

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PROJEKT

Filip Miklaužić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PROJEKT

Mentor:

Doc. dr. sc. Marko Švaco, mag. ing.

Student:

Filip Miklaužić

Zagreb, 2023.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
SAŽETAK.....	III
1. UVOD.....	1
1.1. Uvod u GNSS sustave.....	2
1.1.1. Segmenti GNSS sustava	2
1.2. Princip rada GNSS sustava	3
1.3. Izvori pogreški pozicije kod GNSS sustava.....	5
2. GPS RTK.....	6
2.1. Uvod u RTK sustav	6
2.2. Elementi RTK sustava	6
2.3. Korekcijski podaci	7
2.3.1. Mreža referentnih stanica.....	7
2.3.2. Vlastita korekcijske bazne stanice	8
3. Izbor komponenti GPS RTK sustava.....	10
3.1. Izbor baze.....	10
3.1.1. Korištenje privremene baze	11
3.1.1.1. Izrada vlastite privremene baze	11
3.1.2. Korištenje stacionarne baze	15
3.1.3. Korištenje korekcijskih podataka lokalnih korekcijskih stanica.....	17
3.2. Izbor rovera	18
3.3. Korištenje integriranih sustava baze i rovera	18
4. Zaključak	20
5. Planovi za nastavak diplomskog rada.....	21
LITERATURA.....	22

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz aktivnih satelita pri određivanju položaja [4]	4
Slika 2. Prikaz GNSS RTK sustava baze i rovera [12]	6
Slika 3. Prikaz uređeno postavljene mreže korekcijskih stanica [7]	8
Slika 4. Vlastita korekcijska bazna stanica [8]	9
Slika 5. SparkFun GNSS-RTK-SMA-ZED-F9P pločica [17]	11
Slika 6. Višepojasna <i>ublox</i> antena [13]	12
Slika 7. GNSS antena montirana na stalak [10]	13
Slika 8. Telemetrijski radio [14]	14
Slika 9. Prikaz ovisnosti pogreške pozicije i vremena [15]	16
Slika 10. Prikaz CROPOS korekcijskih stanica na području Republike Hrvatske [19]	17
Slika 11. SparkFun RTK Facet integrirani sustav [21]	19

SAŽETAK

Potrebe za preciznim pozicioniranjem su sve češće u sve većem broju područja. Jedna od najraširenijih metoda postizanja subcentimetarske točnosti pozicioniranja je GNSS RTK metoda (*engl. Global Navigation Satellite System Real Time Kinematics, hrv. globalni satelitski navigacijski sustav stvarne kinematike*). U ovom radu dan je pregled globalnih navigacijskih satelitskih sustava korištenih za preciznu lokalizaciju te njihova moguća upotreba u nastavku diplomskog rada.

Ključne riječi: pozicioniranje, navigacija, GNSS RTK

1. UVOD

GNSS je kratica za globalni satelitski navigacijski sustav (*engl. Global Navigation Satellite System*) koji omogućuje određivanje točne geografske pozicije bilo gdje na Zemlji uz korištenje satelitskih signala. Najpoznatiji GNSS sustavi su GPS (Američki sustav), GLONASS (Ruski sustav), Galileo (Europski sustav) i Beidou (Kineski sustav). Glavni elementi svakog GNSS sustava su sateliti koji emitiraju te prijemnika koji primaju signale. Prijemnik koristi podatke tri ili više satelita kako bi odredio svoju točnu poziciju u prostoru. GNSS sustavi se koriste u različitim područjima kao što su navigacija vozila, plovila, aviona, precizno kartiranje, zemljopisno informacijski sustavi te mnogi drugi sustavi gdje je potrebno odrediti točnu lokaciju na zemlji.

Svaki GNSS sustav ima svoje karakteristike i prednosti nad ostalim alternativama, ali u osnovi svi sustavi rade na isti način. Sateliti iz GNSS mreže emitiraju signale koji sadržavaju informacije o satelitu, njegovom trenutnom položaju u orbiti te točno vrijeme koje označava vrijeme atomskog sata satelita putem kojega je isti poslan. Prijemnik na Zemlji prima signale od više satelita te pomoću istih u realnom vremenu računa svoju poziciju na Zemlji.

Kao tehnologija, GNSS sustavi se stalno razvijaju kako bi bili još precizniji i robusniji te kako bi se kao takav mogao primjenjivati u područjima u kojima nije zastupljen radi svojih trenutnih nedostataka. U novije vrijeme su svjetlo dana ugledali i neki noviji sustavi koji se trenutno u fazi razvoja, kao što su QZSS (Japanski sustav) i NavIC (Indijski sustav).

1.1. Uvod u GNSS sustave

Globalni satelitski sustav (GNSS) je mreža satelita koja omogućuje pozicioniranje i navigaciju na globalnoj razini. GPS (*engl. Global Positioning System*) je najpoznatiji GNSS sustav koji se koristi u cijelom svijetu. U svom sastavu ima 24 satelita koji su raspoređeni u orbiti oko Zemlje. Koristi se u različitim područjima, kao što su vojnu i civilnu navigacija, mobilna robotika, geodezija, geologiju te druga područja gdje postoji potreba za definiranjem točnog položaja na zemlji.

1.1.1. Segmenti GNSS sustava

GNSS sustavi se obično sastoje od tri glavna segmenta: svemirski segment, kontrolni segment i korisnički segment. Prostorni segment sastoji se od satelita koji se nalaze iznad Zemlje te koji putuju po gotovo idealnim kružnim orbitalnim ravninama. Postoje tri različite visine na kojima se nalaze sateliti: niska orbita odnosno LEO (*engl. low earth orbit*), srednja orbita odnosno MEO (*engl. medium earth orbit*) i geostacionarna orbita odnosno GEO (*engl. geostacionary orbit*). Odnos između visine određene orbite te perioda Zemljinog ciklusa je fiksiran. LEO sateliti orbitiraju na nadmorskoj visini ispod 2.000 km i te im period obilaska zemlje traje od 95 do 120 min. MEO sateliti nalaze se na nadmorskoj visini od 5.000 do 12.000 km te im je potrebno okolo 6 sati da obiđu Zemlju. Nadmorska visina GEO satelita iznosi konstantnih 35.786 km, te samim njihova brzina poklapa s brzinom rotacije zemlje (tj. obilaze Zemlju jednom svakih 24 sata) i ostaju točno na istom mjestu gledano sa Zemlje [1]. Svaki satelit opremljen je uređajima za navigaciju i komunikaciju kako bi mogao održati traženu putanju i kako bi mogao ostati u svom radnom području tijekom cijele orbite oko zemlje. Satelit prima, pohranjuje i obrađuje poslane informacije iz zemaljskog kontrolnog centra. Svaki od satelita ima različiti identifikacijski sustav odnosno broj lansiranja, broj orbitalne pozicije i specifičan naziv sustava kako bi se podaci koji su odaslani od svakog od satelita mogli međusobno razlikovati. Kontrolni segment svakog satelita odgovoran je za nadzor cijelog sustava. Koristi se u zadacima postavljanja i održavanja sustava, praćenja satelita u njihovim orbitama i parametara sata, praćenja pomoćnih podataka i učitavanja podatkovne poruke na satelite. Kontrolni segment također je odgovoran za enkripciju podataka s ciljem zaštite satelitskih usluga od neovlaštenih korisnika. Stanice za praćenje satelita smještene diljem svijeta koriste se pri koordiniraju aktivnosti za kontrolu i nadzor sustava putem dvosmjerne komunikaciju između tih stanica i GNSS satelita. Segment korisnika sastoji se od pasivnih prijemnika koji primaju i dekodiraju signale koje odašilje satelit. Korištenje brojnih GNSS prijemnika za privatne korisnike je

potpuno besplatno. Međutim, većina navigacijskih sustava istovremeno šalje i posebne signale korištene u vojne svrhe, kojima civili ne mogu pristupiti [2].

1.2. Princip rada GNSS sustava

GNSS je satelitski navigacijski sustav koji koristi satelite u orbiti Zemlje kako bi odredio poziciju objekta na površini Zemlje. Sateliti GNSS sustava emitiraju signale koji putuju brzinom svjetlosti do prijemnika na Zemlji. Prijemnik koristi te signale kako bi izračunao svoju poziciju, odnosno zemljopisnu širinu, dužinu i visinu.

Svaki GNSS sustav mora sadržavati dovoljan broj satelita kako bi se osigurala potpuna pokrivenost područja djelovanja. U svakom trenutku objektu koji se prati moraju biti dostupna barem 4 satelite kako bi se mogla odrediti njegov relativni položaj u odnosu na satelite. Sateliti imaju integrirane atomske satove koji se mogu sinkronizirati do razine nanosekundi kako bi se što točnije odredilo vrijeme potrebno da prijamnik na zemlji očita signal sa satelita nakon slanja. Prijamnici pak, za razliku od satelita ne koriste atomske satove, zbog visoke cijene, velike osjetljivosti te ostalih nedostataka, već koriste jeftinije kristalne satove. Pogreška u očitavanju vremena od 1 μ s dovodi do pogreške u određivanju položaja od otprilike 300 m, što je neprihvatljivo gotovo za svaku primjenu. Iako se iz presjeka 3 sfere dobivene iz podataka od 3 različita satelita i Zemlje kao četvrte može odrediti točka na kojoj se nalazi prijamnik, zbog anuliranja problema sinkronizacije te radi postizanja zadovoljavajuće točnosti uvodi se četvrti satelit. Uvođenjem dodatnog satelita omogućava se korekcija pogreške računanja vremena prijamnika na Zemlji čime se dodatno povećava preciznost samog sustava pozicioniranja.

Vrijeme potrebno signalu koji putuje brzinom svjetlosti ($c \sim 299.792,458 \text{ m/s}$) da od satelita doputuje do prijamnika koristi se za izračun pseudodometra, što je prikazano sljedećim izrazom:

$$\text{pseudodomet} = c\Delta t, \quad (1)$$

gdje Δt predstavlja razliku vremena između odaslanog i primljenog signala.

Jednom izmjereno vrijeme koje je signalu potrebno da stigne od satelita do prijamnika može biti korišteno kao parametar u sustavima jednadžbi pozicioniranja. Također valja napomenuti da sateliti koriste nekoliko redova veličine točnije satove te stoga vrijeme na prijamniku može značajnije odstupati od vremena koje šalje satelit. Stoga je potrebno sinkronizirati vrijeme na

prijamniku s vremenom satelita određenim atomskim satom. Izrazi (2) – (5) [3] prikazuju sustav određivanja pozicije prijamnika u odnosu na podatke dobivene korištenjem 4 satelita:

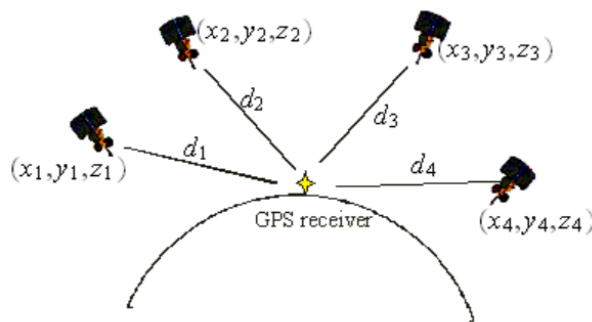
$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} + ct_b = d_1 \quad (2)$$

$$\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} + ct_b = d_2 \quad (3)$$

$$\sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} + ct_b = d_3 \quad (4)$$

$$\sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} + ct_b = d_4 \quad (5)$$

Uz poznate koordinate svakog od satelita, odnosno (x_i, y_i, z_i) za $i = 1$ do 4 te udaljenosti koja je određena pomoću izraza (1) dobivaju se četiri izraza s četiri nepoznata parametra. Tri parametra stoje za lokaciju prijamnika, odnosno (x, y, z) dok četvrti parametar, odnosno t_b određuje vrijeme pomaka stvarnog vremena na međusobno sinkroniziranim satelitima te vremena na prijamniku. Slika 1 prikazuje aktivne satelite koji sudjeluju u određivanju položaja prijamnika uz prikaz koordinata u zajedničkom koordinatnom sustavu zemlje:



Slika 1. Prikaz aktivnih satelita pri određivanju položaja [4]

Izrazi (2) – (5) prikazuju nelinearni multivarijabilni sustav, koji može biti riješen primjenom raznih matematičkih postupaka kao što je Newtonova metoda. Poznavanjem matematičke pozadine izračuna pozicije pomoću GNSS sustava može se objasniti trajanje vremena određivanja pozicije. Ukoliko uređaj ima informaciju o približnoj lokaciji na kojoj se nalazi, cijeli postupak izračuna pozicije traje relativno kratko te korisnik u samo nekoliko sekundi ima informaciju o svojoj poziciji. Ukoliko pak sustav nema ni približno točnu početnu pretpostavku

pozicije, sam algoritam neće brzo konvergirati te je potrebno vrijeme da se određenim metodama rješavanja nelinearnih multivarijabilnih sustava odredi pozicija prijarnika. Drugim riječima, algoritam rješavanja sustava nije imao početne uvijete koje bi osigurale brzu i sigurnu konvergenciju točnom rješenju [5].

1.3. Izvori pogreški pozicije kod GNSS sustava

Postoje mnogi izvori pogrešaka u GNSS mjerenju pozicije. Kao glavni uzroci pogrešaka smatraju se atmosfera, ionosfera, pogreške definiranja satelitske orbite, šum u signalima koje očitava prijarnik, višestazne dvosmislenosti i dugotrajna akumulacija pogrešaka satelitskog sata. Za dobivanje točnosti reda veličine nekoliko metara potrebna je primjena brojnih metoda anuliranja gore navedenih pogrešaka. Ponekad GNSS sateliti koriste dvofrekventni prijenos signala. Razlog prijenosa signala na različitim frekvencijama leži u tome što se pogreške u ionosferi koje su svojstvene svim promatranjima mogu modelirati te samim time značajno smanjiti primjenom satelitskih promatranja na dvije različite frekvencije. Također promatranje signala na dvije frekvencije omogućuju brže rješavanje dvosmislenosti. Također, iznimno je važna međusobna usklađenost satova svih satelita istog GNSS sustava. Ukoliko bi vremena svakog od satelita međusobno odstupala za jednu nano sekundu, detektirana pozicija prijarnika bi odstupala nekoliko kilometara od stvarne, čime bi sami podaci o poziciji prijarnika bili neupotrebljivi za bilo kakvu primjenu.

Sljedeći vrlo bitni izvor pogrešaka je utjecaj atmosfere i ionosfere na kašnjenje signala, što je u velikoj mjeri riješeno primjenom GPS RTK sustava, koji su opisani u sljedećem odjeljku.

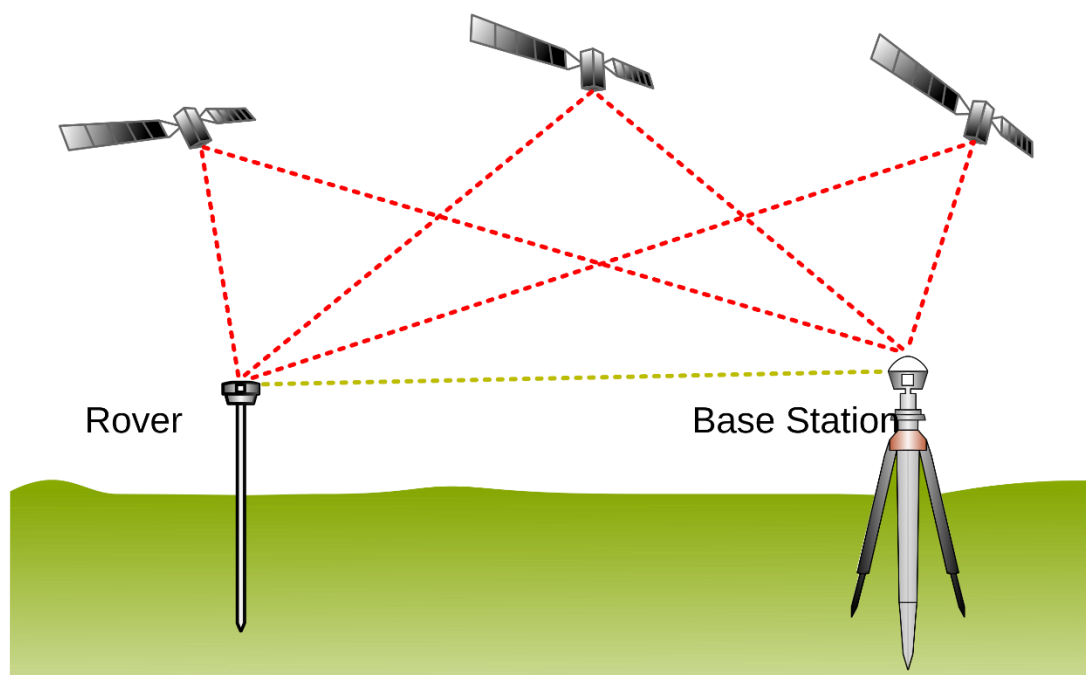
2. GPS RTK

2.1. Uvod u RTK sustav

RTK (*engl. Real Time Kinematic*) je vrsta GNSS sustava koji se koristi za precizno pozicioniranje prijamnika u stvarnom vremenu. Kao tehnologija koristi se kako bi se povećala preciznost konvencionalnih GNSS prijamnika čija se preciznost u normalnim radnim uvjetima rasipa unutar nekoliko metara. Tehnologija RTK sustava koristi se u raznim područjima poput geodezije, kartografije, graditeljstva, poljoprivrede, robotike te drugih područja gdje je potrebna subcentimetarska preciznost [6].

2.2. Elementi RTK sustava

RTK sustav se sastoji od tri glavna dijela: rovera, baze i komunikacijskog kanala. Baza je fiksni uređaj koji prima signale sa satelita te generira podatke koji se koriste za kompenzaciju poremećaja signala u atmosferi. Bazni prijamnik se postavlja na mjesto kojemu je poznata točna lokacija određena nekim drugim nezavisnim uređajem. Tijekom određivanja svog položaja, baza uspoređuje svoju poznatu lokaciju s lokacijom koja je korištenjem satelitskih signala te prema njihovoj razlici stvara datoteke koji se potom koriste kao korekcijski podaci prijamnike u neposrednoj blizini s bazom. Slika 2. prikazuje GNSS RTK sustav baze i rovera:



Slika 2. Prikaz GNSS RTK sustava baze i rovera [7]

Rover je mobilni dio RTK sustava koji prima signale sa satelita te ujedno koristi informacije dobivene od baze koje koristi za subcentimetarsko pozicioniranje. Uređaj koristi signale od satelita kako bi približno odredio svoju poziciju dok uz pomoć signala dobivenih od baze sustav provodi korekciju atmosferskih utjecaja te samim time postiže željenu točnost.

Bazna stanica se kod RTK sustava koristi za generiranje popravaka (*eng. corrections*) GNSS signala signale koje prima. Rover i baza su u neprestanoj komunikaciji koja se najčešće ostvaruje putem interneta ili radio vezom. Komunikacijski kanal roveru u stvarnom vremenu osigurava korekcijske podatke te sam sustav komunikacije mora biti iznimno robustan i stabilan u radnom prostoru sustava kako bi se RTK mogao ispravno koristiti.

2.3. Korekcijski podaci

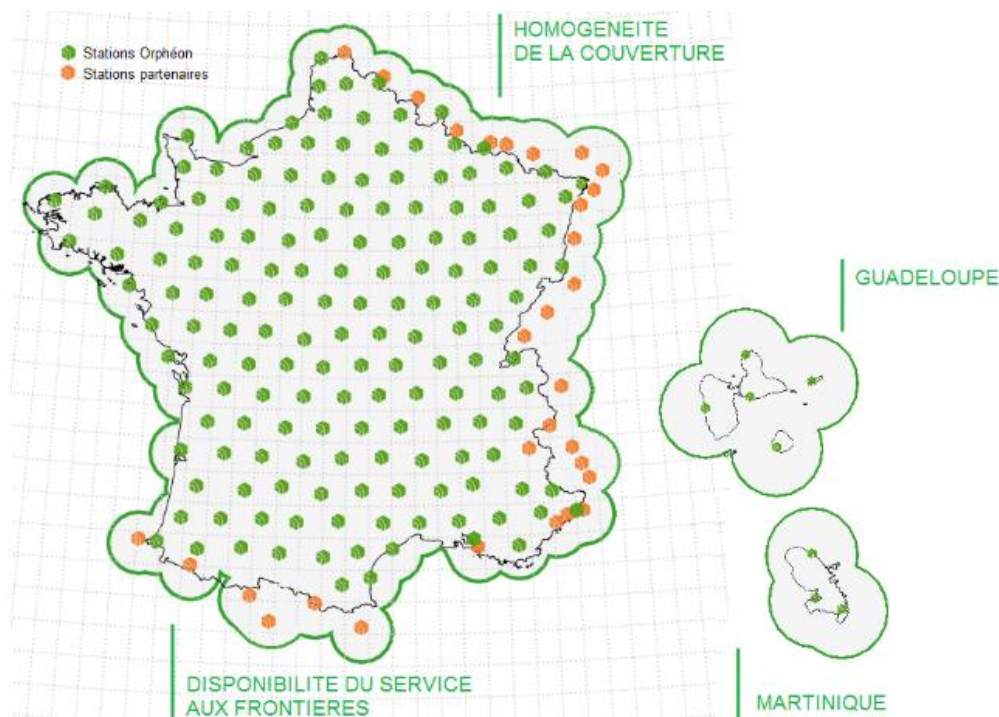
Korekcijski podaci mogu biti dobiveni iz različitih izvora. U nastavku će biti osnovni izvori korekcijskih signala.

2.3.1. Mreža referentnih stanica

Korekcijski podaci na nekom području temelje se na kvantificiranju različitih pogrešaka na istoj lokaciji. Kvantificirane pogreške se zatim koriste pri ispravljanju lokacijskih podataka kod GNSS RTK sustava koji se pretplaćuju na lokalnu bazu koja se nalazi u približno jednakim uvjetima, odnosno čiji GNSS signali primljeni od satelita prolaze kroz sloj atmosfere približno jednakih svojstva. Svojstva atmosfere su približno jednaka na širem području stoga je moguća ispravna korekcija podataka rovera i na nekoliko desetaka kilometara.

Ukoliko neko područje posjeduje linearnu i pravilnu geometrijsku mrežu referentnih stanica, pokrivenost teritorija je jedinstvena po cijelom području te takav sustav može biti korišten za generiranje korekcijskih datoteka na širokom području. Prednost korištenja linearne i pravilne mreže referentnih stanica je postizanje veće stabilnosti i točnosti u usporedbi s korekcijskim podacima dobivenim od jedne stanice. Razlog tome leži u pokrivanju šireg područja te stvaranju točnijih korekcijskih podataka na širem području, što se očitava u postizanju subcentimetarske točnosti u svakom dijelu radnog prostora korekcijske stanice. U slučaju da referentne stanice nisu uređeno postavljene, sami korekcijski podaci gube homogenost te točnost samog sustava

varira u ovisnosti o udaljenosti Rovera od najbliže baze. Slika 3. prikazuje uređeno postavljene mreže korekcijskih stanica:



Slika 3. Prikaz uređeno postavljene mreže korekcijskih stanica [8]

Korekcijski podaci opisane mreže referentnih stanica dostupni su korisnicima najčešće uz mjesečnu pretplatu, koja varira od operatera i države u kojoj se takve usluge koriste.

2.3.2. Vlastita korekcijske bazne stanice

Ukoliko se na području od interesa ne nalaze aktivne korekcijske stanice ili one iz bilo kojih razloga nisu dostupne, najčešće se podvrgava korištenju vlastitih korekcijskih baznih stanica. Njihov sastav je u osnovi jednak kao i kod rovera, jedino što iste moraju biti stacionarne. Stvarna pozicija vlastitih korekcijskih stanica se provodi na dva načina. Prvi način je da se točna pozicija vlastite korekcijske baze određuje nezavisnim RTK uređajem koji ima pristup korekcijskim podacima. Drugi način određivanja točne pozicije vlastite bazne stanice provodi se postavljanjem stanice na fiksnu lokaciju te prikupljanje satelitskih podataka tijekom duljeg vremenskog perioda (najčešće u trajanju od 72 sata) te obradu tih podataka. Rezultat analize

podataka je stvarna pozicija baze koja je dobivena iz rasipanih podataka lokacije bazne stanice. Slika 4. prikazuje vlastitu korekcijsku baznu stanicu:



Slika 4. Vlastita korekcijska bazna stanica [9]

Detaljniji opis i usporedba korekcijskih baznih stanica su dani u sljedećem odjeljku.

3. Izbor komponenti GPS RTK sustava

U ovisnosti o potrebama samog područja primjene, prilikom konstruiranja RTK sustava odabire se oprema koja će zadovoljavati željenu točnosti određivanja lokacije rovera. U sljedećem dijelu rada opisane su karakteristike korištenja raznih kombinacija RTK opreme.

3.1. Izbor baze

Prvi korak u procesu izrade RTK sustava je postavljanje sustava dobave korekcijskih signala, odnosno sustava bazne stanice. Kao što je spomenuto u prethodnom odjeljku, baznu stanicu moguće je postaviti na sljedeće načine. Prvi način je postavljanje privremene bazne stanice koja se relativno brzo postavlja te je odmah spremna za korištenje. Nedostatak privremenih baznih stanica je manja preciznost u odnosu na ostale dvije metode. Drugi način je postavljanje statičke bazne stanice čije su karakteristike dugotrajni proces postavljanja i konfiguracije dok im je glavna prednost osiguravanje najveće preciznosti. Treći način dobave korekcijskih signala nije vezan uz korisničku baznu stanicu, već podrazumijeva pretplatu i povezivanje na lokalnu mrežu satelita koji distribuiraju korekcijske podatke.

Pri procesu konfiguracije baze, važno je detaljno obraditi 4 glavna koraka: planiranje, postavljanje, konfiguraciju i validaciju rezultata. U koraku planiranja odabiru se komponente potrebne za željene performanse sustava te mjesto za postavljanje baze, uz procjenu okolišnih uvjeta koji mogu utjecati na točnost mjerenja. Sljedeći korak, odnosno korak postavljanja uključuje postavljanje antene GNSS prijemnika na odabrano mjestu te povezivanje antene s prijemnikom. Glavni cilj ovog koraka je osigurati fiksnu poziciju antene u prostoru kako bi baza bila sposobna osigurati što točnije korekcijske podatke mobilnim uređajima iz neposredne blizine. Nakon uspješnog postavljanja opreme potrebno je izvršiti konfiguraciju postavljene opreme, odnosno prijemnika tako da se omogući povezivanje s drugim GNSS uređajima koji su namijenjeni za izvršavanje određenih zadataka. Ovaj korak obično uključuje postavljanje IP adrese baze te konfiguriranje protokola prijenosa podataka ili spajanje s uređajem za prijenos telemetrijskih podataka radiovalovima. Posljednji korak pri konfiguraciji baze je validacija podataka. Nakon postavljanja opreme i provedene konfiguracije, potrebno je izvršiti ispitivanja dobivenih korekcijskih podataka. Iste je moguće validirati ukoliko imamo poznatu lokaciju na kojoj se smješta baza. Drugi način validacije ispravnosti dobivenih korekcijskih datoteka je mjerenje nekoliko različitih točaka uz pomoć prijemnika koji prima korekcijske datoteke od

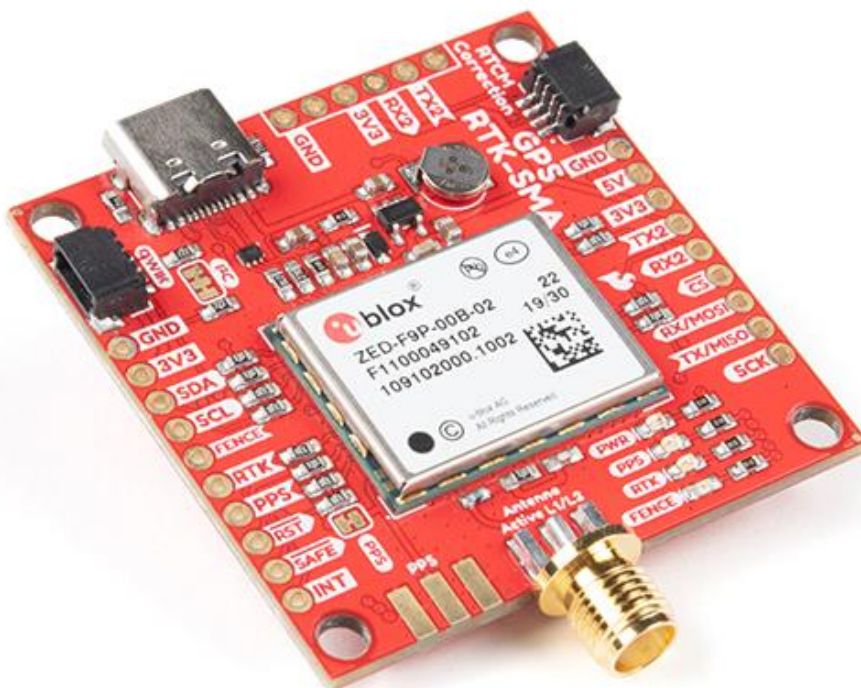
postavljene stanice te potom provođenje analize snimljenih točaka i usporedba rezultata s stvarnih točkama kako bi se ocijenila kvaliteta postavljene bazne stanice.

3.1.1. Korištenje privremene baze

U slučajevima kada je potrebno odrediti preciznu lokaciju na područjima koja nisu pokrivena mrežom korekcijskih podataka ili oni iz nekog razloga nisu dostupni korisniku, jedna od mogućnosti je korištenje privremene bazne stanice koja je lako prenosiva te se brzo postavlja i spremna je za rad u nekoliko minuta. U ovom odjeljku opisane su mogućnosti korištenja te izvedbe privremene bazne stanice.

3.1.1.1. Izrada vlastite privremene baze

Glavni cilj pri izradi privremene baze je ostvariti konfiguraciju sa što manje komponenata kako bi se ista mogla lako prenositi i što jednostavnije postavljati na terenu. Kao osnovna komponenta vlastite privremene baze koristi se GNSS RTK pločica. Slika 5. prikazuje GNSS RTK pločicu kompanije SparkFun, čija se dokumentacija nalazi se na [17]:



Slika 5. SparkFun GNSS-RTK-SMA-ZED-F9P pločica [17]

Kako bi se bazi omogućilo uspješno primanje podataka sa satelita, RTK pločica koja se koristi pri izradi baze mora imati ažuriran upravljački sustav. Jedna od mogućnosti konfiguracije upravljačkog sustava je korištenje sustava razvijenih za upravljanje GNSS uređajima, kao što je *u-center* kompanije *ublox* [9]. U izvoru [9] nalaze se poveznice za preuzimanje programa kao i uputstva za korištenje te veza s korisničkom podrškom. Kao antena najčešće se koriste uređaji koji mogu detektirati GNSS signale svih satelita kako bi se uređaj mogao što uspješnije koristiti. Slika 5. prikazuje višepojasnu antenu kompanije *ublox*:



Slika 6. Višepojasna *ublox* antena [13]

Na izvoru [13] nalazi se tehnička dokumentacija višepojasne antene prikazane na slici 5.

Antena se s prijamnikom najčešće spaja pomoću SMA kabla (*engl. SubMiniature version A*). Prilikom korištenja ovakvog sustava baza i antena mogu biti povezani kablom i do nekoliko desetaka metara, što uvelike olakšava proces razvoja sustava jer se isti može provoditi iz zatvorene prostorije dok se antena postavlja na vanjskom prostoru. Nadalje, potrebno je fiksirati

položaj antene, primjerice montiranjem na ploču koja se pričvršćuje na stalak, što je prikazano na slici 7. :



Slika 7. GNSS antena montirana na stalak [10]

Nadalje, potrebno je odrediti metodu prijenosa korekcijskih podataka do mobilnih uređaja. Jedna od mogućnosti je korištenje radio valova. Ovaj princip temelji se na posjedovanju prijamnika i predajnika koji rade na jednakoj frekvenciji. Paketi korekcijskih podataka iznose približno 2 KB te se šalju svake sekunde. Preporuke proizvođača RTK opreme su korištenje serijske telemetrijske radio opreme koja radi na 915 MHz kako bi se osiguralo da se paketi uspješno šalju od prijamnika do predajnika. Serijski radio telemetrijski uređaji pri napajaju od 100 mW imaju domet od ~300 m dok promjenom napajanja na 500 mW domet raste i do 3 km [10]. Ukoliko su potrebne veće udaljenosti, potrebno je zatražiti licencu za odašiljanje radio

valova ili koristiti slanje korekcijskih podataka putem interneta. Slika 8. prikazuje telemetrijski radio koji odašilje signale frekvencija 915 MHz:



Slika 8. Telemetrijski radio [14]

Nakon povezivanja svih komponenti, potrebno je prilagoditi bazu, definirati korištene ulazne i izlazne protokole kao i brzinu prijenosa podataka (*engl. baudrate*) kako bi se signali podataka koji se šalju uskladili s podacima koji se primaju. S ciljem očuvanja svih navedenih postavki, baza GNSS RTK modula najčešće ima ugrađenu BBR bateriju (*engl. battery backed RAM, hrv. RAM s baterijskom*).

Posljednji dio kod podešavanja baze sustava je određivanje minimalnog vremena promatranja i željene točnosti pozicije. Željena točnost pozicije odnosi se na iznos standardne devijacije. Ukoliko antena nema potpuni pregled neba te nije praćena od strane nekoliko desetaka satelita,

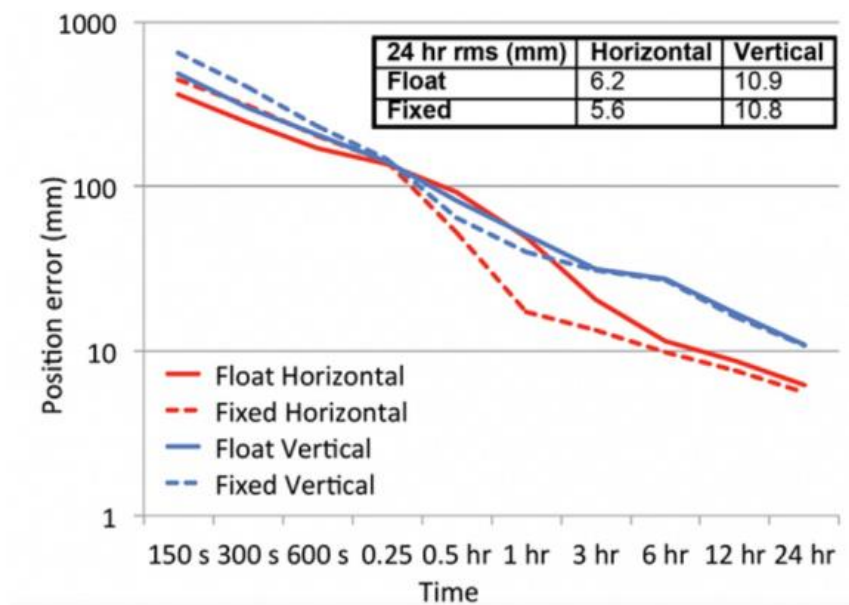
proces sakupljanja podataka do postizanja željene točnosti pozicije može potrajati i do nekoliko minuta. Nakon postizanja definirane točnosti pozicije, uređaj počinje slati korekcijske podatke na kanal koji je prethodno definiran prilikom slaganja sustava. Standardna stopa osvježavanja koja se koristi kod satelita je 1 HZ, odnosno jedan paket poruke u sekundi što nas dovodi do zaključka da korekcijski podaci nemaju potrebe biti nekoliko redova veličine brži od podataka sa satelita. Stoga se pri slanju korekcijskih podataka odabiru frekvencije koje odgovaraju frekvencijama satelita kako ne bi bez razloga zakrčili kanal prijenosa podataka korekcijskih informacija koje prijamniku neće biti od koristi zbog relativno sporog osvježavanja pozicije korištenjem GNSS satelita.

3.1.2. Korištenje stacionarne baze

U slučajevima kada se rover nalazi na udaljenosti od nekoliko kilometara od postavljene baze, potrebno je pronaći alternativni način slanja korekcijskih podataka. Jedna od mogućnosti je korištenje NTRIP protokola (*engl. Network Transport of RTCM via Internet Protocol, hrv. mrežni prijenos korekcijskih podataka putem Internet protokola*).

Nakon postavljanja antene na fiksnu lokaciju, potrebno je sustavu definirati točnu poziciju smještene antene. To je moguće odrediti korištenjem nezavisnih GNSS RTK uređaja ili ako oni nisu dostupni lokaciju baze je moguće odrediti korištenjem PPP metode (*engl. Precise Point Positioning*). Glavni problem pri određivanju pozicije je taj što orbite satelita odstupaju za nekoliko metara. Zemaljske bazne postaje odbijaju laserske zrake emitirane od satelita te se informacije o reflektiranim zrakama koriste za izračun stvarnih orbita satelita. Za dobivanje točne putanje satelita uz upotrebu podataka iz laserskih zraka te neobrađenih podataka primatelja moguće je izračunati bolje popravke te odrediti submilimetarsku točnost odabrane lokacije stacionarne baze. Nakon provedene instalacije antene, u postupku određivanja točne lokacije baze potrebno je snimati satelitske podatke unutar duljeg vremenskog razdoblja, najčešće unutar 24 sata. Sirovi podaci skupljeni tijekom duljeg perioda se potom šalju u obradni centar na PPP analizu kako bi se anulirao utjecaj pogrešne putanje satelita. Nakon provedene obrade baza može prijeći u “stacionarni mod” nakon kojeg se omogućuje davanje visoko

preciznih korekcijskih podataka. Dijagram na slici 9 prikazuje logaritamski odnos pogreške pozicije u odnosu na vrijeme:



Slika 9. Prikaz ovisnosti pogreške pozicije i vremena [15]

Iz dijagrama sa slike 9 vidljivo je kako se pogreška pozicioniranja smanjuje prilikom duljeg snimanja podataka sa GNSS satelita. Pošto se podaci koji se snimaju nalaze u sirovom formatu, sam zapis podataka kroz dulji vremenski period može poprimiti iznos reda veličine i do nekoliko gigabajta, što značajno otežava i usporava proces obrade i estimiranja točne lokacije postavljene baze. Vidljivo je također da se već unutar 6 sati snimanja postiže relativna pogreška u razmjeru desetka milimetara, što je za većinu navigacijskih uređaja za osobnu upotrebu i više nego zadovoljavajuće.

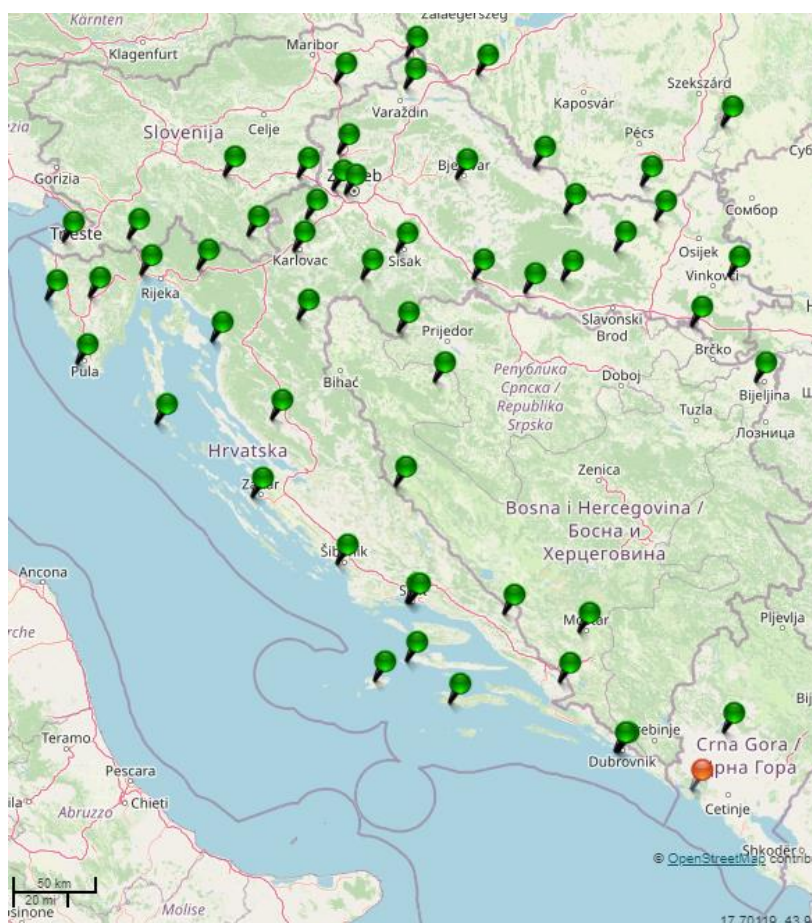
Nakon provedenog snimanja lokacijskih podataka, iste je potrebno obraditi kako bi se estimirala točna lokacija postavljene antene. Na tržištu postoje mnogo davatelja usluga obrade sirovih GNSS podataka, primjerice Kanadski CSRS-PPP servis [16]. Nakon obrade podataka servis će korisniku isporučiti izvještaj o njegovoj točnoj lokaciji uz prikaz odstupanja točnosti.

Kao što je spomenuto u prethodnom dijelu odjeljka, ukoliko je bazu potrebno koristiti na širem području nego što je područje kojeg pokrivaju otprije spomenuti radio transmiteri, potrebno je koristiti mini računalo koje će omogućiti slanje korekcijskih podataka na mrežu. U [15] je

prikazan detaljni postupak konfiguracije mini računala u procesu slanja korekcijskih podataka do rovera.

3.1.3. Korištenje korekcijskih podataka lokalnih korekcijskih stanica

Pri korištenju korekcijskih podataka sa lokalne mreže korekcijskih stanica, potrebno je odabrati operatera sa dobrom pokrivenošću baza korekcijskih stanica. Nadalje, potrebno je proći postupak registracije te potpisivanje ugovora u kojima se navode područja u kojima privatni korisnik ne smije koristiti njihove usluge (primjerice vojne svrhe). Većina davatelja korekcijskih usluga je komercijalno te je potrebno plaćati mjesečne/godišnje pretplate kao i korišteni promet korekcijskih podataka (najčešće po minutama korištenja RTK korekcijskih podataka). Primjerice, najpoznatiji davatelj korekcijskih podataka u Hrvatskoj je CROPOS [18] čija mreža se sastoji od 55 korekcijskih stanica koje su raspodijeljene po teritoriju Republike Hrvatske. Slika 10. prikazuje raspored CROPOS korekcijskih stanica na području Republike Hrvatske:



Slika 10. Prikaz CROPOS korekcijskih stanica na području Republike Hrvatske [18]

Sa slike 10. vidljivo je kako korekcijske stanice ne tvore pravilnu mrežu te su razmaci između korekcijskih stanica daleko veći od propisanih 20 km, što za posljedicu ima neravnomjerne točnosti korekcijskih podataka na različitim dijelovima države. Usluge korekcijskih podataka od lokalnih distributera korekcija mogu se koristiti ukoliko se područje rada nalazi na prostorima koji su pokriveni korekcijskim stanicama, dok je za sve ostale slučajeve potrebno izraditi ili kupiti vlastitu baznu stanicu, što je detaljnije opisano u prethodnom dijelu ovog odjeljka. Izvor [20] prikazuje konfiguraciju rovera korištenjem korekcijskih podataka dobivenih od lokalnog distributera.

3.2. Izbor rovera

Izbor komponenti rovera, kao i izbor komponenti baze, ovisi o potrebnoj točnosti sustava. Prvi korak pri konfiguraciji sustava rovera je izbor GNSS RTK pločice, otprije prikazana u odjeljku 3.1.1.1. *Izrada vlastite privremene baze*. Nadalje, potrebno je odabrati antenu koja je kompatibilna s odabranom pločicom te frekvencijskim područjem signala koji će se primati sa odabranih satelita. Posljednji korak u procesu konfiguracije rovera je odabir načina primanja korekcijskih podataka, što je također prikazano u odjeljku 3.1.1.1. *Izrada vlastite privremene baze*.

3.3. Korištenje integriranih sustava baze i rovera

Za razliku od prethodno spomenutih sustava, integrirani sustav rovera predstavlja spoj svih komponenti potrebnih za postizanje visoke razine točnosti iz GNSS signala.

Integrirani sustavi se najčešće sastoje od GNSS RTK pločice, LiPo (*engl. Lithium polymer, hrv. Litijske polimerne*) baterije, modula za spajanje, antena te mikroupravljača koji se koristi za upravljanje sustava te se može jednostavno modificirati korištenjem Arduino IDE ili srodnih editora. Korištenjem Bluetooth modula otvara se široki spektar mogućnosti nakon spajanja GNSS uređaja s pametnim telefonom. Pametni telefon može služiti kao distributer korekcijskih podataka od bazne stanice ili za promjenu parametara GNSS RTK sustava u stvarnom vremenu, bez potrebe za fizičkim povezivanjem GNSS uređaja sa računalom.

Kao primjer integriranog sustava baze može se navesti RTK Facet kompanije SparkFun [21], prikazan na slici 11. :



Slika 11. SparkFun RTK Facet integrirani sustav [21]

RTK Facet prikazan na slici 11. može raditi u 4 načina rada: GNSS pozicioniranje kao samostalni Rover, GNSS pozicioniranje uz korištenje korekcijskih RTK podataka, samostalna bazna stanica te NTRIP bazna stanica.

Ukoliko se RTK Facet koristi kao samostalni Rover, maksimalna preciznost koju može postići iznosi 30 cm. Uz korištenje RTK podataka Facet postiže točnost od 1,4 mm. Facet se također može koristiti kao bazna stanica te koristiti za izračun i slanje korekcijskih podataka do RTK uređaja iz okoline putem radio signala ili interneta (FACET).

Zbog svoje robusnost, jednostavnosti postavljanja kao i široke mogućnosti primjene, integrirani sustavi su vrlo često primjenjivi u slučajevima kada je potrebno precizno određivanje pozicije.

4. Zaključak

U slučaju da se GNSS sustavu ne može osigurati dostupnost lokacijskih podataka iz 30 satelita koji bi sustavu omogućili preciznost od nekoliko desetaka milimetara, podliježe se korištenju RTK sustava. RTK sustavi su visokoprecizni GNSS sustavi koji koriste korekcije kako bi se postigla subcentimetarska točnost pri mjerenju položaja i visine. Sastoji se od mobilne GNSS antene, bazne stanice te pomoćnih uređaja za prijenos korekcijskih podataka između bazne stanice i mobilnog uređaja ili rovera.

Glavna prednost RTK sustava u odnosu na druge GNSS sustave je njegova visoka točnost i brzina. RTK sustavi omogućuju subcentimetarsku točnost, što je potrebno u mnogim primjenama, kao što su precizno mjerenje granica zemljišta, postavljanje temelja za građevine, precizno određivanje pozicije mobilnog robota te slične primjene. Uz to, RTK sustavi omogućuju korisnicima dobavu podataka u stvarnom vremenu, što znači da se mjerenja mogu provoditi brzo i učinkovito što im daje primjenu u različitim okruženjima i situacijama.

Zbog svoje robusnost, jednostavnosti postavljanja kao i široke mogućnosti primjene, za svoj diplomski rad predlažem korištenje dva integrirana sustava, po jedan za bazu i rover. Sinergija dva integrirana sustava će mobilnom robotu otvoriti široki spektar mogućnosti pri preciznoj vanjskoj navigaciji, što ne bi bilo moguće korištenjem konvencionalnih GNSS prijamnika.

5. Planovi za nastavak diplomskog rada

Nakon upoznavanja s GNSS RTK sustavima te pozadinom njihova rada, u diplomskom radu bi se posvetio implementaciji takvog sustava na problemu kretanja mobilnog robota kroz vanjski prostor. Za početak bi se upoznao s mobilnim robotom hodačem kompanije Boston Dynamics naziva SPOT uz analizu trenutnih mogućnosti i ograničenja u zadacima vanjske navigacije.

Zatim bi se fokusirao na uspostavljanje RTK sustava koji bi SPOT-u omogućio određivanje svoje točne pozicije, odnosno subcentimetarsku lokalizaciju u prostoru.

Na posljétku diplomskog rada implementirao bi globalni planer putanje koji bi SPOT-u omogućio kretanje do željene točke u prostoru, uz lokalno izbjegavanje prepreka.

LITERATURA

- [1] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, i E. Wasle (2007), GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer; 1 edition,
- [2] Dawoud, S. (2012). GNSS principles and comparison. Potsdam University.
- [3] Kaplan, E. D., & Hegarty, C. (Eds.). (2017). Understanding GPS/GNSS: principles and applications. Artech house.
- [4] <https://www.math.tamu.edu/~dallen/physics/gps/gps.htm> (16.04.2023.)
- [5] <https://www.gps.gov/systems/gnss/> (10.04.2023.)
- [6] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-gps-rtk/all> (15.04.2023)
- [7] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Real_time_kinematic.svg (19.04.2023.)
- [8] <https://reseau-orpheon.fr/en/the-fields-of-application-of-orpheon/precision-agriculture/the-principle-of-gps-rtk-correction/> (16.04.2023.)
- [9] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-build-a-diy-gnss-reference-station/all#introduction> (17.04.2023.)
- [10] <https://www.u-blox.com/en/product/u-center> (18.04.2023.)
- [11] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/setting-up-a-rover-base-rtk-system> (18.04.2023.)
- [12] <https://www.sparkfun.com/products/19032> (18.04.2023.)
- [13] <https://www.sparkfun.com/products/15192> (19.04.2023.)
- [14] <https://www.sparkfun.com/products/19032> (19.04.2023.)
- [15] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-build-a-diy-gnss-reference-station/all#introduction> (20.04.2023.)
- [16] <https://webapp.csrscs.nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en> (21.04.2023.)
- [17] <https://www.sparkfun.com/products/16481> (21.04.2023.)
- [18] <https://www.cropos.hr/> (21.04.2023.)
- [19] <https://learn.sparkfun.com/tutorials/gps-rtk-hookup-guide/all#connecting-the-gps-rtk-to-a-correction-source> (22.04.2023.)
- [20] <https://gnss.cropos.hr/Map/SensorMap.aspx> (22.04.2023.)
- [21] <https://www.sparkfun.com/products/19984> (22.04.2023.)