Programiranje prijamnika GPS definiranog softverom

Bjelkanović, Borna

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:696525

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Borna Bjelkanović

PROGRAMIRANJE PRIJAMNIKA GPS DEFINIRANOG SOFTVEROM

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 10. rujna 2020.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovna navigacija II**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6040

Pristupnik: **Borna Bjelkanović (0135241866)**
Studij: Aeronautika
Smjer: Pilot
Usmjerenje: Civilni pilot

Zadatak: **Programiranje prijamnika GPS definiranog softverom**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati sustav GPS i objasniti strukturu signala istoga. Potrebno je navesti tehničke karakteristike softverom definiranog prijamnika te opisati princip rada istoga. Student će pripremiti razvojno okruženje za programiranje softverom definiranog prijamnika, a potom i izvršiti programiranje prijamnika GPS. Navedene postupke, kao i načela obrade signala, student će opisati u radu. Po izvršenom programiranju prijamnika, student će isti koristiti za prijam signala GPS-a te proračun pozicije.

Zadatak uručen pristupniku: 14. srpnja 2020.
Rok za predaju rada: 10. rujna 2020.

Mentor:

doc. dr. sc. Tomislav Radišić

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

PROGRAMIRANJE PRIJAMNIKA GPS DEFINIRANOG SOFTVEROM

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE DEFINED GPS RECEIVER

Mentor: prof.dr.sc.Tomislav Radišić

Student: Borna Bjelkanović

JMBAG: 0135241866

Zagreb, rujan 2020.

SAŽETAK:

U ovom radu opisane su osnove GPS sustava i njegovih segmenata, te je elaborirana struktura GPS signala. Također, opisan je princip rada softverom definiranog radija kao temelj softverom deifiniranog GPS prijamnika. U petom poglavlju ovog rada objašnjena je implementacija hardvera i softvera potrebnog za prijam, dekodiranje i obradu signala GPS satelita.

Ključne riječi: GPS; satelit; signal; pozicija; vrijeme; softverom definirani radio;

SUMMARY:

In this paper, basics of GPS system and its segments are described, and GPS signal structure is elaborated. Working principles of a software-defined radio as a foundation of a software-defined GPS receiver are also described. Fifth chapter of this paper explains the hardware and software implementation required for reception, decoding and processing of signal from GPS satellite.

Key words: GPS; satellite; signal; position; time; software-defined radio

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. OPIS SUSTAVA GPS 2

2.1. Svemirski segment 4

2.2. Kontrolni segment 8

2.3. Korisnički segment 9

3. STRUKTURA SIGNALA SUSTAVA GPS 15

3.1. C/A kod 15

3.2. P - kod 16

3.3. D - kod 16

3.4. Prijam i obrada signala 17

3.5. Mjerenje udaljenosti i pogreške u vremenu 18

3.6. Pogreške pri određivanju pozicije 20

3.6.1. Ionosfersko kašnjenje 20

3.6.2. Troposfersko kašnjenje 21

3.6.3. Prijam reflektiranog vala 21

3.6.4. Efemeride satelita 22

3.6.5. Odstupanje satelitskog sata 22

3.6.6. Odstupanje sata GPS prijamnika 22

3.6.7. Šum prijamnika 22

4. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SOFTVEROM DEFINIRANOG RADIJA 23

4.1. Konstrukcija tradicionalnog analognog radio uređaja 23

4.2. Konstrukcija softverom definiranog uređaja 24

4.3. Osnovni dijelovi 24

4.4. Primjena 25

5. PRIJAM I DEKODIRANJE SIGNALA 26

5.1. Hardverski segment 27

5.2. Softverski segment 29

6. ZAKLJUČAK 38

LITERATURA 39

POPIS SLIKA 41

POPIS TABLICA 43

1. UVOD

GPS (eng. *Global Positioning System*) je satelitski navigacijski sustav razvijen od strane Ministarstva obrane SAD-a, u svrhu što bržeg određivanja pozicije prijamnika bilo gdje na Zemlji u bilo kojem trenutku. Mogućnosti izračunavanja navigacijskih parametara (koordinate, visina, brzina, vrijeme) 24 sata dnevno bez obzira na meteorološke prilike vrlo brzo su GPS prijamnike učinile korisnima, te su postali prihvaćeni kao terenski instrument.

Izvorno je GPS sustav razvijen i korišten isključivo u vojne svrhe, međutim, s vremenom su donesene odluke kojima je sustav odobren za korištenje i u civilne svrhe. Shodno tome, GPS je do danas našao široku primjenu kako u profesionalnom, tako i u privatnom životu, te je njegova upotreba sve češća. Danas se upotrebljava u svim oblicima prometa (cestovni, vodni, zračni), u sportu (jedriličarstvo, padobranstvo, nautika, planinarenje), geodeziji, a ugrađuje se i u razne uređaje za privatnu upotrebu (automobili, dronovi, pametni telefoni).

SDR (eng. *Software-Defined Radio*) je radiokomunikacijski sustav u kojem su komponente klasičnog radioprijamnika zamijenjene softverom unutar osobnog računala, uz mnogo širi frekvencijski spektar. SDR je platforma otvorenog tipa, što znači da ju mogu razvijati i unaprjeđivati svi koji su zainteresirani, u amaterske ili profesionalne svrhe, što znači da su primjene ovog tipa radiokomunikacije praktički neograničene.

U ovom radu detaljnije su pojašnjene pojedinosti GPS i SDR sustava, te su u konačnici ova dva sustava objedinjena u posljednjem poglavlju gdje će biti pojašnjena njihova implementacija u svrhu određivanja pozicije.

2. OPIS SUSTAVA GPS

GPS predstavlja sustav od 24 satelita, od kojih su 3 u pričuvnom stanju, a 21 satelit je u uporabi. Pozicionirani su u Zemljinoj orbiti i ključan su segment cijelog projekta. Za uspješno određivanje pozicije je potreban primitak signala od barem četiri satelita, a svaki od satelita odašilje slabi signal krajnjem korisniku. Na taj način se određuju veličine kojima se u potpunosti određuje položaj, a to su geografska dužina, geografska širina, te visina [1].

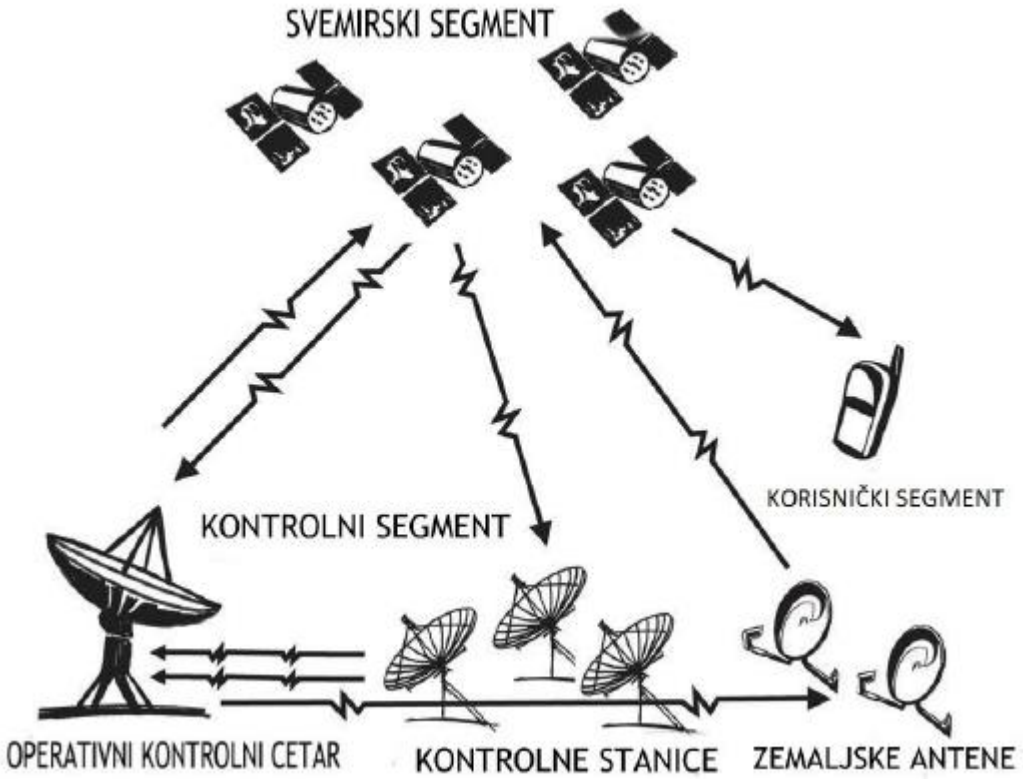
GPS se temelji na skupini satelita u vlasništvu Ministarstva obrane SAD-a koji se nalaze u Zemljinoj orbiti. Izvršna odluka iz 1983. godine je dozvolila upotrebu GPS-a i civilima[1]. Ova odluka je donesena ubrzo nakon incidenta u kojem je Sovjetski lovac srušio putnički zrakoplov koji je ušao u zabranjeni zračni prostor zbog navigacijske pogreške [2].

Svaki satelit odašilje slabi signal krajnjem korisniku. Kretanje signala u GPS sustavu se odvija u jednom smjeru, od satelita do krajnjeg korisnika. Time je izbačena potreba za ugradnjom odašiljača u uređaje koje koristi krajnji korisnik. Jedino što krajnji korisnik mora mjeriti je vrijeme, jer na temelju vremena kašnjenja primitka signala, uređaj određuje udaljenost od svakog satelita, odnosno položaj [1].

Položaj satelita u Zemljinoj orbiti nije fiksan, pa se ukazuje potreba za centralnom stanicom koja matematičkim postupcima može računati položaj pojedinog satelita, te taj podatak šalje svakom satelitu koji se nadalje šalje krajnjem korisniku. Krajnji korisnik prima podatke od satelita, i na temelju tih podataka računa položaj pojedinog satelita od kojeg je primio podatak i svoju poziciju [1].

GPS sustav se dijeli na tri segmenta koji su prikazani na slici 1 [1]:

- svemirski segment, odnosno sateliti
- kontrolni segment, odnosno zemaljske stanice i
- korisnički segment, odnosno korisnici i njihovi GPS prijamnici.



Slika 1: Segmenti GPS sustava [3]

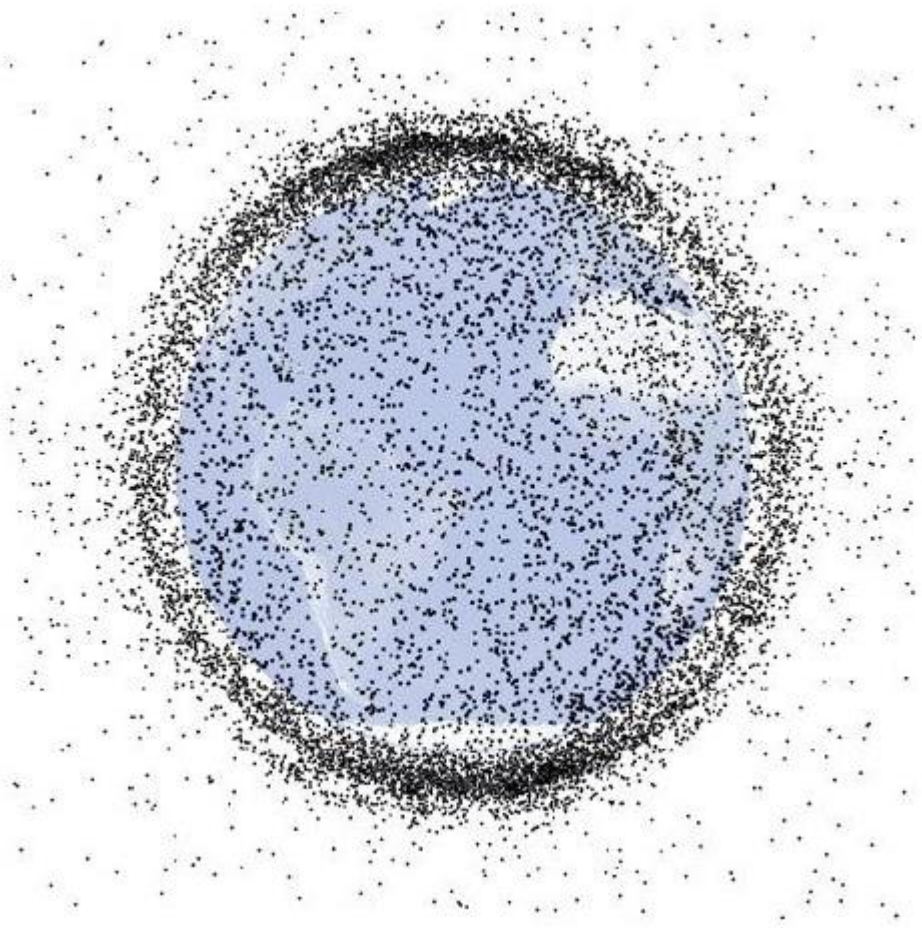
Danas se GPS sustav upotrebljava za [1]:

- zrakoplovnu navigaciju,
- navigaciju kopnenih prijevoznih sredstava
- navigaciju plovila,
- određivanje vremena stanice poznate lokacije,
- određivanje pozicije ili orbite satelita s prijamnikom koji se nalazi u blizini Zemlje,
- diferencijalni GPS (rad dva GPS prijamnika od kojih jedan ima poznatu poziciju i služi za određivanje greške GPS sustava i informiranje drugog prijamnika, koji mu se nalazi u blizini, o njoj kako bi dobio što precizniju poziciju),
- mjerenje faze vala nosilaca,
- mjerenje visine,
- mjerenje ionosferskih efekata (kašnjenje i scintilacija tj. nagla oscilacija amplitude i faze vala nosilaca), itd.

2.1. Svemirski segment

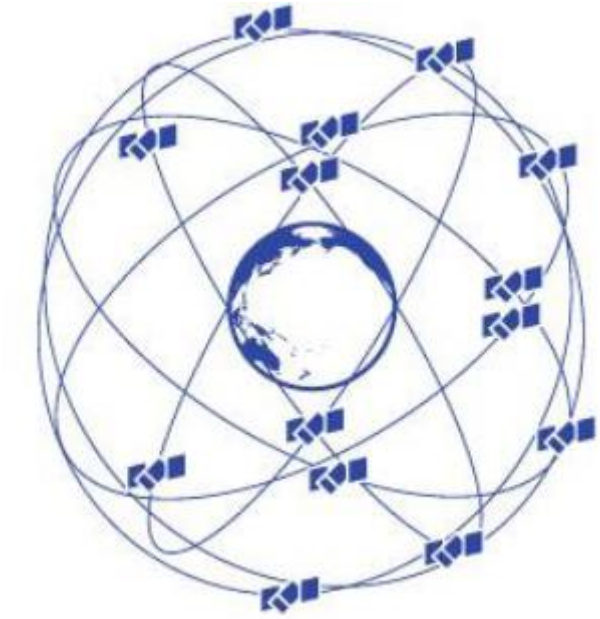
Svemirski segment čini konstelacija od najmanje 24 satelita. Od tih 24 satelita 21 satelit je aktivan, a 3 služe za rezervu. Orbite su raspoređene tako da je najmanje šest satelita uvijek u liniji vidljivosti s gotovo svake točke ne Zemljinoj površini. Sateliti se nalaze u srednjoj Zemljinoj orbiti na oko 20 200 kilometara iznad površine. Ta visina je uzeta kao kompromis između površine prekrivanja, brzine kretanja i broja satelita. Kada bi navigacijski sateliti bili pozicionirani u višim slojevima prekrivali bi veću površinu i trebalo bi manje satelita za cjelokupnu pokrivenost Zemlje, ali lansiranje satelita u više orbite je puno skuplje pa je srednja zemljina orbita uzeta kao kompromisno rješenje [1].

Kada satelit stigne u orbitu potrebno ga je tamo i zadržati. Budući da Zemlja nije savršena sfera, na nekim dijelovima njena gravitacija djeluje jače nego na drugim, što zajedno s privlačenjem Sunca, Mjeseca i Jupitera utječe na inklinaciju i položaj satelita u sferi. Zbog toga, kao i zbog svemirskog otpada, potrebno je prilagođavati orbite svakog pojedinog satelita. Na slici 2. je prikazan svemirski otpad, aktivni i neaktivni sateliti i njihove krhotine. Slikom se nastoji dočarati broj ukupnih predmeta u Zemljinoj orbiti od kojih je većina otpad. Stoga, iako se na ovom prikazu vidi da je otpad gušći, blizu Zemlji i da predstavlja veću prijetnju satelitima u Zemljinoj orbiti, svaka ova točka je puno veća od satelita ili krhotine koju predstavlja u stvarnosti u odnosu na Zemlju, te su sudari i potrebna izbjegavanja istih jako rijetki [1].



Slika 2: Objekti u blizini Zemlje [4]

Sateliti putuju brzinom od oko 14 000 kilometara na sat, što znači da obiđu Zemlju svakih 12 sati. Životni vijek im je oko 10 godina, a napajaju se solarnom energijom. Ako dođe do pomrčine i solarna energija zakaže, u pogonu ih održavaju rezervne baterije, a na pravoj putanji ih održava mali raketni pogon. Satelit se smatra vidljivim kada se nalazi pod kutem od minimalno 5° iznad horizonta, i tek tada se može koristiti u svrhu određivanja pozicije. Svaki satelit je vidljiv otprilike 5 sati, a zbog oblika orbita, linija puta satelita projektirana na Zemlju bi uvijek trebala biti ista. Na slici 3. je prikazan shematski prikaz orbita satelita [1].



Slika 3: Shematski prikaz orbita satelita [1]

1978. godine su u svemir lansirani prvi GPS sateliti. Od strane Ministarstva obrane SAD-a koje neprekidno služi za kupnju novih satelita i njihovo lansiranje u orbitu tako da se sustav održi u pogonu u godinama koje dolaze, postignut je puni raspored svih 24 satelita. Svaki satelit emitira radio signale male snage na nekoliko frekvencija, koje su označene s L1, L2 itd. Na frekvenciji L1 od 1575,42 MHz UHF pojasa (eng. Ultra High Frequency) „slušaju“ civilni GPS prijamnici. Signal ne prolazi kroz čvrste objekte kao npr. zgrade i planine, jer putuje kao zraka svjetlosti, ali zato prolazi kroz oblake, staklo i plastiku [1].

Da bi se dobila predodžba gdje je na radio području frekvencija L1, moramo imati na umu da FM radio stanica emitira na frekvenciji između 87 i 108 MHz. Satelitski signali se odašilju vrlo malom snagom, od 20-50 W. Dok npr. lokalne FM radio stanica emitiraju snagom od nekoliko desetaka kilovata, stoga je vrlo važno da pri upotrebi GPS-a postoji jasan pogled na nebo [1].

Poruka se odašilje pomoću PRN (eng. Pseudo Random Noise), načina kodiranja poruke koji je predvidljiv i počinje u točno određeno vrijeme, što ga čini prepoznatljivim prijamnicima (signal se izvlači iz šuma, jer je odnos signal – šum u korist šuma). Modulacija koja se koristi je BPSK. Svaki satelit odašilje vlastiti C/A kod čiji početak je određen atomskim satom na satelitu, a vrijeme koje se koristi je GPS vrijeme, a ne UTC [1].

Navigacijska poruka koju odašilje satelit se sastoji od 25 slogova podataka, od kojih svaki pojedini slog sadrži 1500 bita podataka strukturiranih u 5 pod – slogova po 300 bita. Za odašiljanje svakog sloga potrebno je 30 sekundi, pa je tako za odašiljanje cijele poruke potrebno 12,5 minuta. Poruka sadrži [1]:

- GPS vrijeme odašiljanja,
- signal prijenosa s P na C/A
- podatke o orbitalnoj putanji satelita
- podatak o korekciji sata satelita
- almanah podataka o statusu svih satelita u konstelaciji
- koeficijenti za preračunavanje GPS vremena u UTC
- ionosferski model.

Referentni sustav za izračun pozicije je WGS84, a GPS pozicija se računa u prijamniku. Zemlja je geoid, koji je nemoguće matematički opisati, i zato se koristi matematička aproksimacija zemlje u obliku referentnog elipsoida – WGS84, sa središtem u središtu zemlje (Earth – Centered – Earth – Fixed). Zato se na nekim mjestima stvarna površina zemlje poklapa upravo s površinom elipsoida, dok je na većini mjesta na zemlji primjetno odstupanje [1].

Trenutna aktivna konstelacija se sastoji od 31 satelita što je prikazano u tablici 1., u punoj operativnoj sposobnosti. Šest satelita: sateliti broj: 23,27,32,34,36 i 38 su rezervni i jedan testni satelit broj 49 koji je reaktiviran i 03.11.2016. godine počeo slati signale ali je označen kao „*unhealthy*“ te nije uključen u emitiranje almanaha. Budući da je za određivanje pozicije potrebno 24 satelita preostali sateliti omogućavaju povećanu preciznost određivanja iste kao i zamjenu neoperativnog ili pokvarenog satelita [1].

Tablica 1: Informacije o konstelaciji satelita [4]

SVN (space vehicle number – broj satelita	PRN (pseudorandom noise code – pseudoslučajni zvučni kod)	Vrsta atomskog sata	Datum lansiranja	Datum početka uporabe
43	133	Rb	23.07.1997.	31.01.1998.
46	11	Rb	07.10.1999.	03.01.2000.
51	20	Rb	11.05.2000.	01.06.2000.
44	28	Rb	16.07.2000.	17.08.2000.
41	14	Rb	10.11.2000.	10.12.2000.
54	18	Rb	30.01.2001.	15.02.2001.
56	16	Rb	29.01.2003.	15.02.2001.
45	21	Rb	31.03.2003.	18.02.2003.
47	22	Rb	21.12.2003.	12.04.2003.
59	19	Rb	20.03.2004.	12.01.2004.
60	23	Rb	23.06.2004.	09.07.2004.
61	02	Rb	06.11.2004.	22.11.2004.
61	02	Rb	06.11.2004.	22.11.2004.
53	17	Rb	26.09.2005.	16.12.2005.
52	31	Rb	25.09.2006.	12.10.2006.
58	12	Rb	17.11.2006.	13.12.2006.
55	15	Rb	17.10.2007.	31.10.2007.
57	29	Rb	20.12.2007.	02.01.2008.
48	07	Rb	15.03.2008.	24.03.2008.
50	05	Rb	17.08.2009.	27.08.2009.
62	25	Rb	28.05.2010.	27.08.2010.
63	01	Rb	16.07.2011.	14.10.2011.
65	24	Cs	04.10.2012.	14.11.2012.
66	27	Rb	15.05.2013.	21.06.2013.
64	30	Rb	21.02.2014.	30.05.2014.
67	06	Rb	17.05.2014.	10.06.2014.
68	09	Rb	02.08.2014.	17.09.2014.
69	03	Rb	29.10.2014.	12.12.2014.
70	32	Rb	09.03.2016.	20.04.2015.
71	26	Rb	25.03.2015.	12.08.2015.
72	08	Cs	15.07.2015.	09.12.2015.
73	10	Rb	31.10.2015.	09.03.2016.

2.2. Kontrolni segment

Kontrolni segment radi što mu i samo ime kaže, „kontrolira“ GPS satelite, odnosno upravlja njima prateći ih i dajući im ispravljene orbitalne i vremenske informacije. Kontrolni segment služi za promatranje stanja satelita te ispravljanje njihovih putanja, te ispravljanje atomskih satova među satelitima na par nano sekundi razlike. Kontrolni segment je postao

operativan 1985. godine i tada se sastojao od 5 kontrolnih stanica, 4 zemaljske odašiljačke antene i operativnog kontrolnog centra. Danas se kontrolni segment sastoji od operativnog kontrolnog centra i njegove zamjene, 11 komandnih i kontrolnih zemaljskih antena te 16 kontrolnih stanica čije se lokacije mogu vidjeti na slici 4 [1].

Slika 4: Kontrolni segment GPS sustava [6]

Prijamne stanice bez ljudi neprekidno primaju podatke od satelita i šalju ih glavnoj kontrolnoj stanici, koja se nalazi u Coloradu, SAD. Glavna kontrolna stanica „ispravlja“ satelitske podatke i šalje ih natrag GPS satelitima [1].

2.3. Korisnički segment

Korisnički segment se sastoji od svih korisnika koji upotrebljavaju GPS i njihove prijamnike. Širenjem tržišta satelitske navigacije nastala je potreba za jeftinim, pouzdanim uređajima za obične građane. GPS prijamnike možemo podijeliti na samostalne navigacijske uređaje, prijamnike koji rade zajedno s prijenosnim računalom, uređaje koji bilježe podatke o kretanju te hibridne uređaje [1].

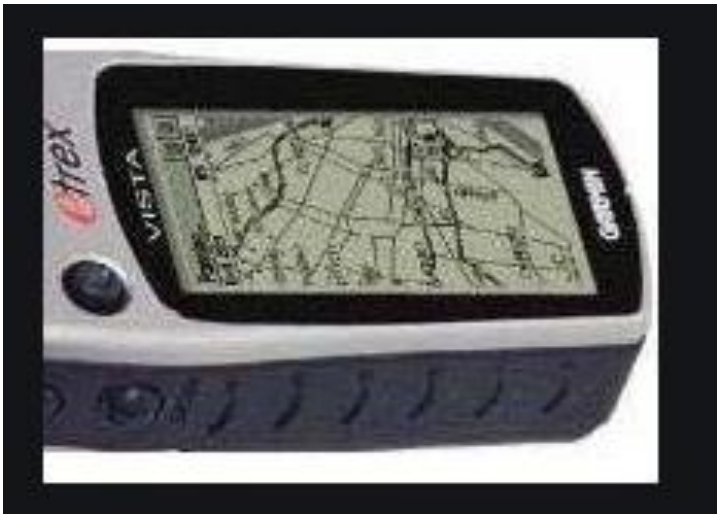
GPS prijamnike možemo podijeliti u 3 skupine:

- prijamnici bez karte,
- prijamnici s jednostavnom kartom i
- prijamnici s kartama.

GPS prijamnici bez karata imaju zaslon za crtanje koji može pokazati pogled odozgo (tlocrt) vašeg položaja i ostale točke puta (waypoints), rute ili prethodno spremljene trase. Zaslon za crtanje pomoći će u određivanju položaja u odnosu na te točke. Većina GPS prijamnika ima mogućnost pokazivanja tih osnovnih informacija. Neki modeli imaju dodatnu bazu podataka koja pokazuje položaje gradova. Prijamnik bez karte prikazan je na slici 5.

Slika 5: GPS prijamnik bez karte [7]

GPS prijamnik s jednostavnom kartom obično će pokazivati granice, važnije ceste, prolaze kroz veća naselja, jezera, rijeke, željezničke pruge, obalu, gradove, smještaj aerodroma i informacije o izlazima iz sustava autocesta. GPS prijamnik s jednostavnom kartom je prikazan na slici 6.



Slika 6: GPS prijamnik s jednostavnom kartom [7]

Pri upotrebi GPS prijamnika s mogućnosti spremanja detaljne karte, informacije na zaslonu stvarno su bitno bogatije. Podaci karte mogu sadržavati poslovne i stambene zgrade, restorane, banke, benzinske pumpe, turističke znamenitosti, navigacijske podatke za marine, pristupe za čamce, topografske detalje, adrese i više. Podaci karte mogu se ugraditi u prijamnik upotrebom kartice s podacima ili povezivanjem GPS prijamnika s računalom. Neki prijamnici mogu imati podatke napunjene izravno u internu memoriju bez potrebe za karticom s podacima. Na slici 7 je prikazan GPS prijamnik s kartama.

Slika 7: GPS prijamnik s kartama [7]

Glavna svrha navigacije je da omogući kretanje od točke A do točke B na najjednostavniji mogući način. GPS-prijamnici mogu spremiti više stotina točaka, ili položaja koji se nazivaju putnim točkama (eng. waypoints). Ako korisnik zna koordinate neke točke ili njen položaj na karti može u memoriji GPS prijamnika kreirati točke nakon čega GPS prijamnik korisnika vodi do tih točaka [8].

Vođenje do nekog mjesta znači mogućnost jednostavnog izbora odredišne točke i naredbe GPS-prijamniku da "ide do nje". Prijamnik će crtati crtu do te točke i voditi prema točki pokazujući smjer strelicom koja izgledom podsjeća na kompas, željenom linijom smjera, ili 3D prikazom "autoceste". Kad idete do traženog mjesta, GPS-prijamnik može bilježiti vaš položaj i smjer kretanja, brzinu kretanja, udaljenosti do odredišta, i vrijeme koje ćete trebati do cilja! Ali što ako je između vas i vašeg cilja planina, otok ili kanjon i ne možete ići ravnom linijom do vaše točke? Tada se može narediti prijamniku da ide nizom putnih točaka određenim redom, a to se naziva "rutom"[8].

Želimo li doći od točke A do točke B ali na putu između te dvije točke želimo proći kroz još neke točke (1, 2, 3... itd.) ruta je crta koja spaja te točke. S obzirom na to da ste stavili vlastite brojeve na točke, zapravo kažete "Želim ići od A do 1 pa do 2 pa do 3 i tako dalje, tim

redoslijedom!" Sa svim GPS-prijamnicima možete također vidjeti gdje ste bili, i to prikazano u obliku dnevnika trase (eng. track log) [8].

Kako putujete, GPS-prijamnik će automatski bilježiti putovanje u dnevnik trase. Ako skrećete i zaobilazite na putu kroz šumu ili kroz skupinu otoka, svako kretanje se sprema u memoriju GPS-prijamnika. Želite li putovati natrag istim putem kojim ste došli, možete aktivirati odgovarajuću naredbu. Kad se aktivira, prijamnik će pratiti dnevnik trase i automatski kreirati obrnutu rutu uzduž istoga puta, vodeći vas natrag odakle ste krenuli. Također, te se informacije mogu spremiti i po potrebi ponovo rabiti [8].

Geografski sjever je smjer sjevernog geografskog pola, dok je magnetski sjever smjer sjevernog magnetskog pola. Taj se pol nalazi u sjevernoj Kanadi. Ako rabite GPS prijamnik zajedno sa standardnim kompasom, podesit ćete GPS-prijamnik na magnetski sjever. Razlika između geografskog i magnetskog sjevera poznata je kao "magnetska varijacija" (ili magnetska deklinacija) i ona ovisi o mjestu. GPS-prijamnici obično imaju ugrađeni model magnetske varijacije Zemlje i mogu automatski postaviti varijaciju za položaj bilo gdje na Zemlji. Može se također izabrati ručno postavljanje varijacije upotrebom korisničkog definiranja smjera sjevera [8].

Trenutni položaj može se vidjeti u GPS-u u obliku koordinata. Kako različite geografske i pomorske karte koriste različite koordinatne sustave za određivanje položaja, GPS prijamnici omogućuju odabir koordinatnog sustava za određenu namjenu. Najčešće koordinate su geografska širina i geografska dužina. Taj način zapisa koordinata ugrađen je u sve GPS-prijamnike. Na većini modela, može se izabrati zapis koordinata u nekom drugom koordinatnom sustavu. UTM/UPS (Univerzalna poprečna Mercatorova/Univerzalna polarna stereografska) kartografska je projekcija koja je u čestoj upotrebi. MGRS (Vojni referentni sustav u obliku pravokutne mreže - Military Grid Reference System), proizlazi iz UTM-a i upotrebljava se uglavnom na vojnim kartama u SAD-u. U Hrvatskoj je na postojećim kartama najzastupljenija Gauß-Krügerova projekcija (u engleskom govornom području naziva se i Transverse Mercator). Potrebno je za pojedinu kartu poznavati i koji su parametri Gauß-Krügerove projekcije upotrijebljeni. Većina GPS-prijamnika, ako već nema ugrađene projekcije za Hrvatsku, omogućuje da ih korisnik (za iskusnije) definira [8].

Mnoge karte koje su danas u upotrebi, izrađene su prije nekoliko desetljeća. S vremenom, tehnologija je omogućila poboljšanje vještine mjerenja i izradu točnijih karata. Prema tome, potrebno je adaptirati GPS-prijamnik za upotrebu i s takvim starijim kartama.Većina GPS-prijamnika sadrži više od 100 različitih datuma karata, koji omogućuju da obavite transformaciju na postavke koje odgovaraju vašoj karti. Upotreba datuma karte koji ne odgovara karti koju upotrebljavate može rezultirati značajnim razlikama u informacijama o položaju [8].

Većina dobrih navigacijskih karata ima naveden datum, obično negdje sitnim slovima sa strane ili u legendi. Najčešći datumi karata SAD-a su World Geodetic System 1984 (WGS 84), North American Datum 1983 (NAD 83), i North American Datum 1927 (NAD 27). Postojeće karte u Hrvatskoj najčešće su izrađene u datumu koji se često naziva Hermannskogel. Neki prijamnici imaju već ugrađen taj datum za Hrvatsku, a većina ih omogućuje da ga korisnik (za iskusnije) definira. Kad pregledavate popis datuma ugrađenih u GPS-prijamnik, svakako je važno upamtiti da su to sve matematički modeli oblika Zemlje upotrijebljeni za određivanje položaja, a ne same karte ugrađene u prijamnik [8].

3. STRUKTURA SIGNALA SUSTAVA GPS

Svi GPS sateliti istodobno odašilju signale na dvjema prijenosnim frekvencijama, L1 i L2. Frekvencije nosilaca precizno se nadziru pomoću atomskih satova. Blok II. sateliti imaju 4 vremenska standarda, ostvarena s pomoću dva rubidijeva i dva cezijeva sata. Stabilnost tih satova dostiže i od 10^{-13} do 10^{-14} sekundi tijekom jednog dana. Vrlo točni standardi frekvencije omogućuju da se dobiju stabilne osnovne takt – frekvencije f = 10,23 MHz. Prijenosne frekvencije L1 i L2 su 154., odnosno 120. višekratnici osnovne frekvencije takta, L1 = 1575,42 MHz i L2 = 1227,60 MHz [9].

Prijenosni signali su modulirani binarnom bifaznom modulacijom BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) s pomoću triju sinkroniziranih kodova. Tablica 2. prikazuje frekvencije pojedinih komponenata signala [9].

Tablica 2: Frekvencije komponenata GPS signala [9]

Komponente signala	Frekvencija (MHz)
Osnovna frekvencija takta	$f = 10{,}23$
Prijenosna frekvencija *L*1	$154\ f = 1575{,}42$
Prijenosna frekvencija *L*2	$120\ f = 1227{,}60$
P-kod	$f = 10{,}23$
C/A-kod	$f / 10 = 1{,}023$
W-kod	$f / 20 = 0{,}5115$
Navigacijska poruka (D-kod)	$f / 204600 = 50 \times 10^{-6}$

3.1. C/A kod

Kod za pozicioniranje standardnom razinom točnosti, C/A – kod (eng. Coarse Acquisition /Clear Access) modulira fazu nositelja L1. Predviđen je za standardnu SPS uslugu, i dostupan je svim korisnicima. Kodna sekvenca ima pseudoslučajni oblik PRN – koda (Pseudo Radnom

Noise) s frekvencijom takta 1,023 MHz i spektralnom širinom signala od približno 2 MHz. Kodna sekvenca se ponavlja svakih 1023 bita (1ms), što daje efektivnu valnu duljinu koda oko 300 m [9].

Kod je različit za svaki pojedini satelit i sateliti se na temelju njega identificiraju. PRN – kodovi omogućuju CDMA (Code Division Multiple Access), tako da kodovi istodobno primljeni s različitih satelita ne koreliraju međusobno. Svi signali mogu biti primljeni na istoj frekvenciji i svaki se pojedini signal može selektivno izdvojiti [9].

3.2. P - kod

Kod za pozicioniranje s višom razinom točnosti, P - kod (eng. Precise/Protected) modulira faze obaju nositelja L1 i L2. Namijenjen je za PPS – uslugu za autorizirane korisnike. Kodna sekvenca je dugačka 267 dana i dijeli se u nizove sa sedmodnevnim sekvencama. Početkom svakog tjedna započinje nova sekvenca. Frekvencija takta je 10,23 MHz, a efektivna valna duljina je oko 30 m. Duljina koda omogućuje veću tečnost. P - kod se može posebno šifrirati s pomoću W - koda da se onemogući neovlašteno korištenje. Šifriranjem se dobiva Y – kod, koji zahtijeva posebni A - S (Anti - Spoofing) modul i kodni ključ, samo za autorizirane korisnike. Moduliranjem P - koda na obje prijenosne frekvencije omogućuje se mjerenje kašnjenja i kompenzacija utjecaja ionosfere na rasprostiranje signala [9].

3.3. D - kod

Navigacijska poruka D - kod (Dana code) sadrži podatke o točnim orbitalnim pozicijama (efemeridama) satelita, koeficijente modeliranja ionosfere, informacije o stanju satelita i pogrešci sata, te i almanah – podatke o aproksimativnim orbitama svih ostalih GPS satelita. Navigacijska poruka se prenosi brzinom od 50 bit/s, a informacija je složena u okvire podataka od 1.500 bitova. Okviri su podijeljeni u 5 podokvira po 300 bitova, s trajanjem podokvira od 6 si trajanjem okvira od 30 s. Niz od 25 okvira (125 podokvira) čini kompletnu navigacijsku poruku. Za prijenos cijelog paketa informacija treba 12,5 min. Da se skrati vrijeme za dobivanje inicijalne pozicije, podaci o efemeridama satelita i podaci vremena smješteni su u podokvire i ponavljaju se svakih 30 s. Svaki podokvir počinje s telemetrijskom riječi (TLM) koja služi za sinkronizaciju i HOW (Hand-Over Word) riječi koja omogućuje prijelaz sa C/A – koda na P -kod [9].

3.4. Prijam i obrada signala

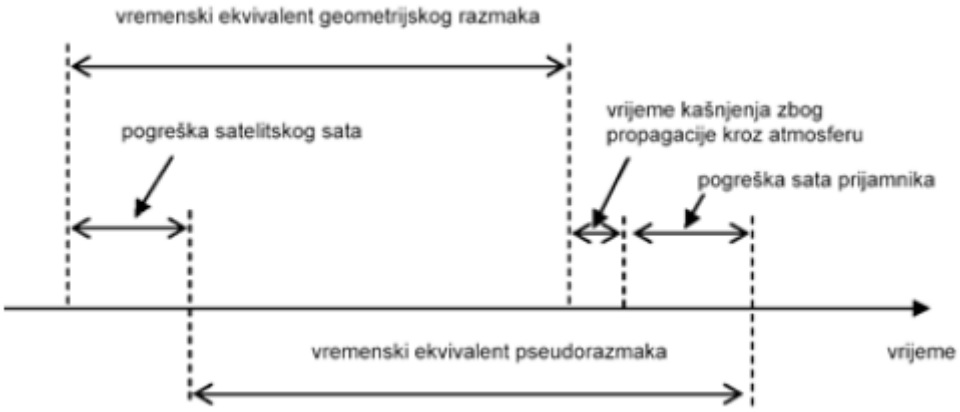
GPS signali koje emitiraju sateliti sastoje se od integrirane kombinacije komponenata vala nositelja, PRN - koda i navigacijske poruke. Moguće se sljedeće kombinacije signala [9]:

- nositelj L1 + C/A - kod + navigacijska poruka,
- nositelj L1 + P - kod + navigacijska poruka,
- nositelj L2 + P - kod + navigacijska poruka.

GPS prijamnici trebaju izdvojiti komponente signala s pojedinog satelita, rekonstruirati prijenosni signal i prepoznati kodove pojedinog satelita. Obradom signala u prijamniku izdvajaju se PRN - kodovi svakog satelita za mjerenje vremena rasprostiranja signala i navigacijske poruke za utvrđivanje pozicije satelita, a posebnom obradom može se dobiti i signal nositelj za fazna mjerenja [10].

Nakon razlaganja ulaznog signala na osnovne komponente, one se obrađuju u sklopovima za praćenje signala. Tehnikom korelacije izdvajaju se PRN - kodovi. GPS prijamnik generira repliku C/A - koda satelita (i/ili P - koda), koji ima pohranjen u memoriji. U posmačnom registru se kodna kombinacija vremenski pomiče dok se ne postigne korelacija s kodom satelita. Kad se kodovi poklope, detektira se najjači signal [10].

Početna pozicija PRN – koda prijamnika u trenutku pune korelacije je vrijeme dolaska TOA (Time of Arrival) PRN – koda sa satelita do prijamnika. TOA omogućuje da se mjeri vrijeme rasprostiranja signala i izračuna udaljenost od satelita do korisnika. Ta udaljenost naziva se pseudoudaljenost jer sadrži u sebi pogreške od kojih se neke mogu djelomično ili potpuno korigirati podacima dobivenima iz navigacijske poruke. Pogreške izmjerenog vremena prikazane su na slici 8 [10].

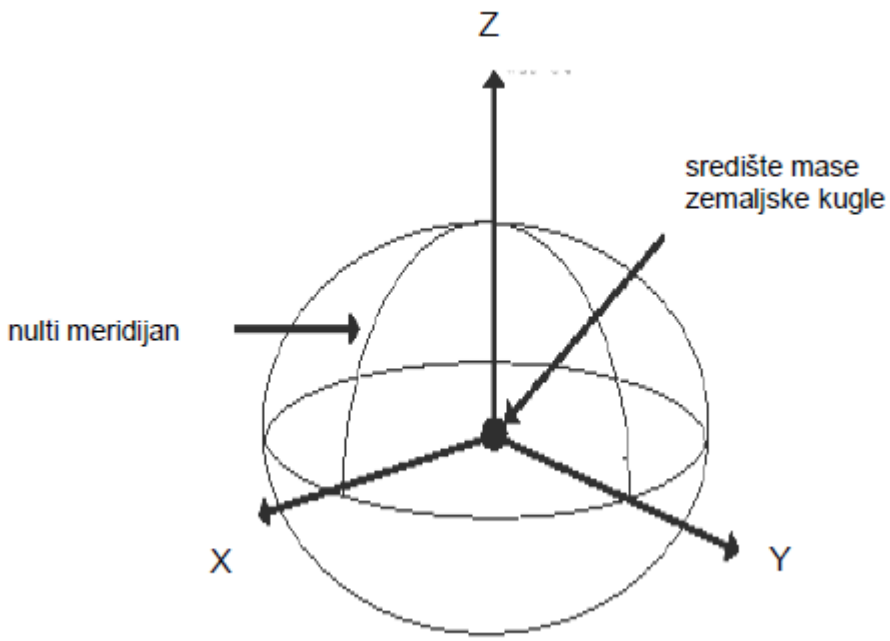


Slika 8: Pogreške izmjerenog vremena [9]

3.5. Mjerenje udaljenosti i pogreške u vremenu

Pozicija prijamnika utvrđuje se kao mjesto presijecanja linija pseudoudaljenosti prema više satelita. Orbitalni podaci (efemeride) omogućuju da prijamnik proračuna trenutnu poziciju svakog satelita u tri dimenzije. Pseudoudaljenosti od triju satelita bile bi dostatne da se utvrdi trodimenzionalna pozicija uz savršeno točni sat u prijamniku [9].

Pozicija satelita se izračunava obzirom na referentni koordinatni sustav s centrom u središtu zemaljske kugle s koordinatama X, Y, Z prikazanim na slici 10 [9].



Slika 9: Geocentrični koordinatni sustav [9]

Udaljenost od satelita može se odrediti kao razlika pozicija satelita i objekta, prema sljedećem izrazu:

$$|P_s - P_k| = r = c \cdot t \qquad (1)$$

Gdje je: Ps – pozicija satelita, Pk – pozicija objekta, r – udaljenost, c – brzina radijskih valova (brzina svjetlosti).

Jednadžba pozicije može se napisati kao funkcija koordinata X, Y, Z [9]:

$$(X_s - X_k)^2 + (Y_s - Y_k)^2 + (Z_s - Z_k)^2 = \mathrm{r}^2 \qquad (2)$$

Ovom se jednadžbom koristi za svaki navigacijski satelit. Izraz (2) se može napisati na sljedeći način:

$$(X_{s1} - X_k)^2 + (Y_{s1} - Y_k)^2 + (Z_{s1} - Z_k)^2 = \left[c\left(t_{p1} - t_{o1} - dt_1\right)\right]^2$$

$$(X_{s2} - X_k)^2 + (Y_{s2} - Y_k)^2 + (Z_{s2} - Z_k)^2 = \left[c\left(t_{p2} - t_{o2} - dt_2\right)\right]^2$$

$$(X_{s3} - X_k)^2 + (Y_{s3} - Y_k)^2 + (Z_{s3} - Z_k)^2 = \left[c\left(t_{p3} - t_{o3} - dt_3\right)\right]^2$$

$$(X_{s4} - X_k)^2 + (Y_{s4} - Y_k)^2 + (Z_{s4} - Z_k)^2 = \left[c\left(t_{p4} - t_{o4} - dt_4\right)\right]^2$$

U ovim izrazima su: t_p – trenutak prijama, t_o – trenutak odašiljanja pojedinog satelita, dt – odstupanje sata na satelitu. X_s, Y_s i Z_s su koordinate pojedinog satelita, koje su poznate iz navigacijske poruke. Pozicija objekta s koordinatama X_k, Y_k i Z_k koju želimo odrediti predstavlja tri nepoznanice, a nepoznanica je i točan trenutak prijama t_p, zbog odstupanja sata GPS – prijamnika. Kako broj mjerenja mora biti jednak broju nepoznanica, treba obaviti četiri mjerenja pseudoudaljenosti, za što su potrebna četiri mjerenja psudoudaljenost, za što su potrebna četiri satelita (s1, s2, s3 i s4) [10].

Pozicija prijamanika se izračunava iz pozicija satelita, izmjerenih pseudoudaljenosti (korigiranih za odstupanje sata svakog satelita i prijamnika, i ionosferska kašnjenja) i zadnje utvrđene pozicije prijamnika [10].

Pozicija korisnika u koordinatama X, Y i Z je nepraktična i pretvara se u GPS – prijamniku u zemljopisnu duljinu i visinu. Postoje različiti geodetski koordinatni sustavi, zbog različitih aproksimacija geoidnog oblika zemaljske kugle. GPS – sustav standardno se koristi WGS – 84 (Word Geodetic System) koordinatnim sustavom za prikaz pozicije [9].

3.6. Pogreške pri određivanju pozicije

Točnost određivanja pozicije ili brzine korisnika GPS- sustava ovisi o međusobnom utjecaju različitih činitelja. Pogreške pozicioniranja mogu nastati zbog geometrijskih i sistematskih pogrešaka. Geometrijske pogreške nastaju zbog prostorne raspodjele satelita i korisnika. Geometrijska mjera preciznosti GDOP (Geometric Dilution of Precision) je bezdimenzijski faktor. Visoke vrijednosti GDOP faktora najčešće su povezane uz smanjeni broj vidljivih satelita. Općenito je prihvaćeno da je geometrijski raspored satelita povoljan ako je GDOP manje od 5. Na slici 11. su prikazana dva geometrijska rasporeda kod kojih se razlikuje točnost pozicioniranja. Najveća točnost se može postići kada je kut među satelitima, gledano s pozicije prijamnika, blizu 90° [9].

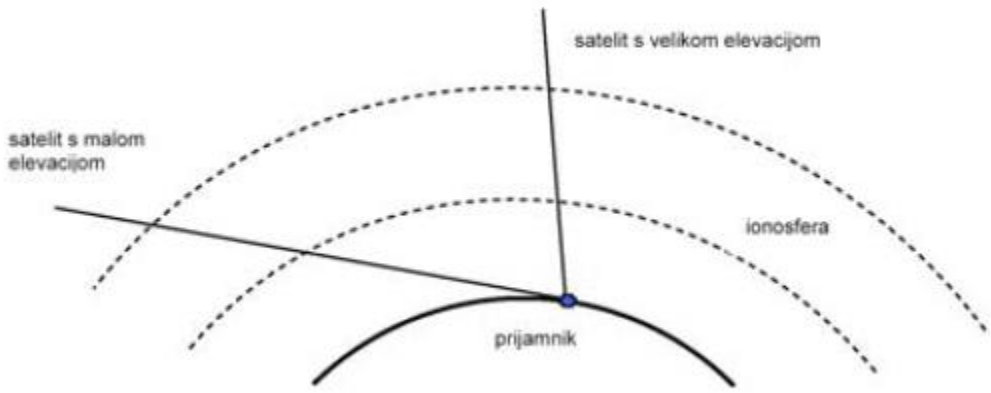
Sistemske pogreške obuhvaćaju sve pogreške nastale pri određivanju udaljenosti između korisnika i satelita. Općenito točnost pozicioniranja ovisi o kvaliteti mjerenja pseudoudaljenosti do satelita, te o točnosti položaja satelita u orbitama. Glavni izvori pogrešaka pozicioniranja kod GPS – sustava su [9]:

- ionosfersko kašnjenje,
- troposfersko kašnjenje,
- prijam reflektiranog vala,
- efemeride satelita,
- odstupanje satelitskog sata,
- odstupanje GPS – prijamnika,
- šum prijamnika.

3.6.1. Ionosfersko kašnjenje

GPS sustav se koristi dvjema frekvencijama prijenosnog signala L1 i L2 (1575,42 i 1227,6 MHz). Na putu od satelita do korisnika na Zemlji GPS – signal prolazi 97,5 % prijeđenog puta kroz vakuum, što ne utječe na njegovo rasprostiranje, i oko 2,5 % puta prolazi kroz slojeve ionosfere i oni izazivaju kašnjenje signala, a time i pogreške u mjerenju udaljenosti. Kašnjenje kroz ionosferu je ovisno o frekvenciji signala, pa se, mjereći vrlo male razlike u vremenu prijama na dvije različite frekvencije, može izračunati iznos ionosferskog kašnjenja, čime se koriste specijalni GPS prijamnici s većom točnošću pozicioniranja. GPS prijamnici za komercijalnu uporabu primaju samo jednu frekvenciju, i za njih se ionosferska korekcija

provodi na temelju podataka o gustoći ionosfere koji se šalju u navigacijskoj poruci. To rezultira manjom preciznošću jer se korekcijska veličina dobiva kao srednja vrijednost za šire zemljopisno područje. Osim toga, debljina ionosferskog sloja ovisi o elevaciji satelita, kao što je prikazano na slici 10, a to jako utječe na iznos kašnjenja signala. Kašnjenje signala kroz slojeve ionosfere može biti reda veličine od 10 ns za satelite s velikom elevacijom do 150 ns za satelite s elevacijom nižom od 10°, što može izazvati pogrešku pseudoudaljenosti od 3 do 45 m [9].



Slika 10: Prolazak GPS signala kroz ionosferu ovisno o elevaciji satelita [9]

3.6.2. Troposfersko kašnjenje

Sloj troposfere mnogo je niži i tanji od onoga ionosfere i izaziva također kašnjenje signala. Ovo je kašnjenje jednako na svim frekvencijama, pa se ne može eliminirati dvofrekvencijskim prijenosom. Pogreška mjerenja pseudoudaljenosti zbog troposferskog kašnjenja približno je jednaka za sve satelite s elevacijom većom od 10°, pa se lako može korigirati [9].

3.6.3. Prijam reflektiranog vala

Refleksiju satelitskih signala mogu izazvati raznovrsni objekti u okolini prijamnika, zbog čega reflektirani signali stižu do prijamnika s kašnjenjem u odnosu prema direktnom signalu. Kako je antena GPS prijamnika neusmjerena, ne mogu se razlikovati direktni i reflektirani signal. Kašnjenje utječe na sklopove za usklađivanje takt – frekvencije u prijamniku i izaziva pogreške pozicioniranja [9].

3.6.4. Efemeride satelita

GPS sustav definira standarde za SPS uslugu pozicioniranja, koji se prije svega odnose na karakteristike signala svemirskog segmenta. Utjecaj ionosfere, troposfere i višestruki put nisu uključeni u specifikacije. Točnost pozicije svakog GPS satelita nadzire sustav opažačkih stanica. GPS sustav osigurava korisnicima točnost pozicioniranja ovisno o točnosti podataka efemerida satelita, koje su najčešće s točnošću do 30 m [10].

3.6.5. Odstupanje satelitskog sata

Podatak o apsolutnom pomaku satelitskog sata je sadržan u navigacijskoj poruci. Važan je podatak i trenutak u kojem je odstupanje izmjereno, te brzina promjene koja se može očekivati do sljedećeg mjerenja. GPS prijamnik proračunava na temelju toga predviđenu veličinu odstupanja od trenutka mjerenja odstupanja sadržanoga u navigacijskoj poruci, što može rezultirati manjim pogreškama [10].

3.6.6. Odstupanje sata GPS prijamnika

Ovu pogrešku ne izaziva pomak sata prijamnika od GPS vremena koja se eliminira dostatnim brojem mjerenja pseudoudaljenosti, nego pomak i treperenje vremenske reference između mjerenja. Moderni višekanalni GPS prijamnici s istodobnim paralelnim mjerenjima reduciraju pogreške nastale zbog odstupanja sata na vrlo male vrijednosti [10].

3.6.7. Šum prijamnika

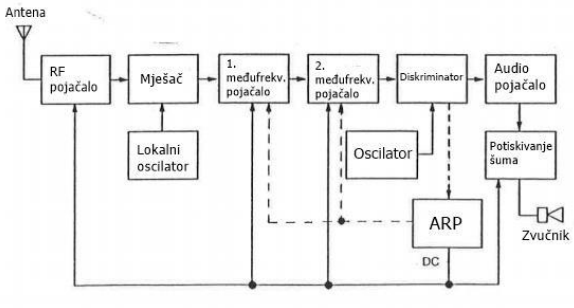
Smanjenjem visokofrekvencijskog šuma prijamnika poboljšava se odnos signal / šum primljenih signala, što omogućuje uporabu slabijih satelitskih signala za pouzdanu navigaciju. Time se poboljšavaju svojstva GPS prijamnika u situacijama kada je direktna vidljivost satelita smanjena zbog prepreka (drveće, zgrade i sl.). To ne znači da je prijamnik ujedno i otporniji na interferencijske smetnje. Utjecaj šuma prijamnika na pogrešku pozicioniranja je slučajna veličina s pogreškom od oko 3 m [10].

4. TEHNIČKE KARAKTERISTIKE SOFTVEROM DEFINIRANOG RADIJA

Softverom definirani radio (SDR) je radio komunikacijski sustav u kojem su komponente poput mješača, filtera, pojačala, modulatora, demodulatora, itd., realizirane kroz softver računala. Osnovni SDR sustav sastoji se od računala opremljenim zvučnom karticom ili nekim drugim analogno-digitalnim konverterom, te ulaznim radioprijamnikom. Najveći dio posla oko obrade signala se vrši u središnjoj jedinici za obradu podataka (procesoru) uz pomoć softvera, umjesto na posebnom hardveru kao kod klasičnih radioprijamnika [11].

4.1. Konstrukcija tradicionalnog analognog radio uređaja

Prije nego što objasnimo kako SDR radi, potrebno je razmotriti rad tradicionalnog analognog radiouređaja. U bežičnim komunikacijama informaciju nose radio valovi koje antena odašilje ili prima. Primljeni signal se predaje seriji komponenata koje izdvajaju korisnu informaciju i pretvaraju je u izlazni signal. Osnovna izvedba je ista neovisno o tome je li radijski signal namijenjen mobilnom telefonu, AM/FM auto – radiju ili nekom drugom uređaju. Osnovna komponenta tradicionalnih radiouređaja je prijamnik s pretvorbom (transpozicijom) frekvencije, a njegovu blok shemu vidimo na slici 11 [11].

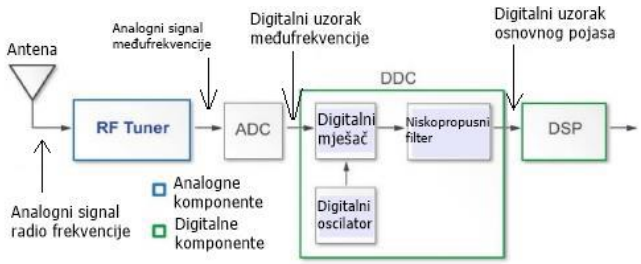


Slika 11: Blok shema tradicionalnog radioprijamnika [13]

Signal na ulazu takvog prijamnika najprije se pretvara u signal neke niže frekvencije tzv. međufrekvencije (*engl. IF – intermediate frequency*). Kao takav se filtrira, pojačava, a zatim demodulira kako bi se dobio signal u osnovnom frekvencijskom području (*engl. Baseband*) koji predstavlja željenu informaciju. Dobiveni signal može se prevesti u digitalni oblik pogodan za daljnju obradu. Jedan od motiva za transpoziciju frekvencije je jednostavnost pojačala i filtrirala za signale nižih frekvencija, a ujedno su i jeftiniji [11].

4.2. Konstrukcija softverom definiranog uređaja

Konstrukcija SDR-a razlikuje se od konstrukcije tradicionalnog radiouređaja u tri stvari: (1) A/D pretvornik stavlja se što bliže prijamničkoj anteni, (2) obradu signala (modulacija, demodulacija…) ne obavlja sklopovlje (hardver) nego se za to koriste kompjuterski programi (softver), (3) SDR omogućava korištenje univerzalnog, umjesto specijaliziranog hardvera. Svaka od ovih promjena ima važan utjecaj na ekonomiju bežične usluge. Na slici 13. je prikazana blok shema softverom definiranog radio prijamnika [12].



Slika 12: Blok shema SDR prijamnika [14]

Premještajem A/D pretvornika što bliže anteni signal se već na samom početku digitalizira i kompjuterski obrađuje. Time je smanjen broj analognih komponenata, a digitalni filtri također puno bolje izdvajaju šum iz originalnog signala. Korištenjem softvera umjesto hardvera dobivamo na fleksibilnosti sustava.Naime, SDR je radiouređaj koji omogućuje softverski nadzor raznih modulacijskih tehnika, rad u uskom ili širokom pojasu, a za bilo koju promjenu navedenih veličina je dovoljno podesiti softver, što je puno jednostavnije od zamjene hardvera. Prijelazom na univerzalni hardver daje se mogućnost otvorenog sučelja, tj. povezivanja s različitim sustavima neovisno o njihovoj namjeni [12].

4.3. Osnovni dijelovi

Opisani su sljedeći dijelovi: MMIC RF komponente, A/D pretvornik, dio za digitalnu obradu signala [11].

MMIC (*Monolitic Microwave Integrated Circuits*) tehnologija integriranih komponenata koja se koristi za integraciju sklopova radiouređaja na jedan čip. Te komponente uključuju aktivne komponente kao što su tranzistori te pasivne komponente kao što su otpornici,

zavojnice i kondenzatori. MMIC koristi dvije vrste poluvodiča: GaAs (galij arsenid) i Si (silicij) [12].

Dva ključna parametra koja definiraju performanse A/D pretvornika su brzina uzorkovanja i razlučivost (broj bita po uzorku).

Još jedan važan parametar je dinamički opseg. U konvencionalnom pristupu, filterima se izdvajao samo signal određene frekvencije. Kod širokopojasnog prijamnika (kakav se koristi u SDR – u), nijedan signal se ne smije izdvajati. Zapravo, dobivamo širok spektar frekvencija: jedni imaju veliku snagu jer dolaze od odašiljača u neposrednoj blizini, dok drugi, koji dolaze s udaljenih odašiljača, imaju puno manju snagu i prekriveni su šumom. Takav spektar zahtijeva široki dinamički opseg samog prijamnika, kako bi sa zadovoljavajućom osjetljivosti mogao rekonstruirati slabe signale [11].

Integrirani krugovi koji se koriste za digitalnu obradu signala su:

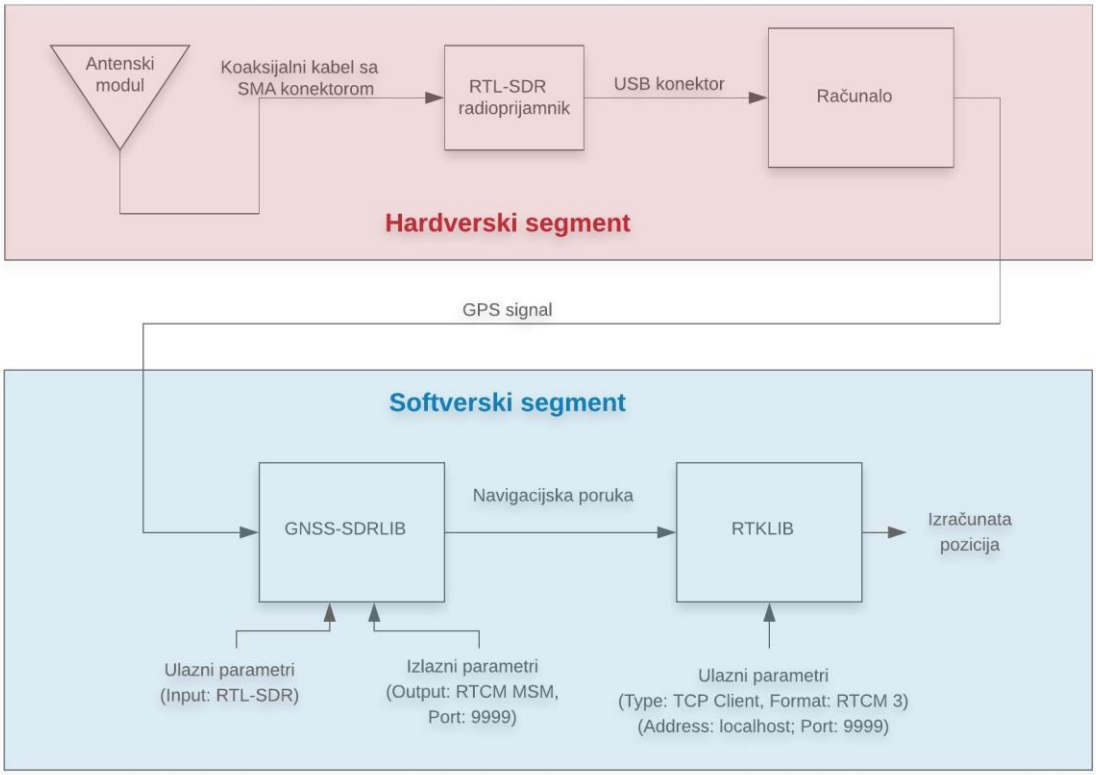
- DSP (Digital Signal Processors) čip koji obrađuje signal tako što dohvaća instrukcije i podatke iz memorije, vrši operacije nad njima i sprema ih natrag u memoriju, FPGA (Field Programmable Gate Array) ili ASIC (Application – Specific Integrated Circuit) [11].
- ASIC integrirani logički sklopovi koji se koriste za obavljanje točno određene logičke funkcije i ne mogu se koristiti za neku drugu primjenu. Razvoj i proizvodnja ovakvih sklopova je vrlo skupa [11].
- FPGA (Field Programmable Gate Array) sklopovi predstavljaju grupu visoko integriranih sklopova koji su za razliku od ASCI, programabilni od strane korisnika

4.4. Primjena

SDR se može primijeniti u bilo kojem području radio komunikacija i emitiranja. Kako SDR radi u vrlo širokom frekventnom području, tako je pronašao brojne amaterske, ali i profesionalne svrhe. Neke od funkcija SDR-a su gledanje analogne televizije, slušanje radioamaterskih stanica, digitalnih radiopostaja (DAB), Međunarodne svemirske stanice, radioastronomija, prijam i obrada GPS signala, te brojne druge primjene kojima će s vremenom rasti broj [15].

5. PRIJAM I DEKODIRANJE SIGNALA

Za realizaciju prijama GPS signala pomoću softverom definiranog radija potrebni su hardverski i softverski segment. Hardverski segment sastoji se od središnje jedinice pomoću koje će se prikupljati i obrađivati podaci (osobno ili prijenosno računalo, mikroračunalo, pametni telefon, i sl.), SDR prijamnika i antenskog modula. Softverski segment se sastoji od dva programska paketa koji međusobno komuniciraju unutar lokalne mreže. GNSS-SDRLIB je prvi programski paket čija je zadaća primiti GPS signal od prijamnika, te isti pretvoriti u navigacijsku poruku. RTKLIB je drugi programski paket koji s lokalne mreže prihvaća navigacijske poruke, te ih u stvarnom vremenu dekodira i izračunava poziciju prijamnika. Na slici 13 prikazan je blok dijagram hardverskog i softverskog segmenta koji su obrađeni u ovom poglavlju.



Slika 13: Blok dijagram hardverskog i softverskog segmenta softverom definiranog GPS prijamnika

5.1. Hardverski segment

Na slici 14 prikazan je RTL-SDR prijamnik (verzija 3) unutar kućišta (gore) i bez kućišta (dolje). Na lijevoj strani kućišta nalazi se SMA konektor na koji se priključuje antenski modul pomoću koaksijalnog kabela, a na desnoj strani kućišta je smješten USB konektor pomoću kojeg se prijamnik spaja na računalo. Unutar kućišta se cijelom njegovom površinom proteže jedna višeslojna tiskana pločica na kojoj je smješteno svo sklopovlje i konektori ovog uređaja. S donje strane tiskane pločice nalazi se termalna podloga za odvođenje topline s elektroničkih komponenata na metalno kućište (nije vidljiva na slici 14). Kućište također pomaže pri izolaciji sklopova od utjecaja vanjskih smetnji [16].

Slika 14: RTL-SDR radioprijamnik unutar kućišta (gore) i bez kućišta (dolje) [16]

Navode se neke od specifikacija RTL-SDR V3 prijamnika [16]:

- Frekvencijski opseg: 0.5 [MHz] – 1766 [MHz]
- Ulazni napon: 5 [V]
- Tipična ulazna struja: 270 [mA] – 280 [mA]
- Tipična ulazna impedancija: 50 [Ω]
- Čip analogno-digitalnog pretvarača: RTL2832U
- Rezolucija analogno-digitalnog pretvarača: 8 [bitova]
- Čip radio tunera: R820T2

Antenski modul se sastoji od keramičke antene u obliku pločice, niskošumnog pojačala (eng. Low-noise amplifier – LNA), i GPS frekvencijskog filtra[17]. Na slici 15 prikazan je GPS antenski modul.

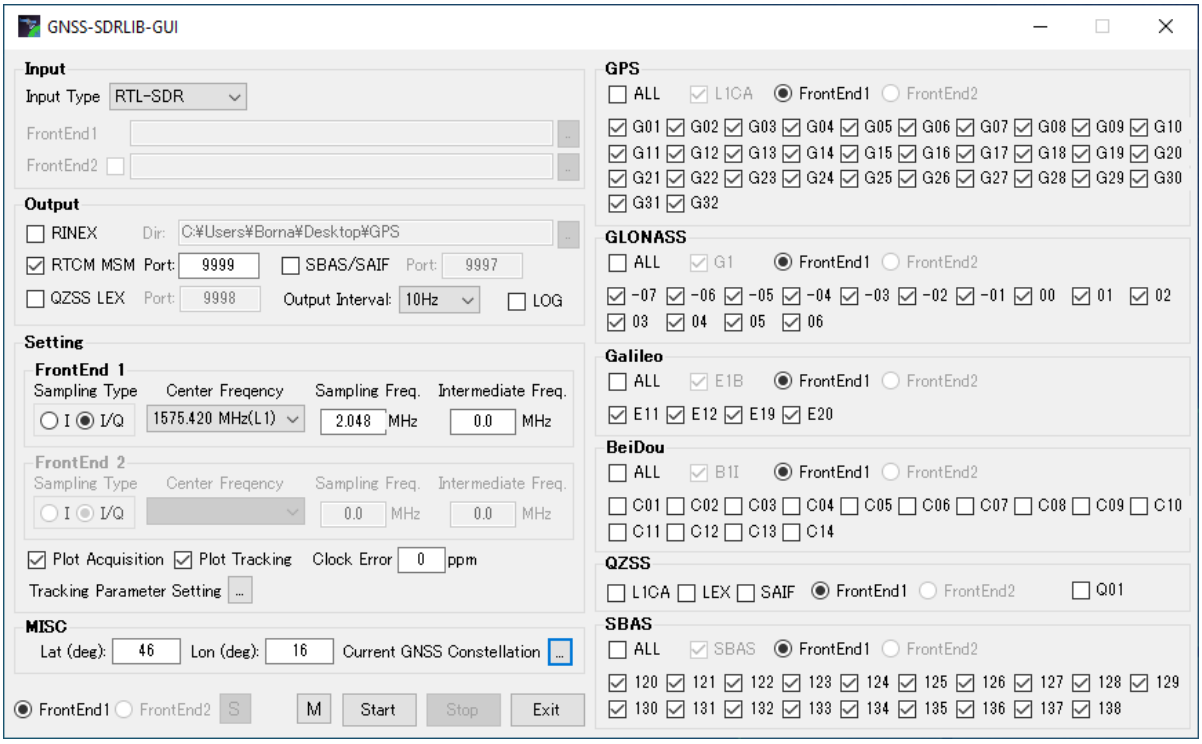
Slika 15: GPS antenski modul s koaksijalnim kabelom i SMA konektorom [17]

Niskošumno pojačalo (LNA) unutar antenskog modula nužno je za kvalitetan prijam signala s GPS satelita. Za aktivaciju LNA potrebno je koaksijalnim kabelom antenskom modulu dovesti odgovarajući prednapon. RTL-SDR prijamnik ima ugrađen sklop za aktivaciju LNA, tzv. *bias tee*, koji se uključuje upisom sljedeće naredbe u *Command Prompt* [16]:

rtl_biast -d 0 -b 1

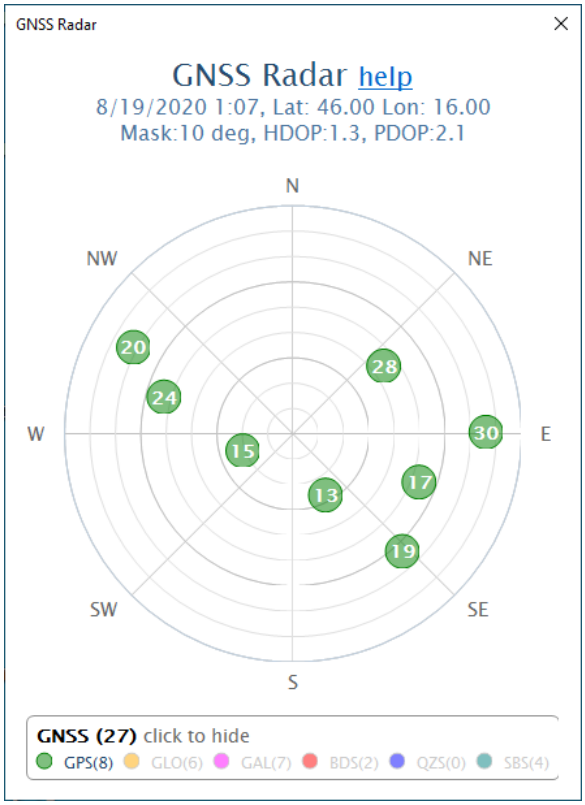
5.2. Softverski segment

GNSS-SDRLIB je softverski paket otvorenog izvora neophodan za komunikaciju sa SDR prijamnikom. Nakon pokretanja, otvara se inicijalno korisničko sučelje prikazano na slici 16, koje je podijeljeno na nekoliko sekcija za postavke parametara prijama. Unutar sekcije **Input** se odabire izvor signala. To može biti datoteka ili neki od podržanih prijamnika. Ovdje je potrebno odabrati RTL-SDR prijamnik. Unutar sekcije **Output** odabire se izlazno odredište signala, gdje je potrebno označiti RTCM MSM i u polje Port upisati vrijednost 9999 što će omogućiti prosljeđivanje signala unutar lokalne mreže prema softverskom paketu koji će ga dekodirati. Odabrani izlazni interval je 10 Hz. U sekciju **MISC** poželjno je upisati okvirne koordinate prijamnika što će skratiti vrijeme potrebno za inicijalno određivanje pozicije. S desne strane sučelja nalaze se sekcije svih navigacijskih i augmentacijskih sustava koje ovaj paket podržava (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, SBAS) i unutar kojih je moguće pojedine satelitske sustave uključiti ili isključiti za prijamnik [18].



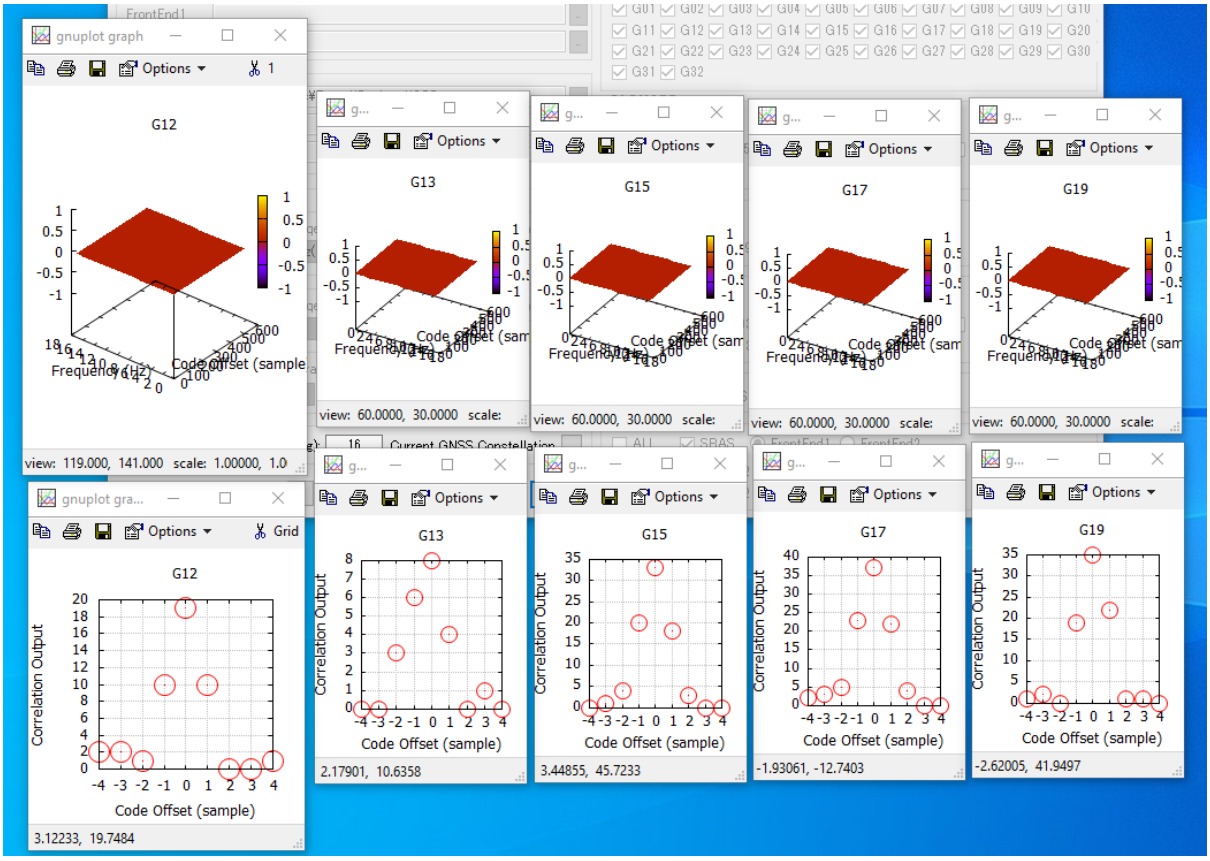
Slika 16: Inicijalno sučelje GNSS-SDRLIB

Za upisane koordinate moguće je predočiti i trenutnu konstelaciju satelita u stvarnom vremenu klikom na tipku „...“ s desne strane sekcije što otvara prozor prikazan na slici 17. U donjem dijelu prozora može se odabrati koji od satelitskih sustava će biti prikazan. Na slici 17 su prikazani položaji isključivo GPS satelita. Podaci o položaju satelita se preuzimaju s internetske stranice *http://www.celestrak.com/* [18].



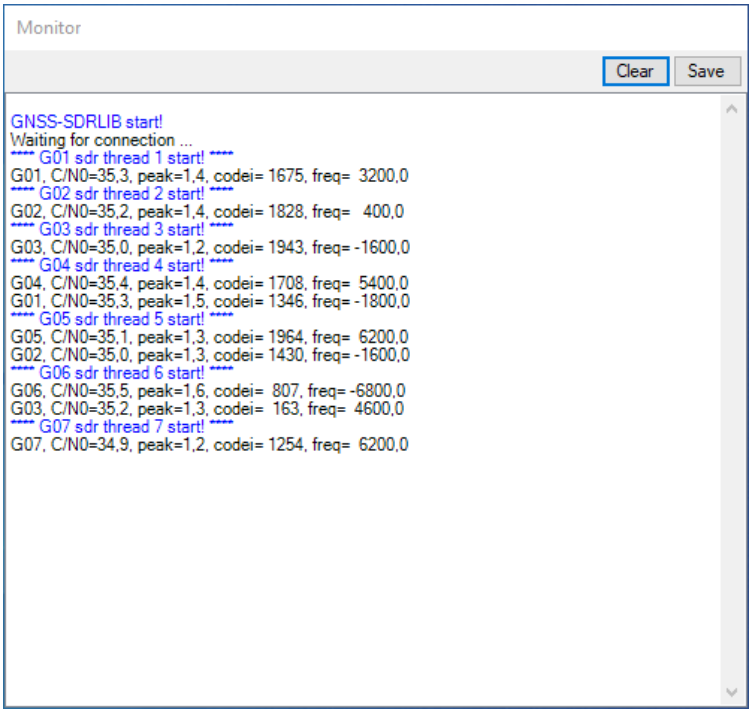
Slika 14: Trenutna konstelacija GPS satelita

Nakon postavljanja parametara prijama, potrebno je kliknuti na tipku „Start“, nakon čega započinje komunikacija prijamnika i satelita. Ubrzo se pojavljuje niz prozora vidljivih na slici 18, koji predstavljaju spektar signala sa svakog vidljivog satelita. Poželjno je da gornji grafovi što više budu nalik na ravnu plohu, a donji grafovi na šiljke s vršnom vrijednosti u sredini, slično kao na slici. To je znak da antena ima dobru optičku vidljivost prema satelitima, te da prijamnik dobiva kvalitetan signal. Ako se ne pojavljuju grafovi ili se pojavi znatno manji broj grafova (jedan do dva), a s vremenom se ne pojavljuju novi, ili ako grafovi izgledom znatno odstupaju od onog na slici 18, to može upućivati na loš prijam signala, te određivanje pozicije vjerojatno neće biti moguće. Stoga valja posumnjati na položaj antene u odnosu na vanjske prepreke, priključni kabel za spajanje antene i prijamnika, te postavke niskošumnog pojačala [18].

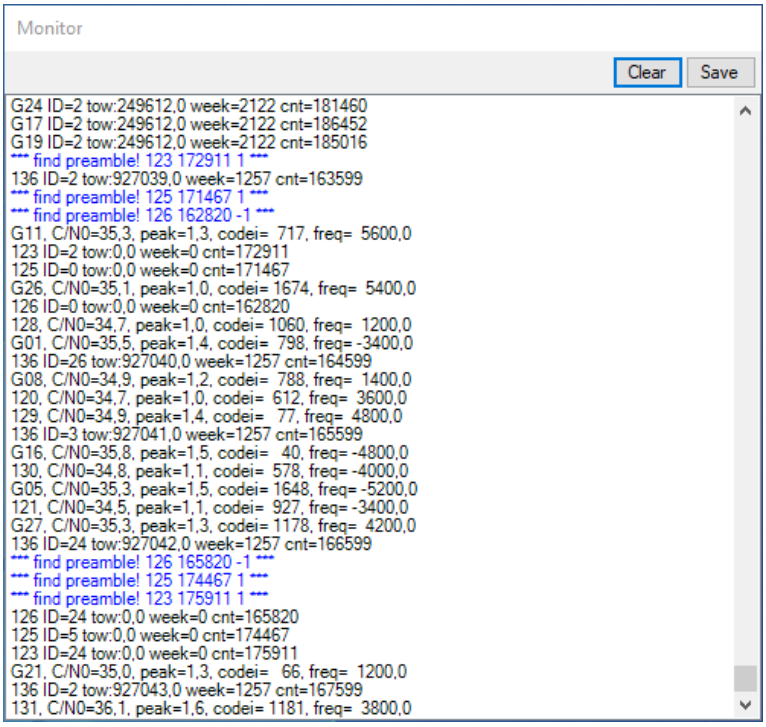


Slika 15: Spektar signala s vidljivih satelita

Klikom na tipku „M“ otvara se prozor za nadzor operacija (eng. Monitor) prikazan na slici 19. Ovdje programski paket tijekom rada ispisuje relevantne informacije o komunikaciji sa satelitima, obradi signala, pogreške, i sl. Prilikom započete komunikacije sa satelitom ispisuje se linija: *****G01 sdr thread 1 start! ***** , što ukazuje da će se komunikacija sa satelitom G01 odvijati na kanalu 1 (eng. Thread). Kasnije se kroz niz izvršenih naredbi, svakom satelitu dodjeljuje novi komunikacijski kanal. Ispisom linije: *G01, C/N0:35,3, peak=1,4, codei= 1675, freq= 3200,0* se prikazuju informacije o signalu s G01 satelita kao što su intenzitet signala (C/N0, eng. Carrier-to-noise ratio), vršna vrijednost (peak), fazni kod (codei), te frekvencijski pomak (freq). Na slici 20 vidljiv je isti prozor nakon određenog vremena, odnosno nakon izračunate pozicije. Linijom ***** find preamble! 123 172911 ***** se ukazuje na početak navigacijske poruke. Ovdje su vidljive i linije iz kojih je moguće iščitati i satelitsko vrijeme (eng. *week*= tjedan, te *tow*, eng. time of week) [18].

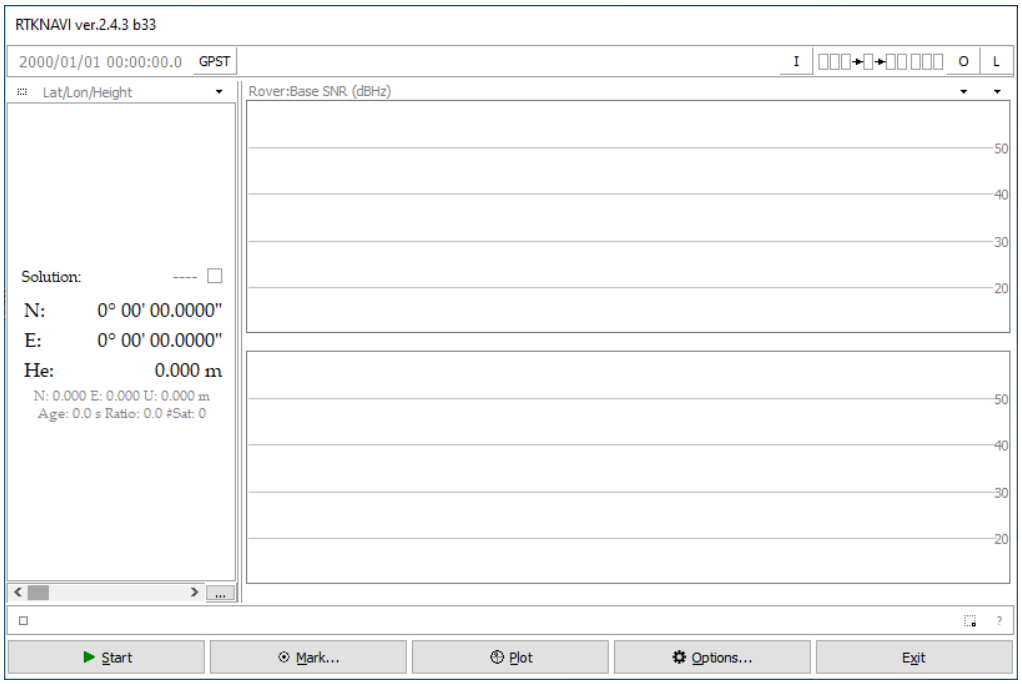


Slika 16: Prozor za nadzor operacija (Monitor) nakon pritiska na tipku „Start“

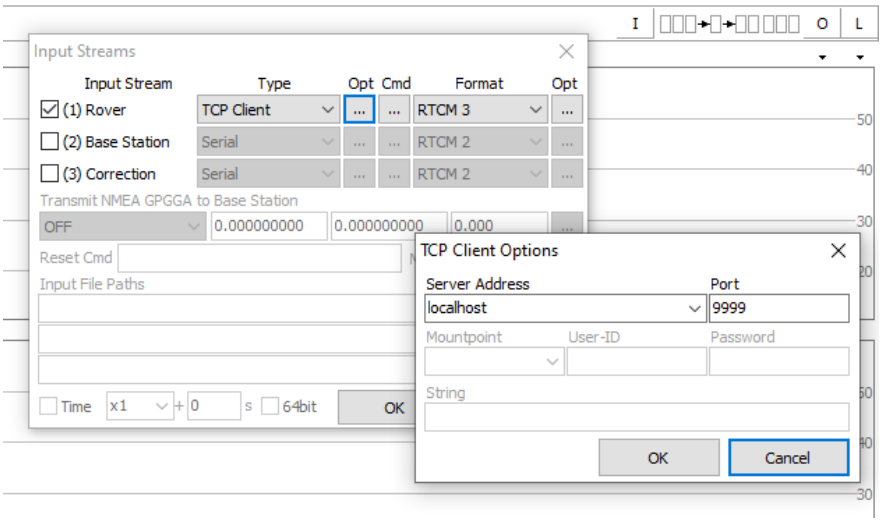


Slika 20: Prozor za nadzor operacija nakon određivanja pozicije

RTKLIB je programska biblioteka otvorenog izvora koja se sastoji od niza zasebnih alata koji se koriste za prikupljanje i obradu signala, pozicioniranje, analizu prikupljenih podataka i druge funkcije uz pomoć globalnog navigacijskog sustava satelita. RTKNAVI je jedan od programa unutar biblioteke RTKLIB, koji služi za pozicioniranje u stvarnom vremenu. Nakon pokretanja programa RTKNAVI otvara se korisničko sučelje vidljivo na slici 21. Za određivanje pozicije potrebno je najprije podesiti ulazne parametre. Klikom na tipku „I“ u gornjem desnom dijelu prozora otvara se prozor „Input Streams“ kao na slici 22, unutar kojeg je potrebno označiti „Rover“ kao ulazni parametar, u padajućem izborniku tipa izabrati „TCP Client“ i format „RTCM 3“, a klikom na tipku „Opt“ otvara se prozor „TCP Client Options“, također vidljiv na slici 22, gdje je potrebno upisati adresu i port. Kako se radi o signalu iz GNSS-SDRLIB-a s lokale mreže, u polje „TCP Server Address“ treba upisati **localhost**, te u polje „Port“ upisati vrijednost **9999**. Ovime su podešeni ulazni parametri potrebni za pozicioniranje, stoga klikom na „OK“ zatvaramo oba prozora [19].

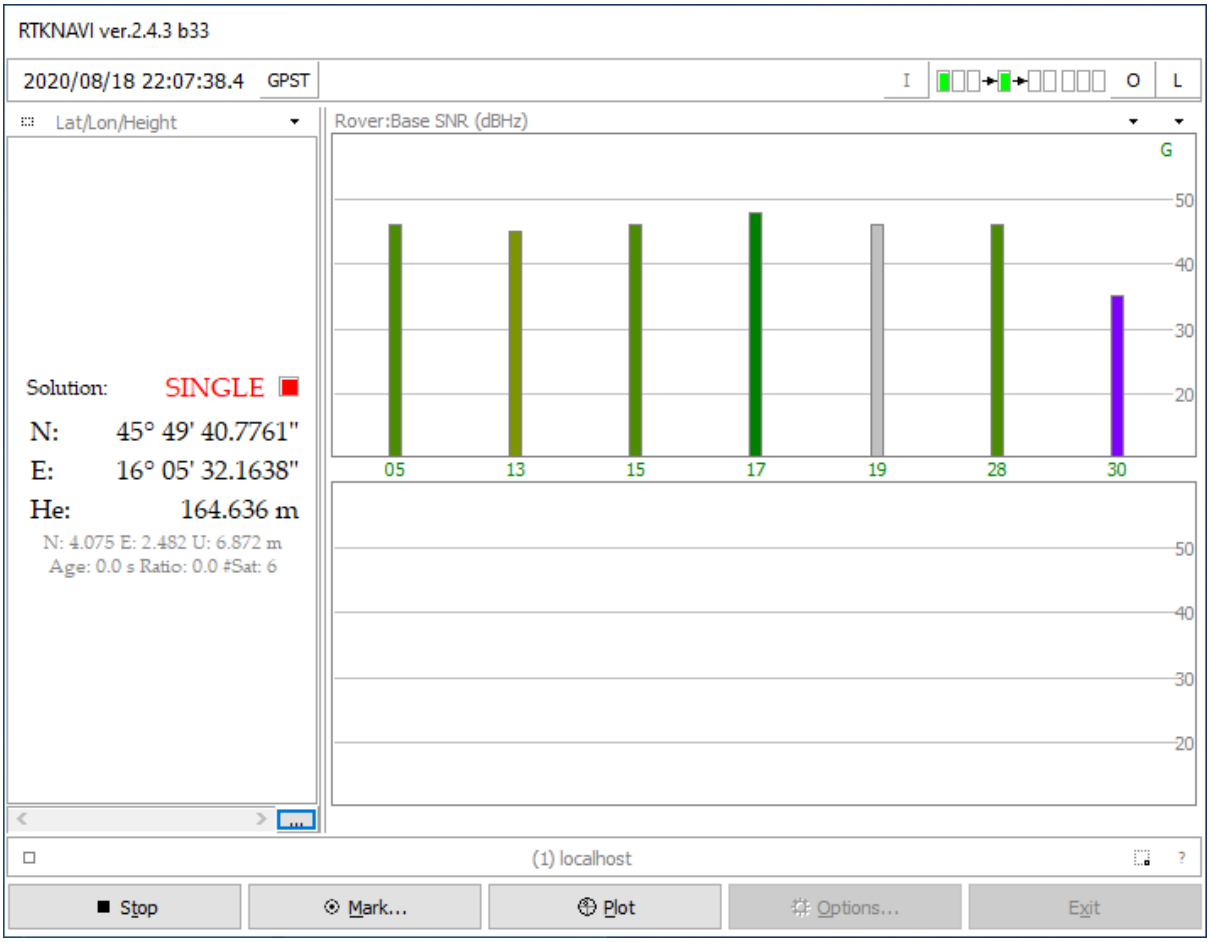


Slika 21: Glavno sučelje programa RTKNAVI



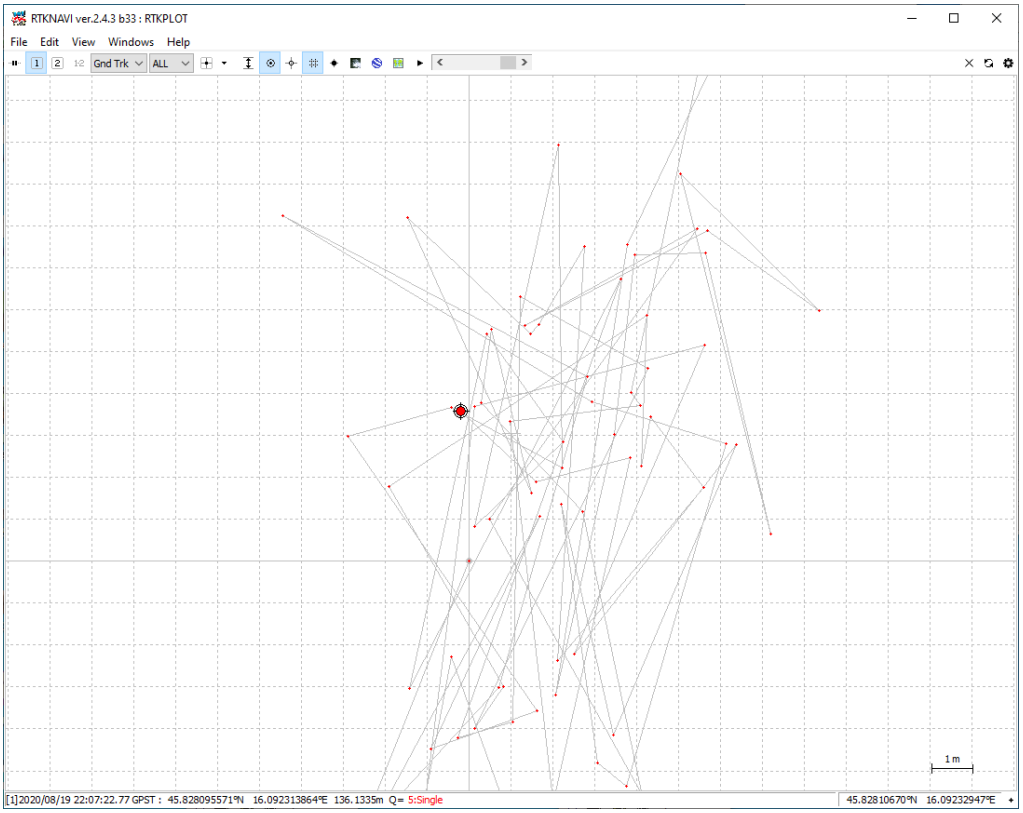
Slika 22: Podešavanje ulaznih parametara unutar programa RTKNAVI

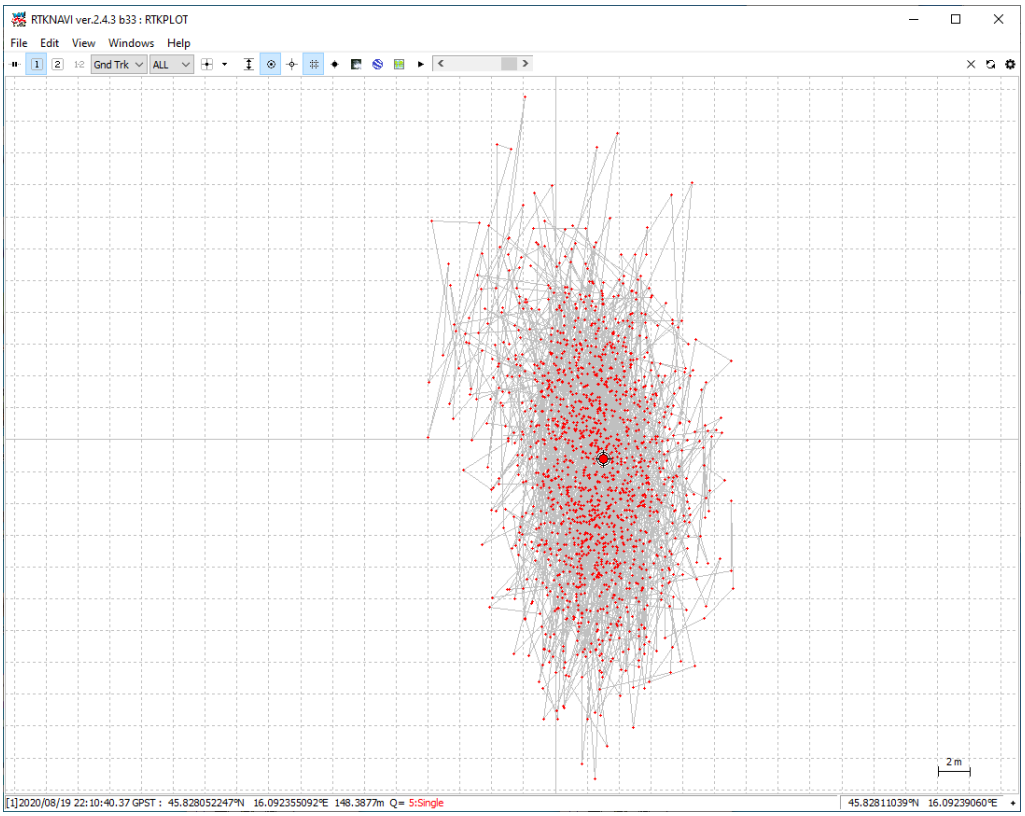
Nakon podešavanja ulaznih parametara, potrebno je kliknuti na tipku „Start“ unutar glavnog sučelja RTKNAVI čime se započinje proces dekodiranja navigacijske poruke i određivanja pozicije. Nakon uspostavljene komunikacije unutar lokalne mreže, na gornjem grafu u sredini sučelja počinju se pojavljivati grafovi koji predstavljaju intenzitete signala koji dolaze sa svakog satelita koji je vidljiv prijamniku. S lijeve strane sučelja se nakon određenog vremena (ovisno o kvaliteti prijama signala) počinje indicirati trenutno vrijeme, koordinate prijamnika, te nadmorska visina, što je prikazano na slici 23.



Slika 23: Sučelje programa RTKNAVI nakon izračunate pozicije

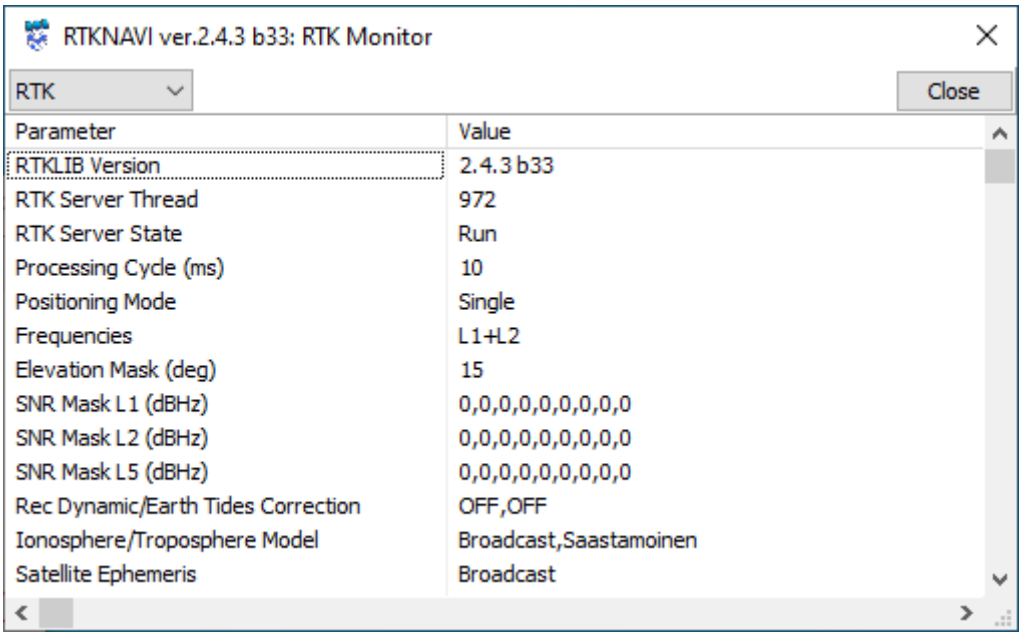
Klikom na tipku „Plot“ otvara se programski alat RTKPLOT unutar kojeg je prikazana mreža određenog razmjera na kojoj svaka crvena točkica predstavlja izračunatu poziciju u danom trenutku, kroz neki vremenski period, a veći crveni marker predstavlja posljednju izračunatu poziciju. U ovom prikazu je vizualizirano odstupanje izračunate pozicije od stvarne uslijed pogrešaka. Na slici 24 (gore) prikazano je mreža RTKPLOT-a nakon otprilike 10 sekundi iscrtavanja izračunatih pozicija, dok je mreža nakon otprilike 3 minute nakon iscrtavanja pozicija prikazana na slici 24 (dolje) [19].



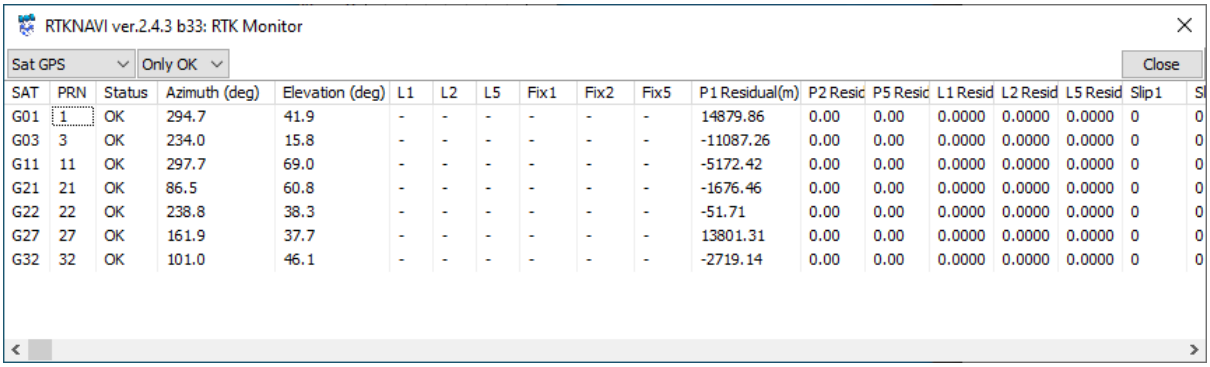


Slika 24: RTKPLOT mreža s izračunatim pozicijama kroz 10 sekundi (gore) i 3 minute (dolje)

Klikom na tipku „RTK Monitor“ u donjem lijevom dijelu sučelja, iznad tipke „Start/Stop“, otvara se prozor za nadzor parametara RTKNAVI koji je vidljiv na slici 25 (gore). Ovdje su vidljive informacije o verziji programa, broju aktivnih kanala, proteklom vremenu od pokretanja programa, satelitskom vremenu, preciznosti i dr. U padajućem izborniku s lijeve strane može se izabrati niz drugih parametara koji se mogu nadzirati kao što su: atmosferske korekcije, model ionosfere, korekcije vremena i dr., odabirom „Sat GPS“ dobiva se tablični prikaz satelita s kojih je primljen signal što je prikazano na slici 25 (dolje). Ovdje su između ostalih informacija vidljivi azimut i kut elevacije za svaki satelit [19].



Parameter	Value
RTKLIB Version	2.4.3 b33
RTK Server Thread	972
RTK Server State	Run
Processing Cycle (ms)	10
Positioning Mode	Single
Frequencies	L1+L2
Elevation Mask (deg)	15
SNR Mask L1 (dBHz)	0,0,0,0,0,0,0,0,0
SNR Mask L2 (dBHz)	0,0,0,0,0,0,0,0,0
SNR Mask L5 (dBHz)	0,0,0,0,0,0,0,0,0
Rec Dynamic/Earth Tides Correction	OFF,OFF
Ionosphere/Troposphere Model	Broadcast,Saastamoinen
Satellite Ephemeris	Broadcast



SAT	PRN	Status	Azimuth (deg)	Elevation (deg)	L1	L2	L5	Fix1	Fix2	Fix5	P1 Residual(m)	P2 Resid	P5 Resid	L1 Resid	L2 Resid	L5 Resid	Slip1	Sl
G01	1	OK	294.7	41.9	-	-	-	-	-	-	14879.86	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0	0
G03	3	OK	234.0	15.8	-	-	-	-	-	-	-11087.26	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0	0
G11	11	OK	297.7	69.0	-	-	-	-	-	-	-5172.42	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0	0
G21	21	OK	86.5	60.8	-	-	-	-	-	-	-1676.46	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0	0
G22	22	OK	238.8	38.3	-	-	-	-	-	-	-51.71	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0	0
G27	27	OK	161.9	37.7	-	-	-	-	-	-	13801.31	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0	0
G32	32	OK	101.0	46.1	-	-	-	-	-	-	-2719.14	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0	0

Slika 25: Prozor za nadzor parametara RTKNAVI (gore), te vidljivih satelita (dolje)

6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu elaborirane su osnove GPS sustava i njegovih segmenata u čije su istraživanje i razvoj uložene milijarde dolara, a također se i danas svake godine ulažu milijuni dolara u njihovo održavanje. Kroz povijest je doživio brojna unaprjeđenja, i implementacije u civilne svrhe, stoga je opravdano očekivati sličan trend razvoja u budućnosti za GPS, ali i u ostale globalne navigacijske sustave.

Također, opisan je koncept rada softverom definiranog radija. Softverom definirani radio je mnogo je noviji sustav u odnosu na GPS, ali zbog prirode razvoja ovog sustava koji je otvorenog tipa, te broja amatera i entuzijasta koji ga konstantno unaprjeđuju, i u ovom području je za očekivati mnoge nove primjene.

U posljednjem poglavlju ovog rada prikazan je proces povezivanja i pripreme hardverske opreme i softverskih paketa u svrhu prijama, i obrade signala GPS satelita. Prikazane su neke od mogućnosti softvera u svrhu analize signala i izračuna pozicije. Primjena softverom definiranog radija u ovu svrhu predstavlja vrlo zanimljiv način shvaćanja razvojnih tokova i infrastrukture koja čini GPS sustav.

LITERATURA

1. B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr., Global Positioning System: Theory and Applications (Volume I), American Institute of Aeronautics and Astronautics 1996.
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System (preuzeto: kolovoz 2019.)
3. https://shivkumardas.wordpress.com/agri-tech/an-introduction-to-gps-gis-and-its-uses-in-agriculture/ (preuzeto: kolovoz 2019.)
4. http://www.sciencenc.com/event-help/examples/RemoteSensing/Catalog%20of%20Earth%20Satellite%20Orbits.pdf (preuzeto: kolovoz 2019.)
5. https://www.gpsworld.com/the-almanac/ (preuzeto: kolovoz 2019.)
6. https://www.gps.gov/systems/gps/control/ (preuzeto: kolovoz 2019.)
7. https://www.google.hr/search?q=gps+receivers&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjqqI7ynsPkAhVLQUEAHVPcCSQQ_AUIEigB&biw=1440&bih=764 (preuzeto: kolovoz 2019.)
8. D. Novak, Zrakoplovna prostorna navigacija, Sveučilište u Zagrebu FPZ Zagreb, 2015.
9. T. Kos, M. Grgić, S. Krile: Hiperbolni i satelitski sustavi za navigaciju
10. Navstar Global Positioning System, Interface Specification, IS-GPS-200, Revision D, 2004.
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio (preuzeto: kolovoz 2019.)
12. M. Dillinger, K. Madani, N. Alonistioti: Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions, 2003.
13. Bucak, T., Nastavni materijali: Uređaji i sustavi u kontroli zračne plovidbe, Sveučilište u Zagrebu
14. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292015000100007 (preuzeto: kolovoz 2019.)
15. https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/ (preuzeto: kolovoz 2019.)
16. https://www.rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2018/02/RTL-SDR-Blog-V3-Datasheet.pdf (preuzeto: kolovoz 2019.)
17. https://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-tutorial-gps-decoding-plotting/ (preuzeto: kolovoz 2019.)

18. http://www.taroz.net/gnsssdrlib/gnss-sdrlib_manual_v1.0_en.pdf

(preuzeto: srpanj 2020)

19. http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf

(preuzeto: srpanj 2020)

POPIS SLIKA

Slika 1: Segmenti GPS sustava 3

Slika 2: Objekti u blizini Zemlje 5

Slika 3: Shematski prikaz orbita satelita 6

Slika 4: Kontrolni segment GPS sustava 9

Slika 5: GPS prijamnik bez karte 10

Slika 6: GPS prijamnik s jednostavnom kartom 11

Slika 7: GPS prijamnik s kartama 12

Slika 8: Pogreške izmjerenog vremena 18

Slika 9: Geocentrični koordinatni sustav 18

Slika 10: Prolazak GPS signala kroz ionosferu ovisno o elevaciji satelita 21

Slika 11: Blok shema tradiocionalnog radioprijamnika 23

Slika 12: Blok shema SDR prijamnika 24

Slika 13: Blok dijagram hardverskog i softverskog segmenta softverom definiranog GPS prijamnika 26

Slika 14: RTL-SDR radio prijamnik unutar kućišta i bez kućišta 27

Slika 15: GPS antenski modul s koakcijalnim kabelom i SMA konektorom 28

Slika 16: Inicijalno sučelje GNSS-SDRLIB 29

Slika 17: Trenutna konstelacija GPS satelita 30

Slika 18: Spektar signala s vidljivih satelita 31

Slika 19: Prozor za nazdor operacija (Monitor) nakon pritiska na tipku „Start“ 32

Slika 20: Prozor za nazdor operacija nakon određivanja pozicije 32

Slika 21: Glavno sučelje programa RTKNAVI 33

Slika 22: Podešavanje ulaznih parametara unutar programa RTKNAVI 34

Slika 23: Sučelje programa RTKNAVI nakon izračunate pozicije 35

Slika 24: RTKPLOT mreža s izračunatim pozicijama kroz 10 sekundi (gore) i 3 minute (dolje) 36

Slika 25: Prozor za nadzor Parametara RTKNAVI (gore), te vidljivih satelita (dolje) 37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Informacije o konstelaciji satelita 8

Tablica 2. Frekvencije komponenata GPS signala 15

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **Programiranje prijamnika GPS definiranog softverom**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 10.9.2020

(potpis)