Mjerenje i analiza performansi satelitskog navigacijskog prijamnika uz primjenu kinematike u realnom vremenu

Banović, Stjepan

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:119:627781

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Stjepan Banović

MJERENJE I ANALIZA PERFORMANSI SATELITSKOG NAVIGACIJSKOG PRIJAMNIKA UZ PRIMJENU KINEMATIKE U REALNOM VREMENU

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2. travnja 2020.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5650

Pristupnik: **Stjepan Banović (0135246131)**
Studij: Aeronautika
Smjer: Pilot
Usmjerenje: Civilni pilot

Zadatak: **Mjerenje i analiza performansi satelitskog navigacijskog prijamnika uz primjenu kinematike u realnom vremenu**

Opis zadatka:

U ovome je radu potrebno izmjeriti performanse RTK GNSS prijamnika po kriterijima dostupnosti signala te točnosti pozicioniranja. U prvom će dijelu rada student opisati princip rada RTK GNSS prijamnika te opisati karakteristike mjerne opreme. Potom je potrebno izraditi scenarije (uvjete) u kojima će se mjeriti performanse te opisati metodologiju mjerenja. U analizi je potrebno izračunati te grafički prikazati odnos promjene točnosti pozicioniranja s promjenom udaljenosti prijamnika od bazne stanice. Osim toga, student će izmjeriti i dostupnost signala u ovisnosti o preprekama na terenu.

Mentor:

doc. dr. sc. Tomislav Radišić

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

MJERENJE I ANALIZA PERFORMANSI SATELITSKOG NAVIGACIJSKOG PRIJAMNIKA UZ PRIMJENU KINEMATIKE U REALNOM VREMENU

PERFORMANCE MEASUREMENT AND ANALSYS OF A SATELLITE NAVIGATION RECEIVER USING REAL-TIME KINEMATICS

Mentor: doc. dr. sc. Tomislav Radišić

Student: Stjepan Banović
JMBAG: 0135246131

Zagreb, rujan 2020.

SAŽETAK

RTK GNSS je tehnika satelitske navigacije koja se temelji na pozicioniranju pomoću faze vala nosioca i slanju korekcija lokacije GNSS uređaju sa bazne stanice. U ovome radu će se analizirati i usporediti bazično GNSS lociranje s RTK GNSS lociranjem u realnim uvjetima. Također će se analizirati preciznost RTK GNSS lociranja ovisno o udaljenosti stanica i dostupnosti signala. Svi podaci će biti obrađeni u Mission Planneru i Matlabu.

Ključne riječi: RTK GNSS, GNSS, lociranje, bazna stanica, rover, Mission Planner, Matlab

SUMMARY

RTK GNSS is a satellite navigation technique based on carrier-phase positioning and transmission of location correction data from base station to the GNSS reciever. In this paper basic GNSS positioning and RTK GNSS positioning will be compared and analyzed in real conditions. The accuracy of RTK GNSS positioning depending on the distance between the base and rover and signal availabillty will also be analyzed. All data will be processed in Mission Planner and Matlab

Key words: RTK GNSS, GNSS, positioning, base station, rover, Mission Planner, Matlab

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. GNSS 2
2.1. GNSS arhitektura 2
2.1.1. Svemirski segment 2
2.1.2. Upravljački segment 3
2.1.3. Korisnički segment 4
2.2. Pozicioniranje 4
2.3. Strukture GNSS signala 6
2.4. NAVSTAR GPS 6
2.5. GLONASS 9
3. OPIS PRINCIPA RADA RTK GNSS PRIJAMNIKA 11
4. OPIS OPREME ZA MJERENJE 13
4.1. Here+ RTK GNSS 13
4.2. Pixhawk autopilot 14
4.3. Mission planner 14
4.4. Ostalo 15
4.5. Spajanje sve opreme i njezina interakcija 15
5. IZRADA SCENARIJA ZA MJERENJE PERFORMANSI 17
5.1. Neobrađeno GNSS mjerenje 17
5.2. Mjerenje s RTK korekcijama 18
6. UMJERAVANJE, MJERENJE TOČNOSTI POZICIJE I DOSTUPNOSTI SIGNALA 20
6.1. Umjeravanje lokacije 20
6.2. Metodologija mjerenja 22
6.3. Dostupnost signala 23
7. OBRADA I ANALIZA PODATAKA 25
7.1. Neobrađeno GNSS mjerenje 27
7.2. RTK GNSS mjerenje 10 m 28
7.3. RTK GNSS mjerenje 50 m 29
7.4. RTK GNSS mjerenje 150 m 30
7.5. Usporedba podataka i analiza 31
8. ZAKLJUČAK 35
LITERATURA 36
Popis kratica 37
Popis slika 38

Popis tablica 39
Popis grafikona 39

1. UVOD

Globalni navigacijski satelitski sustavi *(engl. Global Navigation Satellite Systems-GNSS)* postaju glavna metoda navigacije u 21. stoljeću. Od pješaka i auta do najvećih putničkih zrakoplova, tehnologija napreduje i teži unaprjeđenju satelitske navigacije kao primarnog izvora navigacijskog vođenja. Oni za manje od 100 €/$ omogućuju korisniku uređaj koji će odrediti njihovu poziciju na Zemlji preciznošću od nekoliko metara. Nadalje, ta točnost pozicije se može dovesti ispod metra raznim navigacijskim tehnikama koje koriste bazne stanice na poznatim lokacijama kako bi korigirale dio grešaka. Jedna od tih tehnika je satelitska navigacija s kinematikom u realnom vremenu *(engl. real-time kinematic-RTK)* koja se bazira na *carrier-phase* pozicioniranju tj. pozicioniranje pomoću faze vala nosioca. Pozicioniranje pomoću faze vala nosioca korisno je u mnogim primjenama poput ručnih ili unaprijed programiranih preciznih letova dronom, upravljanja *roverom* na zemlji itd. *Rover* je stacionarna ili pokretna stanica s GNSS uređajem kojom korisnik može upravljati i kojoj bazna stanica šalje korekcije. Međutim, tehnike pozicioniranja pomoću faze vala nosioca satelitske navigacije su puno osjetljivije na interferencije, signalne smetnje i geometrijsku poziciju satelita nego bazično pozicioniranje. Stoga će se ovom radu izmjeriti i analizirati preciznost satelitske navigacije s RTK tehnikom korekcije pozicije u različitim realnim uvjetima.

Rad je podijeljen na 8 cjelina:

1. Uvod
2. GNSS
3. Opis principa rada RTK GNSS prijamnika
4. Opis opreme za mjerenje
5. Izrada scenarija za mjerenje performansi
6. Umjeravanje, mjerenje točnosti pozicije i dostupnosti signala
7. Obrada i analiza podataka
8. Zaključak

U drugome poglavlju su generalno opisani i objašnjeni GNSS-i i dva specifična sustava koja će se koristit u ovom radu. U trećem poglavlju opisan je princip rada RTK GNSS prijamnika. U četvrtom poglavlju opisana je oprema korištena pri mjerenju za ovaj rad. U petom poglavlju prikazani su scenariji u kojima će se raditi mjerenja. U šestom poglavlju objašnjeno je i analizirano umjeravanje te je objašnjena metodologija mjerenja i svi elementi dostupnosti signala. U sedmom poglavlju obrađeni su i analizirani svi podaci te je prije toga opisano na koji način su obrađeni i analizirani.

2. GNSS

GNSS kolektivni je pojam za navigacijske sustave koji pružaju korisniku trodimenzionalnu lokaciju pomoću pasivnog mjerenja udaljenosti koristeći radio signale prenošene od orbitirajućih satelita. GNSS-i nude osnovnu radijalnu točnost pozicioniranja od 1,0 do 3,9 m u horizontalnoj i 1,6-6,3 m u vertikalnoj ravnini ovisno o usluzi, dizajnu prijamnika i geometriji signala [1].

Postoje četiri globalna navigacijska satelitska sustava:

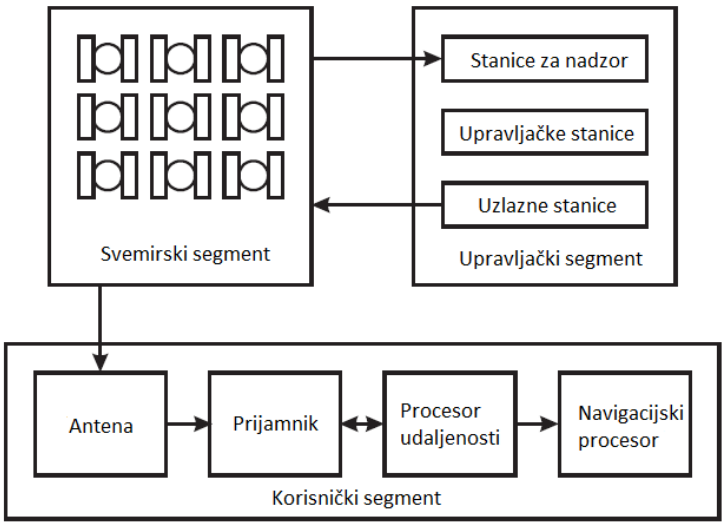
1. NAVSTAR GPS
2. GLONASS
3. Galileo
4. BeiDou/Compass

Prije opisivanja svojstva pojedinih navigacijskih sustava i servisa potrebno je prikazati i opisati tri elementa GNSS-a: arhitektura GNSS-a i funkcije njezinih segmenata, određivanje pozicije i brzine korisnika mjerenjem udaljenosti satelita te strukture GNSS signala [1].

2.1. GNSS arhitektura

Kao što možemo vidjeti na slici 1. arhitektura GNSS-a sačinjena je od tri segmenta:

1. Svemirski segment
2. Upravljački segment
3. Korisnički segment



Slika 1. Arhitektura GNSS-a, [1]

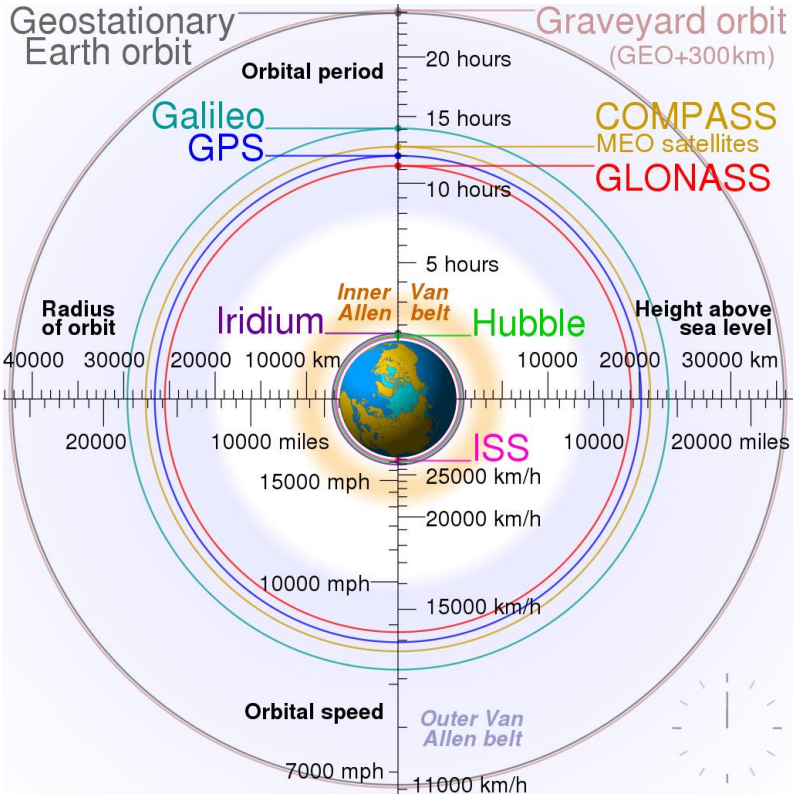
2.1.1. Svemirski segment

Svemirski segment sačinjen je od satelita, kolektivno nazvanih konstelacije, koji emitiraju signale kontrolnom segmentu i korisnicima. GPS, GLONASS i Galileo sateliti su

distribuirani između broja srednjih Zemljinih orbita *(engl. medium Earth orbit-MEO)* nakošeni ugrubo 60° u odnosu na ekvator. Kruže po tim orbitama i naprave dvije orbite dnevno [1].

Signali emitirani od satelita sačinjeni su od pseudoslučajnog koda *(engl. pseudo random noise-PRN)*, kojim se određuje vrijeme putovanja signala od satelita do prijamnika i time njihova međusobna udaljenost, i navigacijske poruke s informacijama o putanji i vremenu satelita [2]. Niz atomskih satova na svakom satelitu održavaju preciznu vremensku referencu [1].

Na slici 2. prikazane su udaljenosti orbita satelita svih navedenih GNSS-a.



Slika 2. Udaljenosti orbita satelita GNSS-a, [3]

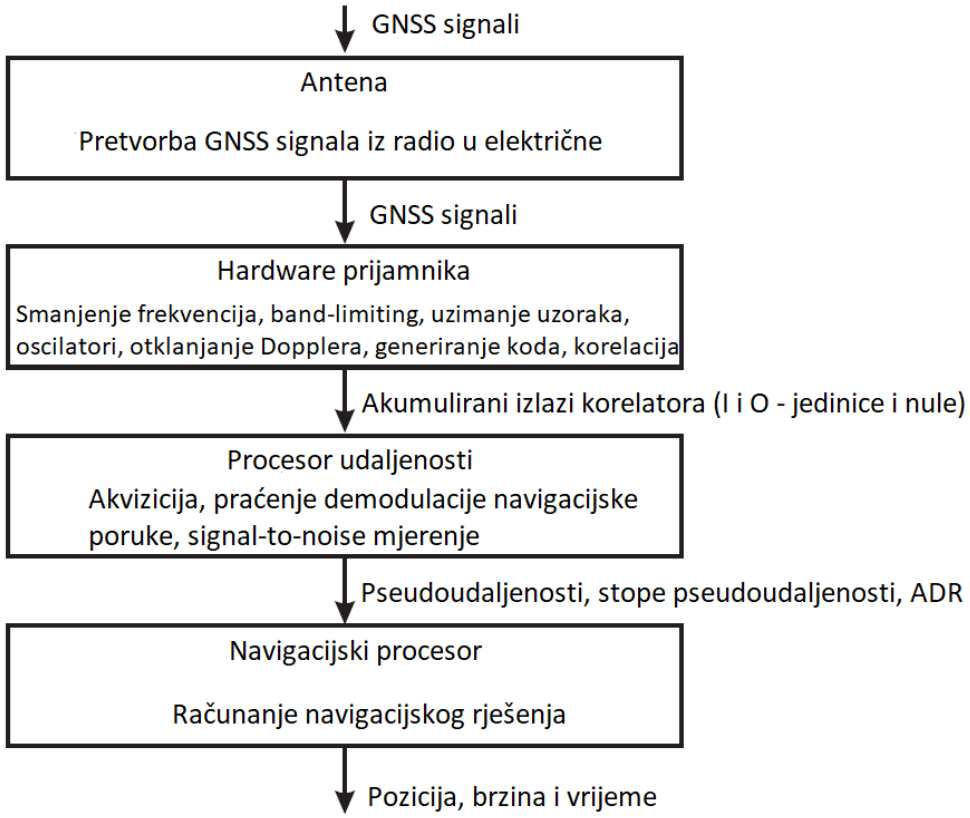
2.1.2. Upravljački segment

Upravljačke stanice izračunavaju podatke navigacijske poruke za svaki satelit i utvrđuju moraju li se obavljati bilo kakvi manevri. Ti podaci se tada prenose na svemirski segment pomoću uzlaznih stanica. Većina satelitskih manevara su male rijetke ispravke, poznate kao održavanje pozicije, koje se koriste za održavanje satelita u njihovoj pravilnoj orbiti. Međutim, kada su sateliti u kvaru, obavljaju se veći premještaji satelita tako da se neradeći satelit pomiče u drugu orbitu a novi funkcionalni satelit zauzima njegovo mjesto. GPS, GLONASS i Galileo svi imaju svoj nezavisne kontrolne segmente [1].

2.1.3. Korisnički segment

GNSS korisnička oprema se obično naziva GPS, GLONASS, Galileo ili GNSS prijamnik no kako se može vidjeti na slici 3. prijamnik je samo dio cjelokupne korisničke opreme.

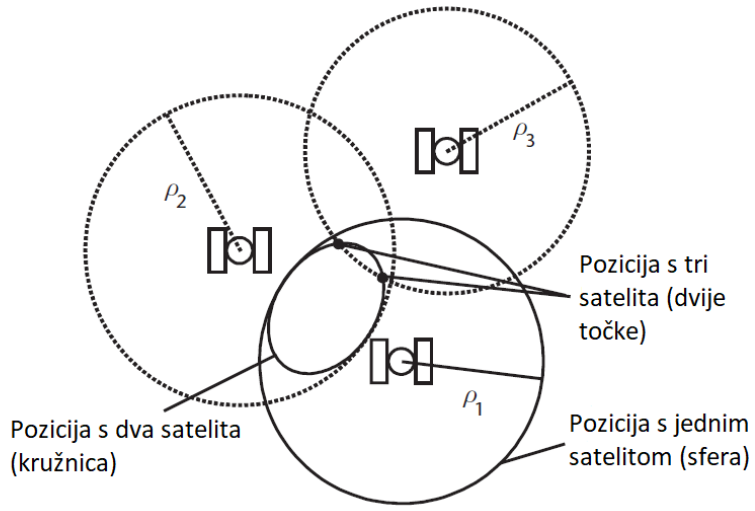
Korisnički segment funkcionira na sljedeći način: antena pretvara dolazeće GNSS radio signale u električne signale. Oni odlaze do prijamnika koji demodulira signale koristeći sat pomoću kojeg dobiva referencu vremena. Zatim procesor udaljenosti koristi instalirane algoritme za određivanje udaljenosti od svih satelita koji se koriste u datom trenutku. Također kontrolira prijamnik i dekriptira navigacijske poruke. Napokon, navigacijski procesor koristi mjerenja udaljenosti kako bi izračunao poziciju, brzinu i vrijeme.



Slika 3. Funkcionalni dijagram GNSS korisničke opreme, [1]

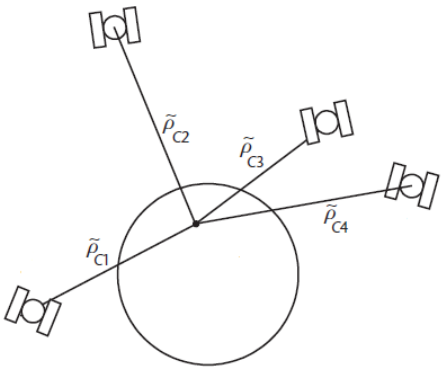
2.2. Pozicioniranje

GNSS pozicijsko rješenje je određeno pasivnim mjerenjem udaljenosti u tri dimenzije. Vrijeme dolaska signala od satelita do prijamnika je određeno oduzimanjem vremena primitka signala prijamnika vremenom emitiranja signala iz satelita koje je zabilježeno u PRN-u i podatkovnoj poruci. Množenjem tog vremena s brzinom svjetlosti dobiva se udaljenost između pojedinog satelita i prijamnika. S jednim satelitom pozicija prijamnika može biti bilo gdje na sferi tog satelita. Nadalje, s dva satelita pozicija prijamnika može biti bilo gdje na kružnici gdje se sfere tih dvaju satelita presijecaju. Napokon, s tri satelita se dobivaju dvije moguće pozicije prijamnika gdje se sve tri sfere presijecaju te se ona kriva jednostavno se eliminira jer je vrlo udaljena unutar Zemlje ili jako visoko u njezinoj atmosferi [1]. Opisano može se vidjeti na slici 4.



Slika 4. Pozicija prijamnika s jednim, dva i tri satelita, [1]

Opisani slučaj vrijedi kada su oba sata savršeno kalibrirana i ujednačena te nema nikakvih grešaka. Takav slučaj nije moguć u realnim uvjetima. Greške satelitskih satova su mjerene od strane kontrolnog segmenta i prenesene na navigacijsku poruku tako da su njihove greške uzete u obzir, ali satovi prijamnika su kvarcni i nisu dovoljno precizni. Njihova greška nije poznata i emitirani radiovalovi sa satelita ne putuju brzinom svjetlosti jer ne prolaze kroz vakuum nego kroz atmosferu i podložni su brojnim smetnjama na putu. Zbog toga prijamnik u realnim uvjetima ne mjeri točnu udaljenost već pseudoudaljenost. Zaključno prijamnik u realnim uvjetima mora primati radiovalove od četiri satelita kako bi navigacijsko računalo izračunalo četiri jednadžbe s četiri nepoznanice (tri su prostorne koordinate, četvrta je greška sata prijamnika koja je ista za sva mjerenja) i time dobilo poziciju, [1], [2].



Slika 5. Određivanje pozicije prijamnika u realnim uvjetima s četiri satelita, [1]

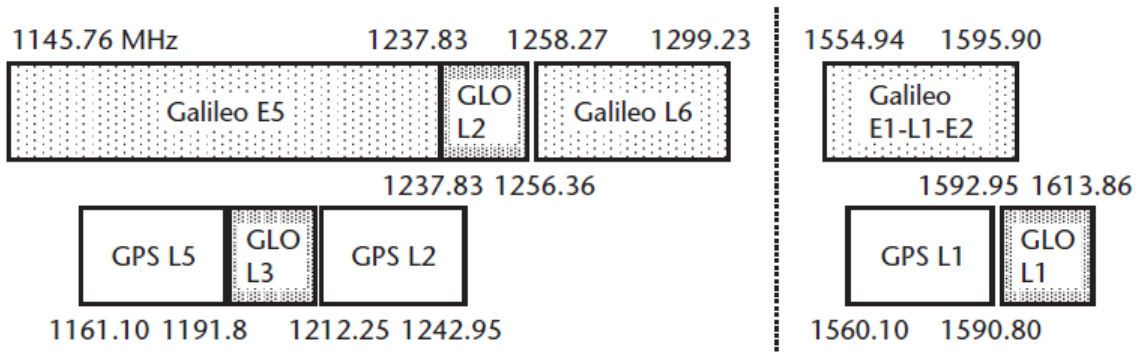
Izvori grešaka pri određivanju pozicije su: razlike između stvarnih i emitiranih efemerida, pogreške satelitskog sata, kašnjenja uzrokovana prolaskom kroz ionosferu i troposferu, šum u prijamniku, prijam reflektiranog vala te pogreške zbog prostornog rasporeda satelita [2].

Preciznost pozicije se može poboljšati korištenjem kalibriranih informacija od jednih ili više referentnih stanica na poznatim lokacijama. Referentne stanice se također mogu koristiti za detekciju grešaka u GNSS signalima [1].

2.3. Strukture GNSS signala

GNSS signali emitiraju se u ultra kratkom frekvencijskom području frekvencija 1-2 GHz. GNSS koristi više signala na različitim frekvencijama zbog: pružanja usluge različitim grupama, smanjenja interferencije na istim frekvencijama, omogućavanja mjerenja kašnjenja signala prolaskom kroz ionosferu i kako bi se poboljšalo pozicioniranje pomoću faze vala nosioca. Većina GNSS signala se sastoji od signala nositelja na koji je modulirana navigacijska poruka, D, i kod širenja tj. kod udaljenosti, C, pri čemu se koristi digitalna dvofazna modulacija pomaka faze *(engl. bi-phase shift key-BPSK)* [1].

Najosnovniji uvjet za korištenje više GNSS-a istovremeno, čime možemo povećati preciznost pozicije, je kompatibilnost frekvencija tj. svi sustavi moraju operirati bez međusobne interferencije. Slika 6. pokazuje frekvencijske pojaseve svakog sustava. GPS i GLONASS koriste potpuno različite pojaseve tako da je mala mogućnost interferencije između satelita. GPS i Galileo dijele dva frekvencijska pojasa, L5/E5a i L1 [1]. U ovom radu bit će korišteni GPS i GLONASS sustavi koji će biti opisani u sljedećem poglavlju 2.4. i 2.5.



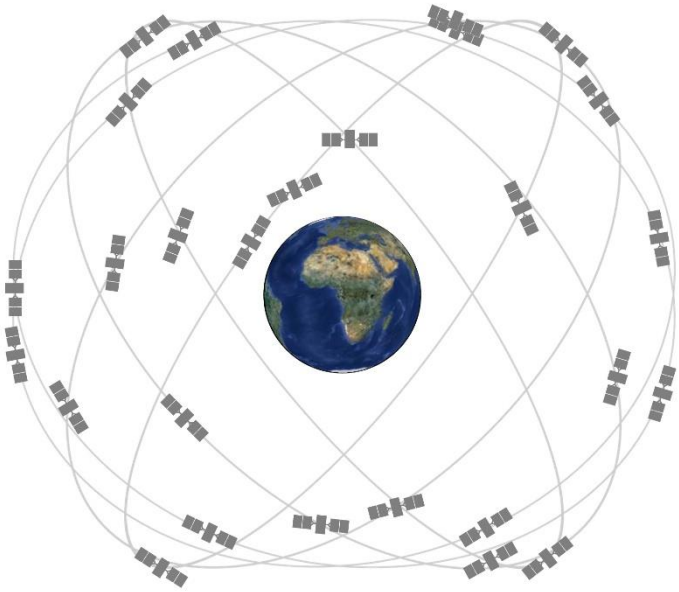
Slika 6. GPS, GLONASS i Galileo frekvencijski pojasevi, [1]

2.4. NAVSTAR GPS

Globalni položajni sustav *(engl. Navigation Satellite Timing & Ranging Global Positioning System-NAVSTAR GPS)* ili samo GPS je GNSS razvijen od vlade Sjedinjenih Američkih Država kao vojni navigacijski sustav. Njegovo upravljačko tijelo je GPS Wing [1].

GPS nudi dvije navigacijske usluge: standardna pozicijska usluga *(engl. standard positioning service-SPS)* neformalno poznata kao civilna usluga i precizna pozicijska usluga *(engl. precise positioning service-PPS)* ili vojna usluga. 2000. godine ukinuta je namjerna greška na signalu civilne usluge poznata kao *selective availability*.

GPS sateliti orbitiraju po MEO na visini od otprilike 20220 km. Svaki satelit obiđe Zemlju dva puta u danu. Sateliti u GPS konstelaciji su raspoređeni u šest jednako razmaknutih orbitalnih ravnina koje okružuju Zemlju. Svaka ravnina sadrži četiri „slota“ koji su zauzeti osnovnim satelitima. Ovaj 24-slotni raspored osigurava da korisnik u svakom trenutku može vidjeti barem četiri satelita iz svake točke na planeti [4]. Orbite GPS satelita prikazane su na slici 7.



Slika 7. Orbite GPS satelita, [4]

GPS djeluje s normalnom konstelacijom od 24 i maksimumom od 36 satelita. Novi sateliti se ne drže u stanju čekanja dok se stari satelit ne pokvari već svi operativni sateliti pružaju potpunu uslugu. Bilo je niz generacija GPS satelita, sa mnogim generacijama planiranim u budućnosti [1]. Generacije GPS satelita prikazane su u tablici 2.4.1.

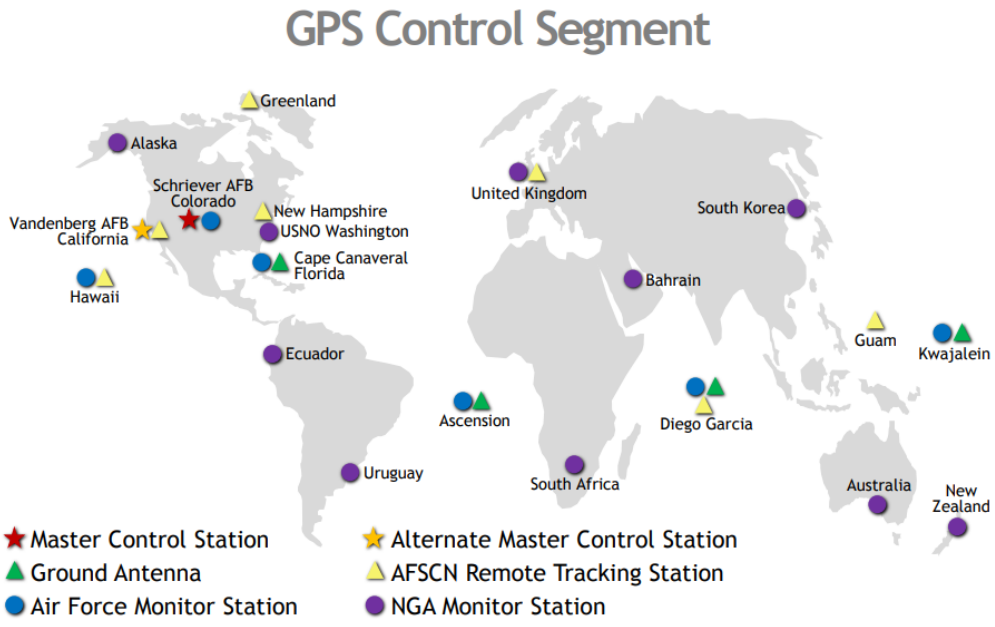
Tablica 1. Generacije GPS satelita

Generacija	Razdoblje pokretanja	Životni vijek	Signali	Broj satelita	Broj operativnih
Block I	1978-1985	-	-	10	0
Block II	1989-1990	-	-	9	0
Block IIA	1990-1997	7.5 god	1 civilni i 1 vojni	19	0
Block IIR	1997-2004	7.5 god	1 civilni i 2 vojna	12	10
Block IIR-M	2005-2009	7.5 god	2 civilna	8	7
Block IIF	2010-2016	12 god	3 civilna	12-16	12
GPS III/IIIF	2018+	15 god	4 civilna	24 (planirano)	2

Izvor: [4]

GPS kontrolni segment sastoji se od globalne mreže zemaljskih postrojenja koja prate GPS satelite, nadgledaju njihove prijenose, obavljaju analizu i šalju naredbe i podatke konstelacijama.

Trenutni operativni upravljački segment *(engl. Operational Control Segment-OCS)* uključuje glavnu upravljačku stanicu u Coloradu Springsu (SAD), zamjensku glavnu upravljačku stanicu, 11 zapovjednih i upravljačkih antena i 16 nadzornih mjesta [4]. Lokacije tih objekata prikazane su na slici 8.

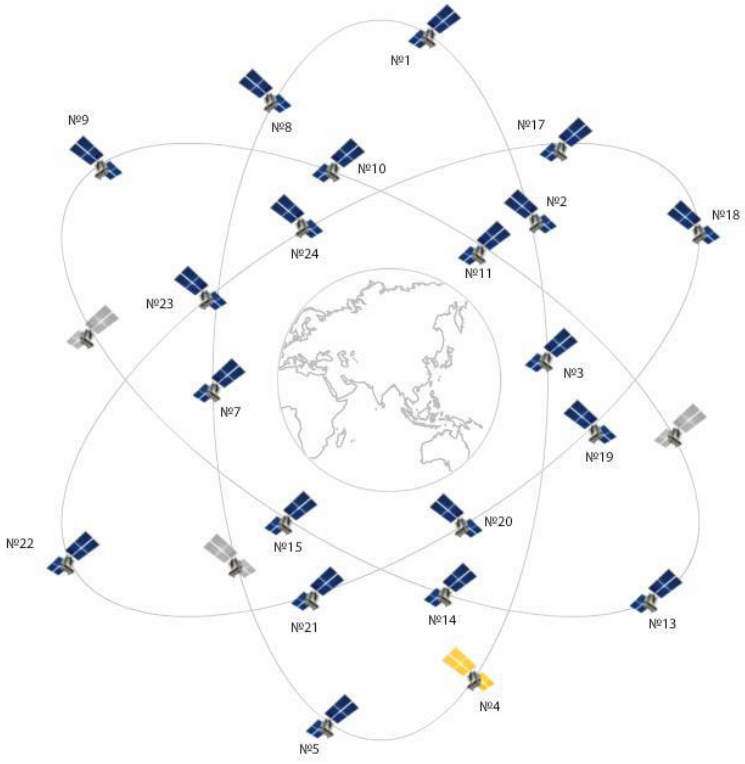


Slika 8. GPS Upravljački segment, [4]

2.5. GLONASS

Globalni navigacijski satelitski sustav *(rus. Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema-GLONASS)* je razvijan kao vojni navigacijski sustav od sredine 1970-ih paralelno s GPS-om. Kao i GPS, dizajniran je tako da nudi i civilnu i vojnu uslugu pozicioniranja. Prvi satelit lansiran je 1982. Nakon raspuštanja Sovjetskog saveza razvoj je nastavila Rusija s punom satelitskom konstelacijom ostvarenom 1995. Međutim, zbog financijskih problema i relativno kratkog životnog vijeka satelita konstelacija je ostavljena da propada dosegnuvši najmanju brojku od sedam satelita 2001. Tada je pokrenut program modernizacije, obnove konstelacije. uvođenja novih signala i nadogradnje kontrolnih segmenata. Planirano je 18 satelita do kraja 2007. i punom konstelacijom do 2009 [1].

Puna konstelacija GLONASS-a sastoji se od 24 satelita od kojih su 3 aktivne rezerve. Konstelacija je raspoređena na 3 orbite s 8 satelita u svakoj. Orbite su prikazane na slici 9. Orbitiraju na visini od 19100 km s periodom od 11 h 15 min i 44 s [5].



Slika 9. Orbite GLONASS satelita, [6]

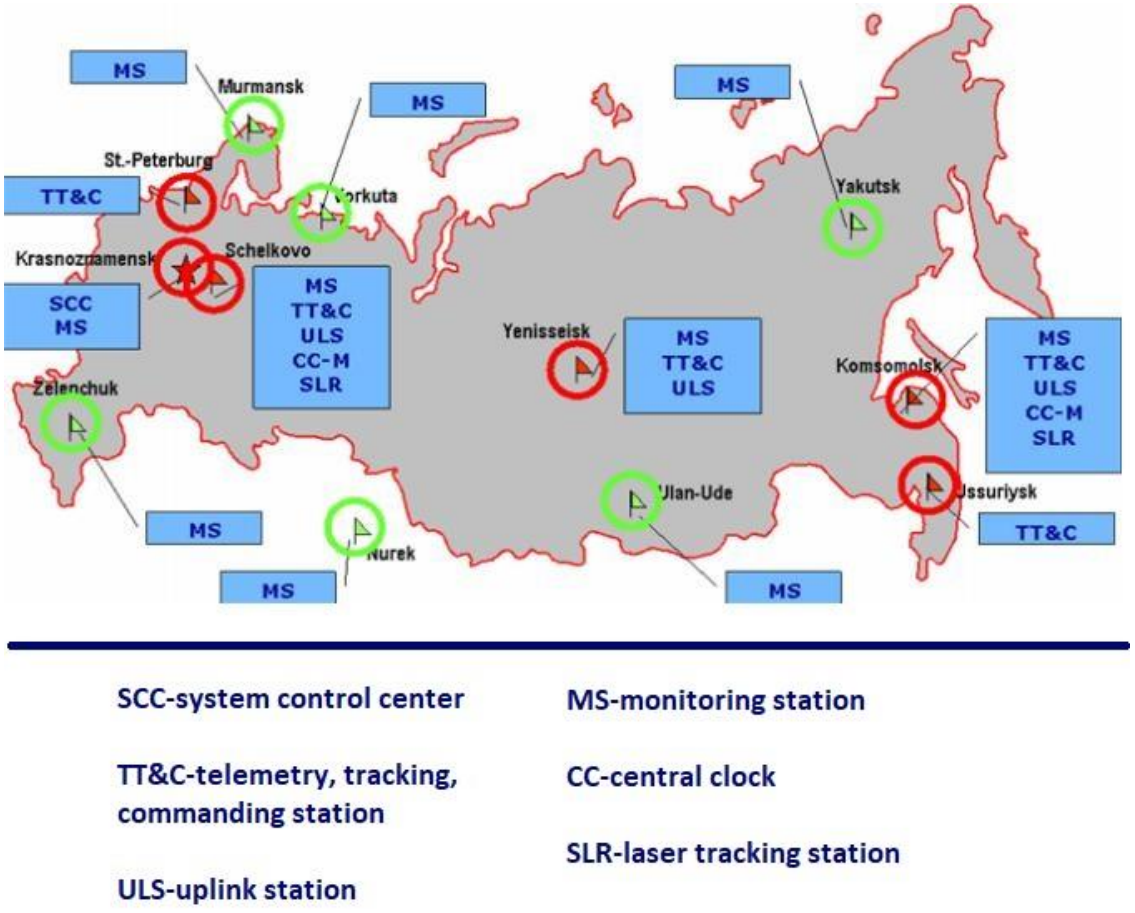
Postoje četiri generacije GLONASS satelita koje su prikazane u tablici 2.5.1.

Tablica 2. Generacije GLONASS satelita

Generacija	Razdoblje pokretanja	Životni vijek	Signali
GLONASS	1982-2005	3.5 god	1 civilni i 2 vojna
GLONASS-M	2003-2016	7 god	3 civilna i 2 vojna
GLONASS-K	2011-2018	10 god	4 civilna i 3 vojna
GLONASS-K2	2017+	10 god	5 civilnih i 4 vojna

Izvor: [5]

GLONASS upravljački segment je većinski ograničen na Ruski teritorij. Sastoji se od glavne upravljačke stanice u Krasnoznamensku, pet stanica za telemetriju, praćenje i upravljanje *(engl. telemetry, tracking and control-TT&C)*, centralnog sata *(engl. Central Clock-CC)* blizu Moskve, tri stanice za slanje podataka konstelaciji *(engl. uplink station-ULS)*, dvije laserske stanice za mjerenje udaljenosti *(engl. Laser Ranging Stations-SLR)*, mreže stanica za praćenje i mjerenje *(engl. Monitoring station-MS)* i niza planiranih stanica u budućnosti [7]. GLONASS upravljački segment je prikazan na slici 10.



Slika 10. GLONASS upravljački segment, [7]

3. OPIS PRINCIPA RADA RTK GNSS PRIJAMNIKA

Bazično GNSS pozicioniranje daje preciznost od nekoliko metara, no u nekim slučajevima potrebna nam je veća preciznost. Mnoga bespilotna vozila oslanjaju se na precizno GNSS pozicioniranje kako bi vršila vođenje po željenom putu. Vozilo može precizno pratiti željeni put unutar nekoliko centimetara. Bitna je ponovljivost tog puta i satelitska navigacija s RTK tehnologijom korekcije to može omogućiti. Uz navedenu RTK tehnologija ima i druge primjene poput visokopreciznog utvrđivanja pozicije, navigacije kroz nepoznata područja i dr.

RTK je visokoprecizna tehnika pozicioniranja koja koristi faze vala nosioca i mjerenja pseudoudaljenosti u stvarnom vremenu [8].

Oprema za RTK satelitsku navigaciju sastoji se od dva glavna dijela: *rover* stanice i bazne stanice. *Rover* stanica je bazični GNSS prijamnik na upravljanom vozilu ili korisniku u rukama koji dobiva informacije korekcije pozicije od bazne stanice. Bazna stanica je stacionarni GNSS prijamnik na točno poznatoj poziciji no kojoj je prije korištenja potrebno napraviti umjeravanje. Također na baznoj stanici su potrebni antena, računalo i odgovarajući *software* za umjeravanje, bilježenje podataka pozicije i obrade korekcija koje se šalju *roveru*. Što se duže bazna stanica ostavi na umjeravanju pozicije to preciznije može odrediti svoju poziciju i ispravljati poziciju *rover* stanice. To umjeravanje, ovisno o kvaliteti antene, može trajati i par sati za preciznost od nekoliko centimetara. Kada se zaustavi umjeravanje bazne stanice i ona odredi svoju poziciju željenom preciznošću, može se početi koristiti RTK navigacija.

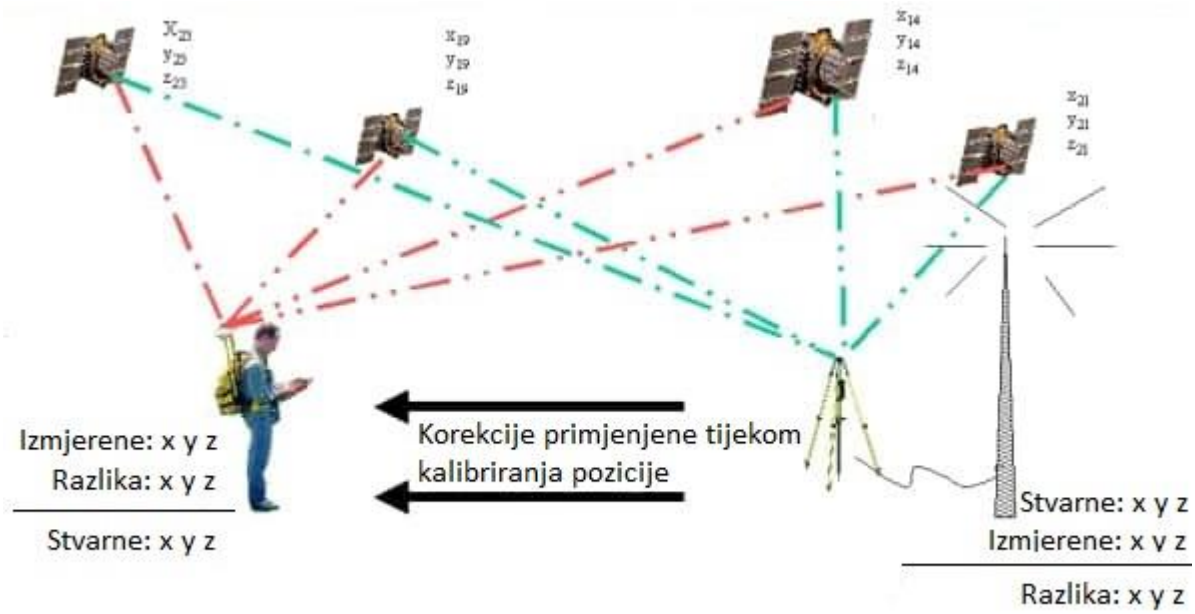
RTK za pozicijske informacije koristi mjerenje udaljenosti bazirano na valu nosiocu koje mogu pružiti daljinske vrijednosti više puta preciznije od pozicioniranja temeljenog na kodu tj. bazičnog pozicioniranja. Udaljenost se računa određivanjem broja prijenosnih valova između prijemnika i satelita i onda njihovim množenjem s valnom duljinom istoga. Svi sateliti ne prenose informacije na istoj frekvenciji; ako se koristi više frekvencija za određivanje pozicije, greška atmosferskog kašnjenja i greška primitka reflektiranog signala su minimizirane [9].

Bazna stanica prenosi svoje neobrađene podatke, odgovarajuće formatirane, putem kanala za prijenos podataka. Ti kanali mogu biti: Ultra visoka frekvencija *(engl. Ultra high frequency-UHF)*, celularni Globalni Sustav za Mobilne Komunikacije *(engl. Global System for Mobile Communications-GSM)*, dugoročna evolucija *(engl. Long Term Evolution-LTE)*, WiFi ili internetski kanali. U ovom radu bit će korišten UHF. Podaci se obično prenose u jednom smjeru, od baze do *rovera*. Jedan ili više rovera može slušati određene bazne stanice i diferencirati njihova neobrađena mjerenja s neobrađenim mjerenjima od bazne stanice kako bi ispravio poziciju [8].

Nekoliko je formata koji se koriste za prijenos podataka punih neobrađenih mjerenja ili diferencijalnih korekcija. Svi formati kompaktno prenose informacije koje su potrebne za smanjivanje GNSS grešaka. Greške koje ne ovise o poziciji stanice i greške koje su gotovo neovisne o lokaciji imaju tendenciju malo varirati s pozicijom i imaju gotovo jednake učinke na mjerenja obaju stanica. One uključuju: greške satelitskog sata, greške satelitskih efemerida i atmosferska kašnjenja. *Rover*, imajući na raspolaganju vlastita mjerenja i mjerenja bazne stanice, može oblikovati razlike između prijamnika za visokoprecizno izračunavanje pozicije u

odnosu na bazu. *Rover* istovremeno izračunava razlike između baznog i *rover* prijamnika za sve satelite. Diferenciranje između prijamnika je izvedeno na ujednačen način za sve GNSS sustave kao što su GPS, GLONASS, Galileo, Beidou itd. [8].

Na slici 11 prikazani su elementi RTK navigacije i princip rada.



Slika 11. RTK navigacija, [10]

4. OPIS OPREME ZA MJERENJE

Za mjerenja u ovom radu korištena je oprema namijenjena za letenje bespilotnim letjelicama no može se koristit i u druge svrhe. Oprema je sljedeća: Here+ RTK GNSS, Pixhawk autopilot, telemetrijski moduli, kompjuter, dron i software Mission planner. Ona je podijeljena u tri kategorije: *hardware*, *firmware* i *software*. *Hardware* su svi fizički dijelovi opreme: Here+ RTK GNSS, Pixhawk autopilot, telemetrijski moduli, kompjuter i dron. *Firmware* je kod u autopilotu. *Software* je sučelje na kojem sve vidimo i upravljamo radnjama. Još se zove zemaljska upravljačka stanica *(engl. Ground Control Station-GCS)*. On se može izvoditi na računalu i mobitelu. U ovom radu korišteno je računalo. U software spada Mission planner.

4.1. Here+ RTK GNSS

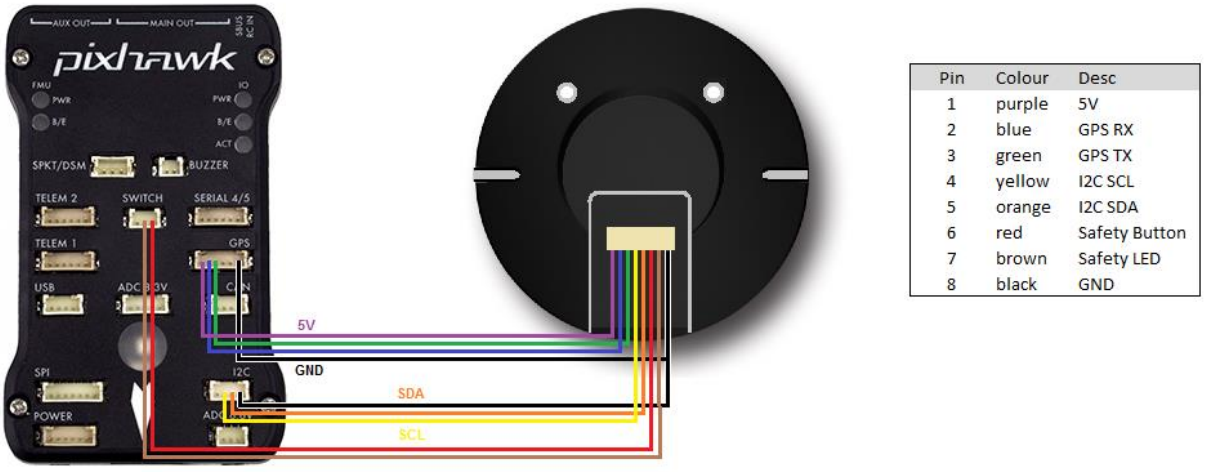
Here+ RTK GNSS je *open source* paket opreme za RTK satelitsku navigaiciju dizajniran i razvijen od Proficnca, Ardupilota i Hex Technologya. Sačinjen je od GNSS-a vozila tj. *rovera*, GNSS-a bazne stanice, vanjske antene GNSS-a bazne stanice i pripadajućih kabela. Here+ RTK GNSS je paket opreme za RTK tehniku satelitske navigacije koja nudi preciznost pozicioniranja u centimetrima za masovno tržište. Namijenjen je za rad s Pixhawk autopilotom i drugim *open source* autopilotima. Vrlo je kompaktan i svestran. Here+ paket je prikazan na slici 12. Strelica na GNSS-u *rovera* pokazuje smjer kretanja *rovera* a ispod nje je okrugli gumb za paljenje i na bočnim krajevima su dva svijetla koja se upale kada se GNSS upali i svijetle prikladno radnji. GNSS bazne stanice je spojen sa svojom vanjskom antenom i ima svjetla koja prikazuju trenutni status GNSS-a. Vanjska antena GNSS-a bazne stanice je spojena dugom žicom s GNSS-om bazne stanice i potrebno ju je staviti na stabilnu, visoku poziciju koja ima što manje prepreka između sebe i satelita iznad obzora.



Slika 12. Here+ RTK GNSS, [11]

4.2. Pixhawk autopilot

Pixhawk autopilot je *open source* popularni kontroler leta opće namjene. Dizajniran je i razvijen od Proficnca, Ardupilota i Hex Technologya. Namijenjen je za masovno tržište i letenje bespilotnim letjelicama. Na slici 13 prikazano je kako se spaja Here+ RTK GNSS s Pixhawk autopilotom.



Pin	Colour	Desc
1	purple	5V
2	blue	GPS RX
3	green	GPS TX
4	yellow	I2C SCL
5	orange	I2C SDA
6	red	Safety Button
7	brown	Safety LED
8	black	GND

Slika 13. Spajanje Here+ RTK GNSS-a s Pixhawk autopilotom, [11]

4.3. Mission planner

Mission planner je potpuno opremljeni GCS koji podržava ArduPilot tj. on je sučelje kojim će se namjestiti željena preciznost umjeravanja, upravljati svom opremom, mjeriti i zabilježiti svi podaci za obradu i analizu u 7. poglavlju. Nudi *point-and-click* interakciju s hardwareom, prilagođeno skriptiranje i simulaciju. Kreiran je od Micheala Obornea i nudi puno više opcija od onoga što mu samo ime kaže. Te opcije su [12]:

- *Point-and-click* putne točke/*fence*/*rally point entry* koristeći Google Maps/Bing/Open street maps/Custom WMS
- Odabiranje naredbi misije iz padajućih izbornika
- Preuzimanje dnevnika misije i njihovo analiziranje (ova opcija će biti korištena u ovome radu za mjerenje i analiziranje preciznosti RTK GNSS u više realnih uvjeta)
- Namještanje postavki autopilota vozila
- Sučelje sa simulatorom leta na računalu kako bi se stvorio potpun *software-in-the-loop (SITL)* simulator bespilotne letjelice *(engl. unmanned aerial vehicle-UAV)*
- Izvođenje vlastitih SITL simulacije mnogih tipova okvira za sva ArduPilot vozila

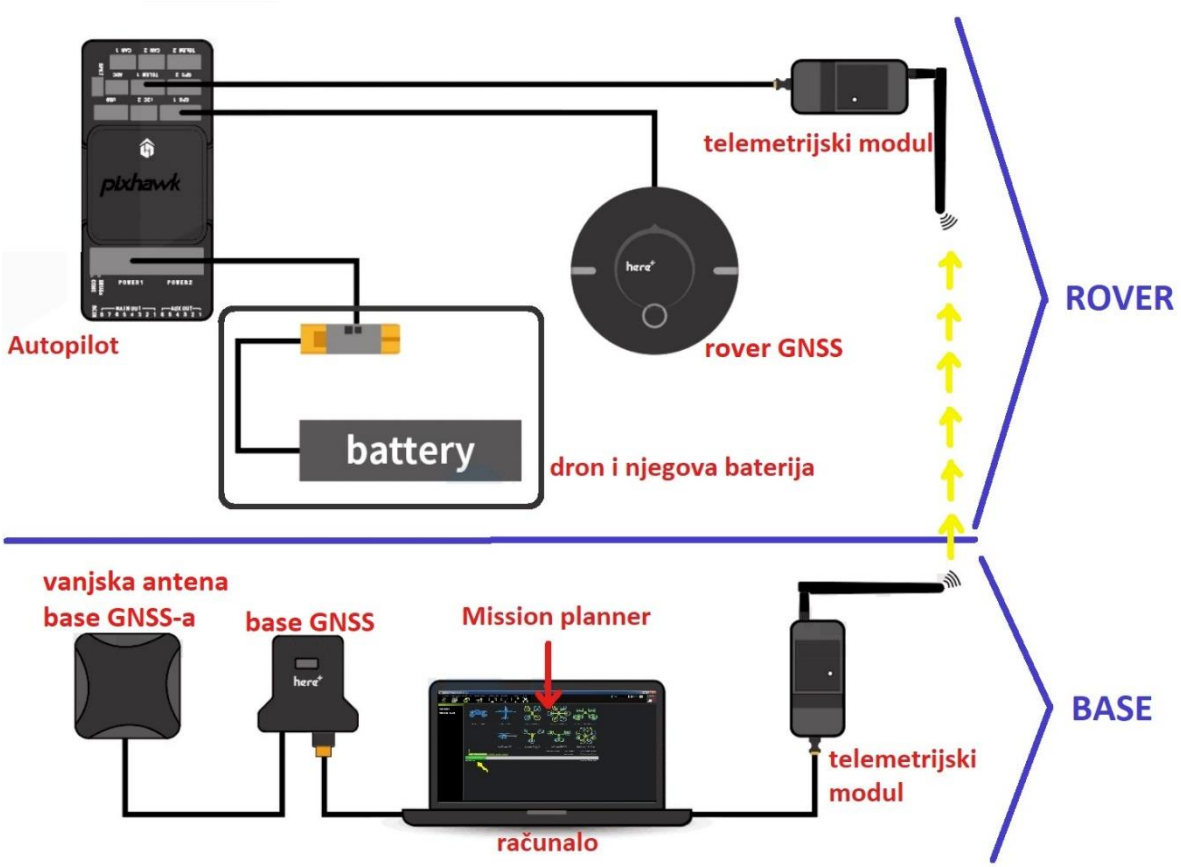
U poglavlju 6 bit će prikazano sučelje Mission plannera i njegove funkcije za potrebe ovog rada.

4.4. Ostalo

Uz navedena tri dijela opreme i *firmware* u autopilotu koji su specijalizirana oprema za RTK GNSS navigaciju korištena su računalo, dron i telemetrijski moduli. O njima se ne treba puno reći. U računalo su uključeni GNSS i njegova antena, telemetrijski modul za slanje podataka *roveru* i na njemu se upravlja opremom te mjere i bilježe podaci. Dron ne leti već je stacionaran na zemlji te služi kao izvor električne energije za autopilot i GNSS *rovera* kako bi se izvršila mjerenja. Telemetrijski moduli su jedan spojen na računalo tj. baznu stanicu, drugi na autopilot tj. *rover* stanicu te služe za slanje podataka između baze i *rovera* UHF signalima.

4.5. Spajanje sve opreme i njezina interakcija

Na slici 14 prikazano je kako se spaja sva oprema za mjerenje i njihova međusobna interakcija, a na slici 15 kako isto izgleda u stvarnosti. Bazna stanicu čini računalo na koje je na jedan priključak spojen bazni GNSS. Na bazni GNSS je spojena njegova vanjska antena. Na drugi priključak računala je spojen telemetrijski modul i na računalu je uključen Mission planner. *Rover* stanicu čini dron koji ima svoju bateriju. Na dron je spojen Pixhawk autopilot, a na njega *rover* GNSS i drugi telemetrijski modul. Interakcija je sljedeća: Bazna stanica tj. njezina antena je na poznatoj prije centimetarski određenoj poziciji. Bazna antena prima svoje neobrađene trenutne koordinate koje šalje do baznog GNSS-a i računala. Računalo obrađuje te koordinate te ih korigira s obzirom da zna svoju stvarnu lokaciju od prije precizno u nekoliko centimetara. Te korekcije zatim šalje do *rover* stanice putem signala telemetrijskih modula. Istovremeno, *rover* GNSS, koji ima integriranu antenu i spojen je na Pixhawk, prima svoje neobrađene koordinate te u stvarnom vremenu dobiva korekcije (poslane od bazne stanice) preko drugog telemetrijskog modula koji je također spojen na Pixhawk i tako zna svoju lokaciju u nekoliko centimetara. Također, Pixhawk je spojen na bateriju drona te tako on i *rover* GNSS dobivaju potrebnu električnu energiju.



Slika 14. Spajanje opreme i njezina interakcija, [13]



Slika 15. Oprema u stvarnosti, [13]

5. IZRADA SCENARIJA ZA MJERENJE PERFORMANSI

Nakon što je oprema pravilno spojena i konfigurirana, potrebno je opisati scenarije i uvjete mjerenja. Prije bilo kakvih mjerenja potrebno je staviti GNSS bazne stanice na lokaciju koja će se koristit za slanje korekcija i zapisivanje mjerenja kako bi zajedno s računalom i Mission plannerom izvršio umjeravanje svoje lokaciju do željene preciznosti. Pri mjerenjima za ovaj rad to će biti točno odabrana pozicija na parkingu Borongajskog kampusa gdje antena ima relativno čisti kontakt sa velikim brojem satelita iznad obzora. Bazna stanica će se umjeriti do preciznosti 0,5 m. Na slici 15 prikazana je lokacija umjeravanja bazne stanice koja nakon umjeravanja postaje referenta lokacija bazne stanice za slanje korekcija *roveru*. Nakon što je bazna stanica odredila svoju lokaciju željenom preciznošću, može se započeti s mjerenjima.



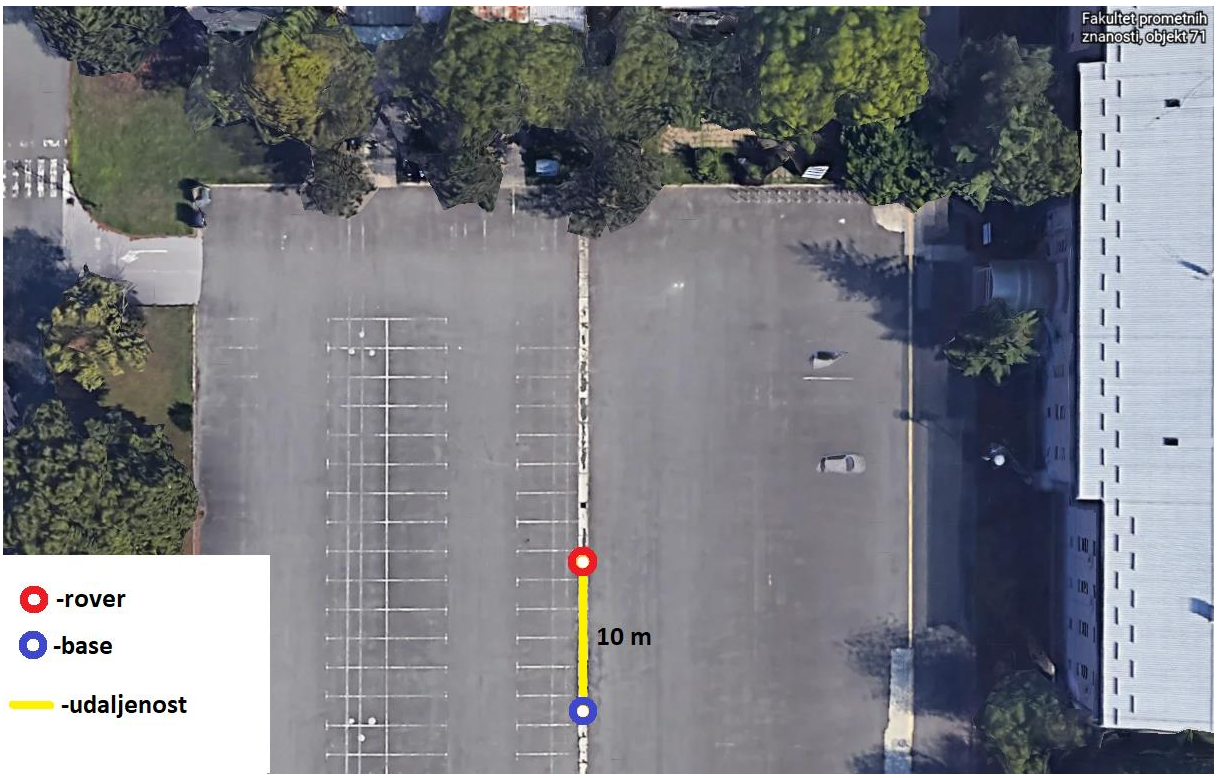
Slika 16. Lokacija umjeravanja/referentna lokacija bazne stanice

5.1. Neobrađeno GNSS mjerenje

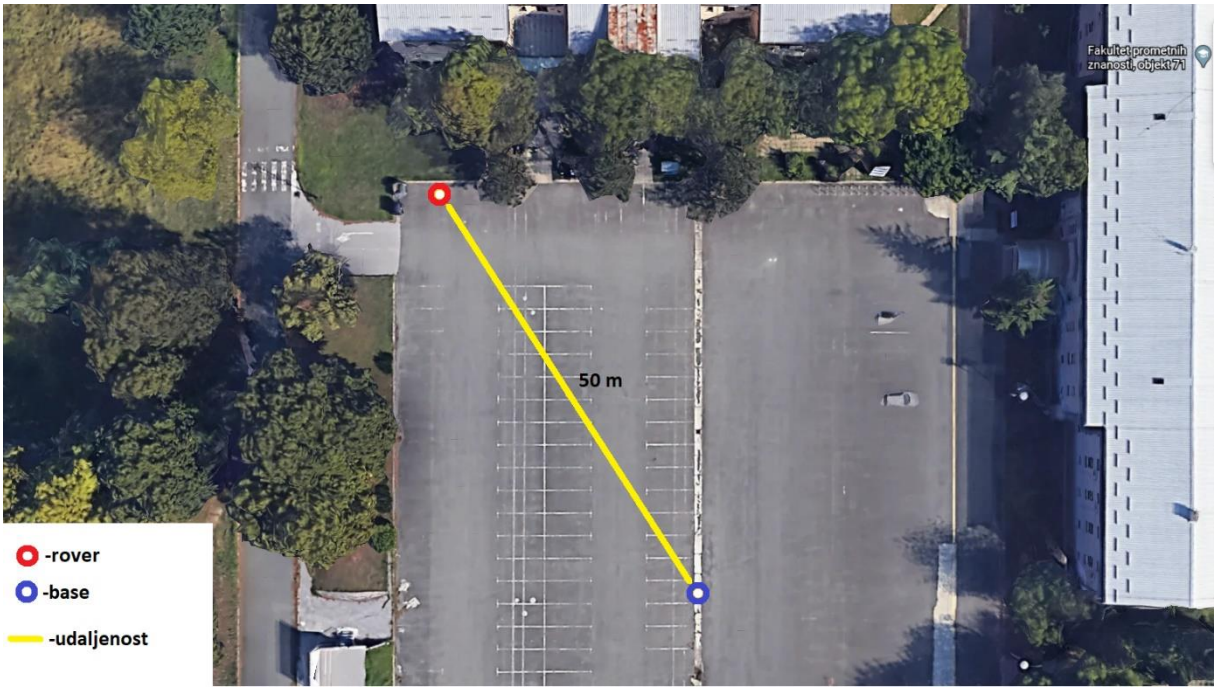
Prvo mjerenje će biti čisto neobrađeno mjerenje pozicije GNSS-a *rovera* bez korištenja RTK tehnike korekcija i trajat će 20 min. Dron s GNSS-om će biti postavljen na prije umjerenu tj. referentnu lokaciju baze tako da postoji referenca i može se analizirati točnost prikazivanja bazičnog GNSS-a koji se inače koristi bez RTK korekcija. Ovo mjerenje će biti rađeno kako bi se moglo usporediti s točnosti RTK GNSS pozicioniranja.

5.2. Mjerenje s RTK korekcijama

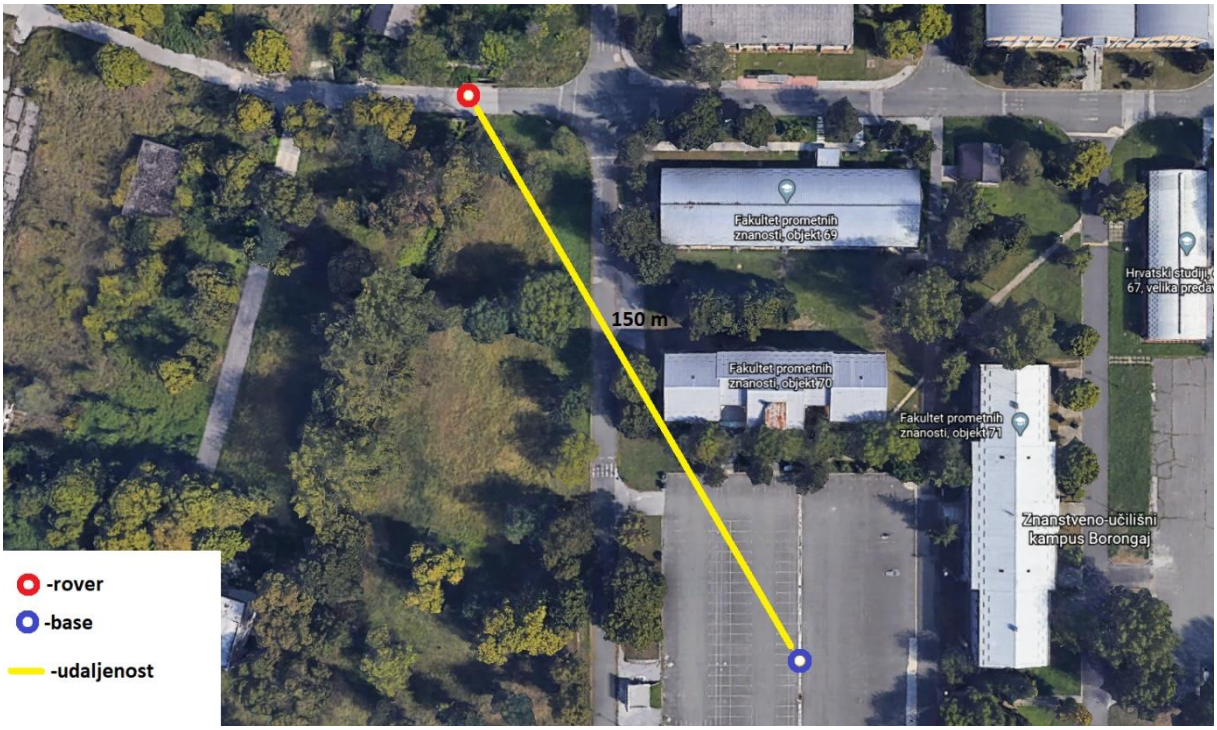
RTK mjerenje će biti mjerenje preciznosti GNSS-a *rovera* sa slanjem korekcija bazne stanice. Mjerit će se na tri različite udaljenosti stanica: 10 m, 50 m i 150 m. Tim mjerenjima će se vidjeti utjecaj udaljenosti bazne i *rover* stanice na preciznost određivanja lokacije. Mjerenja od 10 m i 50 m će biti rađena bez prepreka između baze i *rovera*, a mjerenje od 150 m će se radit s prirodnim i umjetnim objektima između njih. U mjerenju od 50 m *rover* će imat pokrivenu sjevernu stranu obzora umjetnim objektom. U mjerenju od 150 m *rover* će imat pokriven obzor s više strana prirodnim objektima. Tako će se uz utjecaj udaljenosti izmjeriti i utjecaj prepreka između bazne i *rover* stanice te utjecaj ograničenog obzora *rovera*. Na slikama 16, 17 i 18 prikazane su lokacije stanica i međusobne udaljenosti pri RTK mjerenjima.



Slika 17. Mjerenje udaljenost stanica 10 m



Slika 18. Mjerenje udaljenost stanica 50 m



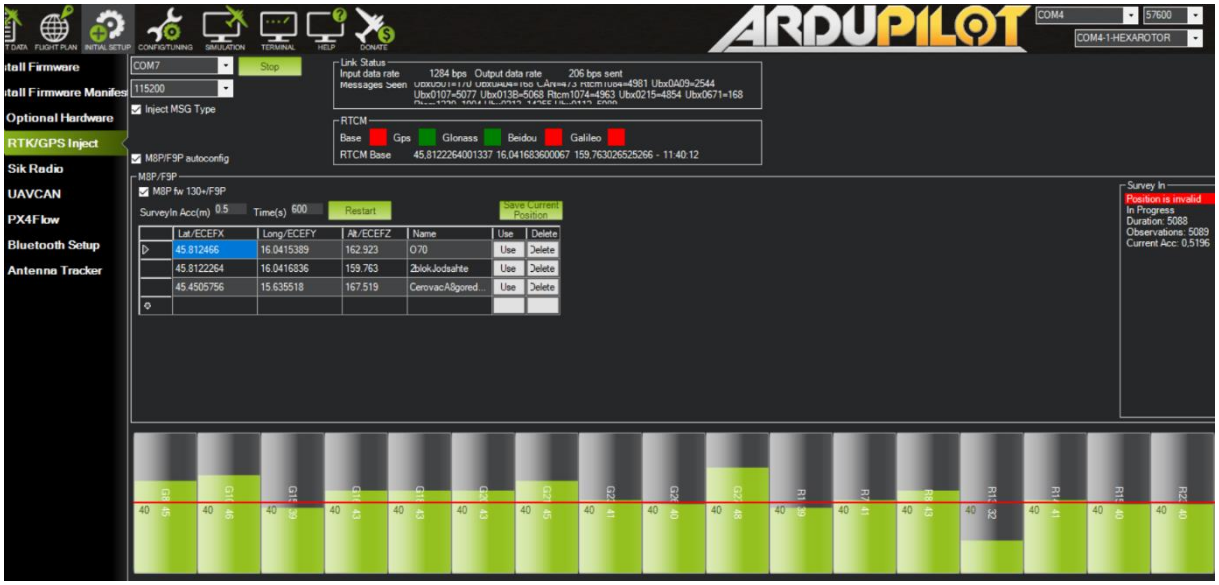
Slika 19. Mjerenje udaljenost stanica 150 m

6. UMJERAVANJE, MJERENJE TOČNOSTI POZICIJE I DOSTUPNOSTI SIGNALA

U ovom poglavlju bit će opisano, objašnjeno i analizirano umjeravanje. Zatim će biti opisana metodologija mjerenja i kako će se obrađivati dobiveni podaci u 7. poglavlju. Nadalje, bit će opisan utjecaj dostupnosti signala. Za mjerenja ovog rada koristit će se GPS i GLONASS sustavi.

6.1. Umjeravanje lokacije

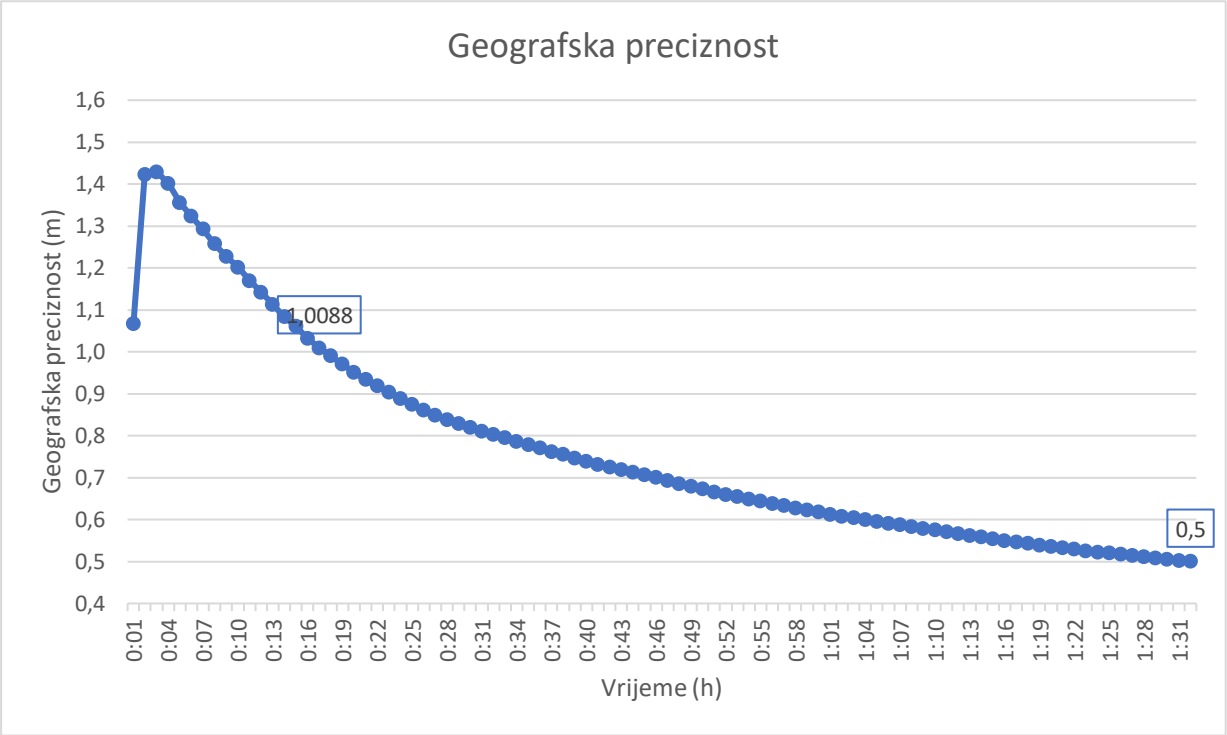
Na slici 20 je prikazano kako izgleda umjeravanje u Mission planneru. Desni kvadrat nazvan SurveyIn prikazuje status umjeravanja: In Progress: umjeravanje je još u tijeku; Duration: broj sekundi koliko traje trenutno umjeravanje; Observation: broj izvršenih obzervacija; Current Acc: Apsolutna geografska preciznost koju bazna stanica trenutno može postići. Na donjem dijelu sučelja su zeleni stupci koji prikazuju snagu signala detektiranih satelita. Snaga mora biti preko 40 da bi se mogle uzimati obzervacije tog satelita. Potrebno je minimalno 5 GPS satelita i 2 GLONASS satelita zadovoljavajuće snage signala za umjeravanje lokacije. Kvadrat na sredini sučelja prikazuje opciju umjeravanja nove referentne lokacije SurveyIn Acc(m): koliku preciznost nove lokacije korisnik želi; Time(s): koliko će inicijalno čekat za tu preciznost lokacije. Opcijom restart pokreće ispočetka umjeravanje i opcijom save current position sprema lokaciju. Ispod navedenih opcija su već spremljene referente lokacije koje je korisnik prije umjerio. Kvadrat RTCM prikazuje je li bazna lokacije uspostavljena i koji se GNSS-i koriste.



Slika 20. Umjeravanje u Mission planneru

Službeni manual kaže: *„Stanici treba određeno vrijeme da ispuni zahtjeve za točnost korisnikovog unosa. Testiranje pokazuje da je na otvorenom prostoru bez zaklona za postizanje apsolutne točnosti od 2 m potrebno nekoliko minuta. Do apsolutne točnosti manje od 30 cm treba oko sat vremena. Da bi se postigla točnost od 10 cm potrebno je nekoliko sati“* [13].

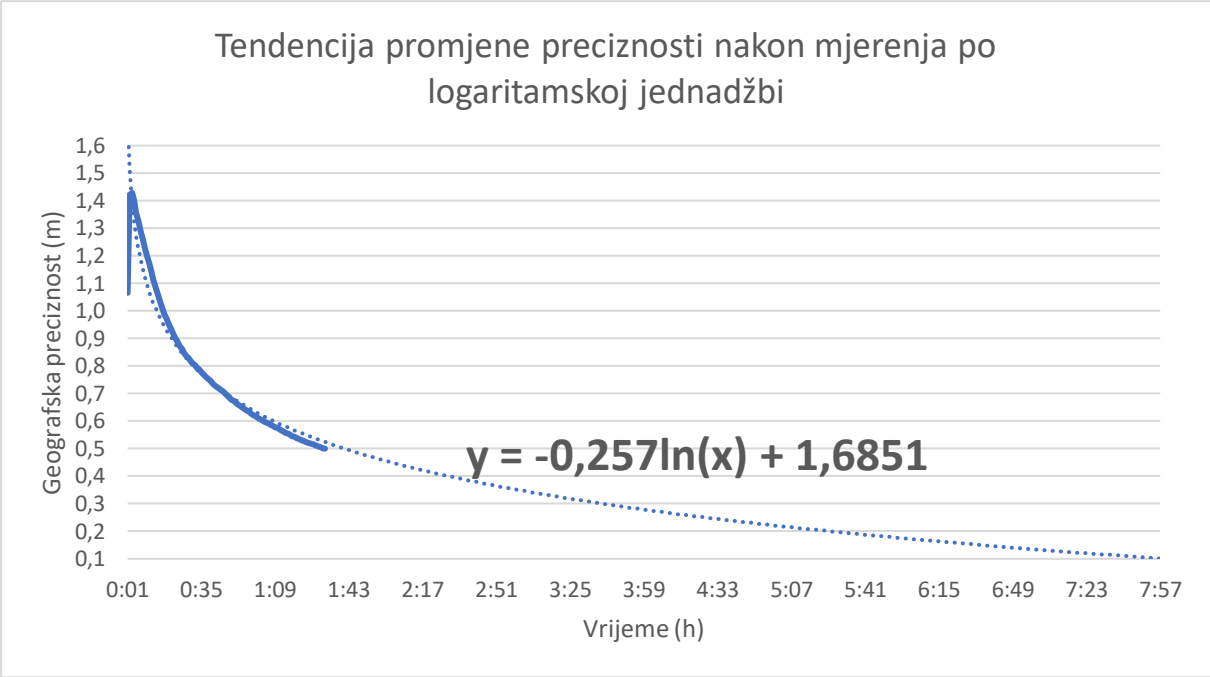
Umjeravanje za ovaj rad je rađeno na lokaciji navedenoj u prethodnom poglavlju. Stavljena je apsolutna geografska preciznost od 0.5 m. Umjeravanje je trajalo 1 h i 32 min. Svake minute je zabilježeno: do koje je preciznosti došlo umjeravanje, broj vidljivih satelita i snaga njihovih signala te broj obzervacija. Do kraja umjeravanja bilo je napravljeno 5492 obzervacija. Tijekom umjeravanja prosjek GPS satelita sa snagom signala preko 40 je bio 7,4, a prosjek GLONASS satelita sa snagom signala preko 40 je bio 4,51.



Grafikon 1. Geografska preciznost kroz vrijeme tijekom umjeravanja – trenutačne geografske preciznosti u razmacima od 1 min

Iz grafikona 1 je vidljivo kako je do preciznosti od 1 m lagano doći s umjeravanjem trajanja 17 min ali do centimetarskih preciznosti je potrebno ostavit baznu stanicu na umjeravanju satima. Inicijalno se u početku uređaj stabilizira što objašnjava podatke od prve dvije minute a nakon toga slijedi eksponencijalni pad napretka umjeravanja. Kada je umjeravanje gotovo prikaz crvene pozadine *„Position iz invalid“* postaje *„Position is valid“* sa zelenom pozadinom. Dobivena lokacija je: Lat/X: 45,8121433218754; Lng/Y: 16,0416668627192; Alt/Z: 159,52698345948 s preciznošću od 0,5 m.

Grafikon 2 pomoću matematičkog izračuna programa Excel prikazuje koliko bi trebalo umjeravanja u tim istim uvjetima kako bi došlo do preciznosti određivanja pozicije od 10 cm. Na istome je prikazana logaritamska jednadžba po kojoj je nacrtan grafikon i izračunato da bi za tu preciznost određivanja pozicije bilo potrebno 7h i 57 min umjeravanja u tim istim uvjetima.



Grafikon 2. Prikaz tendencije geografske preciznosti nakon umjeravanja do preciznosti 0,1 m

Bitno je napomenuti da će apsolutna geografska točnost bazne stanice utjecati na apsolutnu geografsku točnost *rover* stanice bez utjecaja na relativnu točnost između bazne stanice i *rovera*. Ako korisnikova aplikacija ne zahtijeva UAV s visokom apsolutnom geografskom točnošću, ne treba staviti veliku preciznost bazne stanice, što rezultira dugim vremenom umjeravanja. Čak i ako je točnost bazne stanice 1,5 do 2 m, točnost položaja *rover* stanice u odnosu na baznu stanicu i dalje može dosegnuti centimetar [13].

6.2. Metodologija mjerenja

Način na koji je se rađeno mjerenja je sljedeći: Oprema je spojena kako je opisano u poglavlju 4. GNSS prijamnik na *roveru* mjeri svoju lokaciju u trajanju od 10 do 20 minuta ovisno o scenariju. GNSS određuje lokaciju nekoliko puta u sekundi. Te lokacije koje mjeri GNSS *rovera* se šalju telemetrijskim modulima na računalo na kojem Mission planner bilježi sve podatke. Ti podaci će biti obrađeni i analizirani u poglavlju 7.

Prvo neobrađeno GNSS mjerenje rađeno je na poziciji umjerene lokacije tako da se odstupanja od referentne lokacije mogu precizno mjeriti. Zatim su rađena tri GNSS mjerenja s RTK korekcijama. Ona su rađena na tri različite udaljenosti od 10 m, 50 m i 150 m. Mjerenja od 10 m i 50 m su bez prepreka između bazne stanice i *rovera*, a mjerenje od 150 m je s prirodnim i umjetnim preprekama. Također, mjerenje od 50 m ima umjetnu prepreku koja ograničava obzor *rovera* i time smanjuje broj vidljivih satelita, a mjerenje od 150 m ima prirodne prepreke sa svih strana čime se dodatno testira točnost u uvjetima urbanih kanjona kakvi su uobičajeni u letu bespilotnih letjelica.

U poglavlju 7 uspoređivat će se preciznost neobrađenog GNSS određivanja lokacije s RTK GNSS lociranjem. Također, uspoređivat će se preciznost triju RTK GNSS mjerenja kako bi se utvrdio utjecaj udaljenosti, prepreka a time i dostupnosti signala na preciznost određivanja lokacije. Za RTK GNSS mjerenja će se uzeti srednja vrijednost kao referenta lokacija i mjeriti odstupanja od nje. Odredit će se najveće odstupanje u svim mjerenjima te prosječno odstupanje u svim mjerenjima i usporedit međusobno. Statistički će se analizirat preciznost određivanjem postotka izmjerenih lokacija koje su unutar određenog radijusa. Taj postotak će se biti međusobno uspoređen u svim scenarijima. Također biti će napravljeni histogrami grešaka za sva mjerenja.

6.3. Dostupnost signala

Dostupnost signala može se razdijeliti na tri vrste: dostupnost signala satelita bazne stanice, dostupnost signala satelita *rover* stanice i dostupnost signala slanog od baze prema *roveru*.

Dostupnost signala satelita za vrijeme umjeravanja je analizirana u potpoglavlju 6.1. Ona je bila poprilično kvalitetna s prosjekom od 7,4 GPS satelita i 4,51 GLONASS satelita sa signalom snage veće od 40. Može se zaključiti da je ista dostupnost signala satelita prisutna na baznoj stanici tijekom cijelog mjerenja preciznosti GNSS-a jer je rađeno isti dan netom nakon umjeravanja.

Dostupnost signala satelita *rovera* mijenja se tijekom mjerenja jer se njegov obzor mijenja s promjenom lokacija mjerenja. Pri neobrađenom GNSS i RTK GNSS mjerenju s udaljenošću 10 m obzor *rovera* je identičan kao obzor bazne stanice te bi dostupnost signala satelita *rovera* trebala biti najbolja. Pri mjerenju s udaljenošću 50 m sjeverna strana obzora *rovera* je prekrivena umjetnim objektom, a kod mjerenja s udaljenošću 150 m je obzor *rovera* ograničen sa svih strana prirodnim objektima. Slabija dostupnost signala u mjerenjima od 50 i 100 m utječe na preciznost određivanja pozicije. Prosjek vidljivih satelita tijekom svih mjerenja je bio 15.

Dostupnost signala između baze i *rovera* mijenja se s udaljenošću i preprekama između njih. Pri neobrađenom GNSS mjerenju taj faktor ne postoji jer baze nema. Pri RTK GNSS mjerenjima od 10 i 50 m put signala je čist te bi dostupnost signala trebala biti idealna. Međutim s povećanjem udaljenosti i pojavom prirodnih i umjetnih prepreka između baze i *rovera* signal slan između njih slabi a time i preciznost određivanja lokacije uz RTK korekcije. Taj slučaj je izmjeren mjerenjem od 150 m.

Sve tri vrste dostupnosti signala utječu na preciznost određivanja lokacije GNSS-a. Ovisno o trima dostupnostima signala RTK tehnologija ima dva stanja određivanja pozicije: RTK Fixed i RTK Float. RTK koristi kompliciranu matematičku formulu tj. algoritam za izračunavanje točnog broja radio valnih duljina između satelita i antene bazne stanice. Rezultat tog algoritma je jedno od dvaju navedenih stanja. RTK fixed se javlja kada je prijemnik izračunao ispravno rješenje. Utvrdio je da prikazane koordinate imaju točnost unutar tolerancija. Slaba vidljivost satelita, loša geometrija konstelacije satelita ili slaba radio veza

između bazne i *rover* stanice mogu spriječiti fixed soluciju. RTK float solucija se javlja kada algoritam ne daje prihvatljivo fiksno rješenje zbog nekog od navedenih razloga [14].

Tijekom mjerenja za ovaj rad prvih deset minuta RTK GNSS mjerenja solucija je bila RTK float dok se sustav nije stabilizirao. Nakon deset minuta prešao je u fixed i tako ostao. Jedini izuzetak je bilo mjerenje od 150 m gdje je zbog prepreka između baze i *rovera* te ograničenosti kontakta *rovera* sa satelitima (zbog prirodnih prepreka oko njega) solucija cijelo vrijeme bila RTK float. Utjecaj istoga na preciznost bit će analiziran u sljedećem poglavlju.

7. OBRADA I ANALIZA PODATAKA

Prije analize potrebno je napomenuti da je primijećena konstanta greška *rover* GNSS-a te on određuje lokacije cijelo vrijeme 0,0000274 stupnjeva geografske širine sjevernije od stvarne lokacije te 0,0000184 stupnjeva geografske dužine zapadnije od stvarne lokacije. Ta greška je primijećena konstantno u sva četiri mjerenja te je uzeta u obzir. Mjerit će se odstupanja od srednje vrijednosti svakog pojedinog mjerenja koja će biti referenta lokacija te tako odrediti preciznost neobrađenog GNSS lociranja, RTK GNSS lociranja na svim trima udaljenostima i međusobno usporediti.

Obrada i analiza je napravljena na sljedeći način: *rover* GNSS je određivao svoju lokaciju nekoliko puta u sekundi. Ta lokacija je određena stupnjevima geografske širine i dužine zaokruženim na sedmu decimalu. Sva ta mjerenja zabilježena su u Mission planneru. Ona su pretvorena u Matlab dokument. U Matlabu su obrađena na sljedeći način: Pronađene su srednje vrijednosti svih koordinata za svako pojedino mjerenje koje su onda uzete kao referentna lokacija. Zatim, sve koordinate koje je GNSS odredio kao svoju lokaciju tijekom mjerenja su oduzete od te srednje vrijednosti. Dobivena su odstupanja od referente vrijednosti u stupnjevima na sedmu decimalu. Sedma decimala stupnja Zemljine geografske širine je jednaka duljini 1,13 cm bilo gdje na Zemlji, a sedma decimala stupnja Zemljine geografske dužine na 45° sjeverne geografske širine, gdje se nalazi Zagreb, je jednaka 0,79 cm. Zbog toga su odstupanja geografske širine pomnožena s 1,13 te su dobivena odstupanja od referentne vrijednosti u cm, a odstupanja geografske dužine s 0,79 i također dobivena odstupanja u cm. Određeno je maksimalno odstupanje. Određeno je srednje ili prosječno odstupanje. Uzeti su radijusi od 0,5 cm, 1,5 cm i 8 cm za RTK mjerenja i radijusi 8 cm, 50 cm i 100 cm za neobrađeno GNSS mjerenje te su određeni postoci odstupanja unutar svakog od njih. To sve je grafički prikazano u Matlabu te će biti prikazano u sljedećim potpoglavljima. Također je za svako mjerenje zabilježeno broj koordinata koje su obrađene. Na slici 21 prikazan je kod korišten u Matlabu za crtanje grafova i izračun dobivenih podataka.

funkcija_plota.m | funkcija_plota_2.m | funkcija_plota_3.m | funkcija_plota_kalib.m | histogram_ploz.m

```
figure();
grid on;
hold on;
long_prvo_metri = (long_prvo - median(long_prvo)) * 0.79;
lat_prvo_metri = (lat_prvo - median(lat_prvo))* 1.13;
plot(long_prvo_metri , lat_prvo_metri);
scatter(0,0, 'filled')
post = 0;
for i = 1:1:1093
    udaljenostl(i) = sqrt((long_prvo_metri(i)^2) + (lat_prvo_metri(i))^2);
    if udaljenostl(i) <= 1.5
        post = post + 1;
    end

end
postotak = 0;
postotak = post / 1093;
r=0.5;
x0=0;
y0=0;
theta = linspace(0,2*pi,100);
plot(x0 + r*cos(theta),y0 + r*sin(theta),'--')
axis equal

r=1.5;
x0=0;
y0=0;
theta = linspace(0,2*pi,100);
plot(x0 + r*cos(theta),y0 + r*sin(theta),'--')
axis equal

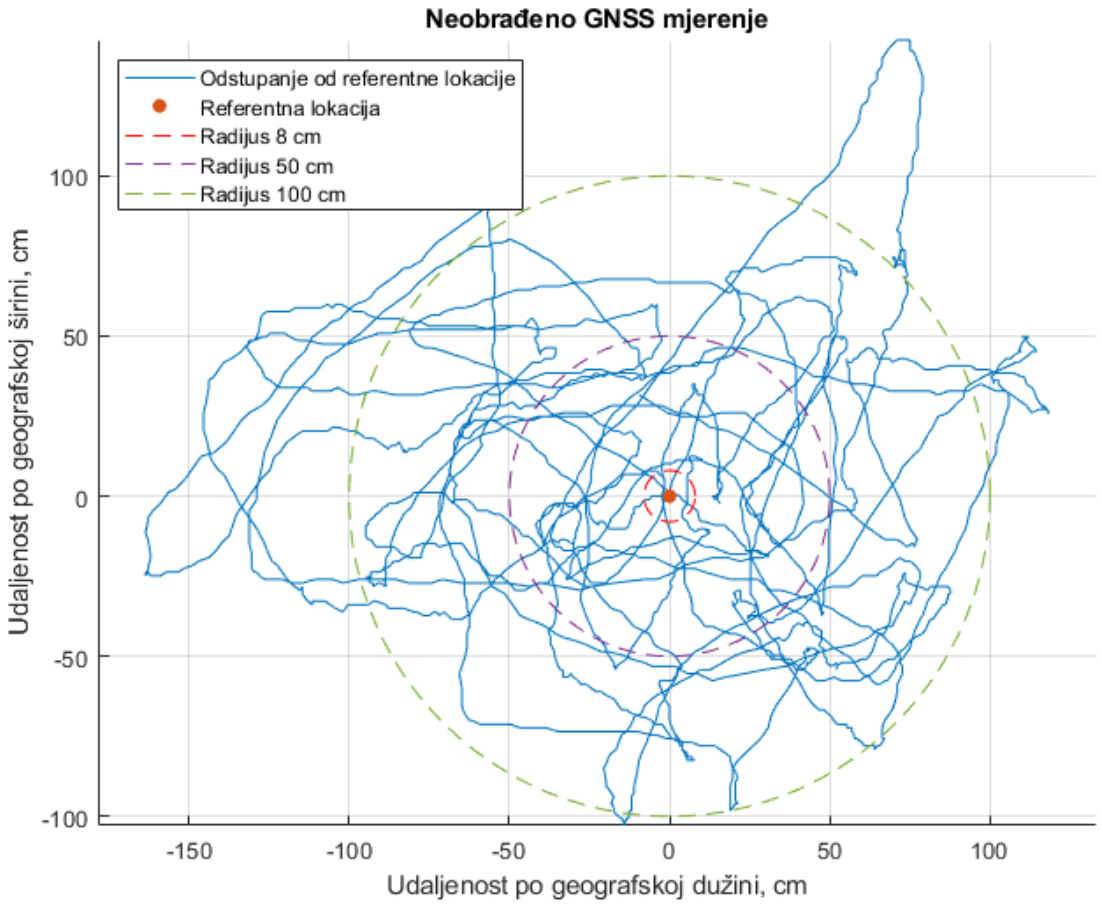
r=8;
x0=0;
y0=0;
theta = linspace(0,2*pi,100);
plot(x0 + r*cos(theta),y0 + r*sin(theta),'--')
axis equal

xlabel('Udaljenost po geografskoj dužini, cm')
ylabel('Udaljenost po geografskoj širini, cm')
legend('Odstupanje od referentne lokacije', 'Referentna lokacija'...
,'Radijus 0.5 cm', 'Radijus 1.5 cm', 'Radijus 8 cm','Location','northwest')
title('RTK GNSS mjerenje udaljenosti 10 m')
```

Slika 21. Matlab kod korišten za obradu i crtanje grafova izmjerenih podataka Mission plannera

7.1. Neobrađeno GNSS mjerenje

Neobrađeno ili bazično GNSS mjerenje trajalo je 22 min i 39 s tijekom kojih je GNSS izmjerio 2701 lokaciju. Najveće odstupanje je bilo 165,4 cm a prosječno odstupanje je bilo 66,42 cm. Na slici 21 prikazana su odstupanja od referentne lokacije neobrađenog GNSS mjerenja u cm.

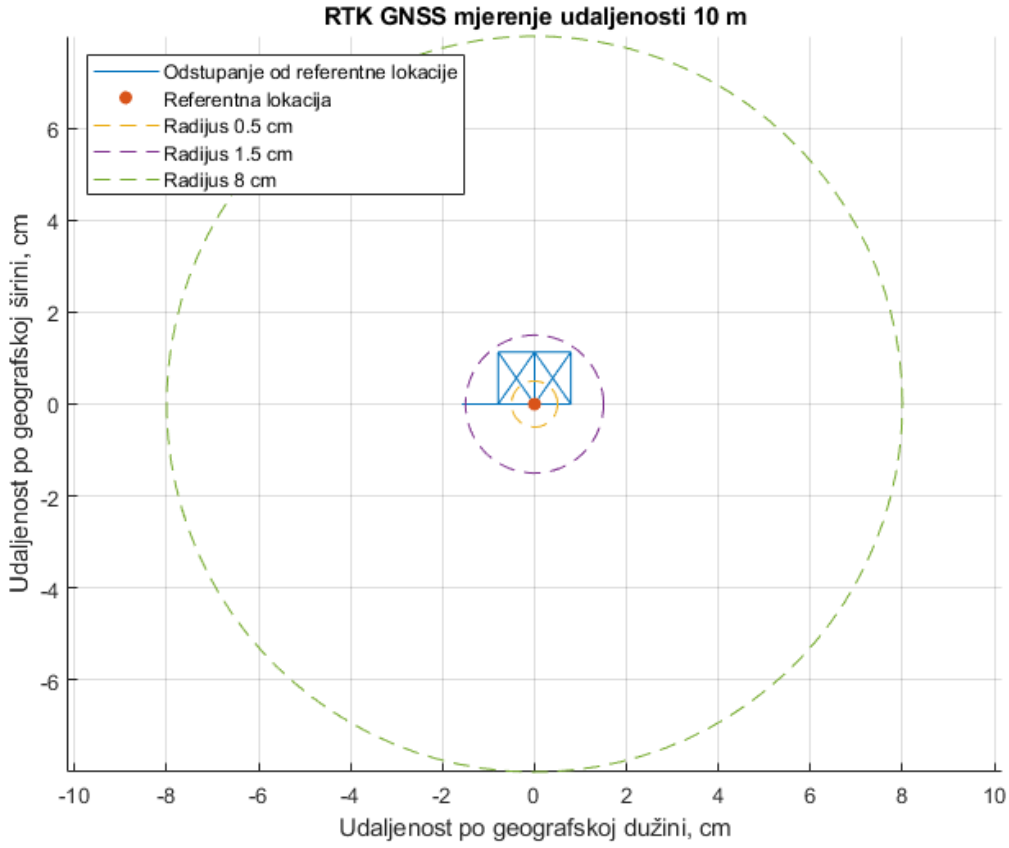


Slika 22. Lokacije određene bazičnim GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju

Postotak odstupanja unutar radijusa 8 cm je 1,48%, unutar radijusa 50 cm 31,73%, a unutar radijusa 100 cm 83,01%.

7.2. RTK GNSS mjerenje 10 m

RTK GNSS mjerenje udaljenosti bazne i *rover* stanice 10 m trajalo je 9 min i 10 s tijekom kojih je GNSS izmjerio 1093 lokacije. Najveće odstupanje je bilo 1,58 cm a prosječno odstupanje je bilo 0,79 cm. Na slici 22 prikazana su odstupanja od referentne lokacije RTK GNSS mjerenja udaljenosti baze i *rovera* 10 m u cm. Važno je naglasiti da se zbog zaokruživanja pozicije na sedmu decimalu RTK mjerenja kod ovakvog povećanja vide kao skok s jedne pozicije na drugu. Nakon 10 minuta inicijalizacije došlo je s RTK float do RTK fixed solucije. Mjerenje je rađeno nakon inicijalizacije kad je došlo do RTK fixed solucije.

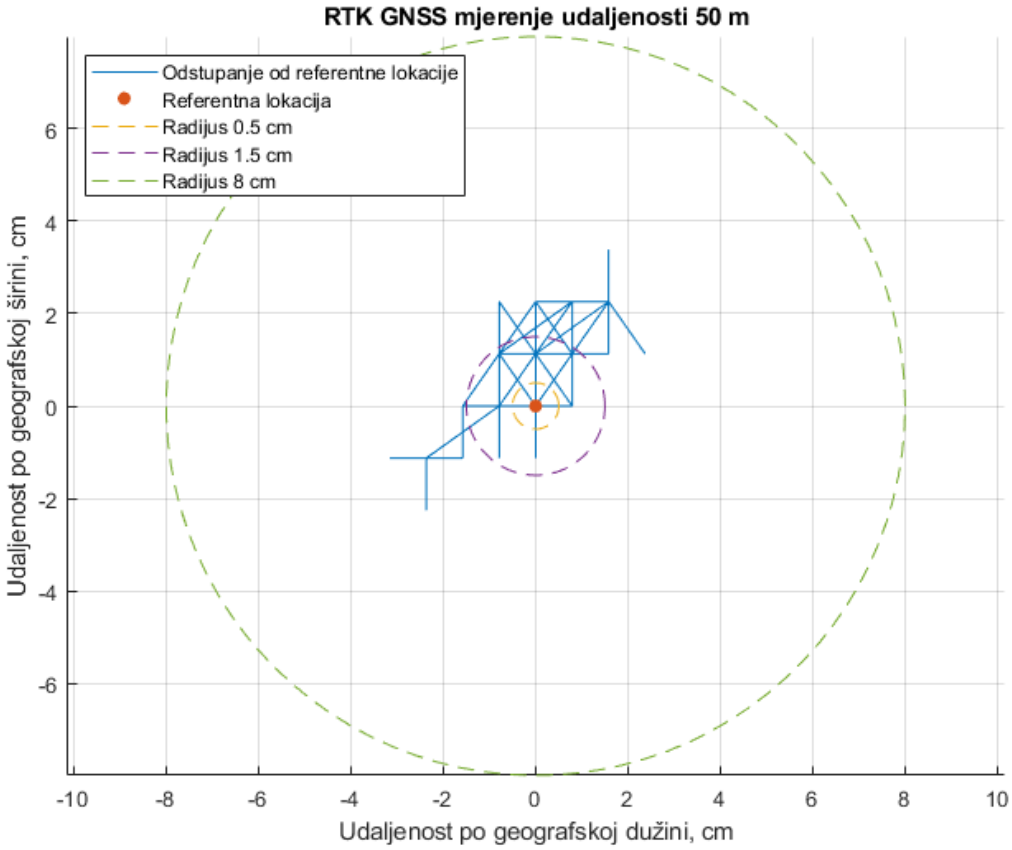


Slika 23. Lokacije određene RTK GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju, odaljenost stanica 10 m

Postotak odstupanja unutar radijusa 0,5 cm je 39.52%, unutar radijusa 1,5 cm 99,73%, a unutar radijusa 8 cm 100%.

7.3. RTK GNSS mjerenje 50 m

RTK GNSS mjerenje udaljenosti bazne i *rover* stanice 50 m trajalo je 15 min i 40 s tijekom kojih je GNSS izmjerio 1865 lokacija. Najveće odstupanje je bilo 3,74 cm a prosječno odstupanje je bilo 1,13 cm. Na slici 23 prikazana su odstupanja od referentne lokacije RTK GNSS mjerenja udaljenosti baze i *rovera* 50 m u cm. Cijelo vrijeme je bila prisutna RTK fixed solucija.

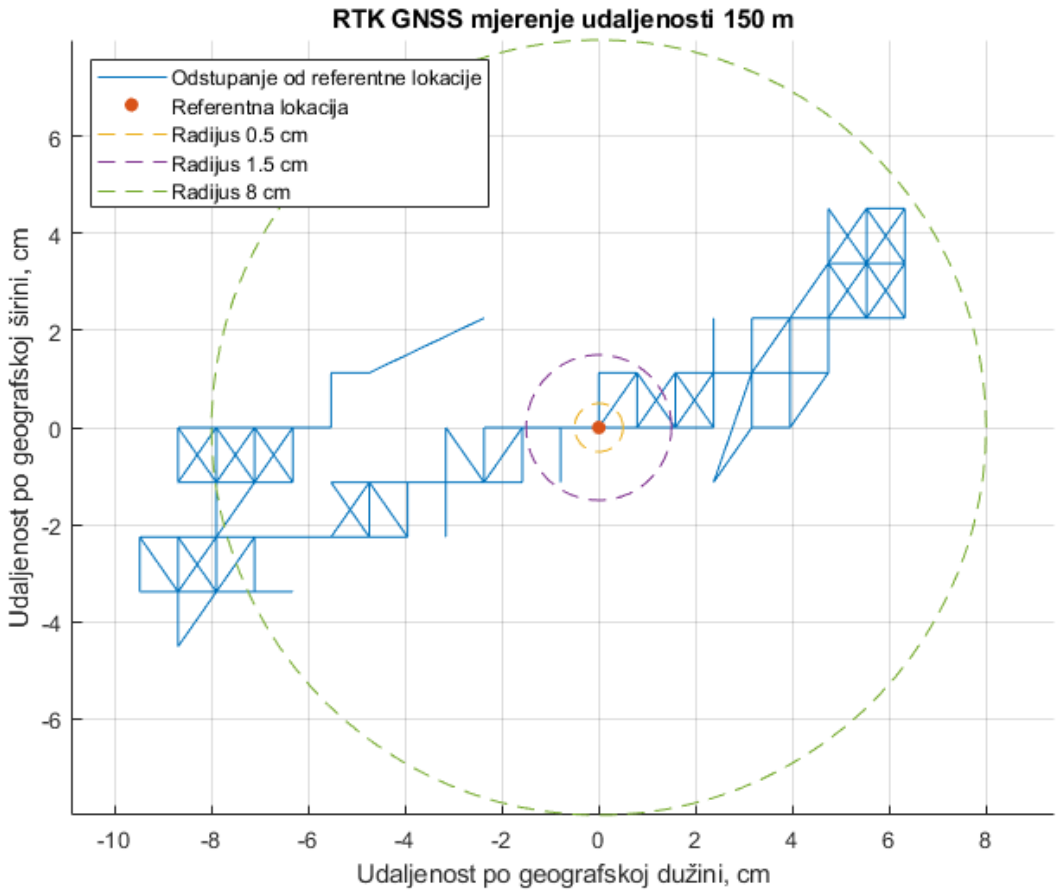


Slika 24. Lokacije određene RTK GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju, odaljenost stanica 50 m

Postotak odstupanja unutar radijusa 0,5 cm je 15.23%, unutar radijusa 1,5 cm 82,95%, a unutar radijusa 8 cm 100%.

7.4. RTK GNSS mjerenje 150 m

RTK GNSS mjerenje udaljenosti bazne i *rover* stanice 150 m trajalo je 16 min tijekom kojih je GNSS izmjerio 1906 lokacija. Najveće odstupanje je bilo 10,07 cm a prosječno odstupanje je bilo 5,83cm. Na slici 24 prikazana su odstupanja od referentne lokacije RTK GNSS mjerenja udaljenosti baze i *rovera* 150 m u cm. Zbog prepreka između prijamnika i između *rovera* i satelita bila je cijelo vrijeme prisutna RTK float solucija.



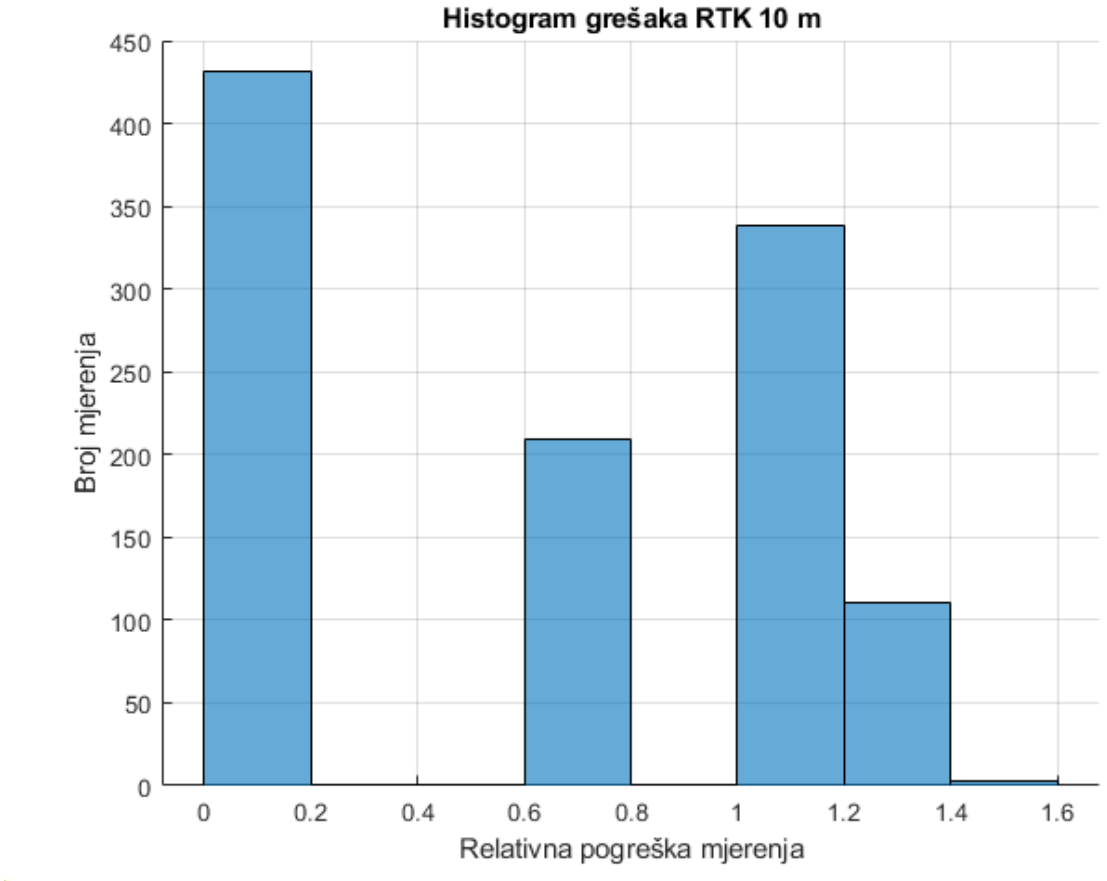
Slika 25. Lokacije određene RTK GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju, odaljenost stanica 150 m

Postotak odstupanja unutar radijusa 0,5 cm je 0.89%, unutar radijusa 1,5 cm 4,62%, a unutar radijusa 8 cm 82,37%.

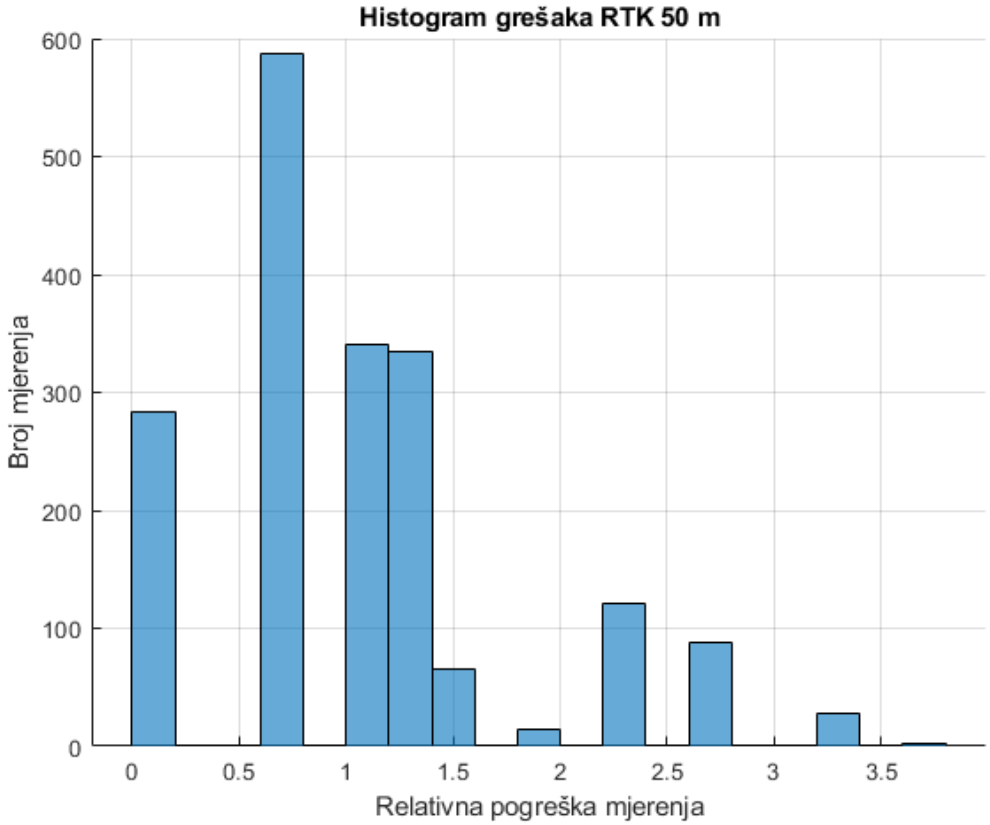
7.5. Usporedba podataka i analiza

Iz priloženih grafova vidi se da je bazični GNSS nekoliko puta neprecizniji od RTK GNSS-a. Bazični GNSS mjeri poziciju unutar par metara dok RTK GNSS mjeri lokaciju u centimetrima. Također, uz to što se vidi da je RTK GNSS iznimno precizan i određuje lokaciju u centimetrima vidi se da s udaljenošću *rover* stanice i preprekama preciznost slabi.

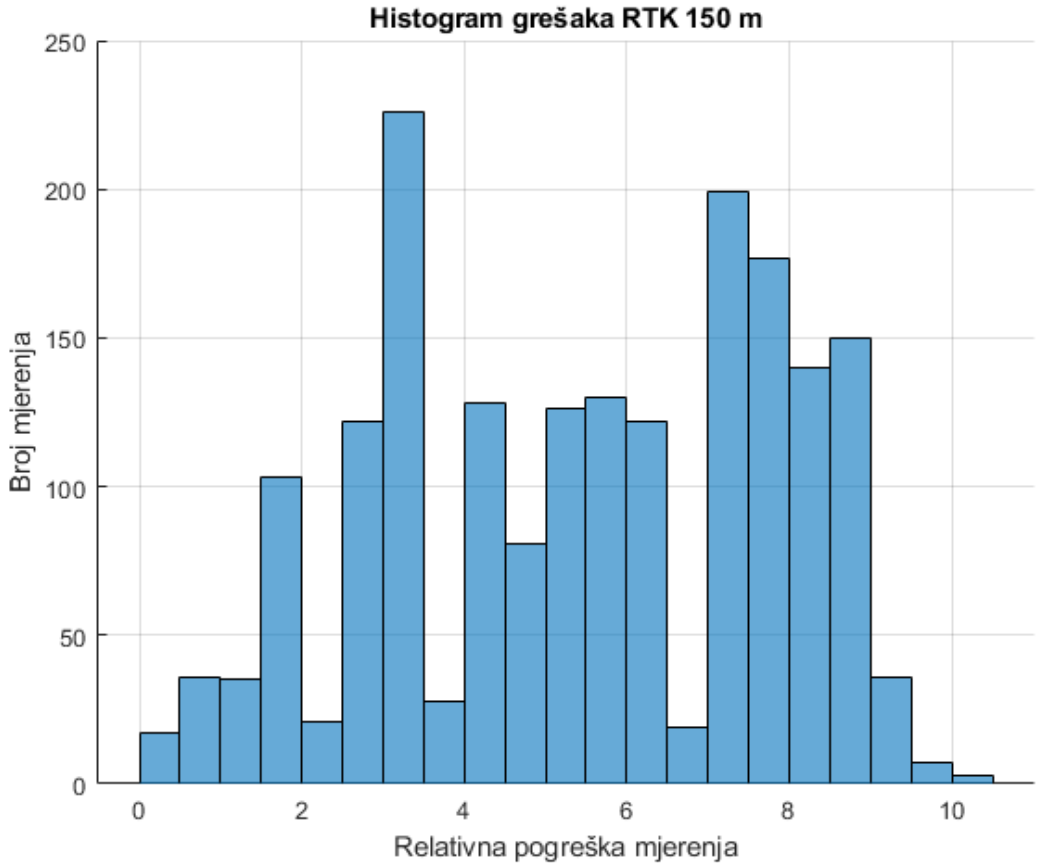
Navedeno se može vidjeti i na slikama 26, 27, 28 i 29 gdje se histogramima grešaka uspoređuju preciznosti svih triju RTK GNSS mjerenja i neobrađenog GNSS-a. Na grafikonu 2 se može vidjeti preciznost bazičnog GNSS-a usporedno s RTK GNSS-om na tri različite udaljenosti stanica prikazano maksimalnim i prosječnim odstupanjem lociranja.



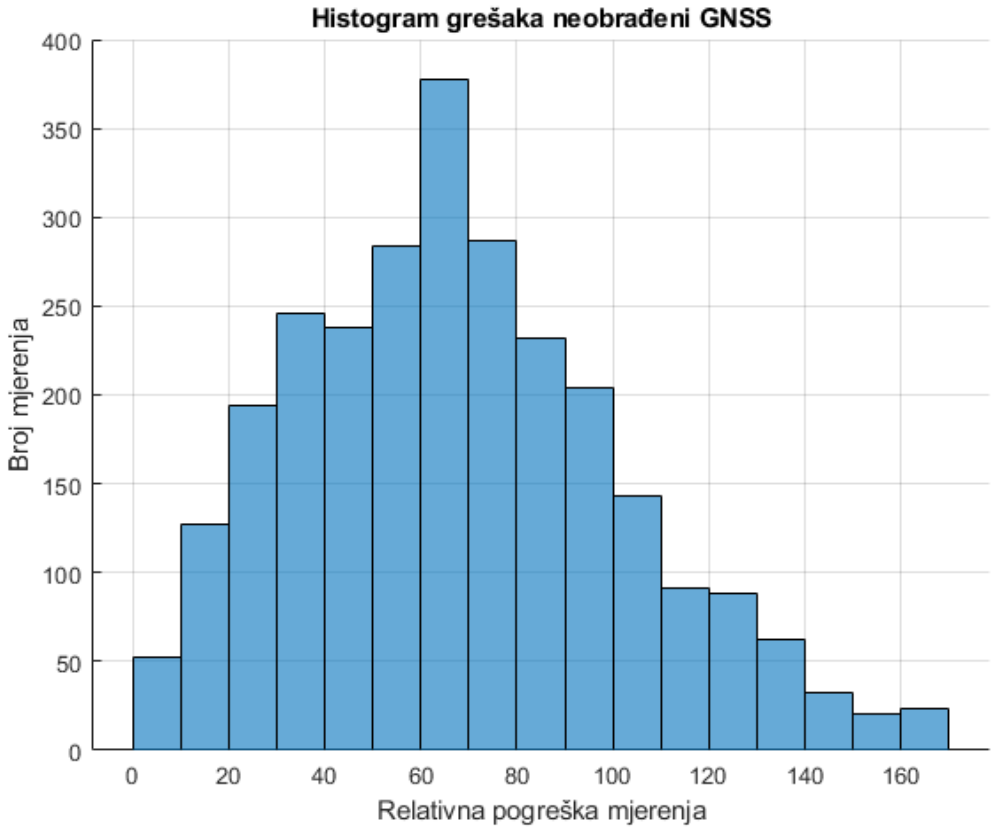
Slika 26. Histogram grešaka RTK mjerenje udaljenosti 10 m



Slika 27. Histogram grešaka RTK mjerenje udaljenosti 50 m

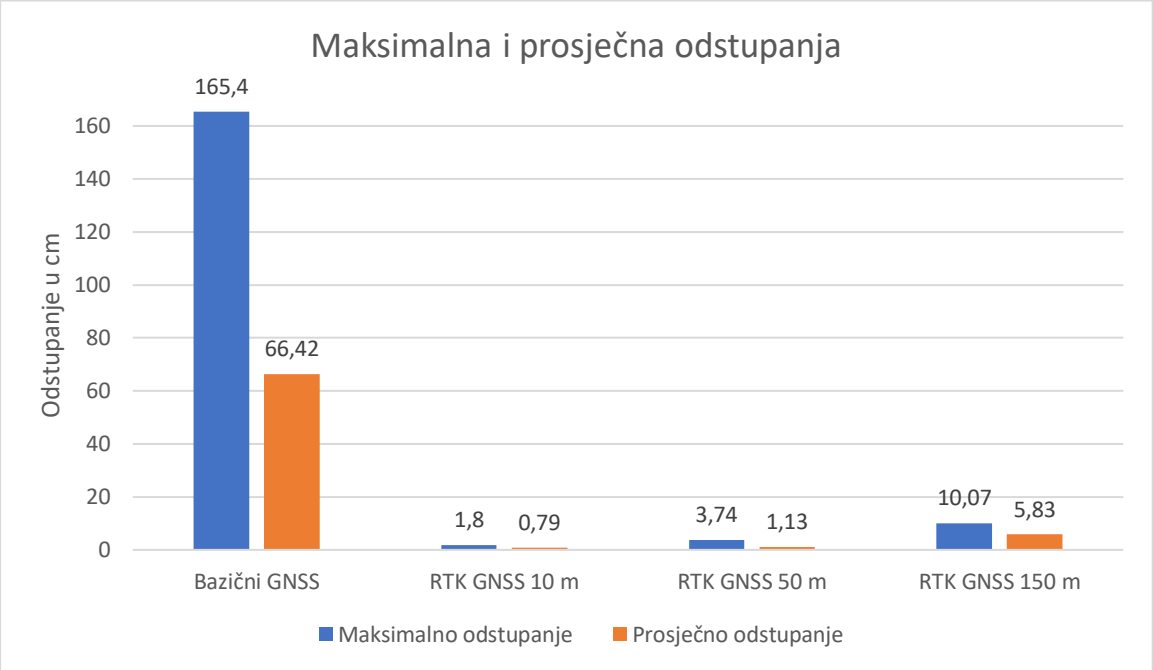


Slika 28. Histogram grešaka RTK mjerenje udaljenosti 150 m



Slika 29. Histogram grešaka neobrađeni GNSS

Na grafikonu 7.3. se može vidjeti preciznost bazičnog GNSS-a usporedno s RTK GNSS-om na tri različite udaljenosti stanica prikazano maksimalnim i prosječnim odstupanjem lociranja.



Grafikon 2. Usporedba maksimalnih i prosječnih odstupanja od referentne lokacije bazičnog GNSS-a i RTK GNSS-a (stanice udaljene 10, 50 i 150 m)

Iz priloženih grafikona i histograma se može vidjeti da su sve pozicije određene od RTK GNSS-a unutar nekoliko centimetara. Kada je udaljenost stanice 10 m gotova sva mjerenja su unutar 1 cm, pri udaljenosti stanice 50 m mjerenja su unutar 2 do 3 cm, a s udaljenošću stanice 150 m i preprekama signalu su mjerenja unutar 10 cm dok bazični GNSS radi greške veće od metra. Jasna je prednost u preciznosti RTK GNSS-a nad bazičnim GNSS-om ali sustav je kompliciraniji i zahtjevniji za realizirat. Također, treba uzeti u obzir da je GNSS stacionaran u sva četiri mjerenja te da bi greške bile veće pri kretanju.

8. ZAKLJUČAK

RTK GNSS je iznimno precizna tehnologija GNSS navigacije koja je relativno pristupačna. Njezina pristupačnost raste svakim danom zajedno s njezinom zajednicom. Valja napomenuti da postoje mogućnosti umreženja više baza i uzimanja podataka od svih no takve mreže su rijetke i nema infrastrukture istih jer je neisplativa.

Iz priloženih mjerenja i podataka vidi se drastična prednost u preciznosti RTK GNSS-a nad bazičnim GNSS-om što se tiče preciznosti. Uz tu prednost dolazi i nekoliko mana: potrebno je nekoliko sati prije umjeravat baznu stanicu za veliku preciznost i s udaljenošću preciznost pada te je zbog toga korisnik ograničen na područje oko kalibrirane lokacije.

Ovisno o potrebama korisnika RTK GNSS se isplati koristiti samo u specifičnim situacijama poput preciznih programiranih letova s dronom za snimanje evenata ili filmova, letenje točno precizno definiranog ruta koje moraju ponovljive više puta ili preciznih vožnji s *roverom*. U većini drugih situacija korisniku će biti dovoljna bazična GNSS navigacija ili će biti potrebna druga, bolja oprema za određene profesionalne potrebe.

LITERATURA

[1] Groves PD. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Boston, London: Arthech House; 2008.

[2] Novak D. Zrakoplovna prostorna navigacija. Zagreb: Fakutlet prometnih znanosti; 2015.

[3] Web stranica Airports worldwide. Preuzeto sa: https://www.airports-worldwide.com/img/articles/big/article0240_picture01b.png [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[4] Službena web stranica GPS-a. Preuzeto sa: https://www.gps.gov/ [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[5] Službena web stranica GLONASS-a. Preuzeto sa: https://www.glonass-iac.ru/en/ [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[6] Web stranica esa navipedia. Preuzeto sa: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Space_Segment [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[7] Web stranica esa navipedia. Preuzeto sa: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Ground_Segment [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[8] Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D. GPS satellite surveying, Fourth edition. Hoboken, New Yersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2015.

[9] Kairos autonomi. Bulletin BUL-068: GPS Correction Comparisons – RTK vs DGPS. Sandy, Utah. Preuzeto sa: http://www.kairosautonomi.com/uploads/files/129/Bulletin---RTK-vs-DGPS-010400.pdf [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[10] Web stranica ardusimple.com Preuzeto sa: https://www.ardusimple.com/wp-content/uploads/2018/06/DGPS2.jpg [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[11] Web stranica ardupilot.org Preuzeto sa: https://ardupilot.org/copter/docs/common-here-plus-gps.html [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[12] Web stranica ardupilot.org Preuzeto sa: https://ardupilot.org/planner/ [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[13] Here+V2 User Manual. Preuzeto sa: https://docs.cubepilot.org/user-guides/here+/here+v2-user-manual [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

[14] Web stranica marxact.com Preuzeto sa: https://marxact.com/support/what-is-the-difference-between-rtk-fix-and-rtk-float/ [Pristupljeno: kolovoz 2020.]

Popis kratica

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Globalni navigacijski satelitski sustavi
RTK (Real-time kinematic) Kinematika u stvarnom vremenu
MEO (medium Earth orbit) srednja Zemljina orbita
PRN (pseudo random noise) psaudoslučajni kod
BPSK (bi-phase shift key) dvofazni pomak faze
NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing & Ranging Global Positioning System) Globalni položajni sustav
SPS (Standard positioning service) standardna pozicijska usluga
PPS (Precise positioning service) Precizna pozicijska usluga
OCS (Operational Control Segment) Operativni upravljački segment
GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) Globalni navigacijski satelitski sustav
TT&C (telemetry, tracking and control) telemetrija, praćenje i upravljanje
CC (Central Clock) centralnig sat
ULS (uplink stations) stanice za slanje podataka konstelaciji
SLR (Laser Ranging Stations) stanice za lasersko mjerenje udaljenosti
MS (Monitoring station) stanica za praćenje i mjerenje
UHF (Ultra high frequency) ultra visoka frekvnacija
GSM (Global System for Mobile Communications) Globlani Sistem za Mobilne Komunikacije
LTE (Long Term Evolution) dugoročna evolucija
GCS (Ground Control Station) zemaljska upravljačka stanica
SITL (software-in-the-loop)
UAV (unmanned aerial vehicle) bespilotna letjelica

Popis slika

Slika 1. Arhitektura GNSS-a, [1] 2
Slika 2. Udaljenosti orbita satelita GNSS-a, [3] 3
Slika 3. Funkcionalni dijagram GNSS korisničke opreme [1] 4
Slika 4. Pozicija prijamnika s jednim, dva i tri satelita, [1] 5
Slika 5. Određivanje pozicije prijamnika u realnim uvjetima s četiri satelita, [1] 5
Slika 6. GPS, GLONASS i Galileo frekvencijski pojasevi, [1] 6
Slika 7. Orbite GPS satelita, [4] 7
Slika 8. GPS Upravljački segment, [4] 8
Slika 9. Orbite GLONASS satelita, [6] 9
Slika 10. GLONASS upravljački segment, [7] 10
Slika 11. RTK navigacija, [10] 12
Slika 12. Here+ RTK GNSS, [11] 13
Slika 13. Spajanje Here+ RTK GNSS-a s Pixhawk autopilotom, [11] 14
Slika 14. Spajanje opreme i njezina interakcija, [13] 16
Slika 15. Oprema u stvarnosti, [13] 16
Slika 16. Lokacija umjeravanja/referentna lokacija bazne stanice 17
Slika 17. Mjerenje udaljenost stanica 10 m 18
Slika 18. Mjerenje udaljenost stanica 50 m 19
Slika 19. Mjerenje udaljenost stanica 150 m 19
Slika 20. Umjeravanje u Mission planneru 20
Slika 21. Matlab kod korišten za obradu i crtanje grafova izmjerenih podataka Mission plannera 26
Slika 22. Lokacije određene bazičnim GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju 27
Slika 23. Lokacije određene RTK GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju, odaljenost stanica 10 m 28
Slika 24. Lokacije određene RTK GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju, odaljenost stanica 50 m 29
Slika 25. Lokacije određene RTK GNSS-om u odnosu na referentnu lokaciju, odaljenost stanica 150 m 30
Slika 26. Histogram grešaka RTK mjerenje udaljenosti 10 m 31
Slika 27. Histogram grešaka RTK mjerenje udaljenosti 50 m 32
Slika 28. Histogram grešaka RTK mjerenje udaljenosti 150 m 32
Slika 29. Histogram grešaka neobrađeni GNSS 33

Popis tablica

Tablica 1. Generacije GPS satelita……8
Tablica 2. Generacije GLONASS satelita……10

Popis grafikona

Grafikon 1. Geografska preciznost kroz vrijeme rijekom umjeravanja – trenutačne geografske preciznosti u razmacima od 1 min……21
Grafikon 2. Prikaz tendencije geografske preciznosti nakon umjeravanja do preciznosti 0,1 m……22
Grafikon 3. Usporedba maksimalnih i prosječnih odstupanja od referentne lokacije bazičnog GNSS-a i RTK GNSS-a (stanice udaljene 10, 50 i 150 m)……31

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 **Mjerenje i analiza performansi satelitskog navigacijskog prijamnika uz primjenu kinematike u realnom vremenu**
na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 9/8/2020

(potpis)