

Pogreške satelitskih sustava za navigaciju

Ćopo, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:773551>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-04**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for
permanent storage and preservation of digital
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

MATEO ČOPO

POGREŠKE SATELITSKIH SUSTAVA ZA NAVIGACIJU

ZAVRŠNI RAD

SPLIT, 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
POMORSKI FAKULTET U SPLITU

STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA

POGREŠKE SATELITSKIH SUSTAVA ZA NAVIGACIJU

ZAVRŠNI RAD

MENTOR:

dr. sc. Lea Vojković

STUDENT:

Mateo Čopo
(MB:0171278802)

SPLIT, 2023.

SAŽETAK

Značajan korak u povijesti pozicioniranja i navigacije započeo je s razvojem globalnih navigacijskih satelitskih sustava. Od prvobitne ideje o isključivo vojnoj primjeni do današnje dominantno civilne upotrebe. Implementacijom ovog sustava na brodove, pomorska navigacija postala je znatno jednostavnija i sigurnija. Najveći korak prema razvoju modernog GNSS postignut je ukidanjem selektivne dostupnosti 2000. godine. U radu je obrađena tema pogrešaka globalnih navigacijskih satelitskih sustava. Pogreške koje utječu na preciznost globalnih navigacijskih sustava dijele se u četiri kategorije: pogreške povezane sa satelitom, pogreške koje utječu na širenje signala, pogreške prepoznavanje i umjetne pogreške. Pogreške se mogu ispraviti i preciznost povećati korištenjem uređaja za povećavanje preciznosti poput diferencijalnih navigacijskih satelitskih sustava i sustava za augmentaciju.

Ključne riječi: GNSS, ionosfera, GPS, troposfera, geomagnetske oluje, pogreške GNSS-a

ABSTRACT

A significant step in the history of positioning and navigation began with the development of global navigation satellite systems. From the original idea of exclusively military application to today's predominantly civilian use. By implementing this system on ships, maritime navigation became much simpler and safer. The biggest step towards the development of modern GNSS was achieved by the abolition of selective availability in year 2000. The paper deals with the topic of errors in global navigation satellite systems. Errors affecting the accuracy of global navigation systems fall into four categories: satellite-related errors, errors affecting signal propagation, detection errors, and artificial errors. Errors can be corrected and precision increased using precision enhancing devices such as differential navigational satellite system and augmentation systems.

Key words: GNSS, ionosphere, GPS, troposphere, geomagnetic storms, errors of GNSS

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJEST SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA	2
2.1. POVIJEST I UPOTREBA SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA .	4
2.2. VOJNA UPOTREBA GPS SUSTAVA	5
2.3. CIVILNA UPOTREBA GPS-A	6
2.4. SELEKTIVNA DOSTUPNOST GPS-A	7
3. POGREŠKE SATELITSKE NAVIGACIJE	9
3.1. POGREŠKE POVEZANE SA SATELITOM.....	10
3.1.1. Pogreške satelitske orbite	10
3.1.2. Pogreške u satelitskom satu	11
3.1.3. Pogreške u geometriji satelita	12
3.2. POGREŠKE KOJE UTJEČU NA ŠIRENJE SATELITSKOG SIGNALA..	14
3.2.1. Ionosfersko kašnjenje	15
3.2.2. Troposferska pogreška	18
3.3. POGREŠKE PREPOZNAVANJA.....	20
3.3.1. Pogreška sata prijamnika	20
3.3.2. Pogreške elektronike prijemnika i subjektivne pogreške	20
3.4. UMJETNE POGREŠKE.....	21
3.4.1. Namjerne pogreške	21
3.4.2. Nenamjerne pogreške	21
3.4.3. Namjerno ometanje signala	22
4. GEOMAGNETSKE OLUJE SUNCA	23
5. PRECIZNOST SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA	25
5.1. SUSTAVI ZA POVEĆANJE PRECIZNOSTI GNSS-A.....	25
6. ZAKLJUČAK	29
LITERATURA	30
POPIS SLIKA	32
POPIS TABLICA	33

1. UVOD

Globalni satelitski navigacijski sustav (GNSS) je sustav koji je postao neophodan u modernom svijetu. Trenutno u svijetu postoje 4 globalna satelitska sustava i 2 regionalna sustava. Globalni sustavi su kineski Beidou, europski Galileo, ruski globalni navigacijski satelitski sustav (engl. *Global navigation satellite system* - GLONASS) te globalni sustav pozicioniranja (engl. *Global Positioning System* - GPS) [1]. Regionalni sustavi su indijski regionalni navigacijski satelitski sustav (engl. *The Indian Regional Navigational Satellite System* - IRNSS) te japanski satelitski sustav (engl. *Quasi-Zenith Satellite System* - QZSS).

GPS i GLONASS su dva prva globalna navigacijska satelitska sustava koja su stupila u upotrebu. GPS američki sustav te ruski GLONASS sustav. U zadnjih 20 godina razvijeni su se novi sustavi poput europskog Galilea, japanskog QZSS-a i indijskog IRNSS-a.

GNSS se sastoji od tri segmenta: kontrolni, korisnički i svemirski. Kontrolni dio se sastoji od pet kontrolnih stranica raspoređenih na Zemlji, čija je glavna zadaća neprekidno praćenje gibanja GNSS satelita. Stanice kontinuirano prate i bilježe poruke odaslane sa satelita te ih prosljeđuju u glavni upravljački centar na daljnju obradu. Cjelokupna koordinacija sustava obavlja se u glavnoj upravljačkoj stanici. Korisnički dio sustava čine svi civilni i vojni korisnici sa svojim GNSS prijemnicima, koji pretvaraju satelitski signal u informaciju o položaju GNSS antene na Zemlji. Svemirski se dio sastoji od 24 do 32 satelita koji kruže oko Zemlje na visini od 20200 km s periodom od 11 sati i 58 minuta. Orbite su im približno kružne, polumjera 26570 km i ravnomjerno su raspoređeni u 6 orbitalnih ravnina, po četiri satelita u jednoj ravnini. Razmak ravnina je 60° , a nagib, u odnosu na ekvatorsku ravninu, je 55° [2].

Globalni navigacijski satelitski sustavi su najbrži način određivanja pozicije u navigaciji te vrlo koristan alat za izradu karata no oni se mogu koristiti i u druge svrhe poput trgovine, znanstvene svrhe, praćenje i nadzor. Ti su sustavi precizni, ali i dalje postoje pogreške koje se pojavljuju tijekom samog korištenja sustava poput ionosferskog, troposferskog kašnjenja signala te pogreške satova i prijemnika satelita.

2. POVIJEST SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA

Ruski satelit Sputnik 1 bio je prvi umjetni satelit u zemljinoj orbiti. Lansiran je sa kozmodroma Bajkonur u današnjem Kazahstanu. Imao je oblik kugle promjera 58 cm, težine 83.6 kg, imao je dva radio odašiljača i četiri antene dvije od 2,4 m i dvije od 2,9 m. Kružio je oko Zemlje po eliptičnoj putanji na visinama od 250 do 945 km. Kretao se brzinom od 29.000 km/h i emitirao radio signale na frekvencijama 20.005 i 40.002 MHz. Emitirao je radio valove za znanstvenike kako bi mogli naučiti više o gustoći zemljine atmosfere, te testirati radijske i optičke metode praćenja satelita [25]. Američki znanstvenici su vidjeli ruski satelit Sputnik 1 na nebu, te su koristeći Dopplerov efekt pratili kretanje satelita. Pomoću te metode praćenja na kraju je došlo razvoja prvog pomorskog satelitskog navigacijskog sustava nazvanog Transit.

Transit (slika 1.) je postao prvi satelitski geo pozicijski sustav 1960-ih. Koristila ga je ratna mornarica Sjedinjenih Američkih država (SAD) te je stupio u službenu uporabu 1964. Godine. Ovaj sustav je određivao poziciju korisnika na principu Dopplerovog efekta te nije imao visoku razinu preciznosti. Za rad je koristio konstelaciju od 5 satelita koji su se nalazili na visini od 1000 km, a vrijeme ophodnje je bilo 1 sat i 47 minuta [3].



Slika 1. Prototip satelita Transit [10]

Američka ratna mornarica je razvila 1967. godine novi sustav pod imenom Timation koji je emitirao točnu vremensku referencu za određivanje udaljenosti. Ovaj novi pristup satelitskom određivanju pozicije je bio temelj današnje tehnologije GNSS-a [3].

U studenom 1972. godine pukovnik zračnih snaga Bradford Parkinson dobio je zadatak da nadgleda program satelitske navigacije. Parkinson je vodio tim za razvoj novog sustava koji je spojio sve najbolje funkcije prijašnjih satelitskih navigacijskih sustava. Taj novi sustav odobren je od strane ministarstva obrane u prosincu 1973. godine. Sastoji se od 24 satelita koji koriste atomske satove te se nalaze u srednjoj zemljinoj orbiti. 1974. godine američke zračne snage započele su razvoj prve serije Navstar satelita.

Krajem veljače 1978. godine lansiran je prvi blok Navstar/GPS satelita, zatim su 1978. godine lansirana još 3 satelita. Više od 700 testova sprovedeno je između 1977. i 1979. godine u kojima je dokazana preciznost integriranog svemirskog, upravljačkog i korisničkog sustava [3].

Sedamdesetih godina 20. stoljeća američki GPS nije bio jedini globalni navigacijski satelitski sustav. Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika (SSSR) 1976. godine započinje sa razvojem novog sustava GLONASS kao eksperimentalnog vojno komunikacijskog sustava. Nakon kraja Hladnog rata, Sovjetski savez je prepoznao novu upotrebu GLONASS-a kao komercijalne aplikacije za pozicioniranje i navigaciju. GLONASS-om upravlja ruska svemirska agencija Roscosmos u ime Vlade Ruske Federacije. [17]

GLONASS sateliti podijeljeni su u blokove i lansirano je šest modela satelita. Prototip satelita pod nazivom Blok I lansiran je u razdoblju od 1982. do 1985. godine, a projektirani su da rade samo godinu dana. Prva generacija satelita lansirana je između 1985. i 1990. godine lansirana su tri različita modela satelita Blok IIa, Blok IIb i Blok IIv, imali su radni vijek od 4,5 godina. GLONASS-M druga je generacija satelita čiji je razvoj započeo 1990. godine, a prvi sateliti su lansirani 2003. godine. Imali su radni vijek od sedam godina i poboljšanu stabilnost atomskih satova. Najznačajnija im je karakteristika da su opremljeni drugim civilnim signalom L2OF, koji je omogućio civilnim korisnicima eliminaciju ionosferskoga kašnjenja. Noviji sateliti GLONASS-M, lansirani od 2014. godine, opremljeni su i digitalnom tehnologijom za prijenos podataka u širem spektru (engl. *Code*

Divison Multiple Access – CDMA) na L3 frekvenciji (1202,025 MHz). Treća generacija satelita GLONASS-K blok K1, blok K2 i blok KM ima vrijeme trajanja od 10 godina. Sateliti GLONASS-K1 omogućuju usluge pozicioniranja za sve kategorije korisnika koristeći višestruki pristup s frekvencijskom raspodjelom (engl. *Frequency Division Multiple Access – FDMA*) signala na L1 i L2, kao i CDMA na L3. Lansirano je 26 satelita od čega su 24 aktivna [17].

Razvoj prvog europskog globalnog satelitskog sustava započeo je 1999. godine pod nazivom Galileo. Predstavnici država Njemačke, Italije i Francuske prevodili su tim za razvoj sustava. 2003. godine zbog financijskih poteškoća Europska unija (EU) i Europska svemirska agencija dogovorile su se o sufinanciranju projekta. Prvi testni satelit GIOVE-a lansiran je u prosincu 2005. godine. Nakon dugogodišnje stanke zbog pravnih problema EU preuzima projekt u cijelosti, te se u travnju 2008. godine lansira drugi satelit GIOVE-b. Program Galileo sastoji se od tri razvojne i implementacijske faze. U prvoj fazi lansirana su dva satelita GIOVE-a i GIOVE-b, te se testirala preciznost njihovih atomskih satova i otpornosti digitalne tehnologije na radijaciju. Lansirana su još četiri satelita od 2011. do 2012. godine, a svrha im je bila testiranje svemirskog i zemaljskog kontrolnog segmenta. Druga faza započeta je lansiranjem četvrtog i petog satelita u kolovozu 2014. godine. 15. prosinca 2016. godine sustav Galileo je postao funkcionalan. Imao je 18 satelita od koji je 12 bilo operativno [17]. Trenutno se u orbiti nalazi 28 satelita od kojih su 24 operativna dok se 4 ne koriste [18].

2.1. Povijest i upotreba satelitskih navigacijskih sustava

1983. godine američki predsjednik Ronald Regan odobrio je korištenje Navstar sustava za civilne komercijalne letove u pokušaju da poboljša navigaciju i sigurnost zračnog prometa. Dopuštenje za upotrebu GPS podataka za aviokompanije je bio prvi korak prema besplatnoj civilnoj upotrebi satelitskih navigacijskih sustava. Do 1989. godine postali su dostupni prvi ručni GPS uređaji proizvedeni od firme Magellan Corporation. Uređaji su težili 680 grama i imali su bateriju koja je trajala samo par sati, te su koštali 3 000 USD. Razvoj GPS tehnologije se nastavio 1980-ih i 1990-ih. Proizvodnja i razvoj drugog bloka satelita započela je 1985. godine, te je lansirana u orbitu 1989. godine.

Američku vladu je brinula mogućnost korištenja GPS sustava i njegovih informacija protiv SAD-a. Kao odgovor, ministarstvo obrane je odlučilo prilagoditi sustav da bude neprecizan u nevojnim aplikacijama (poznato kao "selektivna dostupnost") kako bi odvratili bilo kakvu upotrebu od strane neprijatelja.

Pokrivenost GPS-a se nastavila širiti do pune operativne sposobnosti, tako se proširio i njegov doseg u živote civila. GPS tehnologija se prvi put pojavila u mobitelima 1999. godine kada je Benefon izdao Benefon Esc prvi telefon opremljen GPS-om. 2000. godine američka vlada je odobrila planove za dodavanje tri dodatna GPS signala za nevojnu upotrebu. Američka vlada je te iste godine okončala program "selektivne dostupnosti" koji je smanjivao preciznost koju mogu postići korisnici civilnog GPS-a. Kao rezultat ove odluke, GPS signali su odmah postali 10 puta precizniji za civilnu upotrebu. Cijena GPS prijemnika i čipova za obradu također je pala sa 3000 USD na 1,50 USD. Povećanje točnosti zajedno sa smanjenjem troškova dovelo je do eksponencijalnog rasta upotrebe GPS-a za navigaciju u automobilima, usluge temeljene na lokaciji, osobnu tehnologiju i upotrebu u brodarstvu, jedrenju i drugim industrijama [3].

2.2. Vojna upotreba GPS sustava

GPS sustav je nezamjenjivi dio svake moderne vojske, bez njega teško je odrediti svoju poziciju na nepoznatom terenu. GPS omogućuje vojnim korisnicima određivanje vlastite pozicije te olakšava koordinaciju trupa i opskrbu. Osim same navigacije GPS se može koristiti i u druge svrhe poput praćenja meta, navođenja raketa, traganja i spašavanja.

U vojnom scenariju, potencijalne mete potrebno je stalno pratiti prije nego što se proglase neprijateljskima i napadnu raznim oružanim sustavima. Ovi podaci praćenja šalju se kao ulaz u moderne sustave oružja kao što su projektili i pametne bombe. Moderni oružani sustavi dizajnirani su za korištenje GPS podataka kao ulaznih podataka za ciljanje i navođenje. Krstareće rakete koje SAD obično koristi za precizno pogađanje ciljeva s velikih udaljenosti koriste više kanalne GPS prijammike za točno određivanje njihove lokacije tijekom leta. Spašavanje i potrage u hitnim slučajevima još je jedno područje u kojem se GPS uređaj (slika 2.) može pokazati neprocjenjivim za vojsku. Utvrđujući lokaciju unesrećenog tijekom operacija, timovi za hitne slučajeve mogu koristiti GPS kako bi smanjili vrijeme odaziva na mjesto nesreće.



Slika 2. Navstar vojnik GPS [11]

2.3. Civilna upotreba GPS-a

Besplatna globalna dostupnost, točnost GPS signala za pozicioniranje i niska cijena skupa čipova prijmnika, pretvorili su GPS u najbolji izbor za vrlo širok broj civilnih potreba.

Na temelju broja GPS prijmnika prodanih na globalnoj razini, aplikacije za cestovni prijevoz većinom koriste GPS pozicioniranje za komercijalno upravljanje voznim parkom i praćenje tereta. Vlasnici privatnih automobila također su naširoko usvojili GPS navigacijske sustave za automobile i većina proizvođača automobila sada izdaje nova vozila s tvornički ugrađenim GPS-om.

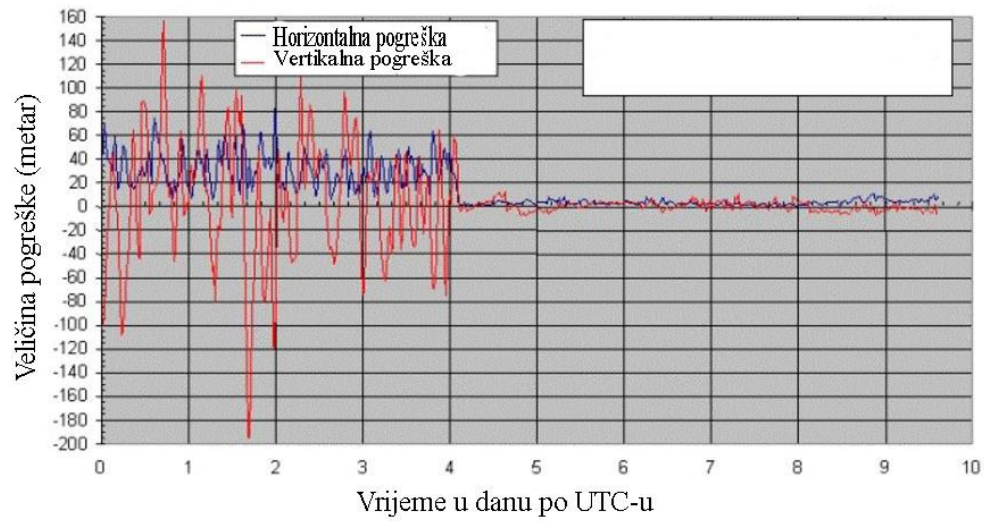
Pomorske primjene uključuju oceansku i obalnu navigaciju, jaružanje, pristupe lukama, ulaze u luke i pristajanje, usluge plovidbenog prometa (engl. *Vessel Traffic System* - VTS), automatski identifikacijski sustav (engl. *Automatic Identification Systems* - AIS), hidrografiju i rukovanje teretom.

Željezničke aplikacije uključuju upravljanje željezničkim voznim parkom, informacije o putnicima, sprječavanje otvaranja vrata sve dok se vagon ne nađe uz platformu, signalizaciju praćenja tereta, integritet vlaka i pristup željezničkom prijelazu.

2.4. Selektivna dostupnost GPS-a

Selektivna dostupnost je izraz koji se koristi za opisivanje namjernog ometanja GPS signala. Vlada SAD-a je upravljala sa satelitima i koristila je selektivnu dostupnost kako bi omela prijemnike da ne mogu pronaći točan položaj. Svaki satelit emitira jedinstveni signal koji prijemniku prenosi informaciju koliko je sati na satelitu u svemiru. Svaki satelit također ima jedinstvenu putanju u zemljinoj orbiti. GPS prijammnik prati svaki satelit. Prijemnik s ovim informacijama izračunava vrijeme koje je potrebno da najmanje 4 satelitske poruke dođu do Zemlje, a zatim koristi poznatu poziciju za ta 4 ili više satelita kako bi odredio zemljopisnu širinu, dužinu i nadmorsku visinu. Uključena selektivna dostupnost onemogućuje GPS prijammniku informacije o pravom vremenu satelita. Ne znajući točna vremena na satelitima kada kreiraju svoju poruku o vremenu, prijemnik vam ne može prikazati točnu lokaciju koju pokušavate izmjeriti. To znači da vam GPS prijemnik daje manje precizan položaj [8].

Kada je selektivna dostupnost bila omogućena, to je GPS signalima dodalo 50 m pogreške horizontalno i 100 m vertikalno (slika 3.). Prije svibnja 2000. godine, vlada Sjedinjenih Američkih Država dodala je ovaj varirajući kod svim civilnim GPS signalima. Ovlaštene skupine poput američke vojske i saveznika mogle bi pristupiti drugom GPS signalu radi veće točnosti. Iako je Ronald Reagan obećao da ga mogu koristiti civili, ograničio je njegovu upotrebu selektivnom dostupnošću. Sve do svibnja 2000. godine to je američkoj vojsci osiguravalo prednost. Nakon svibnja 2000. Bill Clinton je eliminirao selektivnu dostupnost zbog pojave novijih tehnologija. Primjerice, diferencijalni GPS je mogao ispraviti signala za preciznije pozicioniranje. Danas američko Ministarstvo nacionalne obrane održava GPS sustav bez selektivne dostupnosti. Kao rezultat toga, ovaj izvor GPS pogreške više nije problem [3].



Slika 3. Prikaz iznosa selektivne dostupnosti prije i poslije ukidanja [12]

3. POGREŠKE SATELITSKE NAVIGACIJE

GNSS prijamnik za određivanje svog položaja mora imati dvije informacije, poziciju satelita i udaljenost satelita. Pozicija satelita se određuje uz pomoć almanaha koji sadrži približne pozicije satelita. Ti podaci se prenose i pohranjuju u memoriju GNSS prijarnika koji prema njima zna gdje bi se satelit trebao nalaziti. Podaci iz almanah se periodično ažuriraju novim informacijama zbog kretanja satelita. Sateliti se mogu pomaknuti iz svoje predviđene orbite, pa zemaljske stanice prate njihove koordinate i šalju ih u glavnu kontrolnu stanicu koja te nove informacije vraća satelitima. Ti novi podaci nazivaju se efemeride, vrijede šest sati te se šalju GNSS prijarnicima. Nakon točno određenje pozicije treba odrediti udaljenost satelita. Udaljenost satelita od prijarnika jednaka je brzini signala pomnoženog s vremenom koje treba signalu da dođe do prijarnika. Prijarnik zna brzinu, koja je približna brzini svjetlosti i iznosi 300 000 km/s, sa malim kašnjenjem jer signal prolazi kroz zemljinu atmosferu. GNSS prijarnici trebaju odrediti vremenski dio formule. Satelit emitira pseuodslučajni kod, a GNSS prijarnik generira isti kod i prilagođava ga kodu satelita. Prijarnik uspoređi ta dva koda te odredi koliko bi trebalo biti kašnjenje svog koda da bi odgovarao satelitskom. To vrijeme kašnjenja pomnoženo sa brzinom svjetlosti daje udaljenost satelita [2]. Radio signal koji satelit odašilje je slab i lako podložan smetnjama. Ovu smetnju može proizvesti više izvora. Događaji u svemiru, poput sunčevih baklji, mogu poremetiti signal. Metal u blizini prijarnne antene može pogoršati signal, ovo je poseban problem za prijenosne GPS uređaje koji se koriste na brodovima. Osim pogrešaka koje nastaju zbog prirodnih fenomena i uvjeta, postoje i pogreške koje nastaju zbog ljudskog djelovanja. Jedna od njih je nastanak elektromagnetskih valova od uređaja koji se nalaze u blizini prijarnika. Osim nenamjernih ometanja koji nastaju zbog drugih uređaja tijekom ratova se koriste i uređaji koji namjerno ometaju GNSS signale [4]. Pogreške se dijele u 4 kategorije:

- pogreške povezane sa satelitima,
- pogreške koje utječu na širenje signala,
- pogreške prepoznavanja,
- umjetne pogreške.

Pogreške povezane sa satelitom su one koje nastaju prilikom određivanja položaja satelita ili određivanja vremena, pa te pogreške možemo podijeliti na pogreške satelitske orbite, pogreške u satelitskom satu i pogreške geometrije satelita.

Pogreške koje utječu na širenje satelitskog signala nastaju usred putovanja signala od satelita do prijemnika. Pojavljuju se tijekom prolaska signala kroz zemljinu atmosferu, a dijele se na ionosferske efekte, fizičke osnove te pogreške ionosfere i troposfere.

Pogreške prepoznavanja nastaju kada oprema koja se koristi nije ispravna ili kada sustav krivo prepoznaje primljeni signal. To su pogreške sata prijemnika ili elektronike prijemnika. Subjektivni faktori su pogreške koje nastaju kada korisnik ne zna pravilno rukovati sa opremom.

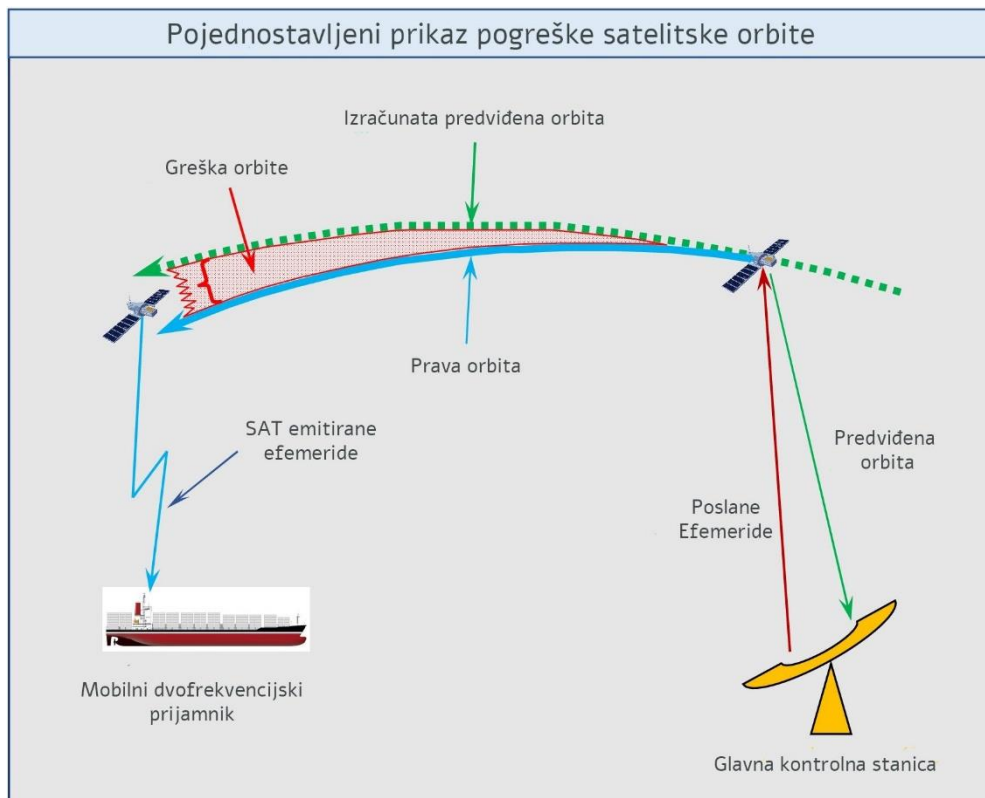
Umjetne pogreške su one koje mogu biti izazvane namjernim ili nenamjernim ometanjem signala.

3.1. POGREŠKE POVEZANE SA SATELITOM

Pogreške povezane sa satelitom su one koje nastaju prilikom određivanja položaja satelita ili određivanja vremena satelita. Dijele se na pogreške u satelitskoj orbiti, pogreške satelitskog sata i pogreške geometrije satelita.

3.1.1. Pogreške satelitske orbite

Pogreške satelitske orbite ili pogreške efemerida nastaju zbog razlike u predviđenom i stvarnom položaju satelita kao što je prikazano na slici 4. Za izračunavanje položaja uz pomoć GNSS-a potrebno je poznavanje točne pozicije satelita. Položaji satelita sadržani u GNSS navigacijskim porukama su predviđanja gdje će se satelit vjerojatno nalaziti. Pogreška do koje dolazi zbog odstupanja između predviđenog i stvarnog položaja satelita može iznositi do 10 m. Za pomorstvo je ta vrijednost relativno beznačajna [5]. Ove pogreške mogu imati različite uzroke od kojih je najznačajnije djelovanje gravitacijskih polja Mjeseca i Sunca, pri čemu posebice Mjesečevo gravitacijsko polje ima značajan utjecaj. Kako bi efemeride bile uvijek precizne unatoč smetnjama koje se događaju, orbite satelita stalno se nadziru zemaljskim segmentom GPS-a.

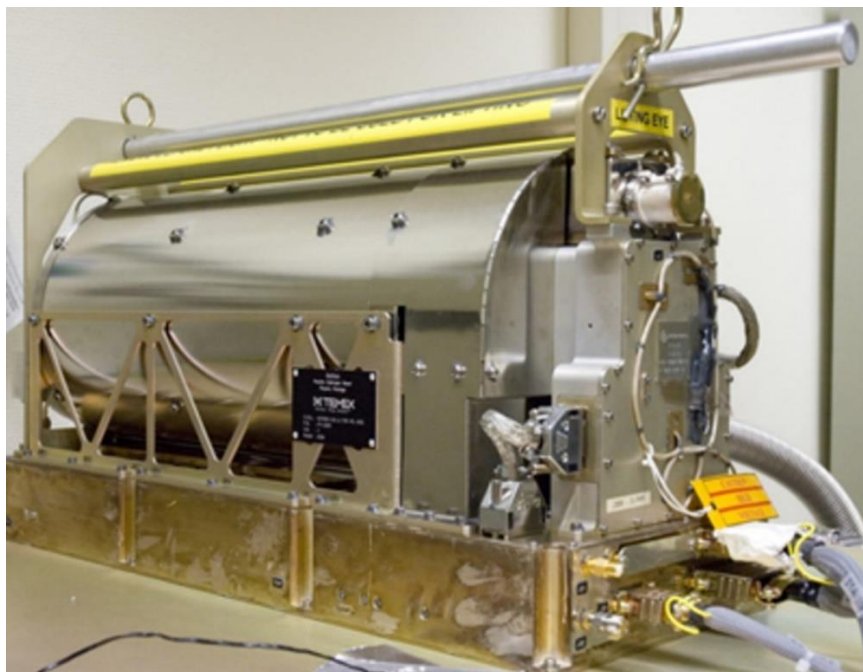


Slika 4. Pojednostavljeni prikaz pogreške u satelitskoj orbiti [5]

3.1.2. Pogreške u satelitskom satu

Pogreške u satelitskom satu uzrokuje čak i najmanje vremensko odstupanje satova u prijemnicima u usporedbi s vremenom na satovima satelita, zbog čega nastaje pogreška u položaju. Vrijeme u satelitima određuju satelitski atomski satovi. Atomski sat, kao što je prikazano na slici 5, najprecizniji je tip sata na svijetu. Atomski satovi dizajnirani su za mjerenje vremena prema vibracijama unutar atoma. Velika preciznost satova ne znači da nemaju pogrešku. Točnost satelitskog sata utječe na izračunavanje udaljenosti između satelita i prijammnika jer se ona temelji na osnovi brzine svjetlosti i vremena koje je potrebno da signal dođe do prijammnika. Preciznost GNSS ovisi o preciznosti mjerenja vremena. Za razliku od GPS sustava koji ima svoje GPS vrijeme, svaki GNSS se koristi jednom vremenskom skalom. GPS vrijeme određuju atomski satovi. Svaki satelit ima svoj atomski sat koji djeluje kao baza za realizaciju GPS vremena. Kontrolna stanica prati vrijeme na satovima satelita i njihovo odstupanje prema GPS vremenu te ga održava u granici od 1 milisekundi. Na satelitskim satovima vrijeme ide brže zbog utjecaja ekscentriciteta orbita i relativnosti. Pogreška relativnosti se ispravlja prije slanja satelita u orbitu. Frekvencija od

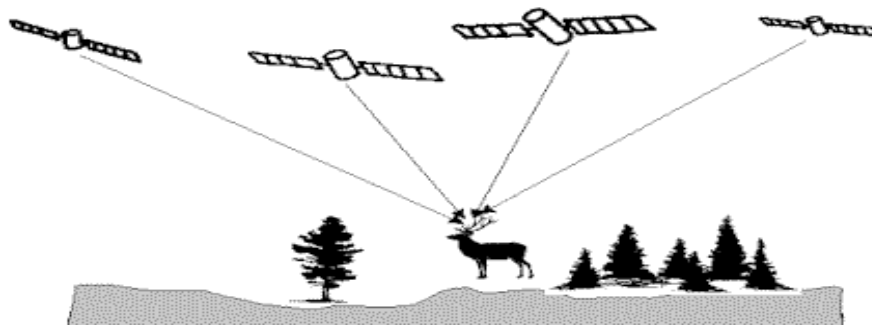
10.23 MHz se ispravlja na frekvenciju od 10.229999545 MHz da bi se ispravio taj utjecaj. Pogreška ekscentriciteta orbite satelita uzrokuje pogrešku od 14 m.



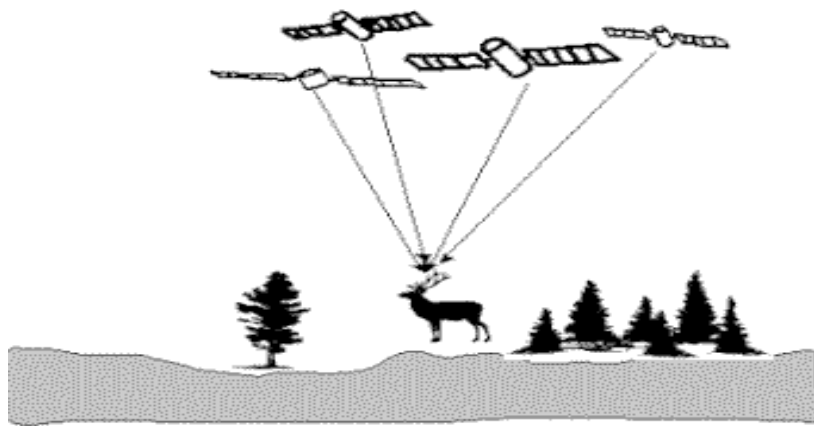
Slika 5. Galileov atomski sat [13]

3.1.3. Pogreške u geometriji satelita

Točnost pozicioniranja pomoću satelita uvelike ovisi o geometriji satelita, odnosno o kutovima udaljenosti između satelita i naziva se dilatacija preciznosti (engl. *Dilution of Precision* - DOP). Koristi se za opisivanje snage trenutne satelitske geometrije i utječe na točnost podataka prikupljenih GPS ili GNSS prijemnikom u vrijeme korištenja. GPS i GNSS prijemnici pomoću satelita iznad korisnika trianguliraju korisnikov položaj. Sateliti mogu vrlo precizno izračunati korisnikov horizontalni položaja, a manje su precizni u određivanju vertikalnog položaja. Za preciznije određivanje pozicije potrebna je dobra geometrija satelita kao što je prikazano na slici 6.



a) Dobra geometrija satelita



b) Loša geometrija satelita

Slika 6. Primjer dobre (a) i loše (b) geometrije satelita [14]

Sateliti grupirani zajedno na istom području, imaju lošu geometriju te im je vrijednost DOP-a viša. Sateliti ravnomjerno raspoređeni po nebu imaju dobru geometriju te je njihova vrijednost DOP-a manja. Opisane vrijednosti i kvaliteta podataka za određivanje pozicije prikazani su u tablici 1. Veći broj dostupnih satelita ravnomjerno raspoređenih po nebu ima veću točnost korisnikova položaja i manju vrijednost DOP-a. DOP se dijeli u pet vrijednosti:

- geometrijski DOP (GDOP),
- pozicijski DOP (PDOP),
- horizontalni DOP (HDOP),
- vertikalni DOP (VDOP),
- vremenski DOP (TDOP).

Vrijednost GDOP se opisuje kao utjecaj satelitske geometrije i vremena na poziciju u orbiti. Za dobro određivanje pozicije vrijednost GDOP-a bi trebala biti <5 . Vrijednost

PDOP se opisuje kao utjecaj satelitske geometrije na 3D poziciju. HDOP je vrijednost koja opisuje utjecaj satelitske geometrije na horizontalnu poziciju. Vrijednost HDOP ovisi o udaljenosti satelita od zemlje što je satelit udaljeniji to je vrijednost HDOP-a veća. VDOP je vrijednost koja opisuje utjecaj satelitske geometrije na vertikalnu poziciju. Vrijednost VDOP-a se smanjuje približavanjem satelita horizontu. TDOP je vrijednost koja opisuje utjecaj satelitske geometrije na mjerenje vremena. Vrijednost GDOP-a se dobije sa jednim satelitom u zenitu i tri satelita jednako raspoređena na horizontu. 3D preciznost geometrije satelita je prikazana PDOP. PDOP se sastoji od dvije komponente HDOP-a i VDOP-a. Vrijednost VDOP-a je uvijek veća od vrijednosti HDOP-a, to znači da je vrijednost vertikalne pogreške veća od vrijednosti horizontalne. Razlika veličina vrijednosti HDOP-a i VDOP-a veća je na većim geografskim širinama [19].

Tablica 1. Vrijednost DOP-a i njegova kvaliteta za određivanje pozicije [17]

Vrijednost DOP-a	Kvaliteta	Opis
<1	Idealno	Najviša razina pouzdanosti.
1-2	Izvršno	Razina pouzdanosti za sve osim najosjetljivijih aplikacija.
2-5	Dobro	Razina pouzdanosti minimalna za određivanje točne pozicije.
5-10	Umjereno	Može se koristiti za izračune.
10-20	Nepouzđano	Može se koristiti za grube procjene pozicije.
>20	Loše	Na ovoj razini treba odbaciti dobivene podatke.

Novi GPS prijemnici prate sve satelite iznad korisnika, a navigacijsko rješenje u tom se slučaju temelji na signalima svih satelita. DOP se izračunava odabirom četiri optimalna satelita. Odabir četiri optimalna satelita temelji se na azimutu i kutu elevacije satelita [9].

3.2. POGREŠKE KOJE UTJEČU NA ŠIRENJE SATELITSKOG SIGNALA

Satelitski signali su elektromagnetski valovi te oni podliježu zakonima širenja valova. Ulaskom u medije različite gustoće podliježu fizikalnim principima loma i refrakcije. Na putu od satelita do prijamnika, elektromagnetski valovi prolaze kroz tri medija različite

ionizacije i gustoće, koji utječu na smjer vala i brzinu širenja vala. Budući da sateliti GPS-a na visini od 20200 km imaju orbitu oko Zemlje, možemo ih podijeliti u 3 različite sfere:

- ionosfera od 60 do 1000 km,
- stratosfera od 15 do 50 km,
- troposfera od 0 do 15 km.

Stratosfera nije razmatrana dalje u radu, jer se njeni utjecaji na satelitske signale mogu zanemariti.

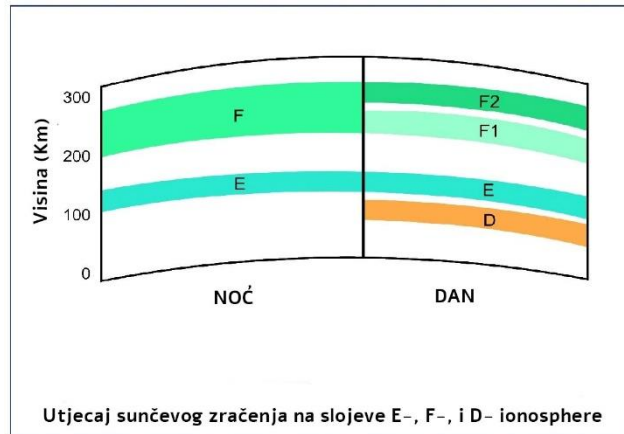
3.2.1. Ionosfersko kašnjenje

Ionosfera je atmosferski sloj koji sadrži velike količine iona i slobodnih elektrona. Ionosfera igra ključnu ulogu u radio komunikacijama zbog svojih lokalnih slojeva s maksimumom ionizacije. Na ionizaciju ovih slojeva utječe dnevni i sezonski hod Sunca (tablica 2.), kao i Sunčev ciklus. Ionizacija ovisi o intenzitetu sunčevog zračenja i lokaciji. Na ekvatoru nalazimo najjaču ionizaciju tijekom dana, koja opada prema polovima. Navedeni čimbenici imaju značajan utjecaj na karakter prizemnih i svemirskih valova u različitim frekvencijskim područjima dugih, srednjih i kratkih valova te mogu dosegnuti domete do 1000 km u najboljem slučaju. Uz prekoračenje moguće je do 2500 km. Sljedeća tablica prikazuje strukturu 3 lokalna sloja i njihovih pod slojeva ionosfere.

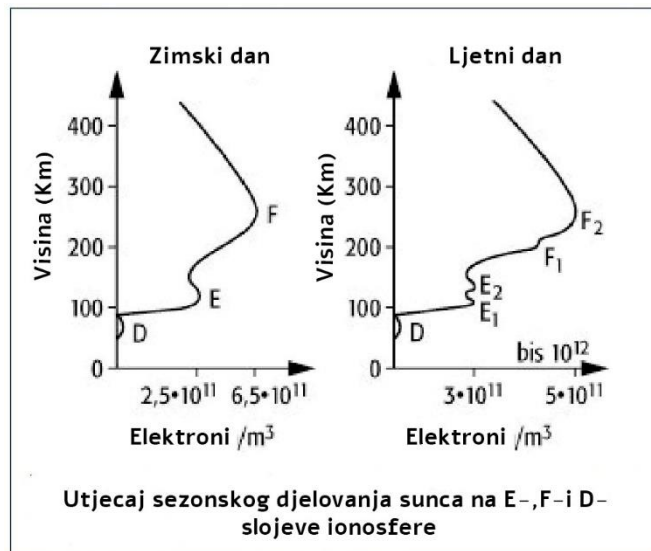
Tablica 2. Tri sloja atmosfere i njihova dostupnost kroz dan [5]

Sloj	Visina	Napomena
D	70-90 km	Prisutan tijekom dana, ionizacija ovisi o poziciji sunca
E	110-130 km	Prisutan tijekom dana, ionizacija ovisi o poziciji sunca
Es	110 km	Tanak, povremen, pogotovo ljeti
F1	200 km	Prisutan tijekom dana, a noći prisutan sa slojem F2
F2	250-400 km	Prisutan tijekom dana i noći

Kao što je spomenuto, struktura ioniziranog D-, E- i F-sloja jako ovisi o utjecaju dnevnog i sezonskog izlaska sunca i povezanog intenziteta sunčevog zračenja. Kako je to slikovito prikazano na slikama 7. i 8.



Slika 7. Utjecaj sunčevog zračenja na slojeve ionosfere [5]



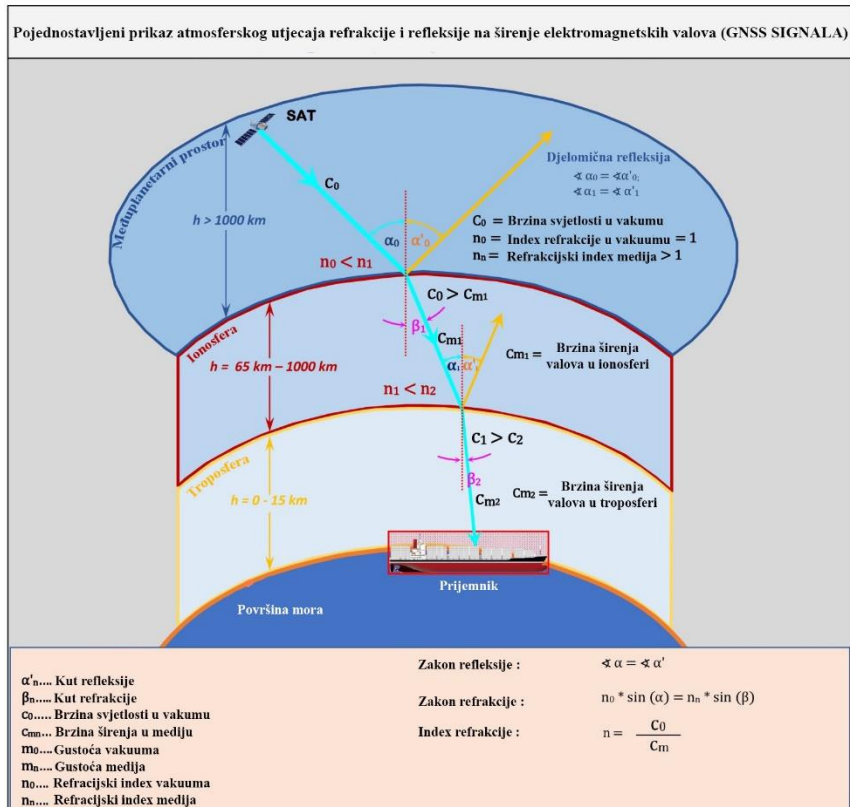
Slika 8. Utjecaj sezonskog djelovanja sunca na ionosferu [5]

Ionosfersko kašnjenje nastaje zbog pojave ionosferske refrakcije elektromagnetskih valova. Odnosno dolazi do promjene brzine širenja radiovalova zbog promjene medija u kojem se radioval širi. Satelitski navigacijski sustavi djeluju na principu mjerenja vremena rasprostiranja, zbog toga ionosfersko kašnjenje direktno utječe na točnost određivanja pozicije. Ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja posljedica je ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u ionosferi. Ukupni broj elektrona definira se kao broj slobodnih elektrona unutar vertikalnog stupca presjeka 1 m^2 na putu satelitskog signala između satelitske i korisničke antene.

Kada satelitski signal uđe u gušću ionosferu iz međuplanetarnog prostora, događaju se dva valna fenomena. Refrakcija i refleksija vala su prikazani na slici 9.

Refleksija valova, u fizici, je odbijanje ravnih valova na graničnoj površini dvaju sredstava. Energija elektromagnetskog zračenja obično se samo djelomično reflektira na sučelju. Također se naziva i djelomična refleksija. Osnova refleksije je zakon refleksije, koji kaže da ako upadna zraka, okomica i izlazna zraka leže u istoj ravnini, tada je upadni kut α = izlazni kut α' . Indeks loma odražava omjer valne duljine svjetlosti, a time i fazne brzine u vakumu prema drugom mediju. Općenito ovisi o valnoj duljini. To jest, valovi različitih valnih duljina mogu se reflektirati u različitim stupnjevima [5].

Refrakcija u fizici znači promjenu smjera širenja valova kroz prostornu promjenu indeksa loma medija kroz koji val prolazi. Promjena indeksa loma dovodi do promjene fazne brzine (c) osovine. Refrakcija se javlja kod bilo koje vrste valova koji se šire u više od jedne dimenzije. Na putu od satelita kroz međuplanetarni prostor satelitski signal se širi pravocrtno i brzinom svjetlosti. Ulaskom u ionosferu, odnosno u gušći medij, uzrokovan ionizacijom plinova koji se tamo nalaze, sunčevom svjetlošću, dio vala se refraktira na sučelju (djelomična refrakcija), dok se drugi dio vala lomi na među površini i kroz koji prolazi gusti medij. Zbog toga dolazi do kašnjenja širenja satelitskog signala, on će biti prigušen, usporava se i dolazi do promjene smjera vala, uzrokovane promjenom valne duljine pri probijanju sučelja. Smanjena brzina širenja satelitskog signala uzrokuje kašnjenje signala. Ovo takozvano ionosfersko kašnjenje ovisi o frekvenciji i može biti do 300 ns u najgorem slučaju, što bi odgovaralo pogrešci položaja od oko 100 m. Budući da su valovi visokih frekvencija, tj. u L pojasu (frekvencijski raspon 1-2 GHz, $\lambda = 30-15$ cm), manje izloženi utjecajima ionosfere, upravo oni koriste za satelitsku navigaciju [5].



Slika 9. Pojednostavljeni primjer djelovanja refrakcije i refleksije na elektromagnetske valove [5]

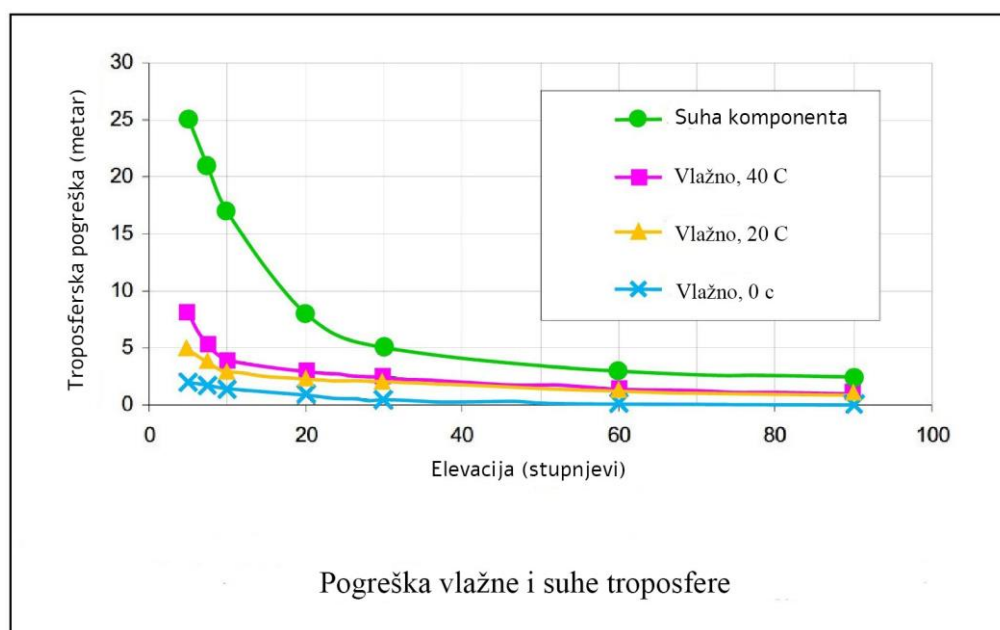
3.2.2. Troposferska pogreška

Troposfersko kašnjenje nastaje zbog činjenice da se radiovalovi (satelitski EM signali) ne šire brzinom svjetlosti kao u vakuumu, već se šire manjom brzinom. Za razliku od ionosferskog kašnjenja uzrok ovoj pojavi nalazi se u donjim neutralnim dijelovima atmosfere, a promjenu brzine širenja radiovalova uzrokuje promjena temperature, tlaka i relativne vlažnosti zračnih masa u troposferi kroz koje se šire satelitski signali.

Troposfera kao najniži sloj zemljine atmosfere od površine zemlje do oko 15 km visine. Karakterizira je to što njezina gustoća opada s visinom. Glavni uzroci troposferske pogreške su kutovi elevacije satelita, temperatura, vlažnost i gustoća molekula plina. To se može jednostavno izraziti: što su veća gustoća i temperatura i niža vlažnost u troposferi i što je manji kut elevacije satelita, to je veće kašnjenje satelitskog signala. Za razliku od ionosferskog kašnjenja troposfera nije disperzivna za GPS frekvencije, to znači da indeks refrakcije ne ovisi o frekvenciji. Povećanje troposferskog kašnjenja ovisi o refrakcijskom indeksu zračnih masa na koje nailazi satelitski signal na svom putu do korisničke antene.

Najvažniji faktor je gustoća zračnih masa, koja se može izraziti kao zbroj gustoća sastojaka suhog zraka i sastojaka vodene pare. Ova gustoća ovisna je o tlaku suhog zraka i vodene pare te o temperaturi. Suhi i vlažni sastojci atmosfere utječu različito na propagaciju satelitskog signala i svaki se modelira posebno.

Sastav suhog zraka ovisi o geografskoj širini, sezoni (djelu godine) i nadmorskoj visini i relativno je stabilan. Sastav vodene pare u troposferi je mnogo teže modelirati, on varira u skladu s lokalnim vremenskim i hidrometeorološkim uvjetima i može se vrlo brzo mijenjati. Treba istaknuti da troposfersko kašnjenje ovisi 90% o predvidivom stanju suhe atmosfere, a 10% o teško predvidivom stanju vlažne atmosfere, kao što je prikazano na slici 10.



Slika 10. Veličina pogreške vlažne i suhe troposfere [5]

3.3. POGREŠKE PREPOZNAVANJA

Pogreške prepoznavanja nastaju kada oprema koja se koristi nije ispravna ili kada sustav krivo prepoznaje primljeni signal. To su pogreške sata prijemnika ili elektronike prijemnika. Subjektivni faktori su pogreške koje nastaju kada korisnik ne zna pravilno rukovati sa opremom.

3.3.1. Pogreška sata prijamnika

Udaljenost između satelita i prijemnika je 0,07 sekundi uzimajući u obzir brzinu signala koja je jednaka brzini svjetlosti. Uz traženu mjernu točnost manju od jednog metra, zahtijeva satove vrlo visoke točnosti. To je moguće samo s atomskim satovima visoke preciznosti, koji naravno imaju svoju cijenu. Uzimajući u obzir ekonomska ograničenja, satovi s takvom točnošću ugrađeni su samo u satelite. Prijemnici su opremljeni jeftinijim, temperaturno stabiliziranim satovima. Može se vidjeti da postoji pogreška u mjerenju koju je potrebno ispraviti drugim sredstvima kako bi se postigla točnost manja od jednog metra. Pogrešku je moguće ispraviti s algoritmima koji simuliraju pogrešku sata prijemnika. Pogreške gledanja mogu biti vrlo različite. Osim konstantnih i linearnih pogrešaka, postoje i nelinearne pogreške. Mjerenja materijala na kristalima sata su vrlo opsežna i skupa, pa se ovaj problem mora razjasniti softverskim rješenjima. U tu svrhu se pretpostavlja da je pogreška sata prijemnika u trenutku određivanja položaja konstantna. Ista je za sva mjerenja udaljenosti. Mjerenjem 4 satelita, pogreška sata može se izračunati kao četvrta nepoznanica. Pored pogreške sata prijamnika mogu se pojaviti druge pogreške signala zbog tehničkih i fizičkih pogrešaka na prijamniku, tada metoda neće uspjeti. Potreban je veći matematički napor da se kompenziraju te pogreške.

3.3.2. Pogreške elektronike prijamnika i subjektivne pogreške

Pogreške elektronike prijamnika pokrivaju širok raspon tehničkih kvarova kao što su problemi s prikazom, problemi s matičnom pločom, problemi sa sučeljem, problemi s podatkovnim priključkom, problemi lokalne računalne mreže (engl. *Local Area Network* – LAN). Korištenjem internih testova sustava koje su proizvođači integrirali u prijamnike mogu se unaprijed otkriti interne pogreške. U pogonskim uputama proizvođača dane su potrebne upute i preporuke za postupanje.

Subjektivne pogreške su ljudski faktori, odnosno neispravno rukovanje opremom prijemnika od strane korisnika, zbog nepoznavanja ili nedovoljnog poznavanja sustava. Neispravnim upisom važnih parametra veličine broda i položaja GNSS antena, dodjele GNSS sustava, postavke RAIM alarma, referentni datum, I/O izbornik mogu nastati pogreške od nekoliko stotina metara u određivanju udaljenosti ili mogu nastati problemi sustava koji vode do potpunog kvara [5].

3.4. Umjetne pogreške

GNSS je sustav koji radi na bazi elektromagnetskih valova te je zbog toga podložan smetnjama. Svi elektromagnetski sustavi imaju jednu zajedničku osobinu, može ih se namjerno ili nenamjerno ometati pomoću drugih ili istih elektromagnetskih tehničkih sustava, tako da je njihova uporaba ograničena ili čak onemogućena. Potrebno je napraviti jasnu razliku između namjernih pogrešaka, nenamjernih pogrešaka i namjernog ometanja signala.

3.4.1. Namjerne pogreške

Primjer namjerne pogreške je selektivna dostupnost koju je američka vlada ostavila kao namjernu pogrešku da se ti sustavi ne koriste protiv njih ali više o tome je pisano u prijašnjem dijelu rada.

3.4.2. Nenamjerne pogreške

GNSS prijammnici su namijenjeni primanju skupa signala iz svemira koji obuhvaćaju niz frekvencija. Upareni GNSS prijammnik i antena moraju odbijati sve druge frekvencije koje nisu GNSS kako bi se izbjegle smetnje sa satelitskim signalima relativno male snage. Frekvencijski rasponi koje prijammnik treba pratiti obično su definirani nizom propusnih filtera unutar prijemnika, koji se nazivaju propusni pojas. Smetnje utječu na GNSS prijammnik na više načina, ovisno o snazi i vrsti ometača. Prisutnost smetnji može povećati šum prijemnika unutar pojasa i smanjiti omjer signala i šuma. Prisutnost jačih smetnji može uzrokovati kompresiju ili zasićenje prijammnika i generirati harmonike i Inter modulacijske produkte koji padaju u propusni pojas GNSS prijammnika. GNSS prijammnici u uvjetima smetnji pokazat će smanjeni omjer nosioca i šuma, bučnija GNSS mjerenja i naposljetku smanjene točnosti određivanja položaja. U najtežim slučajevima, prijammnik će izgubiti sposobnost određivanja položaja.

Izuzetno niska snaga prijema GPS signala osigurava preduvjete za njegovu osjetljivost na neželjene smetnje, kao što su smetnje izazvane emisijama izvan pojasa. Smetnje mogu potjecati iz telekomunikacijskih i elektroničkih sustava koji rade u susjednim pojasevima ili u pojasevima koji su relativno udaljeni od GPS pojasa, kao što su FM/TV odašiljači, AM odašiljači i mobilne mreže. Smetnje izazvane emisijama izvan pojasa su nenamjerne smetnje sa signalima GNSS satelita. Treba uzeti u obzir da sateliti GNSS-a mogu odašiljati nestandardne C/A kodove tijekom svojih faza održavanja, što ometa pravilan rad GNSS-a [6].

3.4.3. Namjerno ometanje signala

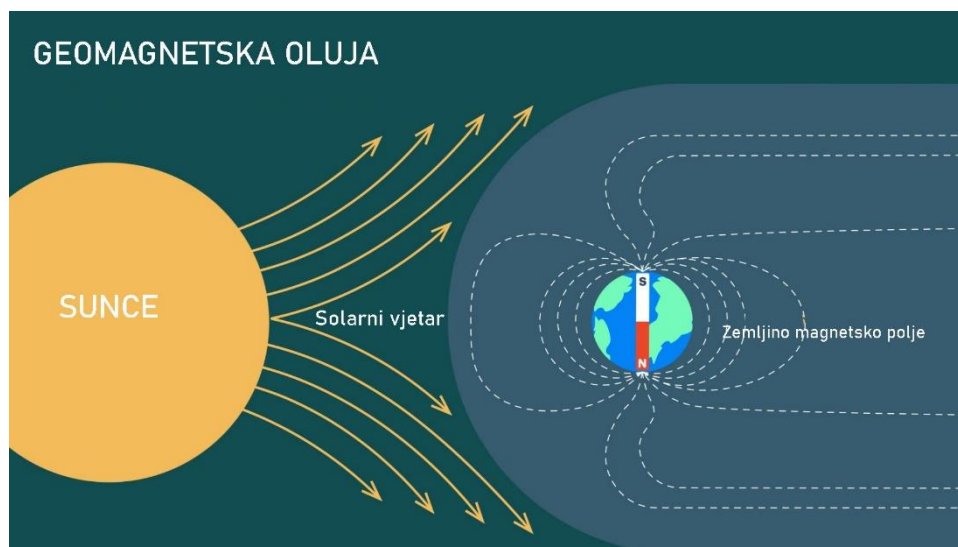
Razvojem tehnologija pozicioniranja putem globalnih navigacijskih satelitskih sustava, razvijene su tehnologije za ometanje prijema signala poslanih sa satelita. Tako su nastali uređaji koji ometaju GNSS signal radiofrekvencijski odašiljači dizajnirani na način da blokiranjem, prigušivanjem ili bilo kojim drugim načinom djelomičnog ili potpunog utjecanja na signal onemogućuje određivanje pravog položaja. U mnogim zemljama to je ilegalno, no sve je veća uporaba uređaja za ometanje u civilnim i vojnim aktivnostima. Uređaji koji ometaju GNSS signal su radiofrekvencijski odašiljači koji blokiraju, smanjuju ili na neki drugi način ometaju preciznost GNSS signala, obično odašiljanjem radio valova koji ometaju prave signala i sprječavaju uspostavu ili kontinuirano praćenje signala u GPS prijammnicima. Uređaji za ometanje (slika 10.) se mogu pozicionirati i na udaljenosti do 100 km od izvora smetnje, a imaju izlaznu snagu od samo 1 W. Globalni navigacijski satelitski sustavi emitiraju signale izlazne snage od 30 W, na udaljenosti od 20.200 km iznad zemlje. Signal GNSS gubi na snagu po dolasku na Zemlju. Udaljenost koju signal treba prijeći vrlo je velika, te su ti signali vrlo slabi i lako ih je ometati. Svi uređaji koji rade na istoj ili sličnoj frekvenciji kao GNSS odašiljači mogu biti ometači signala.



Slika 11. Jednostavni GPS ometač [15]

4. GEOMAGNETSKE OLUJE SUNCA

Geomagnetska oluja veliki je poremećaj Zemljine magnetosfere koji nastaje kada postoji izmjena energije sunčevog vjetra u svemirskom okruženju oko Zemlje (slika 11.). Oluje proizlaze iz varijacija solarnog vjetra koji proizvodi velike promjene u strujama, plazmi i poljima u Zemljinoj magnetosferi. Uvjeti solarnog vjetra koji su učinkoviti za stvaranje geomagnetskih oluja su dugotrajna razdoblja solarnog vjetra velike brzine. Magnetsko polje solarnog vjetra usmjereno prema jugu, suprotno od smjera Zemljinog polja na dnevnoj strani magnetosfere. Ovaj uvjet je učinkovit za prijenos energije Sunčevog vjetra u Zemljinu magnetosferu [7].



Slika 12. Način djelovanja geomagnetskih oluja [16]

Geomagnetske oluje stvaraju velike poremećaje u ionosferi. Struje i energije koje donosi geomagnetska oluja poboljšavaju ionosferu i povećavaju ukupan broj ionosferskih elektrona integriran u visinu ili ukupni broj elektrona. GPS sustavi ne mogu ispravno modelirati, ovo dinamičko poboljšanje i pogreške se unose u izračun položaja. Događa se na velikim geografskim širinama, iako velike oluje mogu proizvesti velika povećanja elektrona i na srednjim geografskim širinama. U blizini Zemljinog magnetskog ekvatora postoje strujni sustavi i električna polja koja stvaraju nestabilnosti u ionosferi. Nestabilnost je najveća neposredno nakon zalaska sunca. Manje nestabilnosti ili mjhurići uzrokuju "svjetlucaje" GPS signala, slično kao što će valovi na površini vode poremetiti i raspršiti putanju svjetlosti dok prolazi kroz njih [7].

Najveća geomagnetska oluja dogodila se 1859. godine. U telegrafskim žicama se uočila inducirana električna struja koja je uzrokovala električni udar na nekoliko telegrafskih operatera te je prouzrokovala par požara. Polarna svjetlost se vidjela čak na Havajima, Meksiku, Kubi i Italiji. 1989. godine geomagnetska oluja je uzrokovala izbacivanje električne mreže u Quebecu, 6 milijuna ljudi je ostalo bez električne struje na 9 sati. Polarna svjetlost se vidjela i u Teksasu.

Solarne oluje nastale sredinom listopada pa do kraja studenog 2003. godine bile su serije solarnih oluja koje su uključivale solarne baklje i izbacivanja koronarne, a vrhunac su dosegle oko 28. – 29. listopada. Ovaj niz oluja generirao je najveću solarnu baklju koju je ikada zabilježio geostacionarni satelitski sustav.

5. PRECIZNOST SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA

GNSS sustavi iako su precizni imaju pogrešku od nekoliko metara, ovisno o vremenskim uvjetima ta greška može biti i veća. Mobilni telefon sa uključenim GPS-om ima preciznost od 4.9 m kada je vrijeme vedro. Preciznost može ovisiti o tome nalazi li se u blizini zgrada, šume ili mostova. Skuplji uređaji za pozicioniranje povećavaju točnost GNSS-a s dvofrekventnim prijaimnicima ili sustavom augmentacije. Omogućuju pozicioniranje unutar nekoliko centimetara. GNSS uređaji ne određuju preciznost, već ona ovisi o signalu koji dolazi sa satelita. Na primjer, Američka vlada se obvezuje na emitiranje GPS signala sa satelita s dnevnom globalnom prosječnom greškom (engl. *User Range Error* – URE) od $\leq 2,0$ m, s 95% vremena. Stvarna izvedba obično je mnogo bolja. 20. travnja 2021. godine globalni prosjek URE-a na svim satelitima bio je $\leq 0,643$ m 95% vremena [20]. Planirana točnost GPS sustava za 2024. godinu iznosi oko 0.8 m [20]. Tablica 3. prikazuje točnost GPS podataka za 2008., 2016. i 2024. godinu za 95% vremena.

Tablica 3. Točnost GPS pozicioniranja [17]

Točnost sustava	Garantirana točnost (2008.)	Postignuta točnost (2016.)	Planirana točnost (od 2024.)
Horizontalna točnost (95%)	≤ 9 m	$\leq 1,9$ m	do 1 m
Vertikalna točnost (95%)	≤ 15 m	$\leq 3,8$ m	
URE (95%)	$\leq 7,8$ m	$\leq 3,9$ m	0,8 m

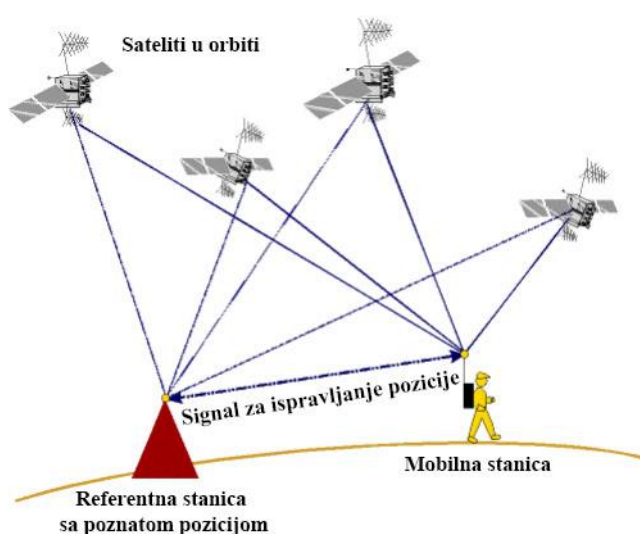
5.1. Sustavi za povećanje preciznosti GNSS-a

Pogreške izračuna pozicije kod GNSS-a nastaju zbog pogreške satelitskog sata, pogreške geometrije satelita, utjecaja troposfere i ionosfere, pogreške satelitske orbite, nenamjernog i namjernog ometanja signala. U tablici 4. su prikazane vrijednosti tipičnih izvora pogrešaka. Pogreške se mogu djelomično ispraviti odabirom optimalnih satelita, diferencijalnim GPS-om, sustavima augmentacije, te drugim metodama mjerenja.

Tablica 4. Prikaz tipičnih pogrešaka GNSS-a i njihovih vrijednosti [21]

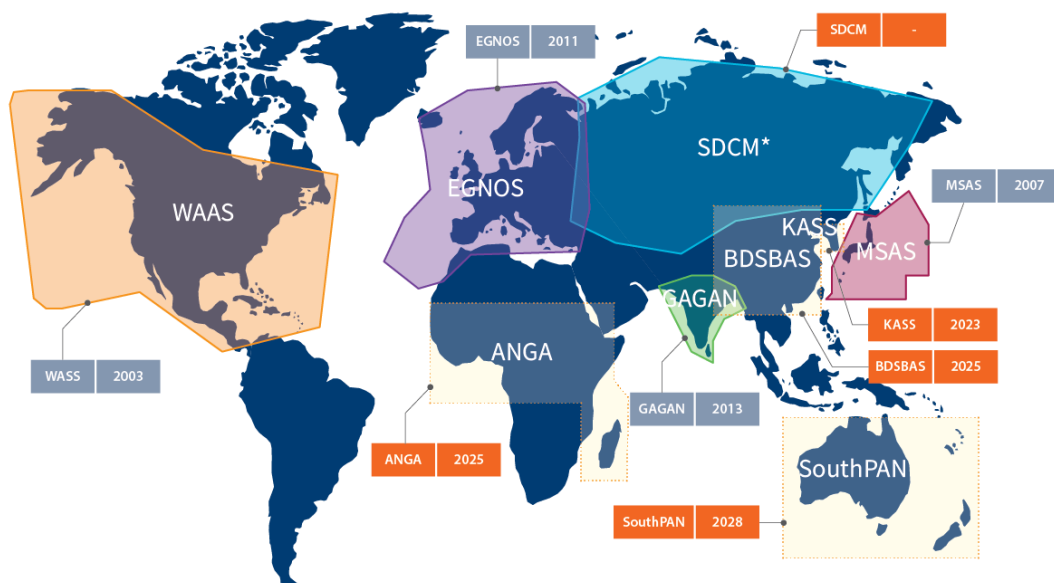
IZVOR	VRIJEDNOST
Ionosferski utjecaji	5,0 m
Troposferski utjecaji	0,5 m
Pogreške orbite	2,5 m
Pogreške satelitskog sata	2,0 m
Numeričke pogreške	1,0 m

Diferencijalni sustav globalnih navigacijskih satelitskih sustava (engl. *Differential GNSS - DGNSS*) nadopunjuje i poboljšava podatke o položaju koji su dostupni iz globalnih navigacijskih satelitskih sustava. Za rad sustava potrebna je točno određena pozicija nazvana referentna stanica. Svaka referentna stanica izračunava razliku između svoje poznate pozicije i pozicije dobivene sa satelitskim signalom. Razlika između te dvije pozicije naziva se diferencijalna korekcija. Kontrolna stanica zatim emitira diferencijalnu korekciju, odašiljačima kratkog dometa, do mobilnih DGNSS prijemnika. Mobilni prijemnici koriste te podatke za ispravljanje svoje pozicije. Objašnjeni način rada prikazan je na slici 13. Razina preciznosti ovisi o udaljenosti između DGNSS prijammnika i referentne stanice. Što je prijammnik bliži stanici to će biti veća točnost pozicije. Točnost pozicije iznosi oko 2 m u krugu od nekoliko stotina kilometara od referentne stanice.



Slika 13. Način rada DGNSS-a [22]

Augmentacija GNSS je metoda poboljšanja navigacijski sustava u smislu preciznosti, dostupnosti i pouzdanosti koristeći vanjske informacije za izračun. U pomorskoj navigaciji najviše se koriste satelitski sustavi augmentacije (engl. *Satellite Based Augmentation System* - SBAS) i kopneni sustavi augmentacije (engl. *Ground Based Augmentation System* - GBAS). Učinkovitost GNSS-a može se poboljšati regionalnim SBAS sustavom, kao što je Europska geostacionarna navigacijska usluga (engl. *European Geostationary Navigation Overlay Service* - EGNOS). Regionalna pokrivenost SBAS sustavom je prikazana na slici 14. SBAS povećava točnost i pouzdanost GNSS informacija ispravljanjem pogrešaka mjerenja i pružanjem informacija o točnosti, pouzdanosti i dostupnosti svojih signala. SBAS koristi GNSS mjerenja koja su izvršile precizno locirane referentne stanice. Sve izmjerene GNSS pogreške prenose se u kontrolnu stanicu, gdje se izračunavaju diferencijalne korekcije. Ti se izračuni zatim emitiraju preko pokrivenog područja pomoću geostacionarnih satelita koji služe za ispravaka GNSS podataka [23].



Slika 14. Regionalna pokrivenost SBAS sustava [23]

GBAS se najviše koristi u avijaciji prilikom slijetanja i polijetanja. GBAS, s antenama na poznatim pozicijama, prima signale s GNSS satelita. Prijamnici mjere vrijeme prijenosa signala između GNSS satelita i antena kako bi procijenili udaljenost koju je signal prešao. GBAS uspoređuje izmjerenu udaljenost sa stvarnom udaljenošću na temelju položaja satelita za emitiranje i stvarnog položaja GNSS prijemnika te utvrđuje pogrešku. Izmjerena pogreška naziva se korekcija, tu korekciju prijemnik na avionu prima i prepravlja podatke

GNSS-a. Globalni satelitski navigacijski sustavi kao što su GPS i GLONASS koriste SBAS za povećanje preciznosti kod određivanja pozicije, dok diferencijalni sustav poput DGPS koristi GBAS augmentaciju kako bi pružili veću preciznost pozicije.

6. ZAKLJUČAK

Globalni navigacijski satelitski sustavi su neophodni za moderno brodarstvo, te su značajno smanjili količinu vremena koja je potrebna za određivanje pomorskih ruta i sigurnu plovidbu. Brodovi postaju sve veći i složeniji za navigaciju, te se posade moraju oslanjati na elektroničke uređaje za navigaciju. GNSS se sastoji od tri segmenta: kontrolni, korisnički i svemirski. Prekretnica za korištenje GNSS sustava se dogodila 2000-te godine kada je ukinuta selektivna dostupnost GPS-a, te se povećala preciznost određivanja pozicije. Globalni navigacijski satelitski sustavi su najbrži i najprecizniji način određivanja pozicije u navigaciji te vrlo koristan alat za izradu karata no oni se mogu koristiti i u druge svrhe poput trgovine, znanstvene svrhe, praćenje i nadzor. Pogreške koje utječu na preciznost GNSS-a su raznolike no u idealnim uvjetima sve te pogreške se mogu ispraviti te dovesti GNSS do točnosti unutar zanemarivih vrijednosti. Dvije najznačajnije pogreške koje utječu na preciznost su ionosfersko i troposfersko kašnjenje. Ionosfersko i troposfersko kašnjenje nastaju dok signal putuje kroz atmosferu. Pogreške mogu nastati ako se na nepravilan način interpretiraju dobivene informacije stoga je važna i pravilna obuka korisnika. Potrebno je osim pravilne obuke provjeriti ispravnost uređaja koji se koriste. Ispravnost uređaja je nužna, jer u suprotnom može dovesti to velikih pogrešaka u preciznosti. Osim pogrešaka na preciznost GNSS-a mogu utjecati i ometanja. Ometanja koja se rade uz pomoć uređaja za ometanje signala smanjuje preciznost GNSS-a. Na preciznost mogu utjecati i nenamjerna ometanja koja nastaju kada se veći broj uređaja koji radi na istoj frekvenciji nalazi u blizini. Preciznost GNSS-a može se povećati korištenjem DGNSS-a ili sustavima augmentacije. Pogreška koja se može očekivati na brodu iznosu manje od 2 m. Pogreška će se još smanjiti razvojem novijih sustava za povećavanje preciznosti te bi ona do 2024. godine trebala iznositi oko 1 m. Ovako visoku preciznost možemo očekivati samo u idealnim vremenskim uvjetima. Pogreška pozicije može iznositi puno više kada se pogoršaju vremenski uvjeti.

LITERATURA

- [1] Gps.gov *Other global navigation systems* (2021.). (pristupljeno 09.01.2023.) URL: <https://www.gps.gov/systems/gnss/>
- [2] Thirsk, R. *What are global navigation systems* (2020.). (pristupljeno 20.01.2023.) <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss>
- [3] The aerospace corporation. *A brief history of GPS*. <https://aerospace.org/article/brief-history-gps>
- [4] Januszewski Gdynia, J. *Sources of Error in Satellite Navigation Positioning*. Maritime University, Gdynia, Poland (2017.)
- [5] Shutze, G. *Physical and technical errors of GNSS* (2019.). (pristupljeno 02.02.2023.) <https://www.marine-pilots.com/articles/14518-gps-part-2-physical-and-technical-errors-of-gnss-error-analysis>
- [6] Hexagon. *Unintentional interference*. (2015.) (pristupljeno 24.02.2023.) <https://novatel.com/tech-talk/velocity-magazine/velocity-2015/unintentional-interference>
- [7] National oceanic and atmospheric organization. *Geomagnetic storms* (pristupljeno 05.03.2023.) <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms>
- [8] Gage facility. *Selective availability and GPS receiver* (2019.) (pristupljeno 17.03.2023.) <https://www.unavco.org/education/resources/tutorials-and-handouts/tutorials/selective-availability-gps.html>
- [9] V.B.S.Srilatha, Indira Dutt, G.Sasi Bhushana Rao, S.Swapna Rani, Swarna Ravindra Babu1, Rajkumar Goswami and Ch.Usha Kumari. *Investigation of GDOP for Precise user Position Computation with all Satellites in view and Optimum four Satellite Configurations* (2009.).
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Transit-1A.jpg> (09.01.2023.)
- [11] <https://asc.army.mil/web/portfolio-item/navstar-global-positioning-system-gps/> (09.01.2023.)
- [12] <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/sa/data/> (20.01.2023.)
- [13] esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_s_clocks (02.02.2023.)
- [14] <https://www.umweltanalysen.com/en/gps/dilution-of-precision/> (02.02.2023.)
- [15] <https://www.thesignaljammer.com/product-category/gps-jammers/> (17.03.2023.)

- [16] <https://windy.app/textbook/what-is-geomagnetic-storm-explanation-in-simple-words.html> (17.03.2023.)
- [17] Zrinjski, M. Barković, Đ. Matika, K. *Razvoj i modernizacija GNSS-a*, Geodetski list (2019.) (pristupljeno 12.04.2023.)
- [18] <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information> (pristupljeno 12.04.2023.)
- [19] Karauter, A. *Role of geometry in gps positioning* Department of Surveying Technical University of Budapest (1998.) (pristupljeno 12.04.2023.)
- [20] <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/> (pristupljeno 13.04.2023.)
- [21] Agatić, M. *Ispitivanje preciznosti GNSS pozicioniranja i navigacije poljoprivrednog traktora* Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek (2019.) (pristupljeno 14.04.2023.)
- [22] Gracin, T. *Differential GPS*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva (2006.) (pristupljeno 16.04.2023.)
- [23] <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas> (pristupljeno 16.04.2023.)
- [24] https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/howitworks (pristupljeno 16.04.2023.)
- [25] <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1957-001B> (pristupljeno 16.04.2023.)
- [26] Buzov, I. *Navigacijski senzori autonomnih brodova*. Pomorski fakultet, Split. (2020) (pristupljeno 16.04.2023.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Prototip satelita Transit [10].....	2
Slika 2. Navstar vojni GPS [11]	6
Slika 3. Prikaz iznosa selektivne dostupnosti prije i poslije ukidanja [12]	8
Slika 4. Pojednostavljeni prikaz pogreške u satelitskoj orbiti [5].6	11
Slika 5. Galileov atomski sat [13].	12
Slika 6. Primjer dobre (a) i loše (b) geometrije satelita [14].	13
Slika 7. Utjecaj sunčevog zračenja na slojeve ionosphere [5].....	16
Slika 8. Utjecaj sezonskog djelovanja sunca na ionosferu [5].	16
Slika 9. Pojednostavljeni primjer djelovanja refrakcije i refleksije na elektromagnetske valove [5].....	18
Slika 10. Veličina pogreške vlažne i suhe troposfere [5].	19
Slika 11. Jednostavni GPS ometač [15]	22
Slika 12. Način djelovanja geomagnetskih oluja [16].....	23
Slika 13. Način rada DGNSS-a [22].....	26
Slika 14. Regionalna pokrivenost SBAS sustava [23]	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednost DOP-a i njegova kvaliteta za određivanje pozicije [17].....	14
Tablica 2. Tri sloja atmosfere i njihova dostupnost kroz dan [5].....	15
Tablica 3. Točnost GPS pozicioniranja [17]	25
Tablica 4. Prikaz tipičnih pogrešaka GNSS-a i njihovih vrijednosti [21].....	26