

Struktura GPS signala

Mataija, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:187:548902>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



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](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

IVAN MATAIJA

STRUKTURA GPS SIGNALA

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**STRUKTURA GPS SIGNALA
GPS SIGNAL STRUCTURE**

**ZAVRŠNI RAD
BACHELOR THESIS**

Kolegij: Elektronička navigacija

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

Student: Ivan Mataija

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112083317

Rijeka, rujan 2024.

Student: Ivan Mataija

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112083317

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom *Struktura GPS signala* izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Davida Brčića.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom 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.

Student: Ivan Mataija



Student: Ivan Mataija

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112083317

IZJAVA STUDENTA – AUTORA O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG
ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>.

Student: Ivan Mataija

Handwritten signature of Ivan Mataija in black ink.

SAŽETAK

Završni rad istražuje strukturu GPS signala, oslanjajući se na širi kontekst satelitske navigacije. U uvodnom dijelu definiraju se osnovni pojmovi i preduvjeti za satelitsku navigaciju, uključujući zajednički geoprostorni i vremenski sustav, te konstantnu brzinu širenja navigacijskih signala. Dalje se analiziraju temeljne usluge satelitske navigacije i različiti GNSS sustavi poput GPS-a, GLONASS-a, Galileo-a i BeiDou-a, kao i regionalni sustavi. Detaljno se razmatraju segmenti satelitskih navigacijskih sustava. Središnji dio rada fokusira se na GPS navigacijske signale, uključujući strukturu signala, val nosilac, kodirane signale i navigacijsku poruku. Također se obrađuje princip satelitskog određivanja položaja i ukupni proračun pogreške položaja s posebnim naglaskom na korisničku razdiobu pogrešaka. Naposljetku, rad proučava primjene GNSS sustava u različitim prometnim sektorima i drugim područjima. Zaključni dio donosi ključna mišljenja i razmatranja.

Ključne riječi: satelitska navigacija, GPS, GNSS sustavi, struktura navigacijskih signala, val nosilac, kodirani signal, navigacijska poruka.

SUMMARY

The bachelor thesis investigates the structure of GPS signals within the broader context of the satellite navigation. The introduction defines basic concepts and prerequisites for satellite navigation, including a common geospatial and temporal system, and the constant speed of navigation signal propagation. It further, thesis analyses the fundamental services of satellite navigation and various GNSS systems such as GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou, as well as the regional systems. The segments of satellite navigation systems are examined in detail. The main part of the thesis focuses on GPS navigation signals, including signal structure, carrier wave, coded signals and navigation messages. It also addresses the principle of satellite positioning and the overall estimation of the positioning error with underline on the user error distribution. Finally, the thesis discusses the applications of GNSS systems in various transportation sectors and other fields. The conclusions summarize the key opinions and considerations.

Keywords: satellite navigation, GPS, GNSS systems, structure of navigation signals, carrier wave, encoded signal, navigation message.

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD	1
2. SATELITSKA NAVIGACIJA	2
2.1. TEMELJNI POJMOVI.....	2
2.2. PREDUVJETI SATELITSKE NAVIGACIJE.....	3
2.2.1. <i>Zajednički geoprostorni sustav</i>	3
2.2.2. <i>Zajednički vremenski sustav</i>	4
2.2.3. <i>Brzina širenja satelitskih navigacijskih signala kao konstante</i>	4
2.3. TEMELJNE USLUGE SATELITSKE NAVIGACIJE.....	5
2.4. SATELITSKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI.....	6
2.4.1. <i>GNSS sustavi</i>	6
2.4.1.1. GPS	6
2.4.1.2. GLONASS.....	7
2.4.1.3. GALILEO	7
2.4.1.4. BeiDou.....	8
2.4.2. <i>Regionalni satelitski navigacijski sustavi</i>	8
2.4.2.1. QZSS	8
2.4.2.2. IRNSS	9
2.4.2.3. WAAS	9
2.4.2.4. EGNOS	10
2.4.2.4. GAGAN.....	10
2.5. SEGMENTI SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA	10
3. SATELITSKI NAVIGACIJSKI SIGNALI SUSTAVA GPS	13
3.1. STRUKTURA NAVIGACIJSKIH SIGNALA	14
3.1.1. <i>Val nosilac</i>	15
3.1.2. <i>Kodirani signal</i>	17
3.1.3. <i>Navigacijska poruka</i>	19
3.2. PRINCIP SATELITSKOG ODREĐIVANJA POLOŽAJA	23
3.3. UKUPNI PRORAČUN POGREŠKE POLOŽAJA	32

3.3.1. Geometrijska razdioba točnosti.....	35
3.3.2. Korisnička razdioba pogrešaka.....	35
3.3.2.1. Atmosferske pogreške	36
3.3.2.2. Pogreške sata	37
3.3.2.3. Pogreške višestaznih puteva	38
4. PRIMJENA GNSS SUSTAVA	39
4.1. POMORSKI PROMET	40
4.2. CESTOVNI PROMET	40
4.3. ZRAČNI PROMET	41
4.4. ŽELJEZNIČKI PROMET	41
4.5. OSTALE PRIMJENE GNSS-a.....	41
5. ZAKLJUČAK	43
LITERATURA	44
POPIS SLIKA	47
POPIS TABLICA	48
KAZALO KRATICA	49

1. UVOD

Određivanje točnog položaja objekta na Zemlji doživjelo je kroz povijest značajan razvoj i napredak te postalo temelj za razvoj suvremenih navigacijskih sustava. Pomorski promet se ne može zamisliti bez stalnog praćenja točne pozicije broda za što je zaslužan složeni sustav satelitske navigacije. Ona predstavlja temeljnu tehnologiju u suvremenom svijetu, omogućujući precizno određivanje položaja, brzine i vremena bilo gdje na Zemlji. Globalni sustav pozicioniranja (engl. *Global Positioning System* - GPS), kao najpoznatiji i najčešće korišten sustav, igra ključnu ulogu u mnogim aspektima svakodnevnog života, od osobne navigacije do industrijskih i vojnih primjena. Razumijevanje strukture GPS signala iznimno je važno za unaprjeđenje učinkovitosti i pouzdanosti navigacijskih sustava koji se oslanjaju na ovu tehnologiju. Sustave satelitske navigacije su različite zemlje razvijale neovisno koristeći iste znanstvene spoznaje i pretpostavke, pa su se tako razvili globalni navigacijski sustavi koji su dostupni u cijelom svijetu i međusobno se podržavaju i preklapaju. Globalne sustave (GNSS) kao što su GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou, kao i regionalne sustave poput QZSS, IRNSS, WAAS, EGNOS i GAGAN je nužno dobro upoznati, analizirati, savladati njihovo korištenje kako bi se tijekom navigacije koristili na učinkovit način s najvećom mogućom preciznošću određivanja pozicije broda. Stoga nam je bitno razumijevanje zajedničkog geoprostornog i vremenskog sustava te konstante brzine širenja satelitskih navigacijskih signala. Također je važno detaljno analizirati segmente satelitskih navigacijskih sustava, kako bi se pružio cjelovit pregled njihovog funkcioniranja.

Ovaj završni rad ima za cilj doprinijeti analizi strukture GPS signala, pružajući dublji uvid u temeljne principe satelitske navigacije i njihovu primjenu u različitim sektorima. Pri tome se posebno vodi računa o strukturi GPS navigacijskih signala, s naglaskom na strukturu vala nosioca, kodiranog signala i navigacijske poruke. Razmatra se i princip satelitskog određivanja položaja, zajedno s proračunom pogrešaka položaja, uključujući analizu geometrijske razdiobe točnosti i korisničke razdiobe pogrešaka. Potrebno je naglasiti primjenu GNSS sustava u pomorskom, cestovnom, zračnom i željezničkom prometu, kao i druge specifične primjene. U konačnici se očekuju smjernice za buduća istraživanja i daljnji razvoj u području satelitske navigacije.

2. SATELITSKA NAVIGACIJA

Poglavlje pruža uvid u temeljne pojmove i preduvjete koji stoje u osnovi satelitskog pozicioniranja. Kroz ovo poglavlje, istražuje se povijest, razvoj i osnovne koncepte satelitske navigacije, stvarajući temelj za daljnje razmatranje strukture GPS signala u narednim poglavljima.

2.1. TEMELJNI POJMOVI

Satelitska navigacija predstavlja tehnologiju koja omogućava određivanje položaja, brzine i orijentacije koristeći satelitske signale. Ova tehnologija temelji se na komunikaciji između satelita u orbiti i prijavnika na površini planeta. Karakteristike satelitske navigacije uključuju sljedeće:

Globalna dostupnost: Satelitska navigacija omogućava globalno određivanje položaja bilo gdje na Zemlji, jer sateliti u orbitama pokrivaju cijelu planetu.

Sateliti: GPS sadrži 33 satelita koji prolaze MEO orbitama na otprilike 20200 km. Nalaze se u 6 orbitalnih ravnina koje su razmaknute 60 stupnjeva i 55 stupnjeva nagiba u odnosu na ekvatorijalnu ravninu. Nazivna konstelacija sadrži 24 satelita što znači da se u svakoj orbitalnoj ravnini mora nalaziti najmanje 4 satelita. Brzina gibanja satelita je 3.88 km/s, a vrijeme ophodnje je 11 sati 56 minuta i 2 sekunde. sateliti neprekidno odašilju signale za određivanje udaljenosti između korisnika i satelita. MEO orbita izabrane su zbog optimalne iskoristivosti signala, dostupnosti određenog broja satelita i mogućnosti njihovog povoljnog međusobnog položaja unutar orbitalne ravnine s ciljem smanjenja geometrijske razdiobne točnosti. Pokrivenost svakog satelita iznosi približno 38 zemljine površine. Ukoliko se u obzir uzme kut maskiranja koji iznosi 5 stupnjeva, efektivna će pokrivenost iznositi 33.9%.¹

Prijamnik: Prijamnik je uređaj koji izdvaja komponente signala sa određenih satelita, rekonstruira prenesen signal te prepoznaje kodove sa određenih satelita. Nakon obrade signala prijamnik izdvaja PRN – kodove koji su potrebni za određivanje pozicije satelita, te je dodatnom obradom moguće dobivanje signala nositelja za fazna mjerenja. Ulazni signal se razlaže na osnovne komponente, te se one obrađuju u određenim sklopovima koji služe kako bi se signal mogao pratiti. PRN kodovi se izdvoje korelacijom, te prijamnik generira kopiju C/A ili P koda koja mu se nalazi u njegovoj memoriji. Kombinacija koda se pomiče

¹ Izvor: Brčić, D. 2015, Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja (Disertacija) Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, online: <https://dr.nsk.hr/en/islandora/object/svkri%3A3167> (26.9.2023.)

za određeni vremenski porod dok ne postigne korelaciju sa kodom satelita. Nakon poklapanja kodova određuje se signal koji je najjači i samim time naj precizniji.²

Preciznost i pouzdanost: Satelitska navigacija može pružiti visoku preciznost položaja, obično unutar nekoliko metara. Točnost usluge se može dodatno poboljšati koristeći diferencijske korekcije i druge metode.

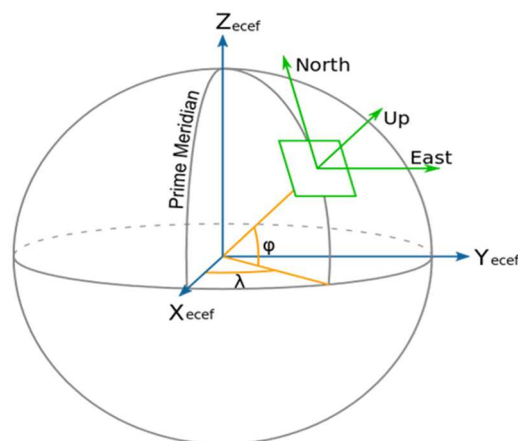
Vrijeme: Satelitski sustavi također omogućuju precizno određivanje vremena, što je ključno u mnogim aplikacijama, uključujući telekomunikaciju, financijske transakcije i vojne operacije.

2.2. PREDUVJETI SATELITSKE NAVIGACIJE

Satelitska navigacija zahtijeva određene preduvjete i temeljne koncepte kako bi pravilno funkcionirala. Ovdje će se razmotriti tri ključna preduvjeta koji su bitni za satelitsku navigaciju.

2.2.1. Zajednički geoprostorni sustav

Za satelitsku navigaciju, važno je usklađivanje koordinatnih sustava kako bi se omogućilo precizno određivanje položaja (Slika 1.).



Slika 1. Referentni koordinatni sustav.

Izvor: Dawson, J., & Woods, A. 2010, The many paths to a common ground: A comparison of transformations between GDA94 and ITRF. online:

https://www.researchgate.net/publication/260210654_The_many_paths_to_a_common_ground_A_comparison_of_transformations_between_GDA94_and_ITRF (28.09.2023.)

² Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H. & Collins I. 1992, Global Positioning System: Theory and Practice, by Springer-Verlag Wien-Graz, Austria, p. 232 - 238.

U tu svrhu, često se koristi Zajednički geoprostorni sustav (engl. *World Geodetic System 1984 - WGS84*), koji je globalno prihvaćeni referentni geodetski sustav. Odnosno WGS 84 je dio Kartezijeva, ECEF sustava (engl. *Earth Cente, Earth Fixed*) u kojemu se pozicija određenog objekta dobije pomoću koordinata X, Y, Z. Ishodište je u središtu zemlje, koordinata X se nalazi u ekvatorijalnoj ravnini na sjecištu ekvatora i početnog meridijana, Y os je okomita na X os u smjeru istoka, a os Z prolazi središtem sjevernog pola.³

2.2.2. Zajednički vremenski sustav

Kako bi se precizno izmjerilo širenje satelitskih signala, potrebna je usklađenost svih segmenata GPS sustava (GPS vrijeme, vrijeme satelita i vrijeme korisnika). GPS vrijeme održava se u odnosu na UTC vrijeme unutar graničnih vrijednosti. Koliko satelitski satovi odstupaju od vremena GPS sustava nalazi se u navigacijskoj poruci satelitskog signala, te se pomoću prijamnika određuje vrijeme odašiljanje signala. Odstupanje korisničkog sata od vremena GPS sustava ovisi o korisniku, stoga se ispravlja dodatnim mjerenjem vremena širenja satelitskog signala. Uslijed pogrešaka u mjerenju vremena širenja satelitskog signala unutar prijamnika se, umjesto stvarne udaljenosti mjeri pseudoudaljenost, odnosno udaljenost između satelita i prijamnika uvećana za vrijednosti pogrešaka satelitskog i korisničkog sata, ionosferskog kašnjenja i ostalih pogrešaka.⁴

2.2.3. Brzina širenja satelitskih navigacijskih signala kao konstante

U satelitskoj navigaciji, brzina širenja svjetlosti u vakuumu ima ključnu ulogu i predstavlja neophodnu konstantu za točno određivanje položaja korisnika. Ova fundamentalna konstanta, čija je vrijednost približno 299.792,458 metara u sekundi, se označava kao "c" i predstavlja najveću brzinu kojom se svjetlost kreće kroz prazan prostor. Konstantna brzina širenja svjetlosti omogućava satelitskim navigacijskim sustavima da precizno izračunaju udaljenost između satelita i prijamnika na temelju vremena putovanja signala. Princip koji stoji iza ovog izračuna poznat je kao "vremenska diferencijalna metoda." Kako sateliti u orbiti kontinuirano odašilju signale, prijamnik na površini bilježi trenutke kada je signal primljen. Ova fundamentalna konstanta omogućava satelitskim navigacijskim sustavima da rekonstruiraju navigacijske poruke iz primljenih signala. Identifikacija satelita na temelju PRN koda signala stvara vezu između satelita i prijamnika.

³ ibidem

⁴ Brčić, D. 2015.

Pomoću informacija iz navigacijskih poruka određuje se položaj svakog satelita i trenutak slanja signala. Izračun pseudoudaljenosti, koji uključuje stvarnu udaljenost, pogrešku korisničkog sata i druge faktore, omogućava precizno određivanje udaljenosti između korisničke i satelitske antene.

Precizno mjerenje vremena putovanja signala omogućava GPS prijamniku da odredi koliko je vremena trebalo svjetlosti da prijeđe udaljenost od satelita do prijamnika. Budući da je brzina svjetlosti u vakuumu konstantna, udaljenost se može izračunati jednostavnom formulom⁵ :

$$r = \Delta t \cdot c \quad (1)$$

gdje slovo r označava geometrijsku udaljenost između prijamne satelitske antene, Δt označava vrijeme propagacije satelitskog signala između prijame i satelitske antene, c označava brzinu širenja satelitskog signala.⁶

2.3. TEMELJNE USLUGE SATELITSKE NAVIGACIJE

Temeljne usluge satelitske navigacije, skraćeno se nazivaju usluge pozicioniranja, navigacije i vremena (engl. *Positioning, Navigation and Timing* - PNT). Ove usluge predstavljaju glavni cilj satelitske navigacije te se sastoje od tri ključna elementa:

Određivanje položaja: Prva i osnovna usluga satelitske navigacije, određivanje položaja, omogućava korisnicima precizno utvrđivanje njihove geografske lokacije.

Navigacija: Navigacijska usluga u ovom kontekstu obuhvaća ključne elemente za upravljanje i vođenje objekata poput vozila, letjelica, brodova i drugih prijevoznih sredstava. Ova usluga omogućava korisnicima planiranje svojih putovanja, praćenje kretanja tijekom puta i precizno usmjeravanje prema odredištima. Navigacijska usluga ostvaruje se kontinuiranim pružanjem informacija o trenutnom položaju objekta, predloženim putanjama i drugim relevantnim podacima koji omogućuju sigurnu i učinkovitu navigaciju.

Usluga pružanja vremena: Precizno vrijeme ima fundamentalnu važnost u mnogim aspektima modernog društva. Usluga pružanja vremena korisnicima omogućava pristup točnom vremenu putem satelitskih signala. Ova usluga osigurava koordinaciju vremenskih događaja, precizno označavanje vremena u komunikaciji i transakcijama, te podržava znanstvena istraživanja. Ova tri ključna elementa PNT usluga čine osnovu za širok spektar aplikacija u različitim industrijama i sektorima.

⁵ ibidem

⁶ Brčić, D. 2015.

2.4. SATELITSKI NAVIGACIJSKI SUSTAVI

2.4.1. GNSS sustavi

Globalni navigacijski sustav (engl. *Global Navigation Satellite System-GNSS*) je naziv za konstelaciju satelita koji pružaju informacije za dobivanje pozicije na globalnoj razini. U sustav GNSS-a spadaju GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou.⁷

2.4.1.1. GPS

GPS je prvi globalni navigacijski satelitski sustav. Razvijen je od ministarstva obrane SAD-a za vojne potrebe. Za vrijeme rata zrakoplovstvo i mornarica paralelno su razvijali vlastitu tehnologiju te su 1973. spojili sustave i nazvali ih NAVSTAR- GPS (engl. *Navigation Satellite Time and Ranging- Global Positioning System*). GPS sustav se sastoji od 3 segmenta : svemirski, kontrolni i korisnički segment. U svemirskom segmentu se nalazi 31 aktivni te dva starija pričuvna satelita koji su raspodijeljeni u 6 orbitalnih ravnina koje su međusobno razmaknute šezdeset stupnjeva u MEO (engl. *Medium Earth Orbit*) orbiti na visini od oko 20 200 km iznad zemlje. Orbite su kružne s inklinacijskim kutom od 55 stupnjeva. Vrijeme ophodnje je 11 sati i 56 minuta. Takav raspored satelita je pogodan iz razloga što pruža minimalno 4 vidljiva satelita s bilo kojeg mjesta. Kontrolni segment načinjen je od zemaljske kontrolne baze koja se nalazi u vojnoj zračnoj bazi Schriever u Coloradu. Kontrolna baza na temelju prikupljenih podataka od 16 nadzornih postaja određuje položaj satelita u svemiru, nakon toga podatke prosljeđuje satelitima preko 11 zemaljskih antena. Frekvencije za odašiljanje PRN kodova su L1 i L2. korisnički C/A kod moduliran ja na L1 nosaču, a zaštićeni p kod na oba nosača.

Korisničkim segmentom se korisnicima omogućava da na raspolaganju imaju besplatan SPS (engl. *Standard Positioning Service*) i PPS (engl. *Precise Positioning Service*) odnosno da imaju besplatne usluge navigacije i GPS-a. U počecima su GPS prijammnici bili velikih veličina no danas su realizirani na puno prihvatljivije oblike kao sto su: čipovi, antene, mikroprocesori.⁸

2.4.1.2. GLONASS

SSSR je 1976. godine započeo razvoj sustava GLONASS koji je prvobitno bio namijenjen kao komunikacijski sustav, te se nakon rata prenamijenio u komercijalnu

⁷ Jurki, D. 2023, Analiza utjecaja ionosferskog kašnjenja na satelitsko određivanje položaja sustavom GPS u polarnim predjelima (Diplomski rad), Sveučilište u Rijeci, online: <https://repository.pfri.uniri.hr/en/islandora/object/pfri:3448> (30.3.2024.)

⁸ Zrinjski M., Barković Đ., Matika K., 2019, Razvoj i modernizacija GNSS-a. Geodetski list, vol. 1, p. 45-65.

aplikaciju za pozicioniranje i navigaciju. Također kao GPS sustav ima svemirski, kontrolni i korisnički segment. GLONASS-ov svemirski segment se sastoji od 24 satelita (21 operativni i 3 rezervna) koja su raspodijeljena u 3 MEO orbite s razmakom 120 stupnjeva, sateliti su u orbitalnoj ravnini raspodijeljeni s razmakom 45 stupnjeva. Orbite su na 19100 km iznad zemlje s inklinacijom 64,8 stupnjeva te je svakom satelitu potrebno 11 sati i 15 minuta da obiđe oko zemlje. Na taj način konstelacija osigurava kontinuiranu globalnu pokrivenost na površini i iznad nje do visine od 2000 km. Također orbitalnu konstelaciju je moguće i proširiti dodavanjem još satelita u ili između orbitalnih ravnina.⁹ Kontrolni segment GLONASS sustava načinjen je od glavnog kontrolnog centra koji se nalazi u Krasnoznamesnku u blizini Moskve te mreža postaja za praćenje koje se većinom nalaze na teritoriju Rusije. Korisnički segment omogućuje korisnicima besplatni civilni servis i autorizirani Vojini servis emitiranjem otvorenih signala L1OF, L2OF L3OC te dva zaštićena signala L1SF i L2SF. U 2007.godini su se počeli proizvoditi prvi GPS/GLONASS prijarnice te su se u 2011 počeli masovno koristiti.

2.4.1.3. GALILEO

GALILEO je prvi europski globalni navigacijski satelitski sustav. Pruža usluge preciznog pozicioniranja, navigacije i određivanja vremena. Pokrenut je od strane europske komisije te je razvijen skupa sa europskom svemirskom agencijom ESA (engl. *European Space Agency*). Kompletan sustav se sastoji od 24 operativna satelita te 6 rezervnih. Nalaze se na visini od oko 23 222 km iznad zemlje u tri MEO orbite s inklinacijom od 56° u odnosu na ekvator. U svakoj orbiti je smješteno 8 satelita s međusobnim razmakom od 45°. Ophodnja traje 14 sati i 5 minuta. Sama inklinacije orbite je odabrana kao takva da bi osigurala pokrivenost u polarnim širinama u kojima GPS nema zadovoljavajuću pokrivenost. Sustav je s razvojem započeo 1999. godine sa inženjerskim timom iz Njemačke, Francuske i Italije. U razvoju je bilo poteškoća zbog financijskih nedostataka i suprotstavljanja SAD- a iz razloga što nisu mogli isključiti GALILEO sustav u vojnim operacijama. U 2003. godini sustavu su se osigurala financijska sredstva od strane EI I ESA te se 2004. godine postigao dogovor o sigurnosnim pitanjima sa SAD- om. U 2005. godini lansiran je prvi satelit pod nazivom GIOVE-A. nakon toga je nastupila opet kriza te se sustav krenuo ponovo razvijati 2008. godine kada je lansiran i drugi testni satelit GIOVE-B.¹⁰

⁹ ibidem

¹⁰ ibidem

2.4.1.4. BeiDou

BeiDou je Kineski satelitski navigacijski sustav, prvobitno je bio namijenjen za vojnu upotrebu a, danas se koristi i za potrebe civila. Sustav je napravljen od regionalnog komunikacijskog navigacijskog sustava globalnog navigacijskog satelitskog sustava. Njegov svemirski segment se razlikuje po tome to za razliku od drugih GNSS sustava ima satelite raspoređene u tri različite orbite. Sadrži 35 satelita od kojih je 27 (24 operativna 3 rezervna) pravilno raspoređeno u tri MEO orbite razmaknute za 120 stupnjeva. Nalaze se na visini od 21 528 km s inklinacijom 55 stupnjeva te periodom ophodnje od 12 sati i 35minuta. U GEO (engl. *Geostationary Orbit*) orbiti na visi od 35 786 km nalazi se 5 satelita, te se posljednja tri satelita nalaze u tri inklinirane geosinkronizirane orbite (IGSO- *Inclined GEO*) razmaknute za 120 stupnjeva s inklinacijskim kutom od 55 stupnjeva. Tako raspoređeni sateliti omogućavaju Kini pokrivenost teritorija Kine i rubnih područja Azije te potpunu globalnu pokrivenost zemlje.¹¹

2.4.2. Regionalni satelitski navigacijski sustavi

Svaki od regionalnih navigacijskih satelitskih sustava (engl. *Regional Navigation Satellite System - RNSS*) pruža precizno pozicioniranje unutar određenih geografskih regija i često ima specifične prednosti za te regije.¹²

2.4.2.1. QZSS

QZSS (engl. *Quasi-Zeinth Satllite System*) je japanski regionalni navigacijski satelitski sustav. Njegov cilj je da skupa sa GPS-om daje precizne i stabilne usluge pozicioniranja, navigacije i vremena na područjima istočne Azije i Oceanije s fokusom na Japan. Sustav se sastoj od 4 satelita od kojih se tri nalaze u kvazi-geostacionarnoj orbiti QZO i jedan GEO satelit koji se nalazi iznad ekvatora. Jedan od satelita se nalazi pokraj zenita u Japanu s kutom elevacije 70 stupnjeva ili više. Sustav je postao potpuno operativan od prvog studenog 2018. godine nakon što su 2017. godine poslana posljednja tri satelita. Prvi satelit je lansiran 2010. godine. Njegov zemaljski segment se sastoji od dvije glavne kontrolne postaje koje se nalaze u Japanu te mreže postaja za praćenje koje se nalaze raspoređene po istočnoj Aziji i Oceaniji. QZSS je od velike važnosti iz razloga što povećava dostupnost GPS-a u velikom broju

¹¹ ibidem

¹² ibidem

područja i kanjonima u kojima se mogu opažati samo sateliti na visokim elevacijama. Također njegova svrha je i poboljšanje performansi, točnosti i pouzdanosti GPS navigacijskih rješenja. Njegovi sateliti odašalju signale koji su kompatibilni sa GPS L1 C/A, L1C, L2C L5S (1176.45MHz). u 2015. godini su s počeli proizvoditi serijski QZSS prijamnike i GNSS prijamnike u koje se integrira QZSS. Sustav pruža mogućnost slanja informacija o prirodnim katastrofama te ostalim kriznim situacijama kao npr. tsunami, potres i teroristički napad u situacijama kada su komunikacijske mreže prekinute.¹³

2.4.2.2. IRNSS

IRNSS (engl. *Indian Regional Navigation Satellite System*) je indijski regionalni navigacijski satelitski sustav koji uspostavljen od strane indijske svemirske agencije (engl. *Indian Space Research Organisation - ISRO*). Usluge pozicioniranja pruža po cijeloj Indiji te oko 1500 km od teritorija Indije. Prvobitno je bio razvijen za vojne potrebe kako Indija ne bi ovisila o GPS-u i ostalim sustavima koji su im za vrijeme vojnih operacija ograničene dostupnosti. Trenutna primjena nadilazi vojnu upotrebu te je važan i bitan čimbenik za razvoj svemirske industrije. Njegov svemirski segment se sastoji od 7 satelita, tri su na visinama od 36 000 km u geostacionarnim orbitama, preostala 4 se nalaze u geosinkronim orbitama s inklinacijom od 29 stupnjeva u odnosu na ekvatorijalnu ravninu. Sateliti su u takvom rasporedu kako bi se omogućilo da kontrolni centri Indije mogu kontinuirano pratiti svih 7 satelita.¹⁴

2.4.2.3. WAAS

WAAS (engl. *Wide Area Augmentation System*) je regionalni navigacijski sustav koji je razvijen kako bi poboljšao preciznost i pouzdanost GPS signala u Sjevernoj Americi. Ovaj sustav pruža podršku zračnom prometu, pomorskoj navigaciji i drugim važnim sektorima. WAAS koristi mrežu zemaljskih referentnih stanica koje prikupljaju podatke o položaju i vremenu, te ih šalju satelitskim odašiljačima koji ih distribuiraju korisničkim uređajima. Ovi podaci se koriste za korekciju grešaka u GPS signalu, čime se postiže veća točnost i integritet navigacijskih informacija. Sustav WAAS sastoji se od mreže geostacionarnih satelita koji

¹³ Zrinjski M., Barković Đ., Matika K., 2019, Razvoj i modernizacija GNSS-a. Geodetski list, vol. 1, p. 45-65. Walter, T. et al. 1994, *Flight Trials of the Wide Area Augmentation System (WAAS)*. In Proceedings of the ION GPS, vol. 94, p. 1537-1546.

¹⁴ ibidem

emitiraju korekcijske signale prema korisnicima na Zemlji. Ova infrastruktura omogućuje visoku dostupnost i kontinuiranu pokrivenost.¹⁵

2.4.2.4. EGNOS

EGNOS (engl. *European Geostationary Navigation Overlay Service*) je napredni regionalni navigacijski sustav koji pruža poboljšane usluge pozicioniranja u Europi. Razvijen je u suradnji s Europskom svemirskom agencijom (ESA) kako bi se osigurala veća preciznost, pouzdanost i dostupnost GPS signala na europskom kontinentu. EGNOS koristi mrežu referentnih stanica za prikupljanje podataka o položaju i vremenu te ih distribuira putem geostacionarnih satelita. Ova sofisticirana infrastruktura omogućuje korisnicima da pouzdano koriste EGNOS usluge širom Europe, poboljšavajući tako različite aspekte navigacije i povećavajući sigurnost i učinkovitost u različitim sektorima.¹⁶

2.4.2.5. GAGAN

GAGAN (engl. *GPS Aided GEO Augmented Navigation*) je indijski satelitski sustav koji poboljšava navigaciju u zračnom prostoru. Razvijen od strane ISRO-a i AAI-a, cilj mu je pružiti certificirani sustav za poboljšanje navigacije temeljen na satelitima za sigurnosne aplikacije. Sastoji se od referentnih stanica, kontrolnih centara, zemaljskih uplink stanica i GEO satelita. GAGAN pruža dodatnu preciznost, dostupnost i integritet za pouzdano korištenje GPS-a u zračnom prometu i drugim sektorima, te je certificiran za pružanje usluga u indijskom zračnom prostoru.¹⁷

2.5. SEGMENTI SATELITSKIH NAVIGACIJSKIH SUSTAVA

Uz pomoć odašiljanih vremenskih signala i elektroničkih prijamnika, satelitska navigacija može s velikom preciznošću odrediti određenu lokaciju. Međutim, za točno lociranje položaja potrebna su najmanje četiri satelita. Prijamnici koriste signale za analizu trenutnog lokalnog vremena do visoke preciznosti. Elektronički prijamnik analizira vrijeme i udaljenost od svakog od satelita kako bi dosegao antenu prijamnika korisnika. Četvrti

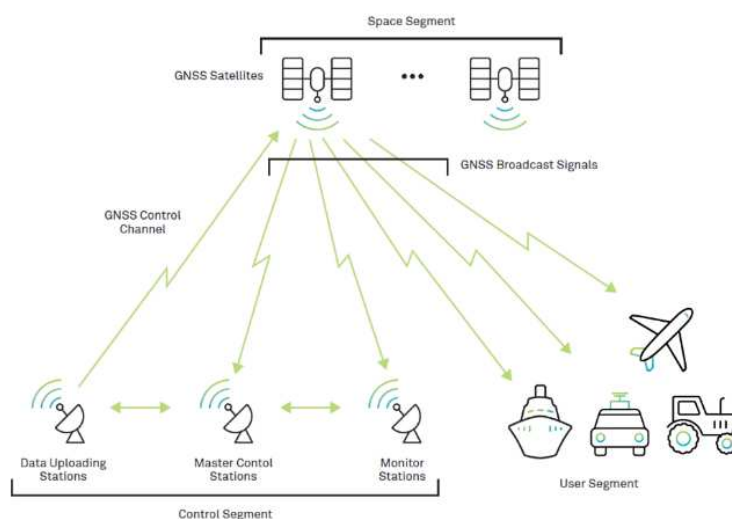
¹⁵ Walter, T. et al. 1994, Flight Trials of the Wide Area Augmentation System (WAAS). In Proceedings of the ION GPS, vol. 94, p. 1537-1546.

¹⁶ Haugg, S. et al. EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service Receiver Terminal, online: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=090163c1454f8821941f6edb0ffbae5aaec6c017> (10.04.2024.)

¹⁷ Indian Space Research Organization, 2016, GAGAN - GPS Aided GEO Augmented Navigation. online: <https://www.ursc.gov.in/navigation/gagan.jsp> (21.04.2024.)

satelit u navigacijskom sustavu pomaže u uklanjanju dvosmislenosti udaljenosti koja je uključena u slučaju tri satelita. Zapravo, što je više satelita uključeno u satelitski navigacijski sustav, veća je točnost koja se može postići. Satelitski navigacijski sustavi precizniji su od drugih navigacijskih opcija. Budući da se radi o sustavu emitiranja koji se temelji na radijskim signalima, neograničeni broj ljudi može ga koristiti neograničen broj puta, bez obzira na lokaciju ¹⁸.

Tri ključna segmenta koja su dio satelitskih tehnologija jesu: (1) prostorni segment, (2) kontrolni segment i (3) korisnički segment (Slika 2). Ovi su segmenti gotovo isti u satelitskim tehnologijama.



Slika 2. Segmenti GNSS.

Izvor: Novatel.com (2023). What are Global Navigation Satellite Systems?. online: <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss> (10.10.2023.)

Kao što se može vidjeti prema Slici 2. prostorni segment opisuje konstelacije GNSS-a. Sateliti emitiraju signale koji identificiraju koji satelit odašilje. Globalne konstelacije su GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou, a regionalni sustavi QZSS i IRNSS. Kontrolni segment označava mrežu glavnih kontrolnih stanica, stanicu za učitavanje podataka i nadzora smještenih diljem svijeta. Postaje primaju signal satelita i potom uspoređuju poziciju satelita s onim gdje bi trebao biti. Operateri mogu vršiti kontrolu položaja satelita kako bi ispravili ili promijenili orbitalne putanje. ¹⁹

¹⁸ Datta, A. 2019, How GNSS signals work within specific frequency bands, online: <https://www.geospatialworld.net/blogs/gnss-frequency-bands-for-constellations/> (20.10.2023.)

¹⁹ Yang, Y., et al. 2020, Inter-Satellite Link Enhanced Orbit Determination for BeiDou-3. Journal of Navigation, vol. 73, no. 1, p. 115-130.

Tablica 1. prikazuje globalne i regionalne sustave, uključujući njihove zemlje/regije porijekla, broj satelita u orbitama, glavne frekvencije signala te pokrivenosti koje pružaju.

Tablica 1. GNSS sustavi

GNSS	Zemlja/regija	Broj satelita	Glavna frekvencija	Pokrivenost
GPS	SAD	31+	L1, L2,L5	Globalna
GLONASS	Rusija	24+	L1, L2	Globalna
Galileo	EU	24+	E1, E5, E6	Globalna
BeiDou	Kina	30+	B1, B2, B3	Globalna
NavIC (IRNSS)	Indija	7	L5, S	Regionalna
QZSS	Japan	7+	L1, L2, L5, L6	Regionalna

Izvor: Novatel.com (2023). What are Global Navigation Satellite Systems?. online: <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss> (10.10.2023.)

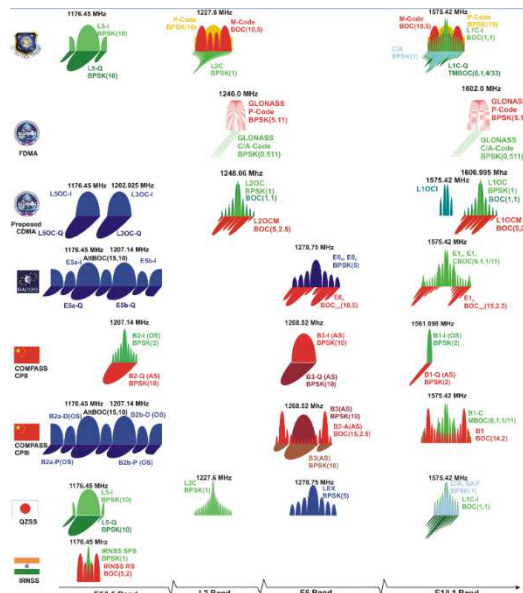
Uz osnovne segmente, neki satelitski navigacijski sustavi koriste referentne stanice kako bi dodatno poboljšali preciznost. Ove stanice su fiksno postavljene na poznate geodetske točke na Zemlji. One neprekidno prate signale sa satelita i precizno mjere svoj položaj. U nekim satelitskim navigacijskim sustavima, poput Galilea, postoji i sigurnosni segment. Ovaj segment omogućuje usluge poput upozorenja o opasnostima, zaštite od sabotaze i sigurnosnih funkcija za posebne aplikacije kao što su zračni promet i vojne operacije.²⁰

²⁰ Yang Y. et. al., op. cit., str. 115–130.

3. SATELITSKI NAVIGACIJSKI SIGNALI SUSTAVA GPS

U ovom poglavlju će se istražiti satelitski navigacijski signali sustava GPS. Kroz ovo poglavlje, prvo će se razmotriti opći aspekti navigacijskih signala koji su zajednički za mnoge satelitske navigacijske sustave, a zatim će se prikazati specifična struktura GPS signala. GNSS sustavi djeluju unutar određenih dijelova radio spektra koji su im dodijeljeni. Kada signale koristi zrakoplovna zajednica, frekvencijski pojas također treba dijeliti na primarnoj osnovi sa Zrakoplovnom radionavigacijskom službom (engl. *Aeronautical Radionavigation Service* - ARNS). Dodjela frekvencijskih pojaseva GNSS-a je kompleksna zbog različitih usluga i korisnika.²¹ Međunarodni telekomunikacijski savez (engl. *International Telecommunication Union* – ITU) koordinira zajedničku globalnu upotrebu radijskog spektra. Uključuje širok raspon spektra uključujući one za televiziju, radio, mobitele, radarsko satelitsko emitiranje itd. Frekvencijski pojasevi GNSS-a u rasponu od 1 do 2 GHz, poznati kao L-pojas. Svi GNSS koriste signale u nižim dijelovima L-pojasa. Samo signali L1/E1 i L5/E5 koriste frekvencije dodijeljene ARNS-u.²²

Slika 3. prikazuje različite GNSS frekvencijske pojaseve koje koriste različiti sustavi



Slika 3. Korištenje GNSS frekvencijskih pojaseva.

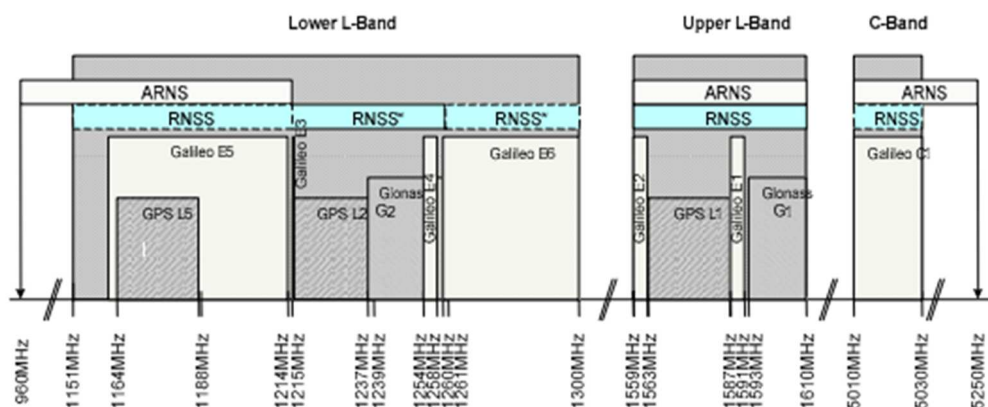
Izvor: Datta, A. 2019, How GNSS signals work within specific frequency bands, online:

<https://www.geospatialworld.net/blogs/gnss-frequency-bands-for-constellations/> (20.10.2023.)

²¹ Yang Y. et. al., op. cit., str. 115–130.

²² Datta A., op. cit.

Signali poput moderniziranog GPS-a, Galilea i GLONASS detaljnije su analizirani u sljedećem poglavlju. Dostupni spektar koji se može koristiti za razvoj radio-navigacijskih satelitskih sustava (RNSS) prikazan je na slici 4. u nastavku.²³



Slika 4. Frekvencijski spektar radio-navigacijskih satelitskih sustava (RNSS) definiran za GNSS signale.

Izvor: Princeton.edu, online: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf> (20.10.2023)

3.1. STRUKTURA NAVIGACIJSKIH SIGNALA

GPS sustav koristi različite frekvencije signala kako bi omogućio precizno određivanje položaja. Glavne frekvencije uključuju L1, L2 i L5. Frekvencija L1 se koristi za standardno pozicioniranje, dok se L2 koristi za precizno pozicioniranje i mjerenje atmosferskih utjecaja. L5 frekvencija se koristi za civilne primjene i ima bolju otpornost na atmosferske efekte. GPS signali su modulirani kako bi prenosili ključne informacije o položaju i vremenu. Modulacija uključuje promjene u fazama i amplitudama signala koje omogućavaju prijateljima da izračunaju svoj položaj. Razumijevanje modulacije signala ključno je za dekodiranje informacija iz GPS signala.²⁴

Kako bi se osigurala sigurnost i kontrola pristupa, određeni GPS signali su šifrirani. To znači da samo ovlaštene korisnici s pravilnim ključem mogu dekodirati i koristiti te signale. Šifriranje je od velike važnosti u vojnim i sigurnosnim aplikacijama GPS-a. GPS

²³ Zaminpardaz, S., Teunissen, P. J. G., & Nadarajah, N. 2017, GLONASS CDMA L3 ambiguity resolution and positioning, *GPS Solutions*, vol. 21, no. 2, p. 535-549.

²⁴ Moraes, A. D. O. 2018, Ionospheric scintillation fading coefficients for the GPS L1, L2, and L5 frequencies. *Radio Science*, vol. 53, no. 9, p. 1165-1174, online: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8679742> (10.01.2024.)

signal sastoji se od nekoliko segmenata, uključujući nosilac, kodirani signal i navigacijsku poruku. Svaki od ovih segmenata ima svoju ulogu u procesu preciznog određivanja položaja korisnika.²⁵

3.1.1. Val nosilac

Val nosilac predstavlja ključnu komponentu strukture GPS signala. Ovaj dio signala igra vitalnu ulogu u preciznom određivanju položaja putem satelitske navigacije. U ovom dijelu će se detaljnije istražiti što je val nosilac, kako se koristi u GPS sustavu i njegovu važnost za određivanje položaja. Val nosilac je čista sinusoidna elektromagnetska valna forma koja služi kao osnovna frekvencija GPS signala. To je visokofrekventna radiovalna komponenta koja se generira na svakom GPS satelitu. Val nosilac ima točno određenu frekvenciju, koja je ključna za precizno određivanje vremena i položaja korisnika. Val nosilac nosi informaciju o vremenu i omogućava precizno sinkroniziranje vremena između satelita i prijarnika na Zemlji. Precizno vrijeme je ključno za određivanje udaljenosti između satelita i prijarnika, a time i za točno pozicioniranje. Svaki GPS satelit ima svoju jedinstvenu frekvenciju vala nosioca, što omogućava identifikaciju i praćenje signala od određenog satelita. On se može prikazati kao čista sinusoidna valna forma na grafičkom prikazu. Ova vizualizacija pomaže u razumijevanju osnovnih karakteristika vala nosioca, uključujući frekvenciju i amplitudu. Precizno određivanje vremena pomoću vala nosioca ključno je za izračun udaljenosti između satelita i prijarnika putem vremenskog kašnjenja signala. Ova udaljenost igra centralnu ulogu u matematičkim modelima za određivanje položaja korisnika. Jedna od metrika je omjer signal-šum (engl. *Signal-to-Noise Ratio* - SNR). SNR izražava omjer između snage nositelja signala i razine šuma. U kontekstu satelitskih komunikacijskih sustava, optimalno postavljanje antene osigurava najbolji SNR. Visoki omjer signala i šuma dovodi do bolje brzine prijama podataka, bolje kvalitete komunikacije i veće pouzdanosti mreže. Stoga je omjer signala i šuma važan pokazatelj za procjenu kvalitete očitavanja faze nositelja signala. Analiza kvalitete GNSS signala na temelju SNR-a daje uvid u stabilnost i pouzdanost signala. Viši SNR općenito ukazuje na bolju kvalitetu signala i bolje performanse pozicioniranja. Ovo može biti važno pri odabiru GNSS opreme ili procjeni kvalitete signala u određenom okruženju.²⁶

Standardna vrijednost SNR-a nije ista za svaku konstelaciju i svaku frekvenciju. Korisnici moraju procijeniti kvalitetu signala svakog satelita i pozvati se na teorijske

²⁵ Markovinović, D. 2001, Globalni pozicijski sustav (GPS). Ekscentar, vol. 4, p. 34-39.

²⁶ Tandra, R., & Sahai, A. 2008, SNR Walls for Signal Detection, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 2, no. 1, p. 4-17.

vrijednosti, tako da korisnicima može biti nezgodno dobiti kvantitativno rješenje za procjenu kvalitete signala. Kako bi se pojednostavio proces analize i korisnicima pružila intuitivnija procjena kvalitete signala, Connor Technology R&D tim definirao je SNR rezultat za sveobuhvatnu procjenu. Ovaj indikator može mjeriti sposobnost GNSS prijavnika da prima signale i odražava njegovu izvedbu praćenja signala i akvizicije. Kratkotrajne oscilacije mogu odražavati poremećaje signala od drugih čimbenika. U istraživanju i analizi omjera signala i šuma, tim za istraživanje i razvoj uglavnom izdvaja omjer signala i šuma iz podataka GNSS promatranja i koristi prosječnu metodu za izračunavanje vrijednosti indeksa.²⁷

Koraci obrade uključuju:

- Teorijski SNR - Teorijske vrijednosti za svaku frekvenciju po satelitu u svakoj epohi izračunavaju se na temelju kuta elevacije praga,
- Stvarni SNR - Stvarne vrijednosti SNR-a za svaki satelit na svakoj frekvenciji u svakoj epohi izvlače se iz neobrađenih GNSS podataka,
- SNR rezultat – SNR rezultat svakog satelita na svakoj frekvenciji u svakoj epohi jednak je:

$$SNR\ rezultat = (stvarna\ SNR\ vrijednost) / (teoretska\ SNR\ vrijednost) \times 100\% \quad (2)$$

- SNR rezultati po epohi - prosjek SNR rezultata po satelitu i po frekvenciji unutar iste epohe.

Što je viši SNR rezultat, to je stvarni SNR bliži teoretskom SNR-u, što ukazuje da drugi čimbenici manje ometaju signal i da je kvaliteta podataka pouzdanija.²⁸ Tablica 2 prikazuje vrednovanje kvalitete GNSS signala s obzirom na SNR rezultat.

²⁷ Tandra, R., & Sahai, A. 2008, SNR Walls for Signal Detection, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 2, no. 1, p. 4-17.

²⁸ ibidem

Tablica 2. GNSS kvaliteta signala

SNR rezultat %	GNSS kvaliteta signala
95-100	Odlično
90-94	Vrlo dobro
85-89	Dobro
80-84	Prihvatljivo
<80	Nezadovoljavajuće

Izvor: obrada autora prema Tandra, R., & Sahai, A. 2008, SNR Walls for Signal Detection, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 2, no. 1, p. 4-17.

Nenormalan SNR odražava veličinu smetnji na koje utječe signal. Obično se SNR na frekvenciji od 1 Hz koristi kao pokazatelj kvalitete signala. Veličina SNR-a izravno će utjecati na performanse hvatanja i praćenja signala, a također utječe na performanse cijelog rješenja za pozicioniranje. To je indeks za mjerenje pouzdanosti akvizicije i praćenja, a može se koristiti za odabir satelita prikladnih za sudjelovanje u rješenju za navigaciju i pozicioniranje.²⁹

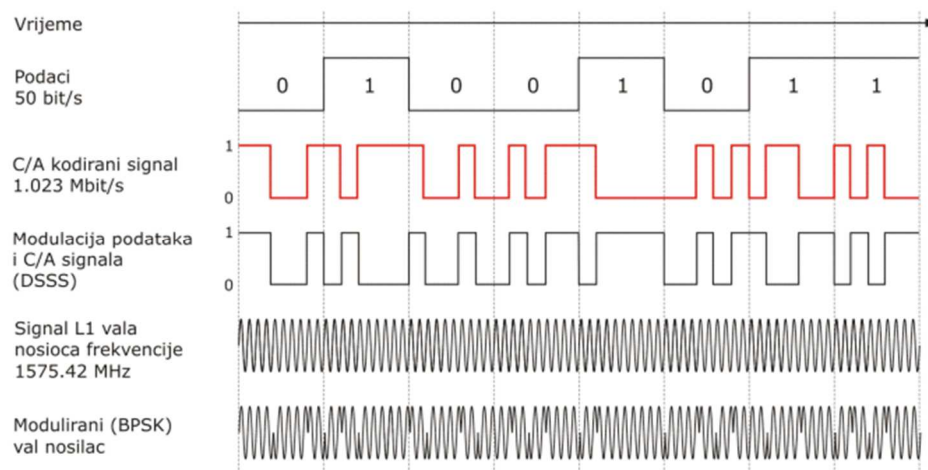
3.1.2. Kodirani signal

Kodirani signal u strukturi GPS signala je ključna komponenta koja nosi informacije o vremenu, satelitskim identifikacijama i korekcijama satelitskih satova. Ovaj signal generira se kombinacijom grube akvizicije (engl. *Coarse/Acquisition – C/A*) koda, preciznog (engl. *Precise - P*) koda i drugih informacija, a svaki satelit emitira svoj jedinstveni kodirani signal. Kodirani signal ima visoku frekvenciju i omogućava precizno određivanje udaljenosti između satelita i prijarnika putem vremenskog kašnjenja signala. Na temelju tih udaljenosti, prijarnik može izračunati svoj položaj. Kodirani signal igra ključnu ulogu u navigacijskom procesu i omogućava precizno pozicioniranje.³⁰

Slika 5. prikazuje strukturu i modulaciju L1 C/A satelitskog signala za određivanje položaja.

²⁹ Tandra, R., & Sahai, A. 2008, SNR Walls for Signal Detection, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 2, no. 1, p. 4-17.

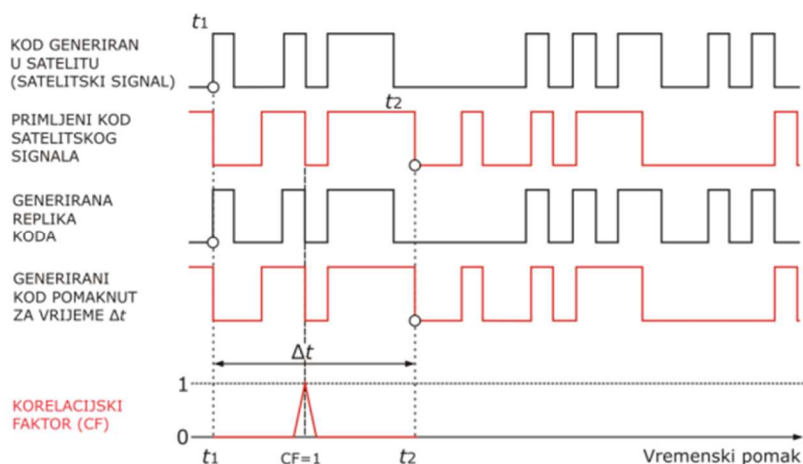
³⁰ European Space Agency, 2024, GPS Navigation Message, In Navipedia. online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (15.07.2024.)



Slika 5. Struktura i modulacija L1 C/A satelitskog signala za određivanje položaja.

Izvor: Brčić, D. 2015, Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja (Disertacija) Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, online: <https://dr.nsk.hr/en/islandora/object/svkri%3A3167> (26.9.2023.)

Kada GPS prijamnik prima signale sa satelita, stvara kopije kodiranih signala svih tih satelita. Kroz postupak korelacije, prijamnik prepoznaje kodirane signale (C/A PRN) od satelita čiji su signali primljeni. Ovaj proces ilustriran je na Slici 6.



Slika 6. Postupak korelacije primljenog (satelitskog) i generiranog (replike) kodiranog signala te mjerenje faze (pomaka) kodnog zapisa.

Izvor: Brčić, D. 2015, Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja (Disertacija) Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, online: <https://dr.nsk.hr/en/islandora/object/svkri%3A3167> (26.9.2023.)

3.1.3. Navigacijska poruka

Svaki satelit prima navigacijske podatke sa zemaljskih antena, koji se zatim šalju korisnicima putem navigacijske poruke. Navigacijska poruka pruža sve potrebne informacije koje omogućavaju korisniku pružanje usluge određivanja položaja. To uključuje parametre potrebne za precizno izračunavanje koordinata satelita, parametre vremena i korekcije sata za izračunavanje pomaka sata satelita i pretvorbe vremena, parametre usluge s informacijama o zdravlju satelita (koristi se za identifikaciju skupa navigacijskih podataka), model parametara ionosfere potreban za prijamnike s jednom frekvencijom, i almanake koji omogućavaju izračunavanje položaja "svih satelita u konstelaciji" s smanjenom preciznošću (1 - 2 km pogreške s 1σ), što je potrebno za prijam signala prijamnikom. Ephemeris i parametri sata obično se ažuriraju svaka dva sata, dok se almanak ažurira najmanje svakih šest dana.

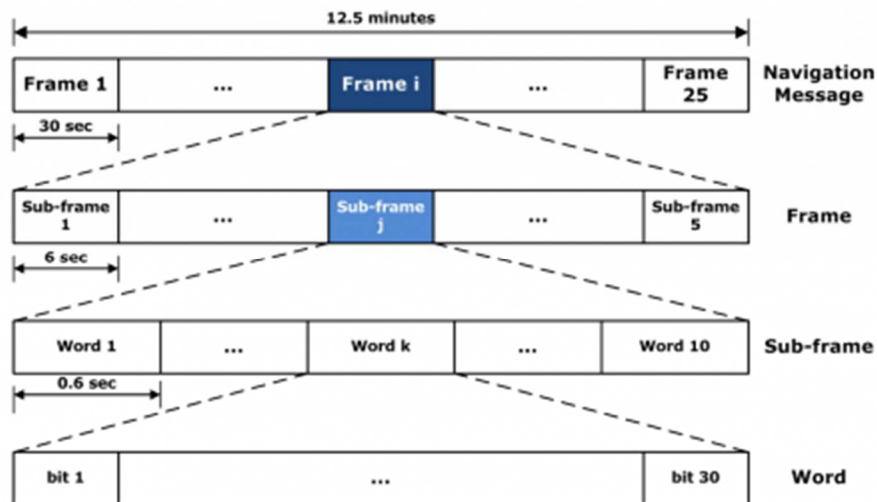
U navigacijskoj poruci se sa satelita odašilju pojedini podatci a to su:

- podatci o ispravnosti satelita,
- vrijeme GPS-a i ispravak satelitskih satova,
- podatci pretvorbe GPS vremena u svjetsko vrijeme,
- procjenjeni položaj od satelita koji odašilje poruku,
- približni položaj preostalih satelita,
- koeficijent modela ispravke ionosferskog kašnjenja.

Iz ovih podataka dobivaju se elementi koji su potrebni za određivanje pseudoudaljenosti: procjenjeni položaj satelita u trenutku odašiljanja signala, trenutak odašiljanja signala i trenutak prijama signala za satelitsko određivanje položaja.

Osim "klasične" navigacijske poruke L1 C/A, uvedene su četiri dodatne nove poruke putem modernizacije GPS-a: L2-CNAV, CNAV-2, L5-CNAV i MNAV. "Klasična" poruka i prve tri modernizirane GPS poruke su civilne poruke, dok je MNAV vojna poruka. U moderniziranom GPS-u, ista vrsta sadržaja kao i "klasična" navigacijska poruka (NAV) prenosi se, ali s većom brzinom i poboljšanom pouzdanošću. Poruke L2-CNAV, L5-CNAV i MNAV imaju sličnu strukturu i (modernizirani) format podataka. Novi format omogućava veću fleksibilnost, bolju kontrolu i poboljšani sadržaj. Nadalje, MNAV uključuje nove poboljšanja za sigurnost i pouzdanost vojne poruke. CNAV-2 je moduliran na L1C i dijeli isti opseg kao "klasična" navigacijska poruka.³¹

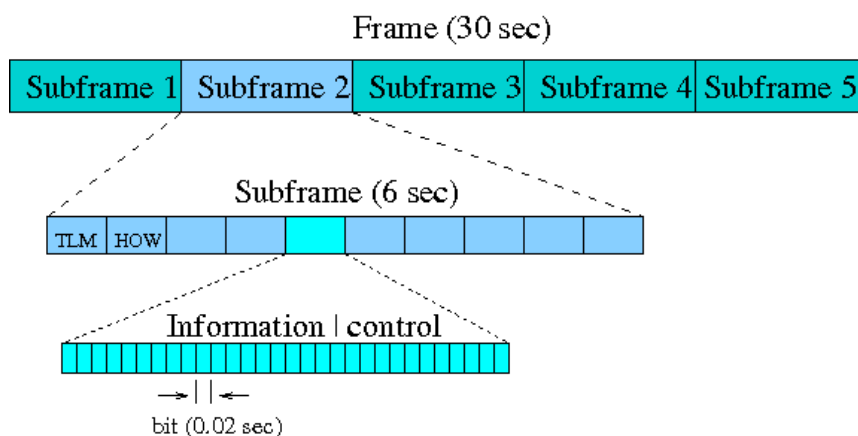
³¹ Navipedia. op. cit.



Slika 7. L1 C/A

Izvor: European Space Agency, 2024, GPS Navigation Message, In Navipedia. online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (15.07.2024.)

Navigacijska poruka (NAV) je modulirana na dva nosača pri 50 bps. Poruka se sastoji od 25 frameova po 30 sekundi, koji stvaraju glavni okvir kojemu je za prijenos potrebno 12 i pol minuta. Svaki se freame sastoji od 5 sub-frameova po 6 sekundi, te se u svakom sub-frame nalazi 10 riječi s 30 bitova po riječi. Sub-frame uvijek počinje riječi TLM koja je potrebna za sinkronizaciju.



Slika 8. Okviri

Izvor: European Space Agency, 2024, GPS Navigation Message, In Navipedia. online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (15.07.2024.)

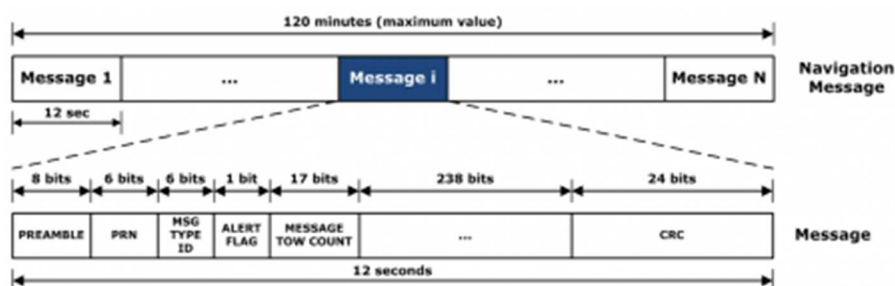
Podokvir 1: u prvom podokviru nalaze se podatci koji su potrebni za korekciju satelitskog sata. To su koeficijenti polinoma koji su potrebni da bi se sat prilagodio GPS vremenu, te se u njemu još nalazi informacija o zdravlju satelita.

Podokviri 2. i 3.: u podokvirima 2 i 3 sadržane su satelitske efermeide.

Podokvir 4: pruža parametre ionosferskog modela (kako bi se prilagodili ionosferskoj refrakciji), UTC informacije (univerzalno koordinatno vrijeme), dio almanaha i indikacije je li Anti-Spoofing, A/S, aktiviran ili ne (što pretvara P kod u šifrirani Y kod).

Podokvir 5: sadrži podatke iz almanaha i status konstelacije. Omogućuje brzu identifikaciju satelita s kojeg dolazi signal. Za kompletiranje almanaha potrebno je ukupno 25 framova.

Podokviri 1,2 i 3 se ponavljaju svakih 30 sekundi odnosno prenose se svaki frameom dok podokviri 4 i 5 sadrže različite okvire navigacijske poruke. Prijenos cijele navigacijske poruke traje 12 i pol minuta (25 x 30 sekundi). Sadržaj podokvira 4 i 5 je zajednički za sve satelite. Stoga se podaci almanaha za sve satelite u orbiti mogu dobiti iz jednog praćenog satelita.



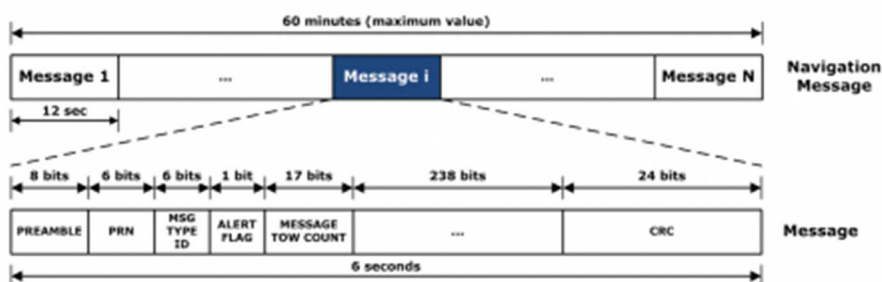
Slika 9. L2-CNAV

Izvor: European Space Agency, 2024, GPS Navigation Message, In Navipedia. online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (15.07.2024.)

Prvobitno emitiranje L2C emitiranje se sastojalo od zadane poruke (vrsta poruke 0) koja je davala ne potpune navigacijske podatke. Plan je bio zadržati lažni prijenos dok operativni kontrolni segment ne postane operativan. Zračne snage su odlučile omogućiti pružanje L2C navigacijskih poruka kako bi pomogli u razvoju kompatibilne korisničke opreme i olakšali koncept operacije CNAV. U travnju 2014. godine je započelo emitiranje ispunjeno porukama uz smanjenu točnost podataka i učestalost ažuriranja u usporedbi s naslijeđenim GPS signalima koji se koriste u širokoj upotrebi. Prosinca 2014. odlučeno je da se ažuriranja L2-CNAV podataka povećavaju na dnevnu stopu, te se samim time L2C

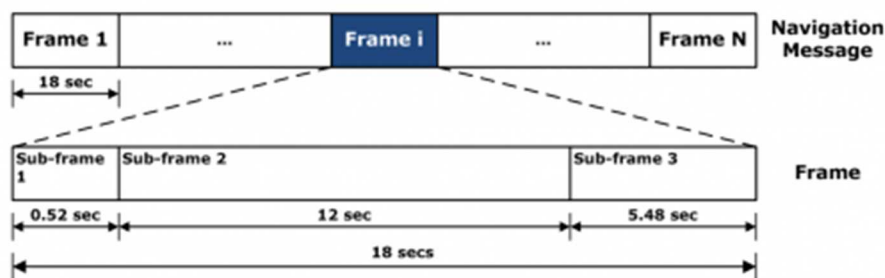
točnost izjednačava s naslijeđenim signalima. Međutim, izvedena točnost položaja ne može se jamčiti tijekom predoperativnog postavljanja frekvencija i njegova se upotreba mora koristiti samo za testiranje i istraživačke aktivnosti. U prosincu 2014., CNAV navigacijska poruka počela se ažurirati na dnevnoj bazi baš kao i naslijeđena poruka, ali se i dalje mora smatrati podacima prije rada i njezina upotreba mora biti ograničena na svrhe testiranja. Operativne deklaracije za L2-CNAV zahtijevat će implementaciju novih mogućnosti praćenja i kontrole u Bloku 1 operativnog kontrolnog sustava sljedeće generacije (OCX).

Njegov dizajn zamjenjuje korištenje okvira i pod-okvira podataka (koji se ponavljaju u fiksnom uzorku) izvornog "naslijeđenog" NAV-a paketiranim komunikacijskim protokolom temeljenim na porukama, gdje se pojedinačne poruke mogu emitirati fleksibilnim redoslijedom s promjenjivim ciklusima ponavljanja kao što je prikazano na slici. Štoviše, FEC (engl. *Forward Error Correction*) i napredno otkrivanje pogrešaka (kao što je CRC) koriste se za postizanje boljih stopa pogrešaka i smanjenog vremena prikupljanja podataka. Svaka poruka sastavljena je od fiksnih podataka kao što su preambula, ID vrste poruke, zastavica upozorenja, TOW broj poruka i CRC koji dopušta da se 238 bita popuni drugim podacima povezanim s navigacijom. Moguće je definirati do 63 različite vrste poruka, no trenutno su definirane samo vrste poruka 10-14 i 30-37. Preostale nedefinirane i neiskorištene vrste poruka rezervirane su za buduću upotrebu. Emitiranje poruka je potpuno proizvoljno, ali sekvencirano kako bi se pružila optimalna izvedba korisnika.



Slika 10. L5-CNAV

Izvor: European Space Agency, 2024, GPS Navigation Message, In Navipedia. online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (15.07.2024.)



Slika 11. CNAV-2

Izvor: European Space Agency, 2024, GPS Navigation Message, In Navipedia. online:
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (15.07.2024.)

Poruka CNAV-2 sastoji se od podokvira i okvira i modulirana je na L1C signal. Svaki okvir je podijeljen u tri pod-okvira različite duljine kojima je potrebno više okvira za emitiranje kompletnog skupa podatkovnih poruka korisnicima.³¹

Podokvir 1 (9 bita) pruža interno vrijeme.

Podokvir 2 (600 bita) daje podatke o satu i efemeridama.

Podokvir 3 (274 bita) pruža druge navigacijske podatke koji se komutiraju preko više stranica.

3.2. PRINCIP SATELITSKOG ODREĐIVANJA POLOŽAJA

Princip satelitskog određivanja položaja temelji se na matematičkom proračunu koordinata prijarnika, osnova za proračun se dobiva od poznate efermeide satelita te izmjerenog vremena prostiranja radiosignala od satelita do prijarnika.

Tri osnovna preduvjeta za satelitsko određivanje vremena su:

1. zajednički sustav vremena
2. zajednički georeferentni koordinatni sustav, odnosno datum
3. ispunjena pretpostavka o konstantnoj brzini prostiranja satelitskog signala (brzina

svjetlosti u vakuumu, $c=2,99792458 \cdot 10^8$ m/s.

Osnova satelitskog određivanja položaja također se temelji i na konceptu triangulacije, gdje se položaj korisnika određuje na temelju signala koji dolaze od više satelita u orbiti. Ovaj princip omogućava precizno pozicioniranje korisnika. Svaki GPS prijarnik mora primiti najmanje četiri satelita za određivanje položaja. Koristeći informacije iz tih signala, prijarnik može izračunati udaljenost između sebe i svakog od satelita. Ova udaljenost se zatim koristi za izračunavanje položaja pomoću matematičkih algoritama.

Identificiranjem satelita na temelju PRN koda signala iz satelita, stvara se veza između satelita i prijavnika. Nakon toga, navigacijska poruka se rekonstruira iz tog signala. Na osnovu informacija iz navigacijske poruke, određuje se položaj svakog pojedinog satelita i trenutak kada je satelit poslao svoj signal. Faza koreliranog signala u odnosu na generiranu repliku unutar prijavnika proporcionalna je vremenu koje je satelitskom signalu trebalo da stigne od satelita do antene korisnika. Prijamnik koristi ovu informaciju kako bi izmjerio pseudoudaljenost između satelitske predajne antene i korisničke prijamne antene.

$$\rho = r + c \cdot bu + c \cdot \delta tD \quad (3)$$

ρ - pseudoudaljenost između korisničke i satelitske antene

r - stvarna udaljenost između korisničke i satelitske antene

bu - pogreška korisničkog sata.

δtD - ukupna pogreška mjerenja vremena širenja signala uslijed ostalih utjecajnih parametara.

Proširenjem izraza u trodimenzionalni pravokutni sustav, dobiva se sljedeći skup jednažbi:

$$p_i = \sqrt{\left(x_u(t_u) - x_{s_i}(t_{s_i})\right)^2 + \left(y_u(t_u) - y_{s_i}(t_{s_i})\right)^2 + \left(z_u(t_u) - z_{s_i}(t_{s_i})\right)^2} + c \times b_u + e_{p_i} \quad (4)$$

p_i - izmjerena pseudoudaljenost s i -tog satelita

x_u, y_u, z_u - koordinate korisnika u trenutku prijama signala

t_u - trenutak prijama signala

$x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i}$ - koordinate i -tog satelita u trenutku odašiljanja signala

t_{s_i} - trenutak odašiljanja signala

$c \times b_u$ - pogreška korisničkog sata

$e_{p_i} = c \cdot \delta tD$ - ukupna pogreška u proračunu udaljenosti uslijed ostalih utjecajnih parametara.

Napredne metode određivanja položaja uključuju:

Kinematika u stvarnom vremenu (engl. *Real-Time Kinematics* - RTK): je tehnika diferencijalnog GNSS-a koja pruža visoke performanse pozicioniranja u blizini bazne stanice. Takva tehnika temeljena je na korištenju mjerenja nositelja i prijenosu korekcije s bazne stanice, čija je lokacija dobro poznata, na rover, čime se poništavaju glavne pogreške

koje pokreću samostalno pozicioniranje. RTK bazna stanica obuhvaća područje usluge od 10 do 20 km, a potreban je komunikacijski kanal u stvarnom vremenu koji povezuje bazu i rover. Kinematika u stvarnom vremenu se sastoji od bazne stanice, jednog ili više korisnika rovera i komunikacijskog kanala kojim baza emitira informacije korisnicima u realnom vremenu. Tehnika RTK-a temelji se na tome da u blizini lokacije čistog neba, glavne pogreške u obradi GNSS signala su konstantne i stoga se poništavaju kada se koristi diferencijalna obrada. To uključuje pogrešku pristranosti satelitskog sata, satelitsku orbitalnu pogrešku, ionosfersko kašnjenje i troposfersko kašnjenje. Glavne pogreške koje su ostale bez ispravka su višestaznost, smetnje i toplinski šum prijamnika. Od gore navedenih pogrešaka, jedina koja je doista konstantna s obzirom na lokaciju korisnika je pristranost satelitskog sata; ostatak će pokazati danu ovisnost o lokaciji kako se rover udaljava od bazne stanice, budući da je troposferska pogreška prva koja će biti potpuno dekorelirana u nekoliko kilometara od baze.³²

Šum mjerenja nositelja mnogo je manji od onog mjerenja pseudo koda. Tipična pogreška kodnih mjerenja pseudoraspona je oko 1 m, za usporedbu s 5 mm za mjerenja faze nositelja. Međutim, obrada mjerenja nositelja podložna je takozvanoj dvosmislenosti faze nositelja, nepoznatog cijelog broja puta valne duljine nositelja, koju je potrebno popraviti kako bi se ponovno izgradila mjerenja punog raspona iz onih nositelja. Fazne dvosmislenosti mogu se popraviti pomoću diferencijalnih mjerenja između dviju referentnih stanica. Dostupne su različite tehnike za njihovo popravljavanje, neke temeljene na mjerenjima jedne frekvencije s dugim vremenima konvergencije, druge iskorištavanjem prednosti dvofrekvencijskih opservabli s kraćom konvergencijom. Općenito, tehnike ili ovise o visokom preciznom poznavanju ionosfere ili pretpostavljaju da su dvije stanice dovoljno blizu tako da je ionosfersko diferencijalno kašnjenje zanemarivo u usporedbi s valnom duljinom nositelja, oko 20 cm. Potonjem se pristupa u RTK, ograničavajući područje usluge na 10 ili 20 km; prvi se koristi u WARTK-u za pokrivanje velikih uslužnih područja s baznim stanicama udaljenim stotinama kilometara. RTK pristup zahtijeva kontinuitet u praćenim mjerenjima kako bi se izbjegla ponovna inicijalizacija filtara fazne dvosmislenosti; ovo je ozbiljno ograničenje u urbanim sredinama zbog velikog broja prepreka.

Bazna stanica emitira svoju dobro poznatu lokaciju zajedno s kodom i mjerenjima nositelja na frekvencijama L1 i L2 za sve satelite u prikazu. S ovim informacijama, oprema rovera može popraviti fazne dvosmislenosti i odrediti svoju lokaciju u odnosu na bazu s

³² Navipedia. op. cit.

velikom preciznošću. Zbrajanjem lokacije baze, rover se postavlja u globalni koordinatni okvir. RTK algoritam temelji se na dvostrukim razlikama u promatranju koje mogu eliminirati učinke selektivne dostupnosti kao i druge pristranosti. U određenoj epohi i za određeni satelit, pojednostavljena je jednadžba promatranja faze nositelja je sljedeća:

$$\phi = \rho - I + Tr + c(b_{Rx} - b_{Sat}) + \llbracket N\lambda + \varepsilon \rrbracket_{\phi} \quad (5)$$

Gdje je:

I kašnjenje putanje signala zbog ionosphere

Tr kašnjenje putanje signala zbog troposfere

b_{Rx} pomak sata prijavnika u odnosu na referentno (GPS) vrijeme

b_{Sat} pomak satelitskog sata u odnosu na referentno (GPS) vrijeme

c brzina svjetlosti u vakuumu

λ nominalna valna duljina nositelja

N višeznačnost faze nositelja (cijeli broj)

ε_{ϕ} komponente šuma mjerenja, uključujući višestazne i druge učinke

ρ geometrijski raspon između satelita i prijavnika, izračunat kao

funkcija satelita $(x_{Sat}, y_{Sat}, z_{Sat})$ i prijavnika (x_{Rx}, y_{Rx}, z_{Rx})

koordiniran kao:

$$\rho = \sqrt{\llbracket (x_{Sat} - x_{Rx}) \rrbracket^2 + \llbracket (y_{Sat} - y_{Rx}) \rrbracket^2 + \llbracket (z_{Sat} - z_{Rx}) \rrbracket^2} \quad (6)$$

Za dva prijavnika a i b koji vrše istodobna mjerenja u isto nominalno vrijeme prema satelitima 1 i 2, dvostruka razlika koja se može uočiti je:

$$\phi_a^{12} - \phi_b^{12} = p_a^{12} - p_b^{12} - I_a^{12} + I_b^{12} + Tr_a^{12} - Tr_b^{12} + \lambda(N_a^{12} - N_b^{12}) + \varepsilon_a^{12} - \varepsilon_b^{12} \quad (7)$$

U gornjoj jednadžbi poništavaju se pomaci sata prijavnika i satelita i hardverske pristranosti. Jedina razlika dvosmislenosti razlika $N_a^{12} - N_b^{12}$ obično se parametrizira kao novi parametar višeznačnosti N_{ab}^{12} . Prednost dvostrukog razlikovanja je u tome što novi parametar višeznačnosti N_{ab}^{12} je cijeli broj jer su eliminirani necijeli članovi u promatranju faze GPS nositelja, zbog kašnjenja sata i hardvera u odašiljaču i prijamniku. Iako bi bilo moguće procijeniti višeznačnost dvostruke razlike korištenjem pristupa *float* umjesto cjelobrojnog pristupa, to bi dovelo do točnosti na razini dm umjesto na razini cm. Stoga standardni RTK popravljaju dvosmislenosti na cjelobrojne brojke. RTK tehnika može se

koristiti za udaljenosti do 10 ili 20 kilometara, dajući točnost od nekoliko centimetara u položaju rovera, u usporedbi s 1 m koji se postiže kodnim diferencijalnim GPS-om . Zbog svoje visoke preciznosti u kontroliranim okruženjima, RTK se intenzivno koristi u geodetskim aplikacijama. ³³

Precizno pozicioniranje točke (engl. *Precise Point Positioning* PPP) ističe se kao optimalan pristup za pružanje globalnih usluga proširenja korištenjem svih dostupnih GNSS konstelacija. Kombiniranjem precizne orbite i satnih proizvoda s nediferenciranim, dvostrukim frekvencijama, kodom i mjerenjem faze nositelja, PPP algoritam može postići preciznost na razini cm ili čak preciznost na razini mm u slučaju statičkog načina rada i naknadne obrade način rada. PPP zahtijeva manje referentnih stanica globalno raspoređenih u usporedbi s klasičnim diferencijalnim pristupima (npr. RTK), a jedan skup preciznih podataka o orbiti i satu vrijedi za sve korisnike svugdje. Uvijek postoji mnogo referentnih postaja koje promatraju isti satelit jer se precizne orbite i satovi izračunavaju iz globalne mreže referentnih postaja. Kao rezultat toga, PPP pruža rješenja položaja na koja uglavnom ne utječu kvarovi pojedinačnih referentnih stanica.

Precizno pozicioniranje (PPP) globalna je usluga preciznog pozicioniranja koja zahtijeva dostupnost precizne referentne satelitske orbite i proizvoda sata u stvarnom vremenu korištenjem mreže GNSS referentnih stanica raspoređenih širom svijeta.

Ne postoje "PPP standardi" kao u drugim GNSS sustavima, ali postoje neke konvencije, modeli i formati koji se uobičajeno koriste. Kako bi se postigla najveća točnost i dosljednost (pozicioniranje na razini mm-cm), uobičajeno je implementirati konvencije i modele specifične za GNSS koje je usvojio IGS . ³⁴

Programeri GNSS softvera općenito su dobro svjesni korekcija koje se moraju primijeniti na opažanja pseudodaleka ili faze nositelja kako bi se eliminirali učinci kao što su specijalna i opća relativnost, Sagnacovo kašnjenje, pomaci satelitskog sata, atmosferska kašnjenja, itd. Svi ovi učinci prilično su veliki, veći od nekoliko metara, i mora se uzeti u obzir čak i za pozicioniranje pseudoraspona na razini preciznosti metra. Kada pokušavate kombinirati satelitske položaje i satove točne do nekoliko centimetara s opažanjima faze nositelja bez ionosfere (s milimetarskom rezolucijom), važno je uzeti u obzir neke učinke koji možda nisu uzeti u obzir u načinima obrade pseudoraspona ili precizne diferencijalne

³³ European Space Agency, 2024, RTK Fundamentals, In Navipedia, online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=RTK_Fundamentals (15.07.2024.)

³⁴ European Space Agency, 2024, PPP Standards, In Navipedia, online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=PPP_Standards (18.07.2024.)

faze. Sljedeći odjeljci sažimaju modele prilagodbe i postupke koji se obično koriste i razmatraju dodatne uvjete korekcije koji su značajni za pozicioniranje točke nosive faze. Modeli korekcije grupirani su u četiri različite kategorije, naime atmosferski učinci, satelitski učinci, učinci pomaka mjesta i učinci pristranosti diferencijalnog koda. Nadalje, raspravlja se o problemima kompatibilnosti i IGS konvencijama. Dio dolje navedenih ispravaka zahtijeva položaj Mjeseca ili Sunca, koji se može dobiti iz lako dostupnih datoteka planetarnih efemerida ili, još praktičnije, iz jednostavnih analitičkih formula. Zapravo, potonji pružaju relativnu preciznost od oko 1/1000, što je dovoljno za korekcije na razini mm. Imajte na umu da uvjete korekcije o kojima se raspravlja u nastavku obavezno treba uzeti u obzir kada ciljate razinu preciznosti ispod centimetra. Nasuprot tome, za diferencijalno pozicioniranje na razini centimetar i osnovne crte manje od 100 km, takvi se ispravci mogu zanemariti.

PPP algoritam se temelji na konceptu podešavanja parametara. Na samom prvom koraku, PPP pruža procjenu položaja nalik pseudorasponu na razini preciznosti metra. Ta se procjena položaja zatim s vremenom poboljšava obradom mjerenja faze nositelja s preciznošću u centimetar, dok procjene koordinata prijammnika, sata, troposferskog kašnjenja zenita i dvosmislenosti početne faze postupno postaju sve točnije. Ovaj proces prilagodbe može se provesti u jednom koraku (s iteracijama), tj. takozvanom *batch* prilagodbom ili, alternativno, unutar sekvencijalne prilagodbe/filtra (bilo sa ili bez iteracija) koji se može prilagoditi promjenljivoj dinamici korisnika. Nedostatak grupne prilagodbe je taj što može postati prevelik čak i za moderna i snažna računala, posebno za nediferencirana opažanja koja uključuju veliku mrežu postaja. Međutim, u ovom slučaju nije potrebna povratna supstitucija ili povratno izgladivanje, što prilagodbu serije čini atraktivnom posebno za pristupe s dvostrukom razlikom. Implementacije filtera, kao što je sekvencijalno filtriranje prema metodi najmanjeg kvadrata ili Kalmanovo filtriranje (za GNSS pozicioniranje to je ekvivalentno sekvencijalnim prilagodbama s koracima koji se podudaraju s epohama promatranja), obično su mnogo učinkovitije i manje veličine od implementacija skupnih prilagodbi, barem kao što se tiče rješenja položaja s nerazličitim opažanjima. To je tako jer se parametri koji se pojavljuju samo u određenoj epohi promatranja, kao što su sat stanice/satelit, pa čak i parametri kašnjenja staze zenita, mogu unaprijed eliminirati. Međutim, implementacije filtera (sekvencijalnog podešavanja) zahtijevaju izravnavanje unazad (natrag zamjene) za parametre koji se ne zadržavaju od epohe do epohe (npr. parametri sata). Nadalje, filter/sekvencijalni pristupi također mogu modelirati varijacije u

stanjima parametara između epoha promatranja s odgovarajućim stohastičkim procesima koji također ažuriraju varijance parametara od epohe do epohe.³⁵

Na primjer, PPP model promatranja i prilagodbe uključuju četiri vrste parametara: položaj postaje (x,y,z), sat prijavnika (dT), kašnjenje staze troposferskog zenita (zpdw), i necijelobrojne dvosmislenosti faze nositelja (N). Položaj postaje može biti konstantan ili se mijenjati tijekom vremena ovisno o dinamici korisnika. Ta bi dinamika mogla varirati od desetaka metara u sekundi u slučaju kopnenog vozila do nekoliko kilometara u sekundi za engl. *Low Earth Orbiter* (LEO). Sat prijavnika pomicat će se prema kvaliteti njegovog oscilatora, npr. oko 0,1 ns/sek (ekvivalent nekoliko cm/sek) u slučaju unutarnjeg kvarcnog sata sa stabilnošću frekvencije od oko 10^{10} . Usporedno, kašnjenje staze troposferskog zenita varirat će u vremenu za relativno malu količinu, reda veličine nekoliko cm/sat. Konačno, dvosmislenosti faze nositelja (N) ostat će konstantan sve dok se satelit ne preorijentira (npr., tijekom razdoblja pomračenja, pogledajte korekciju faznog navijanja) i dok faze nosača nemaju klizanja ciklusa, uvjet koji zahtijeva pažljivo praćenje. Imajte na umu da samo za duplo različite podatke opažene s najmanje dvije postaje, svi satovi dT, uključujući korekcije sata prijavnika, praktički su eliminirani dvostrukim diferenciranjem.

Kako bi se postigla najviša izvedba preciznosti od cm do mm, PPP se uvelike oslanja na vrlo precizne modele pogrešaka koji nisu potrebni u slučaju konvencionalnog pozicioniranja pseudoraspona na razini metra. Ovi modeli korekcije raspravljaju se u nastavku i grupirani su u četiri kategorije, naime atmosferski učinci, satelitski učinci, učinci pomaka mjesta i učinci pristranosti diferencijalnog koda.

Satelitski efekti. Potreba za satelitskim korekcijama proizlazi iz razdvojenosti između središta mase GNSS satelita i faznog središta njegove antene. Budući da se modeli sile koji se koriste za modeliranje satelitske orbite odnose na njegov centar mase, IGS GNSS precizne satelitske koordinate i proizvodi sata također se odnose na satelitski centar mase, za razliku od orbita emitiranih u GNSS navigacijskoj poruci koje se odnose na fazni centar satelitske antene. Međutim, mjerenja se vrše u faznom središtu antene, stoga se moraju znati pomaci faznog središta satelita i pratiti orijentacija vektora pomaka u prostoru dok satelit kruži oko Zemlje. Fazni centri većine satelita pomaknuti su u smjeru z-koordinate tijela (prema Zemlji) i u smjeru x-koordinate tijela koji je u ravnini u kojoj se nalazi Sunce.

GNSS sateliti odašilju desno cirkularno polarizirane radiovalove i stoga promatrana faza nositelja ovisi o međusobnoj orijentaciji antene satelita i prijavnika. Rotacija prijamne

³⁵ European Space Agency. op.cit.

ili satelitske antene oko njezine provrtne (vertikalne) osi promijenit će fazu nositelja do jednog ciklusa (jedna valna duljina), što odgovara jednom potpunom okretaju antene. Taj se učinak naziva "fazno navijanje". Prijamna antena, osim ako je pokretna, ne rotira i ostaje usmjerena prema fiksnom referentnom smjeru (obično prema sjeveru). Međutim, satelitske antene prolaze kroz spore rotacije kako su njihovi solarni paneli usmjereni prema Suncu i mijenja se geometrija stanice i satelita. Nadalje, kako bi preusmjerili svoje solarne panele prema Suncu tijekom sezona pomračenja, sateliti su također podvrgnuti brzim rotacijama, takozvanim "podne" (kada ravna linija, koja počinje od Sunca, siječe satelit, a zatim središte Zemlje) i "ponoćni zaokret" (kada linija siječe središte Zemlje, zatim satelit). To može predstavljati rotacije antene do jednog okretaja unutar manje od pola sata. Tijekom takvih podnevnih ili ponoćnih zaokreta, podatke o fazi treba ispraviti za ovaj učinak ili jednostavno urediti.

Korekcija faznog navijanja općenito je zanemarena čak i u najpreciznijem softveru za diferencijalno pozicioniranje, jer je sasvim zanemariva za pozicioniranje dvostruke razlike na osnovnim linijama/mrežama koje se protežu do nekoliko stotina kilometara. Međutim, pokazalo se da doseže do 4 cm za osnovnu liniju od 4000 km. Ovaj učinak je značajan za nediferencirano pozicioniranje točaka pri fiksiranju IGS satelitskih satova, budući da može dosegnuti do jedne polovice valne duljine. Otprilike od 1994. većina IGS-ovih centara za analizu (a time i kombinirani proizvodi IGS-a orbita/sat) primjenjuje ovu korekciju faznog navijanja. Zanemarivanje toga i popravljivanje orbita/satova IGS-a rezultirat će pogreškama položaja i sata na dm razini.³⁶

Učinci pomaka mjesta. U globalnom smislu, postaja prolazi kroz periodičke pomake (stvarne ili prividne) koji dosežu nekoliko dm koji nisu uključeni u odgovarajuće "regularizirane" položaje Međunarodnog terestričkog referentnog okvira (ITRF), iz kojih su "visoke frekvencije" modelirane i uklonjene. Budući da je većina periodičnih kretanja stanica gotovo ista na širokim područjima Zemlje, oni se gotovo poništavaju u relativnom pozicioniranju na kratkim (<100 km) osnovnim crtama i stoga ih nije potrebno razmatrati. Međutim, ako se mora dobiti precizno rješenje za koordinate postaje u skladu s trenutnim ITRF konvencijama korištenjem PPP pristupa bez razlike ili pristupa relativnog pozicioniranja na dugim osnovnim linijama (> 500 km), gornja kretanja stanica moraju se modelirati prema preporuci u konvencije Međunarodne službe za rotaciju Zemlje i referentne sustave (IERS). To se postiže dodavanjem uvjeta korekcije pomaka mjesta navedenih u

³⁶ European Space Agency. op.cit.

nastavku regulariziranim ITRF koordinatama. Učinci pomaka lokacije s magnitudom manjom od 1 centimetra, kao što su atmosferska i podzemna voda i/ili opterećenje nakupljanjem snijega, zanemareni su i ovdje nisu razmatrani.³⁷

Učinci pristranosti diferencijalnog koda. Odstupanja mjerenja obično se ne uzimaju u obzir u pojednostavljenim dvofrekventnim PPP modelima promatranja (vidi Osnove PPP-a). Ova pretpostavka vrijedi sve dok su proizvodi preciznog sata generirani s istim vrstama promatranja korištenih u PPP algoritmu. Kao primjer, pomaci GPS sata konvencionalno se izračunavaju za kombinaciju L1/L2 P(Y)-kod observabli bez ionosfere; Proizvodi GLONASS sata odnose se na opažanja P-koda na frekvencijama L1 i L2. Ako se ti isti parovi signala koriste kao dvofrekventna opažanja u PPP algoritmu, konvencionalni PPP pojednostavljeni model promatranja može se usvojiti bez razmatranja bilo kojeg daljnjeg izraza pristranosti koda. Međutim, ako se dvofrekvencijsko kombinirano promatranje sastoji od različitih vrsta signala, npr. L2 P(Y)-koda i L1 C/A-koda, potrebno je uvesti dodatni izraz kako bi se preveo pomak satelitskog sata i učiniti ga kompatibilnim s korištenim opažanjima. Ovaj dodatni izraz, koji se obično naziva engl. *Differential Code Bias* (DCB), poboljšava vrijeme konvergencije implementacija filtera i omogućuje brže i pouzdanije popravljnje dvosmislenosti.³⁸

Diferencijalni GNSS. Diferencijalni GNSS (DGNSS) vrsta je sustava proširenja GNSS-a koji se temelji na poboljšanju informacija o primarnim GNSS konstelacijama upotrebom mreže zemaljskih referentnih stanica koje omogućuju emitiranje diferencijalnih informacija korisniku također nazvanom rover poboljšati točnost svoje pozicije integritet nije zajamčen. Postoji nekoliko DGNSS tehnika, kao što su klasični DGNSS (ili DGPS), kinematika u stvarnom vremenu (RTK) i RTK širokog područja (WARTK).³⁹

Klasična DGNSS tehnika je poboljšanje primarnog GNSS sustava koje se sastoji od određivanja GNSS pozicije za točno izmjerenu poziciju poznatu kao referentna stanica. S obzirom na to da je položaj referentne stanice točno poznat, može se izračunati odstupanje izmjerenog položaja od stvarnog položaja i, što je još važnije, korekcije izmjerenih pseudodometra za svaki od pojedinačnih satelita. Ove korekcije se stoga mogu koristiti za korekciju izmjerenih pozicija drugih GNSS korisničkih prijavnika.

³⁷ European Space Agency. op.cit.

³⁸ ibidem

³⁹ European Space Agency, 2024, Differential GNSS, In Navipedia, online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Differential_GNSS (20.07.2024.)

Kada je GPS jedina konstelacija koja se koristi za tehniku diferencijalnog GNSS-a, sustav se naziva DGPS. DGPS točnost je reda veličine 1 m (1 sigma) za korisnike u rasponu od nekoliko desetaka km od referentne stanice, rastući brzinom od 1 m na 150 km udaljenosti.

Pojam DGNSS može se odnositi na specifične implementacije koje koriste DGNSS tehniku. Često se koristi za specifično označavanje sustava koji reemitiraju korekcije sa zemaljskih odašiljača kratkog dometa. Na primjer, Obalna straža Sjedinjenih Država i Kanadska obalna straža imaju jedan takav sustav u SAD-u i Kanadi na dugovalnim radijskim frekvencijama između 285 kHz i 325 kHz. Ove se frekvencije obično koriste za pomorski radio i emitiraju se u blizini velikih vodenih putova i luka. Australija ima dva DGPS sustava: jedan je uglavnom za pomorsku navigaciju, vodi ga Australaska uprava za pomorsku sigurnost, emitirajući svoj signal na dugovalnom pojasu; drugi se koristi za mjerenje zemljišta i kopnenu navigaciju, a ima ispravke koji se emitiraju na komercijalnom FM radiju.

Postoje i druge DGNSS tehnike koje koriste aplikacije visoke preciznosti za navigaciju/izmjeru, a temeljene su na korištenju mjerenja faze nosača. Ovo su slučajevi kinematike u stvarnom vremenu (RTK) i RTK širokog područja (WARTK).⁴⁰

3.3. UKUPNI PRORAČUN POGREŠKE POLOŽAJA

U prethodnim dijelovima rada su se razmotrile osnovne komponente satelitskog određivanja položaja, posebno fokusirajući se na klasični jednofrekvencijski pristup, poznat kao L1. Sada će se dublje usredotočiti na ukupni proračun pogreške položaja, koji se primjenjuje na ovaj često korišteni način satelitskog određivanja položaja. Ukupni proračun pogreške položaja predstavlja ključni koncept u satelitskoj navigaciji jer omogućava procjenu točnosti određenog položaja. Ovaj proračun temelji se na dvije ključne komponente: Korisnička razdioba pogrešaka (engl. *User Equivalent Range Error* - UERE) i geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Dilution of Precision* - DOP).⁴¹

3.3.1. Geometrijska razdioba točnosti

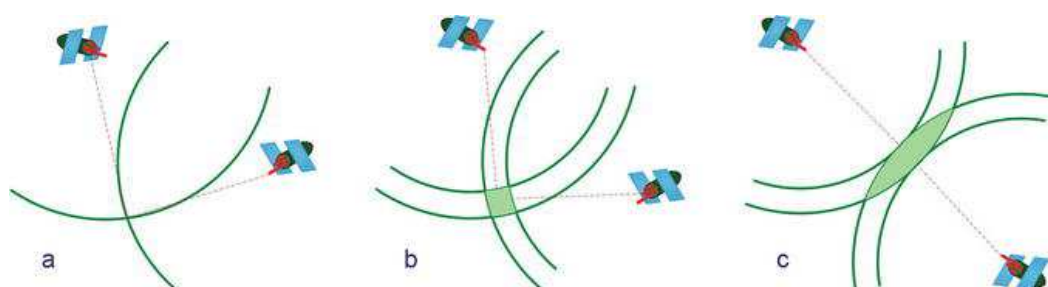
DOP ovisi geometrijskoj raspodjeli satelita koji su vidljivi. Što je bolji međusobni položaj satelita to je DOP manji te je samim time pozicija preciznija. Slika prikazuje koncept geometrijske razdiobe točnosti. Slika 12a prikazuje najpovoljniju situaciju u kojem su signali

⁴⁰ European Space Agency. op. cit.

⁴¹ Smith, J. D., & Johnson, A. 2016, Evaluacija performansi različitih open source digitalnih elevacijskih modela korištenjem DGPS-a. *Journal of Geospatial Research*, vol. 5, no. 2, p. 112-125.

s dva satelita formirali kružnice koje se presijecaju u poziciji prijammnika s pretpostavkom da ne postoji pogreška mjerenja.

Slika 12b prikazuje slučaj u kojemu se zbog pogrešaka u mjerenju pseudoudaljenosti, položaj prijammnika definira područjem neodređenosti. Kakav će oblik područja neodređenosti biti zavisi o geometriji satelita. Geometrijska razdioba točnosti se koristi kako bi se odabrali sateliti koji su najpovoljniji za izračun položaja. Prijammnik odabire skupinu satelita koji imaju najmanju DOP vrijednost. Kako bi se vrijednost geometrijske razdiobe pogreške izračunala potrebno je znati poziciju prijammnika i satelita, a rezultat je bezdimenzionalna vrijednost.

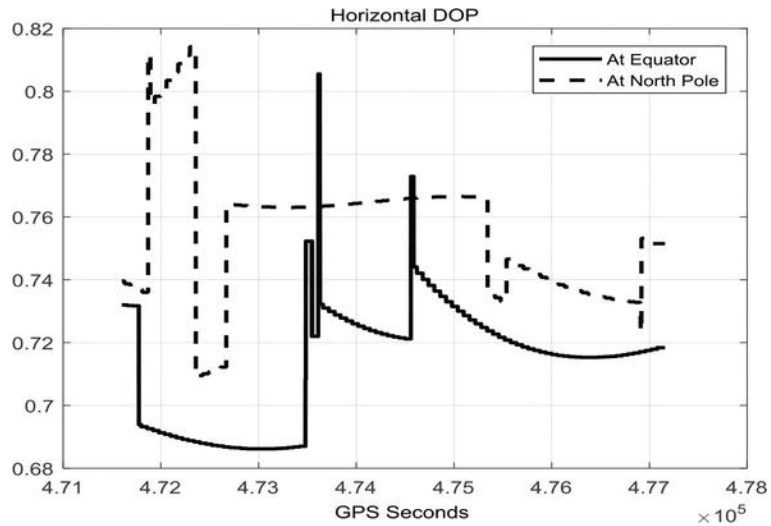


Slika 12. Smanjenje preciznosti s mjerenjima raspona u 2D.

Izvor: Karaim, M., Elsheikh, M., & Noureldin, A. 2018, GNSS error sources. In Multifunctional Operation and Application of GPS. InTech., online: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75493>
(21.07.2024.)

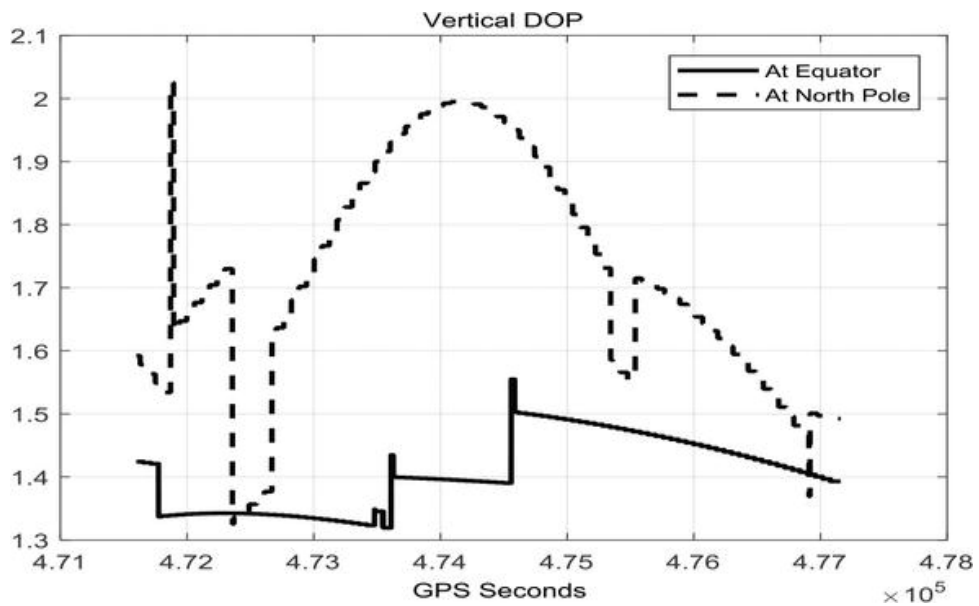
GDOP (engl. *Geometric Dilution of Precision*) je generalni parametar koji opisuje geometrija satelita, također uz njega postoje i podvrste, a to su VDOP (engl. *Vertical Dilution of Precision*) i HDOP (engl. *Horizontal Dilution of Precision*). Na slikama 13 i 14 su prikazane simulirane vrijednosti HDOP i VDOP parametara s obzirom na područje ekvatora i polarno područje. Na slikama je vidljivo kako su parametri manji u području ekvatora zbog bolje geometrije satelita. Također je vidljivo da GPS pruža veće vrijednosti VDOP-a u odnosu na HDOP zbog geometrije satelita.⁴²

⁴² Smith, J. D., & Johnson, A, op. cit., 112-125.



Slika 13. Horizontalne DOP vrijednosti na niskim naspram visokih geografskih širina.

Izvor: Karaim, M., Elsheikh, M., & Noureldin, A. 2018, GNSS error sources. In Multifunctional Operation and Application of GPS. InTech., online: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75493> (21.07.2024.)



Slika 14. Vertikalne DOP vrijednosti na niskim naspram visokih geografskih širina.

Izvor: Karaim, M., Elsheikh, M., & Noureldin, A. 2018, GNSS error sources. In Multifunctional Operation and Application of GPS. InTech., online: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75493> (21.07.2024.)

Po završetku ukupna pogreška u određivanju položaja satelitskim navigacijskim sustavom može se izračunati kao umnožak korisničke razdiobe pogreške i DOP-a⁴³:

$$\sigma_T = \sigma_R \cdot DOP \quad (8)$$

gdje su:

σ_T – ukupna pogreška položaja

σ_R – korisnička razdioba pogreške (UERE)

DOP – geometrijska razdioba točnosti.

3.3.2. Korisnička razdioba pogrešaka

Korisnička razdioba pogreške UERA, nastaje spojem različitih utjecaja kojima je izložen satelitski signal prilikom propagacije od satelitske do korisničke antene.

Uzroci korisničkih razdioba pogrešaka dijele se na tri skupine:

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

Pogreške korisničke komponente su pogreške koje su nastale uslijed termalnog šuma prijammnika, sklopovskih kašnjenja korisničke opreme i višestrukih putova satelitskog signala. Pogreške satelitske i korisničke komponente čine pogreške u procijenjenim položajima satelita, odstupanja satelitskih satova od GPS vremenskog sustava (uključujući relativistički učinak) te sklopovska kašnjenja satelitske opreme. Ukoliko su satelitske efemeride netočne stvara se pogreška u određivanju pozicije iz razloga što se u postupku određivanja položaja korisnika, netočnosti u poznavanju položaja satelita direktno prenose i na određivanje pozicije korisnika. Iako satelitski sustavi za određivanje pozicije korisnika upotrebljavaju zajedničko vrijeme sustava koje im omogućavaju precizni atomski satovi, satelitski satovi s protokom vremena krenu odstupati od zajedničkog vremena te tako nastane pogreška.

Pogreške nastale uslijed širenja satelitskog signala kroz prijenosni medij dijele se na ionosfersko i tropsko kašnjenje. Ionosfersko kašnjenje nastaje zbog složenih fizikalnih i kemijskih pojava nastalih na Suncu, a čiji se učinci odražavaju u Zemljinim ionosferskim slojevima. Ionosfersko kašnjenje predstavlja najznačajniji pojedinačni uzrok pogrešaka satelitskog određivanja položaja, čak i uvjetima mirnog svemirskog vremena. Takvo

⁴³ Karaim, M., Elsheikh, M., & Noureldin, A. 2018, GNSS error sources. In Multifunctional Operation and Application of GPS. InTech., online: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75493> (21.07.2024.)

kašnjenje je vrlo teško predvidivo, stohastično te ovisi o globalnim i lokalnim značajkama ionosferske dinamike. Troposfersko kašnjenje nastaje zbog promjene brzine širenja signala uslijed promjena u temperaturi, tlaku i relativnoj vlažnosti neutralne atmosfere te međusobnog položaja korisničkog prijamnika i satelita. Razlika između ionosferskog i troposferskog kašnjenja je to što se uzrok troposferskog kašnjenja nalazi u donjim neutralnim dijelovima atmosfere, a do promjene brzine širenja radiovalova dolazi iz razloga što se promjeni temperatura, tlak i relativna vlažnost zračnih masa u troposferi kroz koje prolaze satelitski signali.⁴⁴

3.3.2.1. Atmosferske pogreške

Ionosfersko i troposfersko kašnjenje-GNSS signal akumulira ionosfersko kašnjenje prilikom prolaska kroz ionosferu. Ionosfera je dio zemljine atmosfere od 60 do više od 2000 km visine i sastoji se od ioniziranih plinova. Kolika će ionosferska kašnjenja biti najviše ovisi o gustoći elektrona u sloju ionosfere.

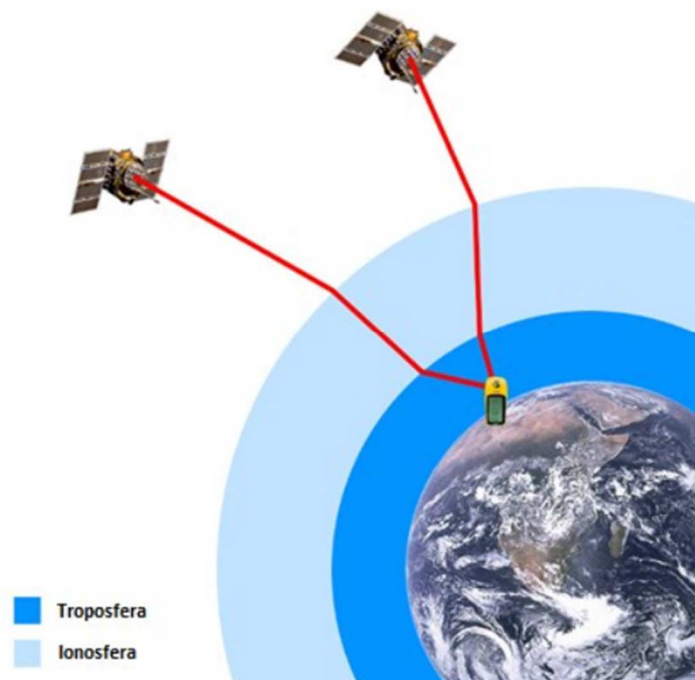
Troposfera je atmosferski pojas između zemljine površine i otprilike 16 km visine na ekvatoru i 9 km visine na polovima. Troposfersko kašnjenje je efekt prolaska GNSS signala kroz troposferu. Troposfera također uzrokuje i refrakciju GNSS signala. Sastoji se od vodene pare i suhih plinova. Kašnjenje je podijeljeno na dvije glavne komponente ovisno o vlažnosti troposfere, suho (engl. *Dry delay*) i mokro kašnjenje (engl. *Wet delay*). Mokro kašnjenje visoko je varijabilno i kvantifikacija je zahtjevna u odnosu na suho kašnjenje.⁴⁵ Troposfersko kašnjenje ovisi o vlazi, temperaturi, tlaku zraka kao i položaju antene odašiljača i prijamnika. Troposfersko kašnjenje iskazuje manju vršnu vrijednost i varijaciju slučajne komponente kašnjenja od ionosferskog kašnjenja. GNSS signal koji dolazi u antenu prijamnika je radioval (elektromagnetski val) koji se u vakuumu širi brzinom od 299792458 m/s. Prolazom signala kroz sloj ionosfere isti mijenja brzinu i smjer širenja. Zbog usporavanja signala nastaje problem ionosferskog kašnjenja. Signal ima različitu brzinu i smjer propagacije kroz medij koji nije jednake gustoće (Slika 15).

⁴⁴ Kolić, D. 2019, Analiza performansi pomorskih plovila u različitim uslovima (Magistarski rad). Rijeka, Sveučilište u Rijeci, online:

<https://www.unirepository.svkri.uniri.hr/islandora/object/pfri%3A2791/datastream/PDF/view> (22.07.2024.)

⁴⁵ Ivanković, M. 2021, Optimizacija modela predikcije u sustavima za upravljanje podacima (Diplomski rad), Sveučilište u Rijeci, online:

<https://repository.riteh.uniri.hr/islandora/object/riteh%3A3596/datastream/PDF/view> (23.07.2024.)



Slika 15. Širenje GNSS signala kroz ionosferu i troposferu do prijammika.

Izvor: Ivanković, M. 2021, Optimizacija modela predikcije u sustavima za upravljanje podacima (Diplomski rad), Sveučilište u Rijeci, online:

<https://repository.riteh.uniri.hr/islandora/object/riteh%3A3596/datastream/PDF/view> (23.07.2024.)

Usporavanjem signala dolazi do kašnjenja u dolasku do prijammika. Kašnjenje unosi grešku u procjeni položaja prijammika. Troposfersko i ionosfersko kašnjenje najveći su izvori pogrešaka u GNSS sustavima za procjenu položaja. Ionosfersko kašnjenje moguće je umanjiti upotrebom dvofrekventnog korisničkog prijammika, koji upotrebljava dviji različite frekvencije za primanje GNSS signala. Učinci ionosfere također ovise i o frekvenciji signala. Ukoliko se GNSS signali šire na različitim frekvencijama, matematičkim modelom je moguće umanjiti ili ugasiti utjecaj kašnjenja zbog prolaska signala kroz ionosferu.

Troposferska kašnjenja nije moguće smanjiti ni isključiti korištenjem dvpfrekventnog prijammika zbog troposferskih efekata koji nisu ovisni o frekvenciji signala. Model koji je zasnovan na opažanjima omogućava umanjene efekte troposferskog kašnjenja.⁴⁶

3.3.2.2. Pogreške sata

Pogreške sata dijele se na pogreške satelitskog sata i pogreške korisničkog sata:

- a) Pogreška satelitskog sata

⁴⁶ Ivanković, M., op. cit.

Kako bi GNSS sateliti uskladili signale između različitih satelita potreban im je precizan sat. U svakom od satelita nalazi se vrlo precizan atomski sat, on se koristi za kontrolu i generiranje odašiljačkih signala. Iako su atomski satovi veoma precizni i kod njih može doći do odstupanja u odnosu na GPS vrijeme. To odstupanje se naziva pogreška satelitskog sata. Pogreškom satelitskog sata dolazi do pogreške u procjeni korisničkog položaja. Ukoliko pogreška satelitskog sata iznosi 10 neoskudni onda će pogreška procjena položaja biti 3 metra. Navigacijska poruka sadrži korekcije efemerida, pogreške sata i procjenu točnosti atomskog sata. Podatci su zasnovani na opažanjima i mogu odstupati od trenutnog stanja sata.⁴⁷

b) Pogreška korisničkog sata

Korisnički sat mora biti usklađen sa satelitskim satom, kako bi procjena pozicije bila što točnija, iz razloga što se sva mjerenja oslanjaju na mjerenje vremena. Prolazak signala kroz pojedini medij mjeren je u vremenu, uz poznatu brzinu širenja signala kroz medij. Pogreška uzrokovana prijamničkim satom, odnosno generatorom sata, je treća najznačajnija pogreška prilikom procjene položaja. Problem nesukladnosti satelitskog i prijamničkog sata uvijek je prisutan, zbog toga što signal sata u prijammniku je najčešće generiran oscilatorom. Nije praktično da prijammnici signala imaju atomske satove kao i sateliti, iz razloga što bi takvi satovi poskupili izradu i povećali gabarite samog prijammnika. Kvarni oscilator nije precizan i stabilan kao atomski sat. Razlika satova uzrokuje pogrešku kod procjene pozicije. Kvarni oscilatori su otporniji na razliku temperature, vibracije. Pogreška korisničkog sata dt, četvrta je nepoznanica korištena u algoritmu za procjenu položaja, ut xyz koordinate.⁴⁸

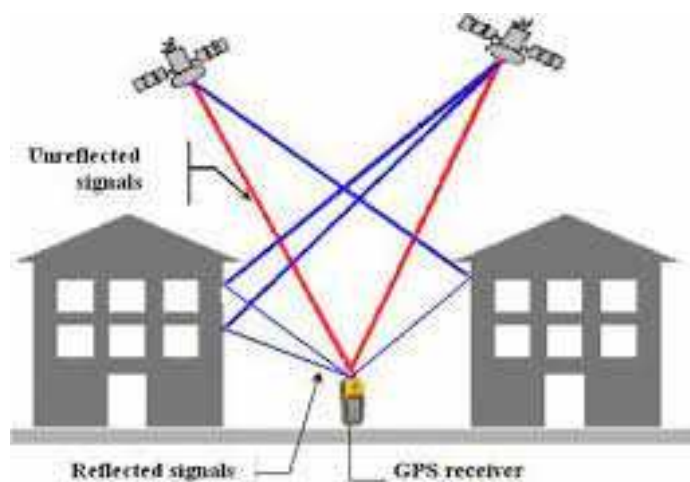
3.3.2.3. Pogreške višestaznih puteva

Do pogreške višestaznih puteva (engl. *Multipath*) dolazi prilikom odbijanja signala od površine i/ili podloge. Odbijanjem signala od površine, isti signal dolazi do korisničkog prijammnika u različito vrijeme, te samim time rezultira pogrešku u procjeni pozicije.

Slika 16 prikazuje direktno i višestazno širenje satelitskog signala.

⁴⁷ Novak, I. 2021, Analiza performansi u inteligentnim transportnim sistemima (Diplomski rad) Rijeka, Sveučilište u Rijeci, online: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/riteh:3596/datastream/PDF/view> (25.07.2024.)

⁴⁸ ibidem



Slika 16. Direktno i višestazno širenje satelitskog signala.

Izvor: online: <https://egyankosh.ac.in/bitstream/123456789/39547/1/Unit-2.pdf> (25.07.2024.)

Crvene linije na slici prikazuju direktan signal iz satelita do prijammnika, odnosno smjer pogleda (engl. *Line of sight*). Plave linije prikazuju signal koji se odbija od objekta, te potom dolazi do korisničkog prijammnika. Kod crveno obojane linije ne dolazi do dodatnog kašnjenja signala zbog direktnog dolaska do korisničkog prijammnika, dok kod plavo obojenih linija dolazi do kašnjenja signala zbog odbijanja od objekta. I jedan i drugi signal prenose istu informaciju, jedina je razlika u tome što dolaze u različito vrijeme do prijammnika, što uzrokuje pogrešku u procijeni položaja. U jednokanalnom prijammniku kašnjenje signala ovisi o frekvenciji GNSS signala. U teoriji maksimalno kašnjenje iznosi 1.5 puta valne duljine signala ili 450 m. Pogreška višestaznih puteva umanjiva je korištenjem dvokanalnog GNSS prijammnika. Uz pomoć dvokanalnog prijammnika smanjena je pogreška na teoretski maksimum od $\frac{1}{4}$ valne duljine ili 5 cm.⁴⁹

4. PRIMJENA GNSS SUSTAVA

GNSS sustav pruža usluge brze, točne i pouzdane informacije o položaju korisnika. Primjenjuje se u svim granama prometa i društvenim aktivnostima kao što su; pomorski promet, cestovni promet, zračni promet, željeznički promet te ostale primjene.

⁴⁹ Novak, I., op. cit.

4.1. POMORSKI PROMET

GNSS se u pomorskom prometu koristi u širokoj primjeni, pomorstvo je prihvatilo satelitsku navigaciju praćenje u svim djelatnostima, počevši od prijevoza tereta do sportskih aktivnosti, ribarstva. Uz pomoć GNSS-a moguća je plovidba i u vrlo lošim uvjetima i područjima. Može ga se koristiti u priobalju, otvorenom moru i lukama i sastavni je dio AIS sustava (engl. *Automatic Identification System*). Također je koristan za navigaciju u uskim kanalima sa puno brodova kao što je Sueski kanal. Kod prijevoza kontejnera morem koristi se satelitsko praćenje „ container tracking“ praćenje svakog pojedinog kontejnera te robe koja se u njemu nalazi. Takav sustav omogućuje agentu i samom krajnjem korisniku da u svakom trenutku znaju gdje se teret nalazi. Sekundarna funkcija sustava je praćenje tereta u slučaju krađe. U slučaju krađe uređaj može javljati poziciju kontejnera svakih 5 minuta. GNSS se također u pomorstvu svakodnevno koristi u svim visoko preciznim operacijama poput kartiranja, postavljanja raznih cjevovoda, hidrografska istraživanja, postavljanje plutača i raznih drugih pomorskih oznaka.⁵⁰

4.2. CESTOVNI PROMET

GNSS sustav se u cestovnom prometu upotrebljava kako bi poboljšao postojeće usluge te omogućio nove poboljšane usluge. Naplata cestarine je pojednostavljeno praćenje vozila putem satelita, te se na osnovu tog prijeđenog puta plaća cestarina s obzirom koje je ceste vozač upotrebljavao. Uz GNSS prijarnike planiranje putovanja je pojednostavljeno, iz razloga što GNSS prijarnik daje točan prikaz od polazne točke do odredišta na korisničkom uređaju, te uređaj također može davati glasovne upute. Upravljanje voznim parkom je omogućeno podacima koje prijarnik odašilje serveru kompanije. Pomaže i u pronalasku ukradenih auta jer može policiji odašiljati signale te dati poziciju ukradenog automobila. U kontroli prometa uz pomoć podataka o brzini i smjeru kretanja vozila mogu se predvidjeti gužve. Ukoliko dođe do kvara vozila može se poslati točna lokacija vozila te ubrzati vrijeme trajanja dolaska pomoći. Također vrlo je važna primjena satelitske navigacije u ADAS sustavu (engl. *Advanced Driving Assistant System*). ADAS je skup sustava u koje se ubraja sustav za noćnu vožnju, heads-up display sustav, sustavi za pomoć u slijepim točkama. GNSS sustav pomaže u takvim sustavima npr. da smanji brzinu zavojima prilikom magle: satelit daje podatke uređaja te računalo u automobilu odredi vremenske uvjete. Također

⁵⁰ Royal Academy of Engineering, 2011, Global navigation space systems: Reliance and vulnerabilities, online: https://rntfnd.org/wp-content/uploads/2013/09/Royal-Acad-of-Eng_Global_Navigation_Space-Systems_Report.pdf (27.07.2024.)

GNSS sustav je vrlo važan u službama spašavanja i hitne pomoći. Uz klasično planiranje puta, kombinacijom satelitskog lociranja i dinamičkih prometnih sustava moguće je stvaranje zelenog vala kako bi službe spašavanja brže stigle do svog cilja.⁵¹

4.3. ZRAČNI PROMET

Satelitska navigacija je od velike važnosti u zračnom prometu još od njenih početaka. Kao grana prometa u kojoj je svaka pogreška kobna, satelitska navigacija uvelike pomaže zračnom prometu ponajviše kod uzlijetanja i slijetanja zrakoplova. Pošto su uzlijetanje i slijetanje najteže operacije zrakoplovstva, GNSS u tim operacijama omogućuje satelitsko navođenje i u vrlo teškim uvjetima slabe vidljivosti, magle, kiše. S obzirom da je u nekim područjima zračni prostor veoma gust potrebna su vrlo precizna mjerenja kako bi se omogućilo povećanje kapaciteta. Uz pomoć satelitskih sustava navigacije može se povećati kapacitet zračnih luka smanjenjem vremena zadržavanja aviona na tlu, smanjuje se vrijeme i potrošnja goriva polijetanja i slijetanja. Ona se postižu podrškom DGPS ili WAAS sustavima. Područja bez tih sustava ovise o visoko preciznim satelitskim signalima.⁵²

4.4. ŽELJEZNIČKI PROMET

GNSS sustav također se proširio i željezničkom prometu. Glavna uloga u željezničkom prometu mu je praćenje vagona, tereta, iskorištavanje kapaciteta željezničke mreže. Kontrolne željezničke postaje mogu provjeravati pozicije vlakova. Vlakovi mogu putovati mreže sa manjim međusobnim razmacima između linija.⁵³

4.5. OSTALE PRIMJENE GNSS-a

Praćenje osoba je također vrlo korisno u satelitskom praćenju. Hand-held uređaji mogu se podesiti da informiraju korisnika o obližnjim restoranima, hotelima, bolnicama ili drugim točkama interesa. Praćenje ljudi se koristi za zaštitu starijih nemoćnih osoba i za praćenje djece. U slučaju da osobi pozli, može brzo i lako pozvati prvu pomoć na svoj položaj. Praćenje djece se vrši preko uređaja u stilu ručnog sata, ili se uređaj sakriva u odjeću ili čak igračku (postoje plišane životinje s ugrađenim uređajem za praćenje). Važno je napomenuti kako je praćenje osoba zabranjeno bez dopuštenja osobe koja se prati. Druge primjene GNSS mogu se pronaći u zaštiti prirode i sportskim aktivnostima. Satelitsko praćenje može pomoći u praćenju morskih struja i njihovom kartiranju, praćenju morskih mijena i razine mora,

⁵¹ Royal Academy of Engineering., op. cit.

⁵² ibidem

⁵³ ibidem

praćenju ledenjaka i praćenju zagađenja. Moguće je pratiti životinje, kućne i divlje. Praćenje zaštićenih vrsta može nam pomoći u određivanju njihovih habitata i time njihovu zaštitu. U rekreaciji primjena satelitske navigacije je u posljednjih par godina proživjela pravi procvat. Koriste se uređaji koji pokazuju lokaciju prilikom šetnji, u turizmu su u ponudi karte s ugrađenim lokacijama interesa te povezani s lokalnim turističkim zajednicama. U sportu je GPS doživio svoju prvu organiziranu primjenu u Tour de France, gdje se može pratiti položaj ali i zdravstveni podaci biciklista, kao na primjer otkucaji srca. Osim tih aktivnosti, GNSS se koristi u sportskom jedrenju i letenju.⁵⁴

⁵⁴ Royal Academy of Engineering., op. cit.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu detaljno je istražena i analizirana strukturu GPS signala, pružajući dublje razumijevanje temeljnih principa satelitske navigacije. U uvodnom dijelu definirani su osnovni pojmovi i preduvjeti potrebni za funkcioniranje satelitske navigacije, poput zajedničkog geoprostornog i vremenskog sustava te konstantne brzine širenja navigacijskih signala. Ova osnova je ključna za pravilno razumijevanje funkcioniranja satelitskih navigacijskih sustava.

Nadalje, istraženi su temeljni aspekti GNSS sustava, uključujući GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou. Svaki od navedenih sustava ima svoje specifične karakteristike, ali svi zajedno doprinose globalnoj mreži satelitske navigacije koja omogućuje precizno određivanje položaja na bilo kojem mjestu na Zemlji. Analizirani su segmenti satelitskih navigacijskih sustava kako bi se pružio cjelovit pregled njihovog funkcioniranja i međusobne interakcije. Središnji dio rada je usredotočen na GPS navigacijske signale, gdje je detaljno razmotrena njihova struktura, uključujući val nosilac, kodirane signale i navigacijsku poruku. Proučavanje ovih elemenata omogućilo je razumijevanje načina na koji GPS sustav pruža točne i pouzdane informacije o položaju. Također, analizirani su principi satelitskog određivanja položaja i ukupni proračun pogrešaka položaja, s posebnim naglaskom na korisničku razdiobu pogrešaka.

Kroz istraživanje primjene GNSS sustava u različitim sektorima prometa (pomorskom, cestovnom, zračnom i željezničkom) kao i u drugim područjima, pokazana je široka primjena i značaj GPS tehnologije. GNSS sustavi doprinose poboljšanju učinkovitosti, sigurnosti i pouzdanosti u mnogim sektorima, čime potvrđuju svoju neophodnost u modernom društvu.

Zaključno, rad je istaknuo važnost kontinuiranog istraživanja i razvoja u području satelitske navigacije. Suočavanje s tehničkim izazovima i rastućim zahtjevima korisnika zahtijeva neprestana unapređenja kako bi se osigurala visoka preciznost i pouzdanost navigacijskih sustava. Buduća istraživanja trebala bi se usredotočiti na razvijanje inovativnih metoda za smanjenje pogrešaka, povećanje otpornosti sustava na smetnje i proširenje primjene GNSS tehnologije u novim područjima.

LITERATURA

- Brčić, D. 2015, *Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja* (Disertacija) Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, online: <https://dr.nsk.hr/en/islandora/object/svkri%3A3167> (26.9.2023.)
- Datta, A. 2019, *How GNSS signals work within specific frequency bands*, online: <https://www.geospatialworld.net/blogs/gnss-frequency-bands-for-constellations/> (20.10.2023.)
- Dawson, J., & Woods, A. 2010, *The many paths to a common ground: A comparison of transformations between GDA94 and ITRF*. online: https://www.researchgate.net/publication/260210654_The_many_paths_to_a_common_ground_A_comparison_of_transformations_between_GDA94_and_ITRF (28.09.2023.)
- European Space Agency, 2024, *Differential GNSS*, In Navipedia, online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Differential_GNSS (20.07.2024.)
- European Space Agency, 2024, *PPP Standards*, In Navipedia, online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=PPP_Standards (18.07.2024.)
- European Space Agency, 2024, *RTK Fundamentals*, In Navipedia, online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=RTK_Fundamentals (15.07.2024.)
- European Space Agency, 2024, *GPS Navigation Message*, In Navipedia. online: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Navigation_Message (15.07.2024.)
- Hagg, S., Costa, J., Chaves, P., Moreira, F., & Niklasch, N. (n.d.). *EGNOS European Geostationary Navigation Overlay Service Receiver Terminal*, online: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=090163c1454f8821941f6edb0ffbae5aae6cc017> (10.04.2024.)
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H. & Collins I. 1992, *Global Positioning System: Theory and Practice*, by Springer-Verlag Wien-Graz, Austria, p. 232 - 238.
- Indian Space Research Organization, 2016, *GAGAN - GPS Aided GEO Augmented Navigation*. online: <https://www.ursc.gov.in/navigation/gagan.jsp> (21.04.2024.)
- Ivanković, M. 2021, *Optimizacija modela predikcije u sustavima za upravljanje podacima* (Diplomski rad), Sveučilište u Rijeci, online: <https://repository.riteh.uniri.hr/islandora/object/riteh%3A3596/datastream/PDF/view> (23.07.2024.)

- Jurki, D. 2023, *Analiza utjecaja ionosferskog kašnjenja na satelitsko određivanje položaja sustavom GPS u polarnim predjelima* (Diplomski rad), Sveučilište u Rijeci, online: <https://repository.pfri.uniri.hr/en/islandora/object/pfri:3448> (30.3.2024.)
- Karaim, M., Elsheikh, M., & Noureldin, A. 2018, *GNSS error sources. In Multifunctional Operation and Application of GPS*. InTech., online: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75493> (21.07.2024.)
- Kolić, D. 2019, *Analiza performansi pomorskih plovila u različitim uslovima* (Magistarski rad). Rijeka, Sveučilište u Rijeci, online: <https://www.unirepository.svkri.uniri.hr/islandora/object/pfri%3A2791/datastream/PDF/view> (22.07.2024.)
- Markovinović, D. 2001, Globalni pozicijski sustav (GPS). *Ekscentar*, vol. 4, p. 34-39.
- Zrinjski M., Barković Đ., Matika K., 2019, Razvoj i modernizacija GNSS-a. *Geodetski list*, vol. 1, p. 45-65.
- Moraes, A. D. O. 2018, Ionospheric scintillation fading coefficients for the GPS L1, L2, and L5 frequencies. *Radio Science*, vol. 53, no. 9, p. 1165-1174, online: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8679742> (10.01.2024.)
- Novak, I. 2021, *Analiza performansi u inteligentnim transportnim sistemima* (Diplomski rad) Rijeka, Sveučilište u Rijeci, online: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/riteh:3596/datastream/PDF/view> (25.07.2024.)
- Novatel.com (2023). What are Global Navigation Satellite Systems?. online: <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss> (10.10.2023.)
- Princeton.edu, online: <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf> (20.10.2023)
- Royal Academy of Engineering, 2011, *Global navigation space systems: Reliance and vulnerabilities*, online: <https://rntfnd.org/wp-content/uploads/2013/09/Royal-Acad-of-Eng-Global-Navigation-Space-Systems-Report.pdf> (27.07.2024.)
- Smith, J. D., & Johnson, A. 2016, Evaluacija performansi različitih open source digitalnih elevacijskih modela korištenjem DGPS-a. *Journal of Geospatial Research*, vol. 5, no. 2, p. 112-125.
- Tandra, R., & Sahai, A. 2008, SNR Walls for Signal Detection, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 2, no. 1, p. 4-17.

Walter, T., Kee, C., Chao, Y. C., Tsai, Y. J., Peled, U., Ceva, J., & Parkinson, B. 1994, Flight Trials of the Wide Area Augmentation System (WAAS). In *Proceedings of the ION GPS*, vol. 94, p. 1537-1546.

<https://egyankosh.ac.in/bitstream/123456789/39547/1/Unit-2.pdf>, online: (25.07.2024.)

Yang, Y., et al. 2020, Inter-Satellite Link Enhanced Orbit Determination for BeiDou-3. *Journal of Navigation*, vol. 73, no. 1, p. 115-130.

Zaminpardaz, S., Teunissen, P. J. G., & Nadarajah, N. 2017, GLONASS CDMA L3 ambiguity resolution and positioning, *GPS Solutions*, vol. 21, no. 2, p. 535-549.

POPIS SLIKA

Slika 1. Referentni koordinatni sustav.....	3
Slika 2. Segmenti GNSS.....	11
Slika 3. Korištenje GNNS frekvencijskih pojaseva.....	13
Slika 4. Frekvencijski spektar radio-navigacijskih satelitskih sustava (RNSS) definiran za GNSS signale.....	14
Slika 5. Struktura i modulacija L1 C/A satelitskog signala za određivanje položaja.....	18
Slika 6. Postupak korelacije primljenog (satelitskog) i generiranog (replike) kodiranog signala te mjerenje faze (pomaka) kodnog zapisa.....	18
Slika 7. L1 C/A.....	20
Slika 8. Okviri	20
Slika 9. L2-CNAV	21
Slika 10. L5-CNAV	22
Slika 11. CNAV-2	23
Slika 12. Smanjenje preciznosti s mjerenjima raspona u 2D	33
Slika 13. Horizontalne DOP vrijednosti na niskim naspram visokih geografskih širina	34
Slika 14. Vertikalne DOP vrijednosti na niskim naspram visokih geografskih širina	34
Slika 15. Širenje GNSS signala kroz ionosferu i troposferu do prijammnika.....	37
Slika 16. Direktno i višestazno širenje satelitskog signala.....	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. GNSS sustavi.....	12
Tablica 2. GNSS kvaliteta signala.....	17

KAZALO KRATICA

Kratika	Puni naziv na stranom jeziku	Tumačenje na hrvatskom jeziku
ARNS	Aeronautical Radionavigation Service	Zračna radionavigacijska usluga
C/A	Coarse/Acquisition	Gruba akvizicija
DGPS	Differential GPS	Diferencijski GPS
FEC	Forward Error Correction	Napredna korekcija pogreške
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service	Europski geostacionarni navigacijski servis
ESA	European Space Agency	Europska svemirska agencija
GDOP	Geometric Dilution of Precision	Geometrijska razdioba točnosti
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema	Globalni navigacijski satelitski sustav
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globalni navigacijski satelitski sustav
GPS	Global Positioning System	Globalni sustav za određivanje položaja
HDOP	Horizontal Dilution of Precision	Horizontalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System	Indijski regionalni satelitski navigacijski sustav
ISRO	Indian Space Researche Organisation	Indijska organizacija za svemirska istraživanja
ITRF	International Terrestrial Reference Frame	Međunarodni terestički referentni okvir
ITRS	International Terrestrial Reference System	Međunarodni terestički referentni sustav
ITU	International Telecommunication Union	Međunarodni telekomunikacijski savez
MEO	Medium Earth Orbit	Srednje visoka orbita
PDOP	Position Dilution of Precision	Prostorna razdioba položaja
PPP	Precise Point Positioning	Precizno pozicioniranje

PNT	PRN-Pseudorandom noise	Određivanje položaja, vođenje navigacije i usluga pružanja točnog vremena
PPS	Precise Positioning Service	Precizna usluga pozicioniranja
PRN	Pseudorandom noise	
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System	Kvazi-zenitni satelitski sustav
RNSS	Regional Navigation Satellite System	Regionalni satelitski navigacijski sustav
RTK	Real-Time Kinematic	Kinematika stvarnom vremenu
SAD	Signal-in-Space Accuracy Design	Dizajn točnosti signala u svemiru
SBAS	Satellite-Based Augmentation System	Sustav poboljšanja temeljen na satelitima
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Omjer signal-šum
SPS	Standard Positioning Service	Standardna usluga pozicioniranja
TDOP	Time Dilution of Precision	Vremenska komponenta geometrijske razdiobe točnosti
URE	User Equivalent Range Error	Korisnička razdioba pogrešaka
UTC	Universal Coordinated Time	Univerzalno koordinirano vrijeme
VMF	Vienna Mapping Function	Bečka funkcija mapiranja
VDOP	Vertical Dilution of Precision	Vertikalna komponenta geometrijske razdiobe točnosti
WAAS	Wide Area Augmentation System	Sustav proširenja širokog područja
WGS84	World Geodetic System 1984	Svjetski geodetski sustav 1984.