane vrijednosti standardnih devijacija, pa je tako GLONASS zabilježio najveće vrijednosti sve 3 varijable u oba scenarija isključujući Podgoricu gdje je BDS ponovno imao značajan porast geografske duljine i nadmorske visine.

Isključivanjem modela došlo je do blagog porasta sve tri varijable, jednako kao i kod standardnih devijacija, međutim razlike su bile minimalne. Nadmorska visina imala je najveće vrijednosti među varijablama u sve tri stanice i sa svim sustavima. Osim sustava

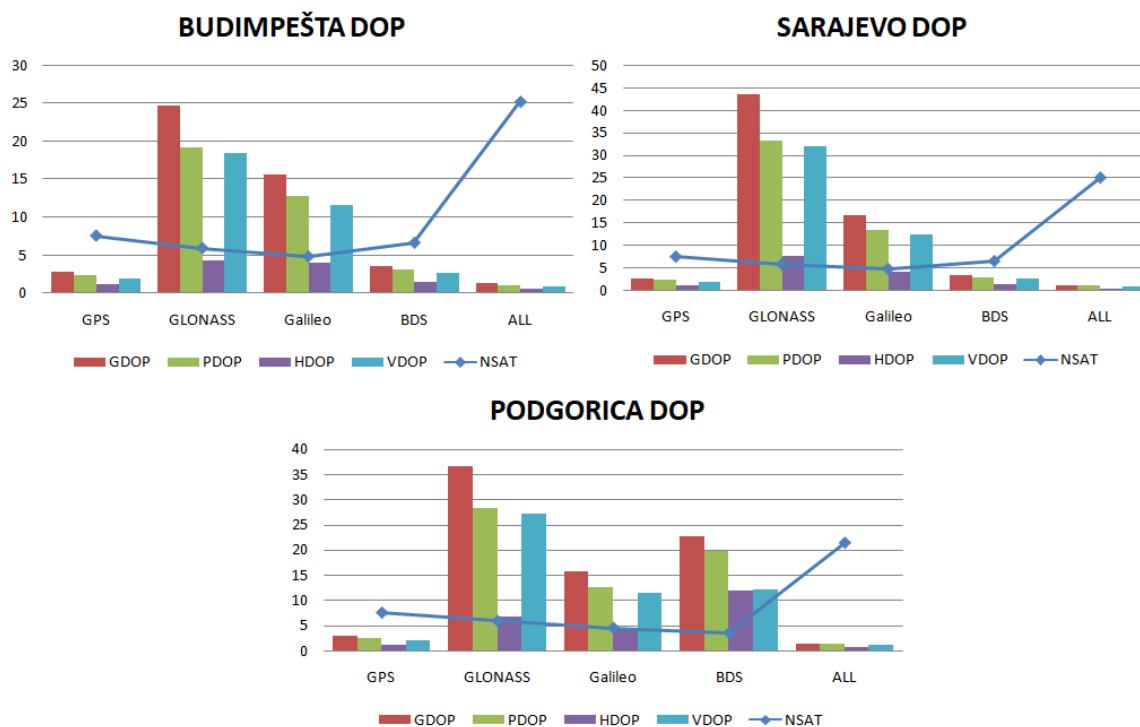
BDS u Podgorici i GLONASS sustava, svi ostali sustavi imali su relativno male vrijednosti IKR u svim stanicama.



Slika 34. IKR vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere promatranih stanica

Izvor: Izrada autora

Ponovno su uspoređivani i scenariji nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere, a rezultati su ponovno reflektirali vrijednosti standardnih devijacija. Ponovila se ista priča, GLONASS je imao najveće vrijednosti zajedno s BDS sustavom u Podgorici dok su svi ostali sustavi ponovno imali slične, relativno male vrijednosti. Isključivanjem troposferskog modela uglavnom je došlo do blagog porasta sve tri varijable uz par iznimki, prvenstveno kod kombinacije svih sustava koja je zabilježila manje vrijednosti geografskih širina u sve tri stanice, a također je imala i manje vrijednosti nadmorskih visina u Budimpešti i Sarajevu.



Slika 35. NSAT i DOP vrijednosti promatranih stanica

Izvor: Izrada autora

Na Slici 35. prikazani su stupčasti grafikoni s NSAT, GDOP, PDOP, HDOP i VDOP vrijednostima za sve sustave i kombinaciju svih sustava u sve tri stanice. NSAT vrijednosti uvrštene su u grafove radi uvida u korelaciju između NSAT i DOP vrijednosti.

Izuzevši kombinaciju svih sustava, GPS sustav imao je u prosjeku najveći broj vidljivih satelita i posljedično, najmanje DOP vrijednosti. GPS sustav imao je podjednake vrijednosti na svim stanicama, sa najmanjim vrijednostima zabilježenim kod HDOP-a, a najvećim kod GDOP-a.

Budimpešta i Sarajevo imali su podjednake rezultate kod svih sustava, gdje je nakon GPS sustava, BDS sustav imao u prosjeku najveći broj vidljivih satelita, praćen GLONASS sustavom te na kraju Galileo sustav sa najmanjim brojem vidljivih satelita. U Podgorici je BDS sustav ponovno imao problema gdje je zabilježio skoro duplo manji broj vidljivih satelita u odnosu na preostale dvije stanice te drastično veće vrijednosti svih DOP komponenti.

U pravilu se može vidjeti da sustavi sa većim brojem vidljivih satelita ostvaruju manje odnosno bolje DOP vrijednosti, međutim to nije slučaj kod GLONASS sustava koji je unatoč većem broju vidljivih satelita od Galileo sustava na sve tri stanice, te BDS sustava na stanici Podgorica, zabilježio najveće, odnosno najlošije DOP vrijednosti na sve tri stanice. Stoga se može pretpostaviti da je GLONASS sustav imao lošu geometriju satelita, odnosno da su kutevi od prijemnika do satelita bili podjednaki.

Kod kombinacije svih sustava zabilježeno je u prosjeku preko 20 vidljivih satelita na sve 3 stanice te dvostruko manje DOP vrijednosti u odnosu na najučinkovitiji pojedinačni sustav, GPS.

Ovim rezultatima prikazala se korelacija između NSAT i DOP vrijednosti. Najmanje DOP vrijednosti postignute su s najvećim brojem vidljivih satelita kod kombinacije svih sustava. Od pojedinačnih sustava najučinkovitiji bio je GPS. BDS sustav ponovno je imao određenih problema na stanici Podgorica dok je GLONASS sustav ponovno zabilježio najlošije rezultate. U većini slučajeva, veći broj vidljivih satelita znači i bolje DOP vrijednosti, no kod GLONASS sustava se uočava da ponekad bolja geometrija satelita može nadoknaditi nedostatak prosječnog broja vidljivih satelita.

6. ZAKLJUČAK

GNSS signali imaju niske razine snage, pa su stoga skloni mnogim pogreškama. Ove pogreške imaju različite uzroke, razmjere, a time i posljedice. Za objašnjenje vrste pogrešaka i/ili veličine učinka koriste se grafikoni i slike. Neke od GNSS pogrešaka mogu biti male, kao npr. pogreška u šumu prijamnika, dok druge pogreške mogu biti reda desetina metara, npr. ionosfera. Pristranost sata prijamnika može narasti do tisuća metara i stoga ga je potrebno modelirati. Namjerni izvori pogrešaka mogu u potpunosti uskratiti GNSS usluge. Bez obzira na njihovu skalu, GNSS pogreške treba ublažiti kako bi se postigla prihvaćena točnost navigacije.

Kao što je ranije spomenuto, za potrebe istraživanja korištena su četiri sustava, zajedno s kombinacijom svih sustava u pet različitih scenarija, te četiri scenarija s obzirom na modeliranje ionosferskih i troposferskih korekcija. Cilj je bio predstaviti presjek pozicioniranja GNSS sustava na širem području Jadrana, u vrijeme kada se svi sustavi smatraju globalnim i potpuno operativnim, te saznati kako koji sustav funkcionira u promatranom području.

U modeliranim rješenjima postojala je mala razlika između performansi pozicioniranja sustava. S druge strane, korištenje preostalih scenarija rezultiralo je značajnim razlikama, posebice u vrijednostima odstupanja nadmorske visine. Doprinos ionosfere najviše je utjecao na GLONASS i BeiDou. Općenito, najveće raspršenje položaja uočeno je kod ova dva sustava. Troposferski doprinos značajno je utjecao na sve sustave, s najvećim učinkom na BeiDou. Očekivano, najkompaktnija i najtočnija izvedba pozicioniranja postignuta je kombinacijom svih sustava.

IKR vrijednosti su također bile najveće sa sustavima GLONASS i Beidou u svim scenarijima, dok su GPS, Galileo i kombinacija svih sustava imali slično niske vrijednosti u svim scenarijima. Također se može vidjeti kako NSAT i PDOP vrijednosti rade u međusobnoj korelaciji. Najbolji rezultati PDOP-a postignuti su s najviše NSAT-a u kombinaciji svih sustava na svim postajama, a najlošiji rezultati s najnižim NSAT-om, točnije u Podgorici, sa sustavima Galileo i Beidou. Osim ta dva sustava u Podgorici, svi ostali sustavi stanica pokazali su dobru satelitsku geometriju s rasponom od 4.0 ili manje.

Imajući na umu da je ovo bilo prilično kratko istraživanje provedeno na rezultatima u vremenskom periodu od sedam dana, treba biti oprezan u proglašavanju „*najboljih*“ i „*najgorih*“ sustava. Važno je još jednom napomenuti kako su u modeliranom scenariju svi sustavi, uključujući i kombinaciju svih sustava imali relativno jednake, niske vrijednosti odstupanja sve tri varijable, te su najveće promjene uočene isključivanjem ionosferskih i troposferskih korekcija. No koristeći prikupljene podatke, može se vidjeti da su, osim očite kombinacije svih sustava, GPS i Galileo najpouzdaniji sustavi na svim stanicama. BDS ih je pomno pratio najvećim dijelom u Budimpešti i Sarajevu, ali je i imao značajnih problema u Podgorici, dok je GLONASS bio posebice loš u standardnoj devijaciji i IKR vrijednostima na svim stanicama.

Za potrebe ovog istraživanja bio je potreban pronalazak razdoblja s mirnim svemirskim vremenskim uvjetima, zbog čega su ispitani različiti scenariji s obzirom na prijenosni medij. U budućnosti bi se moglo provesti istraživanje s različitim svemirskim vremenskim uvjetima. Također, ako podaci konačno postanu dostupni, istraživanje bi se moglo provesti i s hrvatskim stanicama.

LITERATURA

Acharya, R.: *Understanding Satellite Navigation*, Academic Press, 2014.

Brčić, D.: *Model nespecifičnog dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja*, Doktorski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Rijeka, 2015.

Brčić D.: *Predavanja iz primjenjene satelitske navigacije*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Rijeka, 2021.

Echer, E., Gonzales, W. D., Alves, M. V.: *On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures*, 4. izdanje, Space Weather, 2006.

El-Rabbany, A.: *Introduction to GPS, The Global Positioning System*, Artech House, Inc., 2002.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E.: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo & more*, Springer, New York, 2018.

Kaplan, E. D., Hegarty, C. J.: *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2. izdanje, Artech House, Inc., 2006.

Parkinson, B. W., Spilker Jr., J. J.: *Global Positioning System: Theory and Applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, 1996.

Scherer, K., et al.: *Space Weather The Physics Behind a Slogan*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.

Zenzerović, Z.: *Predavanja iz statistike*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka

“BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document”, 2019.
<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf?fbclid=IwAR0qLaTTARNVLh9MVLCoELxSovlAnK1-j7tPzH3epJ-RFYjeJg40o35YUO8>
(05.07.2021.)

Dutt S., I., et al.: *Investigation of GDOP for Precise user Position Computation with all Satellites in view and Optimum four Satellite Configurations*, 2009.
https://www.researchgate.net/figure/a-Satellite-Geometry-Representation-for-two-satellites_fig1_267257339 (09.01.2022.)

EUREF Permanent GNSS Network <https://www.epncb.oma.be/> (06.09.2021.)

“European GNSS (Galileo) Open Service, Signal-In-Space Interface Control Document”,
siječanj 2021. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf?fbclid=IwAR30k_MZBf_nCtYHGkF1OQzMuSIraz1J_8xvIatgVviviHf68cdzuM8TMk (05.07.2021.)

European Space Agency (ESA), *BeiDou, General Introduction*, 2011.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction (21.09.2021.)

European Space Agency (ESA), *BeiDou Ground Segment*, 2011.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/BeiDou_General_Introduction (21.09.2021.)

European Space Agency (ESA), *Galileo architecture*, 2011.
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Architecture (20.09.2021.)

“GLONASS Interface Control Document (ICD): General Description of Code Division Multiple Access Signal System”, 2016. <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf>
(20.09.2021.)

Interquartile Range (IQR) Formula <https://www.cuemath.com/interquartile-range-formula/>
(13.11.2021.)

“*Journal of the Institute of Navigation*”, 2015.
<https://www.ion.org/publications/upload/NAVI.123.pdf> (30.06.2021.)

Kos, T., Grgić, S., Krile, S.: “Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju” *Poboljšanje sustava satelitske navigacije*, 2004. <https://hrcak.srce.hr/file/12784> (12.03.2021.)

M. Karaim, M. Elsheikh, and A. Noureldin: "GNSS Error Sources", in *Multifunctional Operation and Application of GPS*, 2018. <https://www.intechopen.com/chapters/60049>
(10.01.2022.)

“RINEX – The Receiver Independent Exchange Format”, 2018.
<http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf> (13.10.2021.)

RTKLIB manual

Sickle, J., V.: *Block IIF and Block III*, <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1865>
(30.06.2021.)

Space Segment, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics, 12.06.2021.
<https://www.gps.gov/systems/gps/space/?fbclid=IwAR1gJ1EK6BMpMu5mdWfsPGTsjzA-nd4Culnot0pKx14rK-4Gy6SCyx0zbnA> (30.06.2021.)

Takasu, T. *RTKLIB: An Open Source Program Package for RTK-GPS*. Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo, 2009.

Types of Satellite Systems <https://www.javatpoint.com/types-of-satellite-systems> (09.03.2021.)

What is GNSS? <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> (08.03.2021.)

What is the Sunspot Number? <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/2/3/3> (12.11.2021.)

POPIS KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
AMCS	engl. <i>Alternate Master Control Station</i>	Zamjenska glavna kontrolna stanica
BDS	engl. <i>BeiDou Navigation Satellite System</i>	BeiDou satelitski navigacijski sustav
CDMA	engl. <i>Code-division multiple access</i>	Tehnika višestrukog pristupa raspodjelom koda
DOP	engl. <i>Dilution of Precision</i>	Geometrijska razdioba točnosti
DST	engl. <i>Disturbance Storm Time Index</i>	DST indeks
ECEF	engl. <i>Earth Centered Earth-Fixed</i>	Rotacijski zemaljski referentni sustav
ECI	engl. <i>Earth Centered Inertial</i>	Inercijalni zemaljski koordinatni sustav
EDOP	engl. <i>Easting Dilution of Precision</i>	Istočna komponenta geometrijske razdiobe točnosti
EUREF	engl. <i>Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe</i>	Podkomisija za regionalni referentni okvir za Europu
FDMA	engl. <i>Frequency Division Multiple Access</i>	Višestruki pristup s podjelom frekvencije
GCC	engl. <i>Ground Control Centres</i>	Zemaljski kontrolni centri
GCS	engl. <i>Galileo Control Segment</i>	Kontrolni segment Galileo sustava
GDOP	engl. <i>Geometric Dilution of Precision</i>	Geometrijska komponenta razdiobe točnosti
GEO	engl. <i>Geostationary Earth Orbit</i>	Geostacionarna orbita
GMS	engl. <i>Galileo Mission Segment</i>	Misijski segment Galileo sustava
GPS	engl. <i>Global Positioning System</i>	Globalni sustav za određivanje položaja
GPST	engl. <i>GPS Time</i>	Vrijeme GPS sustava
GSO	engl. <i>Geosynchronous Orbit</i>	Geosinkrona orbita
GSS	engl. <i>Galileo Sensor Stations</i>	Senzorske stanice Galileo sustava

GNSS	engl. <i>Global Navigation Satellite System</i>	Globalni navigacijski satelitski sustav
HDOP	engl. <i>Horizontal Dilution of Precision</i>	Horizontalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti
HEO	engl. <i>Highly Elliptical Orbit</i>	Visoko eliptična orbita
IAG	engl. <i>International Association of Geodesy</i>	Međunarodno udruženje za geodeziju
ICD	engl. <i>Interface Control Document</i>	Kontrolni dokument sučelja
IRNSS	engl. <i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>	Indijski regionalni navigacijski satelitski sustav
IQR	engl. <i>Interquartile Range</i>	Interkvartilna razlika
ITRS	engl. <i>International Terrestrial Reference System</i>	Međunarodni zemaljski referentni sustav
LEO	engl. <i>Low Earth Orbit</i>	Niska Zemljina orbita
MEO	engl. <i>Medium Earth Orbit</i>	Srednja Zemljina orbita
MC	engl. <i>Monitoring Stations</i>	Globalne mreže stanica za praćenje satelita
MCS	engl. <i>Master Control Station</i>	Glavna kontrolna stanica
NDOP	engl. <i>Northing Dilution of Precision</i>	Sjeverna komponenta geometrijske razdiobe točnosti
NSAT	engl. <i>Number of Satellites</i>	Broj vidljivih satelita
PDOP	engl. <i>Positioning Dilution of Precision</i>	Prostorna komponenta geometrijske razdiobe točnosti
PNT	engl. <i>Positioning, Navigation and Timing</i>	Pozicioniranje, navigacija i mjerenje vremena
RINEX	engl. <i>Receiver INdependent EXchange Format</i>	RINEX format
SBAS	engl. <i>Satellite Based Augmentation system</i>	Satelitski sustav poboljšanja GNSS usluga
SD	engl. <i>Standard deviation</i>	Standardna devijacija
SF	engl. <i>Solar Flux</i>	Solarno radio zračenje
SFU	engl. <i>Solar Flux Unit</i>	Jedinice toka Sunčevog zračenja
SSN	engl. <i>Sunspot Number</i>	Broj Sunčevih pjega

SV	engl. <i>Space Vehicle</i>	Svemirsko vozilo
TDOP	engl. <i>Time Dilution of Precision</i>	Vremenska komponenta geometrijske razdiobe točnosti
TT&C	engl. <i>Telemetry Tracking and Control Stations</i>	Stanice za praćenje telemetrije i kontrolu
UERE	engl. <i>User Equivalent Ranging Error</i>	Korisnička razdioba pogrešaka
ULS	engl. <i>Up-Link Stations</i>	Stanica za povezivanje
VDOP	engl. <i>Vertical Dilution of Precision</i>	Vertikalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti
VTEC	engl. <i>Vertical Total Electron Content</i>	Vertikalni ukupni sadržaj elektrona
ZTD	engl. <i>Zenith Tropospheric/Total Delay</i>	Zenitno troposfersko kašnjenje
QZSS	engl. <i>Quasi Zenith Satellite System</i>	Kvazizenitni satelitski sustav

POPIS SLIKA

Slika 1. Segmenti satelitske navigacije.....	6
Slika 2. Kompozicija satelitskog navigacijskog signala.....	8
Slika 3. Vrijeme propagacije satelitskog signala.....	10
Slika 4. Princip satelitskog određivanja položaja.....	11
Slika 5. Sinkronizacija korisničkog sata.....	11
Slika 6. GNSS sateliti.....	14
Slika 7. Vrste satelitskih orbita.....	14
Slika 8. GPS konstelacija.....	17
Slika 9. GPS segmenti.....	18
Slika 10. GLONASS konstelacija.....	23
Slika 11. Galileo frekvencijski plan.....	25
Slika 12. BeiDou konstelacija.....	27
Slika 13. Prikaz geometrije satelita za dva satelita.....	32
Slika 14. Prikaz geometrije satelita.....	33
Slika 15. Prijenosni mediji.....	34
Slika 16. Prikaz ionosferskog kašnjenja.....	36
Slika 17. Pokazatelji svemirskog vremena.....	44
Slika 18. Geografsko područje istraživanja i prikaz položaja korištenih EUREF stanica ..	45
Slika 19. Postavke programskog alata RTKPOST prilikom postupka proračuna položajnih zapisa.....	50
Slika 20. Prosječne srednje vrijednosti i vrijednosti standardnih devijacija modeliranih i nemodeliranih scenarija položajnih zapisa.....	55
Slika 21. Modelirane i nemodelirane srednje vrijednosti promatranih stanica.....	58
Slika 22. Vremenski nizovi modeliranih i nemodeliranih zapisa sustava BDS opaženih na stanici Budimpešta.....	62
Slika 23. Histogrami nadmorske visine modeliranih i nemodeliranih scenarija opaženih na stanicama Podgorica i Sarajevo.....	63
Slika 24. Standardne devijacije modeliranih i nemodeliranih vrijednosti odstupanja na promatranim stanicama.....	64
Slika 25. Usporedba horizontalnih odstupanja modeliranog scenarija na stanici Sarajevo	67
Slika 26. Usporedba horizontalnog odstupanja BDS sustava na stanici Budimpešta (a)....	68
Slika 27. Usporedba horizontalnog odstupanja BDS sustava na stanici Sarajevo (b).....	68
Slika 28. Usporedba horizontalnog odstupanja BDS sustava na stanici Podgorica (c).....	69
Slika 29. Prosječne srednje vrijednosti i standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere.....	70
Slika 30. Srednje vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere promatranih stanica.....	73
Slika 31. Histogrami nadmorske visine scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere Galileo sustava na stanici Budimpešta.....	77
Slika 32. Vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere promatranih stanica.....	78
Slika 33. Modelirane i nemodelirane IKR vrijednosti promatranih stanica.....	81
Slika 34. IKR vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere promatranih stanica.....	84
Slika 35. NSAT i DOP vrijednosti promatranih stanica.....	85

POPIS TABLICA

Tablica 1. Trenutno stanje službeno potpuno operativnih sustava	16
Tablica 2. Početna i buduća generacija GPS satelita.....	20
Tablica 3. Pogreške mjerenja pseudoudaljenosti.....	30
Tablica 4. Odnos broja sunčevih pjega i sunčeve aktivnosti.....	41
Tablica 5. Povezanost vrijednosti geomagnetskih pokazatelja sa stanjem svemirskog vremena	43
Tablica 6. Podaci promatranih stanica.....	46
Tablica 7. Prosječne srednje vrijednosti modeliranih i nemodeliranih scenarija	56
Tablica 8. Prosječne vrijednosti standardnih devijacija modeliranih i nemodeliranih scenarija	57
Tablica 9. Modelirane srednje vrijednosti promatranih stanica	59
Tablica 10. Nemodelirane srednje vrijednosti promatranih stanica	60
Tablica 11. Modelirane vrijednosti standardne devijacije promatranih stanica	65
Tablica 12. Nemodelirane vrijednosti standardne devijacije promatranih stanica.....	66
Tablica 13. Prosječne srednje vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere	71
Tablica 14. Prosječne vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere i nemodelirane troposfere	72
Tablica 15. Srednje vrijednosti scenarija nemodelirane ionosfere promatranih stanica	74
Tablica 16. Srednje vrijednosti scenarija nemodelirane troposfere promatranih stanica	75
Tablica 17. Vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane ionosfere promatranih stanica	79
Tablica 18. Vrijednosti standardne devijacije scenarija nemodelirane troposfere promatranih stanica	80
Tablica 19. Modelirane IKR vrijednosti promatranih stanica	82
Tablica 20. Nemodelirane IKR vrijednosti promatranih stanica.....	83