Povećanje točnosti lociranja satelitskim navigacijskim sustavima komunikacijom s dodatnom prijamničkom stanicom

Petrec, Dario

Master's thesis / Diplomski 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:119:631551

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-27**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Dario Petrec

POVEĆANJE TOČNOSTI LOCIRANJA SATELITSKIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA KOMUNIKACIJOM S DODATNOM PRIJAMNIČKOM STANICOM

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

POVEĆANJE TOČNOSTI LOCIRANJA SATELITSKIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA KOMUNIKACIJOM S DODATNOM PRIJAMNIČKOM STANICOM

ENHANCING PRECISION OF POSITIONING USING SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS BY COMMUNICATION WITH AN ADDITIONAL RECEIVER STATION

Mentor: doc. dr. sc. Mario Muštra

Student: Dario Petrec
JMBAG: 0135230694

Zagreb, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 5. travnja 2019.

Zavod: **Zavod za inteligentne transportne sustave**
Predmet: **Lokacijski i navigacijski sustavi**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 5300

Pristupnik: **Dario Petrec (0135230694)**
Studij: Promet
Smjer: Informacijsko-komunikacijski promet

Zadatak: **Povećanje točnosti lociranja satelitskim navigacijskim sustavima komunikacijom s dodatnom prijamničkom stanicom**

Opis zadatka:

Temeljito opisati princip rada satelitskih navigacijskih sustava koji su raspoloživi korisnicima na globalnoj razini u ovom trenutku. Objasniti mogućnost povećanja točnosti određivanja lokacije korisnika uporabom metode Real-Time Kinematic (RTK). Analizirati izvedbu sustava i programskih alata koji omogućavaju lociranje korisnika uporabom metode RTK. Izmjeriti točnost određivanja lokacije primjenom sustava Here+ RTK te usporediti dobivene rezultate s mjerenjima provedenima različitim satelitskim prijamnicima koji ne koriste metodu RTK.

Mentor:

doc. dr. sc. Mario Muštra

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

Zahvaljujem se svojemu mentoru doc. dr. sc. Mariju Muštri na usmjeravanju, strpljenju, pomoći i vremenu koje je uložio tokom pisanja ovoga rada, na predavanjima koje je učinio vrlo zanimljivima i omogućavanja rada na znanstvenom projektu iz kojega sam stekao nova znanja. Također se zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i prijateljima koji su mi bili podrška tokom studija i svaki dan učinili ljepšim.

POVEĆANJE TOČNOSTI LOCIRANJA SATELITSKIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA KOMUNIKACIJOM S DODATNOM PRIJAMNNIČKOM STANICOM

Sažetak

Lociranje i navigiranje je svakodnevna potreba. Sve više ekonomskih djelatnosti ovisi o pouzdanom sustavu lociranja s velikom preciznošću. Promet je jedan od takvih sustava. Novim tehnikama pozicioniranja moguće je postići preciznost lociranja do centimetarske razine. Kroz rad je opisan princip pozicioniranja putem satelitskih navigacijskih sustava te su uspoređena mjerenja dobivena iz navigiranja bespilotne letjelice GPS prijamnikom i RTK prijamnikom uz dodatnu prijamničku stanicu.

Ključne riječi: Real Time Kinematics, RTK, globalni navigacijski satelitski sustavi, GNSS, satelitska navigacijska tehnika

ENHANCING PRECISION OF POSITIONING USING SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS BY COMMUNICATION WITH AN ADDITIONAL RECEIVER STATION

Summary

Locating and navigating is a daily necessity. More economic activities depend on a reliable locating system with great precision. Traffic is one of such systems. With new positioning techniques, it is possible to achieve location accuracy up to the centimeter level. This work describes the principle of positioning with satellite navigation systems, and compares the measurements obtained from navigating an UAV with a GPS receiver and an RTK receiver with an additional receiver station.

Keywords: Real Time Kinematics, RTK, Global Navigation Satellite System, GNSS, Satellite Navigation Technique

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Satelitski navigacijski sustavi 1
   2.1. GPS 2
   2.2. GLONASS 5
   2.3. Galileo 6
   2.4. BeiDou 8
   2.5. Princip pozicioniranja satelitskim navigacijskim sustavima 10
   2.6. Sustavi za poboljšanje preciznosti GNSS-a 16
3. Pozicioniranje tehnikom dodatne prijamničke stanice RTK 20
   3.1. Princip rada tehnike RTK 20
   3.2. Standardi RTK korekcijskih signala 24
4. Pregled i analiza potrebnih alata za pozicioniranje tehnikom RTK i metodologija rada 27
   4.1. Bespilotna letjelica i GNSS prijamnici 27
   4.2. Praktična izvedba procjene točnosti lociranja primjenom sustava Here+ RTK 31
5. Rezultati mjerenja 38
6. Zaključak 49

Literatura 50

Popis ilustracija 53

Popis tablica 54

Popis grafikona 54

1. Uvod

Ljudi su se od samih početaka nastojali navigirati u prostoru, od prvih primitivnih načina poput ostavljanja oznaka, obilježavanja drveća, preko navigacije zvijezdama, a kasnije uz pomoć kompasa, pa sve do danas kada postoje vrlo sofisticirani sustavi satelitske globalne navigacije. Današnje društvo je vrlo ovisno o ovakvom sustavu navigacije, poput mnogih djelatnosti vezanih uz informaciju položaja poput dostave, upravljanje flotama vozila, geodetskih izmjera, predviđanja gustoće prometa, a sve bliže smo pojavi autonomnih vozila u svim granama prometnog sustava koji će zahtijevat još čvršću integraciju u sve aspekte naših života. Ekonomska važnost ovakvih sustava se mjeri u milijardama. Kako danas svi pametni telefoni imaju prijamnike za satelitsku navigaciju, mnogi mogućnost određivanja položaja imaju na dlanu, ali nisu upoznati s načinom određivanja položaja ili o njoj ne razmišljaju.

Bespilotnom letjelicom su odrađeni letovi pri kojima se letjelica navigirala GPS prijamnikom te RTK prijamnikom. Nakon obavljenih letova uspoređivat će se mjerenja koja su prikupljena. Cilj ovog diplomskog rada je ispitati mogućnost praćenja trajektorije leta bespilotne letjelice prilikom navigiranja tehnikom RTK i usporediti s navigiranjem samostalnim GPS prijamnikom. U svrhu obrade mjerenja izrađena je skripta u programskom jeziku Python uz primjenu algoritama OpenCV biblioteke. Ovaj rad sastavljen je od šest poglavlja.

U uvodnom poglavlju predstavljen je cilj i struktura rada.

U drugom poglavlju je objašnjeno što su globalni satelitski navigacijski sustavi, pri čemu su navedeni najbitniji te je pružen pregled arhitekture i princip rada definiranih sustava.

Tehnika RTK i njezina arhitektura objašnjene su u trećem poglavlju.

Četvrto poglavlje donosi opis svih uređaja potrebnih za navigaciju tehnikom RTK i alata korištenih za obradu prikupljenih mjerenja.

U petom poglavlju je opisan način obrade podataka i prezentirani su rezultati mjerenja.

U šestom i posljednjem poglavlju iznesen je zaključak na temelju prethodnih poglavlja.

2. Satelitski navigacijski sustavi

Pozicioniranje pomoću satelitskih sustava je određivanje položaja mjesta na kopnu, na moru, u zraku i u svemiru pomoću umjetnih satelita. Prethodnik današnjih modernih sustava za pozicioniranje je Mornarički navigacijski satelitski sustav (engl. *Navy Navigation Satellite System* - NNSS), koji se naziva i tranzitni sustav. Ovaj sustav je bio osmišljen krajem 1950-ih, a razvijen 1960-ih za vojnu, a kasnije i civilnu primjenu. Sustav se sastojao od šest satelita u niskim zemaljskim orbitama (engl. *Low Earth Orbit* - LEO) na visinama od oko 1100 kilometara. Sateliti su koristili dvije prijenosne frekvencije (150 i 400 MHz). Prijamnici koji bi mogli koristiti samo jednu od dvije frekvencije (označeni su kao jednofrekvencijski prijamnici) postizali su točnost od 100 metara. Točnost prijamnika koji su koristili dvije frekvencije poboljšana je na oko 20 metara. Prvi sustavi imali su dva glavna nedostatka. Prvi problem bile su velike vremenske razlike između dvaju satelitskih prolaza. Drugi problem bio je relativno mala navigacijska točnost, uz osobito loše određivanje visine. [1]

Govoreći o modernim satelitskim sustavima, prije svega se misli na globalne satelitske sustave pozicioniranja, GNSS, što je zajednički naziv za GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou. Navigacijski sustav je mjerenjem vremena i udaljenosti te globalnim pozicioniranjem, tzv. NAVSTAR GPS, razvila američka vojska kako bi se riješili nedostaci ranijih sustava. Za razliku od prvih sustava, GNSS brzo, točno i ekonomično pruža informaciju o položaju, vremenu i brzini objekta kojeg se locira bilo gdje na svijetu u bilo koje vrijeme. GLONASS ruska je inačica GPS-a i njime upravlja ruska vojska. GLONASS se razlikuje od GPS-a u pogledu upravljačkog segmenta, svemirskog segmenta i strukture signala. Galileo je europski doprinos GNSS-u. Također treba spomenuti i kineski sustav poznat pod imenom BeiDou, odnosno sustav s najmodernijim satelitima koji je nedugo zaživio u punoj konstelaciji. Svi navedeni sustavi funkcioniraju na sličnom principu i arhitektura im je koncipirana na tri segmenta, svemirski, kontrolni i korisnički, koji će detaljnije biti objašnjeni na primjeru sustava GPS u ovoj cjelini. Osim toga, spomenuti se sustavi nadopunjuju sustavima za povećanje preciznosti poput sustava SBAS (engl. *Satellite Based Augmentation Systems*) te GBAS (engl. *Ground Based Augmentation Systems*). Ovi sustavi omogućuju povezivanje postojeće satelitske konstelacije srednje zemaljske orbite s geostacionarnom orbitom ili geosinkronim satelitima. [1]

2.1. GPS

GPS sustav se dijeli na tri temeljna segmenta, a to su svemirski segment, kontrolni segment i korisnički segment. Iako je ovdje objašnjena segmentacija na primjeru GPS sustava ostali GNSS sustavi dijele istu podjelu po segmentima, ali se razlikuju u arhitekturi pojedinog segmenta.

Svemirski segment sačinjen je od 32 satelita smještenih u srednjoj zemljinoj orbiti (engl. *Medium Earth Orbit* – MEO) na visini od 20200 kilometara s inklinacijom od 55° u odnosu na ekvator. Sateliti su raspoređeni unutar 6 orbitalnih ravnina kako bi bilo omogućeno da se iznad horizonta barem uvijek nalazi 4 do 6 satelita s periodom ophoda od 12 sati. Primarna zadaća svemirskog segmenta je generiranje i odašiljanje signala potrebnih za utvrđivanje položaja, vremena i brzine. Svaki satelit emitira jedinstven signal primjenom pseudoslučajnog koda (engl. *Pseudo-Random Code* – PSC) radi identifikacije s kojeg satelita je signal poslan. Signali su emitirani pomoću dvije prijenosne frekvencije na koje se moduliraju kodovi za pozicioniranje i jedinstvene navigacijske poruke istog sadržaja koje se šalju na sve satelite. U satelitima su smješteni visoko precizni i stabilni atomski satovi. Atomski satovi osiguravaju usklađenost navigacijskih poruka i osiguravaju stabilnost signala. [2], [3]

Kontrolni segment sastoji se od glavne upravljačke stanice, opažačkih stanica i zemaljskih antena. Glavna kontrolna stanica prikuplja podatke s opažačkih stanica, koje su raspoređene širom Zemlje, obavlja praćenje satelita zbog određivanja njihovih orbita, usklađivanja takta i vremenske sinkronizacije atomskih satova. Izračunati podaci zatim se formiraju u navigacijsku poruku koja se prosljeđuje prema zemaljskim antenama za slanje prema satelitima. Prijenos na svaki satelit obavlja se svakih osam sati. Ako je onemogućena komunikacija između glavne kontrolne stanice i satelita, na svakom satelitu je pohranjena zadnja navigacijska poruka koja omogućuje predviđanje svih potrebnih informacija za pozicioniranje, što dovodi do postepene degradacije u točnosti pozicioniranja. Sateliti mogu raditi samostalno nekoliko mjeseci ako izgube kontakt sa kontrolnim segmentom. [3], [4]

Korisnički segment sastoji se od opreme koja obrađuje primljene signale s GPS satelita i koristi ih za dobivanje i primjenu informacija o lokaciji i vremenu. Prijamnik mjeri pseudoudaljenost između sebe i satelita te rješavanjem navigacijskih jednadžbi utvrđuje

poziciju i vrijeme. Primjeri takvih prijamnika variraju od jednostavnih koji svoju primjenu nalaze u pametnim satovima do sofisticiranih i naprednih uređaja poput prijamnika u vojnim zrakoplovima.

Satelitski signali generiraju se i kontinuirano odašilju od strane satelita u tzv. radio-frekvencijskom L pojasu. GPS koristi tri frekvencije u L pojasu, vidljive u tablici 1, od koji se primarno koriste frekvencije pojasa L1 i L2. Frekvencije signala iz tablice 1 su izvedene iz osnovne frekvencije f_0 koja iznosi 10,23 MHz. Osnovna frekvencija je generirana atomskim satovima. Stvarna frekvencija koja se koristi u satelitu je 10,22999999543 MHz, ali radi kompenzacije relativističkih učinaka, čini se kao 10,23 MHz kada se promatra sa Zemlje. Izračun frekvencija proizlazi iz sljedećih izraza: [3], [5]

$$f_{L_1} = 154 \times 10{,}23\ \text{MHz} = 1575{,}42\ \text{MHz} \quad (2.1.1)$$

$$f_{L_2} = 120 \times 10{,}23\ \text{MHz} = 1227{,}60\ \text{MHz} \quad (2.1.2)$$

$$f_{L_5} = 115 \times 10{,}23\ \text{MHz} = 1176{,}45\ \text{MHz} \quad (2.1.3)$$

Signal je moduliran tehnikom binarne modulacije faze (engl. *Binary Phase Shift Keying* - BPSK), a prijenos se odvija tehnikom višestrukog pristupa kodnom raspodjelom kanala (engl. *Code Division Multiple Access* – CDMA). Signal nastaje tako da se modulira pseudoslučajni kod sa podacima na prijenosni signal u L pojasu. Sukladno rečenom, može se zaključiti da komponente GPS signala jesu val nosioc (radiosignal određene frekvencije), pseudoslučajni kod (jedinstveni kod za svaki satelit pomoću kojeg prijamnik određuje vrijeme prijenosa radiosignala) i navigacijska poruka (binarna poruka s ključnim informacijama o satelitu i greškama). [1], [3]

GPS sustav omogućuje razlčitu točnost pozicioniranja, ovisno o tome koja vrsta korisnika mu pristupa. Sukladno tome, GPS pruža dvije usluge određivanja položaja, pri čemu svaka usluga koristi poseban PRN kod, što dovodi do različite točnosti mjerenja pseudoudaljenosti, a samim time do mjerenja u točnosti pozicije i vremena. Usluga standardnog pozicioniranja (engl. *Standard Positioning Service* - SPS) obavlja prijenos signala samo preko signala L1, kojemu pristup imaju svi korisnici i koji se koristi u civilne svrhe. S druge strane, usluga preciznog pozicioniranja (engl. *Precise Positioning Service* - PPS), koristeći kombinaciju signala L1 i L2 ima mogućnost preciznijeg pozicioniranja, ali

samo za autorizirane korisnike, odnosno vojne namjene. Prijenos signala na dvije frekvencije omogućuje prijamnicima u korisničkom segmentu da ponište negativan utjecaj ionosfere na lociranje, što jedan od najčešćih uzroka pogreške. [1], [3]

Tablica 1. Specifikacija GPS signala

Specifikacija kanala	**L1**	**L2**	**L5**
Frekvencija signala nosioca [MHz]	1575,42	1227,60	1176,45
Primjena	C/A, P i M kod	Autorizirani korisnici	Safety of Life poruke

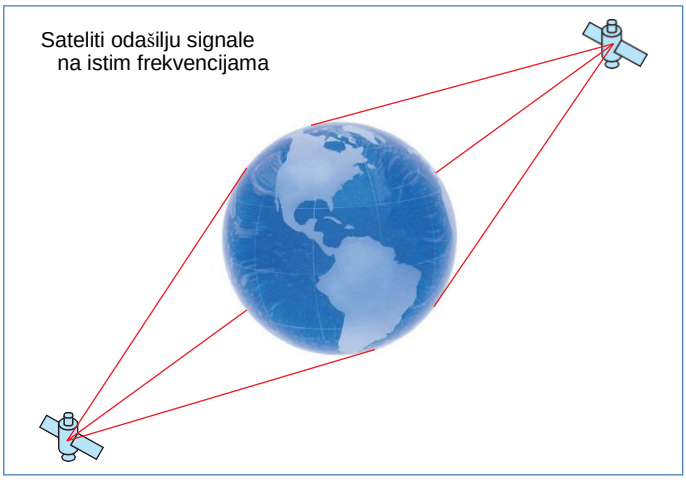
Izvor: [3]

Razlike u točnosti pozicioniranja nastaju jer se prilikom modulacije signala koriste različiti pseudoslučajni kodovi za mjerenje udaljenosti od satelita do prijamnika, što je prikazano na slici 1. Nadalje, moguće je razlikovati sljedeće PRN kodove i poruke koje se moduliraju na signale nosioce:

- C/A kod (engl. *Coarse/Acquistion code*) sekvenca od 1023 bita u pseudoslučajnom rasporedu koji se emitira s periodom od 1 milisekunde. Relativno kratko trajanje koda omogućava brzo prihvaćanje signala, ali je kod osjetljiviji na smetnje. Ovaj kod se koristi za SPS uslugu i emitira se samo na frekvenciji f_1 pomoću koje se modulira signal L1. [3], [4]
- P kod (engl. *Precision code*) je sekvenca od 10^{14} bitova u pseudoslučajnom rasporedu čiji period iznosi 266,41 dan, odnosno 38,058 tjedana. Podijeljen u tjedne odsječke, svaki satelit emitira jedan, različiti, odsječak po čemu se jednoznačno prepoznaju. Emitira se na dvije frekvencije f_1 i f_2, odnosno dva modulirana signala L1 i L2. [4]
- Navigacijska poruka (engl. *Navigation message* ili *Datasignal*) predstavlja binarnu poruku koja sadrži podatke o satelitskim putanjama, podatke za korekciju ionosferskog odstupanja i odstupanja atomskog sata, satelitski alamanh te informacije o stanju ispravnosti satelita. Modulira se u oba signala brzinom od 50 bit/s. Također sadrži riječ HOW koja omogućuje prijamniku prijelaz iz C/A koda u P kod. [4]

2.2. GLONASS

Puni naziv ovog GNSS-a je *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* razvijen 1970-ih godina od strane SSSR-a kao konkurencija GPS-u što je moguće naslutiti iz njegova imena. Svemirski segment ovoga sustava je napredovao kroz godine te je tako prvi satelit lansiran 1984. godine, a prvu generaciju satelita čine Block IIa, IIb i IIv. Kasnije u upotrebu dolaze sateliti druge generacije GLONASS-M (ili Uragan-M) pri čemu „-M" označava modernizaciju. Navedeni sateliti imaju duži životni vijek, ali i dalje zaostaju za GPS-om. Značajniji iskorak postiže se trećom generacijom satelita GLONASS-K (ili Uragan-K), čiji životni vijek je od 10 do 12 godina, a osim duljeg životnog vijeka uz FDMA tehniku razmatra se i korištenje CDMA tehnike višestrukog pristupa. GLONASS od 2011. godine postiže punu operabilnost. Konstelaciju sustava GLONASS čine 24 satelita raspoređenih u 3 MEO orbite, pri čemu se u svakoj nalazi po 8 satelita, ali postoje i dodatna 3 satelita kao rezerva. Orbite su gotovo kružne sa inklinacijom od 64,8°, a sateliti se nalaze na nadmorskoj visini od 19100 kilometara s nominalnim periodom prolaza od 11 sati. [2], [3]



Slika 1. Položaj antipodalnih satelita, [2]

Sateliti za komunikaciju koriste signale u L pojasu kao i GPS sustav. Za razliku od GPS satelita koji dijele iste frekvencije, svaki satelit GLONASS emitira se na određenoj frekvenciji unutar definiranog opsega frekvencija. GLONASS L1 signal koristi frekvencijski spektar u rasponu 1598,0625 - 1609,3125 MHz te za L2 1242,9375 - 1251,6875 MHz. Navedena frekvencija određuje broj frekvencijskog kanala satelita i dopušta prijamnicima identifikaciju satelita tehnikom FDMA. Planiranje modernizacije GLONASS-a uključuje prijenos CDMA signala u pojasevima L1, L2 i L3, pa čak i u opsegu GPS L5 signala. Signali

u L1 i L2 pojasu moduliraju se putem P-koda za usluge visoke preciznosti tzv. PPS usluge koje se koriste u vojne svrhe te C/A kodom za usluge standardnog pozicioniranja SPS, rezerviranim za civilne namjene. Sustav se temelji na 24 satelita koji koriste 15 frekvencija, što se postiže tako da antipodalni sateliti emitiraju signal na istoj frekvenciji. Antipodalni sateliti su u istoj orbitalnoj ravnini, ali su razdvojeni za 180°, što znači da neće doći do interferencije signala, jer se sateliti nikada neće pojaviti u isto vrijeme na istom mjestu u odnosu na prijamnik na Zemljinoj površini što je vidljivo iz slike 1. [2]-[4]

Kontrolni segment GLONASS-a sastoji se od kontrolnog centra i mreže postaja za praćenje rada satelita smještenih diljem Rusije. Kontrolni segment je sličan onome u GPS-u, nadzire status satelita, određuje korekcije efemerida i odstupanja satelitskog sata u odnosu na GLONASS vrijeme i koordinirano univerzalno vrijeme (engl. *Coordinated Universal Time* - UTC). Ispravci se ažuriraju dva puta dnevno. [3]

2.3. Galileo

Inicijativom Europske Unije, koja je prepoznala značaj satelitske navigacije kao ekonomski strateškog sustava, započinje financiranje projekta u suradnji s Europskom Svemirskom Agencijom (engl. *European Space Agency* – ESA), čiji je cilj razvoj europskog satelitskog navigacijskog sustava. Njihova suradnja rezultirala je razvojem Galilea, europskog satelitskog sustava namijenjenog prvenstveno civilnoj uporabi, za razliku od vojno orijentiranih sustava poput GPS-a, GLONASS-a i BeiDou-a, kako bi se smanjila ovisnost o GPS-u, čime su se u konačnici poboljšale navigacijske sposobnosti na području Europe.

Potpuna konstelacija sustava Galileo sastojat će se od 30 satelita od kojih će 6 imati ulogu rezervnih. Sustav trenutno ima operativna 24 satelita gdje su 22 dostupna svima na korištenje, a 2 su u fazi testiranja. Završetkom 2020. godine planirano je osposobljavanje sustava za rad u punoj konstelaciji. Sateliti su ravnomjerno raspoređeni oko tri orbitalne ravnine na nadmorskoj visini od 23222 km i nagnutih pod kutom od 56° u odnosu na ekvator, a svakom satelitu treba oko 14 sati da obiđe Zemlju. Dva satelita u svakoj ravnini bit će rezervni u stanju pripravnosti ako dođe do problema u radu operativnih satelita. Svemirski segment je prošao kroz nekoliko faza razvoja. U prvoj, eksperimentalnoj fazi, su lansirana dva satelita GIOVE-A i GIOVE-B između 2005. i 2008. godine. Eksperimentalna faza imala je

zadatak ispitivanja tehnologija koje će se koristiti u operativnom okruženju sustava te ispitivanje nadzornog okruženja i generiranje Galileo signala kako bi se prilagodila korisnička oprema za rad sa sustavom. U drugoj fazi tzv. provjera u orbiti (engl. *In-Orbit Validation* – IOV), lansirana su dva para operativnih satelita, prvi par 2011., a drugi 2012. godine. Nakon toga uslijedila je i treća, završna faza koja traje od 2014. godine u kojoj se postupno lansiraju sateliti sve dok se ne postigne njihova puna operativna sposobnost (engl. *Fully Operational Capability* – FOC). Sateliti lansirani u završnoj FOC fazi imaju jednake mogućnosti kao i sateliti iz IOV faze, ali s poboljšanim performansama poput veće snage prijenosa signala. [3], [6], [7]

Tablica 2. Galileo signali

Kanal	**E1**	**E6**	**E5a**	**E5b**
Frekvencija signala [MHz]	1575,42	1278,75	1176,45	1207,14
Galileo usluga	PRS, OS, CS, SoL	PRS, CS	OS	OS, CS, SoL

Izvor: [3]

Galileo emitira signale u L pojasu kao i ostali GNSS-ovi na kanalima E1, E6, E5a i E5b. Frekvencijski spektar pojedinog kanala i njegova primjena vidljivi su iz tablice 2. Kao i kod GPS sustava, svi sateliti koriste istu frekvenciju, a za prijenos signala se koristi CDMA tehnika višestrukog pristupa. Signali su dizajnirani tako da podrže različite usluge koje pruža sustav na temelju različitih korisničkih potreba. Usluge koje ovaj navigacijski sustav omogućuje su: [1]-[3]

- OS – otvorena usluga (engl. *Open Service* – OS) besplatna i dostupna svim korisnicima ovog sustava bez dodatnih naknada. Usluga nudi korištenje do tri zasebne frekvencije signala. Jednofrekvencijski prijamnici će pružiti performanse slične GPS C/A usluzi. Prijamnici za pružanje OS usluge koriste kombinaciju Galileo i GPS signala, koji poboljšavaju performanse u teškim uvjetima kao što su urbana područja.
- PRS – javno regulirana usluga (engl. *Public Regulated Service* – PRS) pod nadzorom vlade, a namijenjena za korištenje jedinicama javne uprave koje su zadužene za održavanje sigurnosti, javnog reda i poretka poput policije, vojske, hitnih službi i ostalih. Usluga pruža visoki kontinuitet u odnosu na OS s kontroliranim pristupom, što

je omogućeno putem poboljšanja u modulaciji signala te dodatnim kriptiranim signalom radi robusnosti i otpornosti signala na ciljano ometanje.

- CS – komercijalna usluga (engl. *Commercial Service* – CS) koja korisnicima koji plaćaju uslugu omogućuje pristup dodatnim dvjema frekvencijama odnosno signalima E6 i E5b. U suprotnom su navedeni kanali zaštićeni enkripcijom te ih prijamnici nisu u mogućnosti dekodirati i koristiti. Usluga omogućuje veće brzine prijenosa.
- SAR – usluga za traganje i spašavanje unesrećenih (engl. *Search and Rescue* – SAR) koja pridonosi poboljšanju Cospas-Sarsat sustava za pomoć i spašavanje. Signal za pomoć biti će dostavljen spasilačkom koordinacijskom centru, a Galileo će obavijestit korisnike koji su uputili signal da su uočeni.
- SoL – usluga sigurnost života (engl. *Safety of Life* – SoL) radi u kombinaciji sa sustavom EGNOS. Namijenjena je većini prometnih aplikacija u različitim domenama u kojima bi životi mogli biti ugroženi ako se performanse navigacijskog sustava smanje ispod određenih granica točnosti, a da u određenom vremenskom periodu ne dođe do upozorenja o degradaciji.

Kontrolni segment sustava Galileo sastoji se od dva kontrolna centra (engl. *Galileo Control Center* - GCC) smještena u Europi čija je zadaća kontrola satelita. Podaci prikupljeni globalnom mrežom od dvadeset senzorskih stanica (engl. *Galileo Sensor Stations* - GSS) šalju se prema GCC-u putem komunikacijske mreže. GCC-ovi koriste podatke sa senzorskih stanica za izračunavanje podataka za korekciju i sinkronizaciju atomskih satova i satelitskog vremena (engl. *Galileo System Time* - GST) sa satovima zemaljskih stanica te generiraju navigacijske poruke. Kontrolni centri komuniciraju sa satelitima putem tzv. uzlaznih postaja (engl. *Uplink Stations* - ULS) koje su izgrađene širom svijeta. [2], [3]

2.4.BeiDou

BeiDou ili u prijevodu Kompas je kineski satelitski navigacijski sustav koji je nedavno zaživio u punoj konstelaciji. BeiDou jedan je od najmlađih sustava te je ujedno i najmoderniji satelitski navigacijski sustav u upotrebi. Kineska vlada razvija BeiDou u želji za pozicioniranjem kao svjetski lider, učvršćivanjem vlastite strateške pozicije na globalnoj sceni i pokazivanjem tehničke nadmoći, kao i smanjivanjem ovisnosti o GPS-u. Konstelacija BeiDou-a sastoji se od 35 satelita, uključujući 5 geostacionarnih satelita i 30 ne geostacionarnih satelita u gotovo kružnoj orbiti. Sateliti koji nisu geostacionarni uključuju 3

satelita koji se nalaze u nagnutoj geosinkronoj satelitskoj orbiti (engl. *Inclined Geosynchronous Satellite Orbit* - IGSO) s nagibom od oko 55° i 27 satelita Srednjoj zemljinoj orbiti koji kruže na nadmorskoj visini od 21528 kilometara u tri orbitalne ravnine s nagibom od oko 55° i s periodom prolaza od oko 12 sati, dok geostacionarni sateliti kruže na nadmorskoj visini od oko 35786 kilometara. [8], [9]

Poput ostalih GNSS-a, BeiDou također emitira signale u L pojasu putem kanala B1, B2 i B3. Frekvencije signala prikazane su tablicom 3. U svrhu interoperabilnosti signala BeiDou-a s Galileom i GPS-om, Kina je najavila migraciju civilnog B1 signala sa 1561,098 MHz na frekvenciju 1575,42 MHz, istu kao i civilni signali GPS L1 i Galileo E1. Također je najavljena transformacija signala iz kvadraturne modulacije faznog pomicanja (engl. *Quadrature Phase-Shift Keying* - QPSK) na modulaciju multipleksiranog binarnog pomaka nosioca (engl. *Multiplexed Binary Offset Carrier* - MBOC) sličnu budućem GPS-u L1C i Galileovom E1. Prijenos signala odvija se korištenjem CDMA tehnika višestrukog pristupa, što znači da sateliti mogu odašiljati na istim frekvencijama, ali da je signal moduliran različitim pseudoslučajnim kodom. [3]

Tablica 3. BeiDou signali

Kanal	**B1**	**B2**	**B3**
Frekvencija signala [MHz]	1575,42	1207,14	1268,52
BeiDou usluga	Civilna i autorizirana usluga	Civilna usluga	Autorizirana usluga

Izvor: [3]

Pružit će se dvije razine usluge: [2]

- Javna usluga dostupna svima za civilnu primjenu - besplatna za korisnike u Kini uz pružanje točnosti lokacije od 10 m, točnost brzine unutar 0,2 m/s i vremensku točnost od 50 ns.

- Licencirana vojna primjena - samo za autorizirane korisnike, preciznija od civilne usluge, a također pruža informacije o statusu sustava i sposobnosti vojnih komunikacija.

BeiDou-ov zemaljski upravljački segment temelji se na klasičnoj centraliziranoj shemi koja uključuje mrežu jednosmjernih mjernih stanica koje kontinuirano nadgledaju navigacijske signale svih satelita i prenose podatke svih satelita na obradu u kontrolni centar. Kontrolni centar potom generira precizne podatke o orbiti i satu za svaki satelit koji će se prenositi na satelite putem stanica za sinkronizaciju vremena tzv. stanica za uzlaznu vezu. Mreža jednosmjernih postaja smještena je diljem Kine. Dugoročna strategija razvoja sustava sugerira da bi trebala biti postavljena globalna mreža stanica kako bi se povećale performanse BeiDou-a. [8], [9]

2.5. Princip pozicioniranja satelitskim navigacijskim sustavima

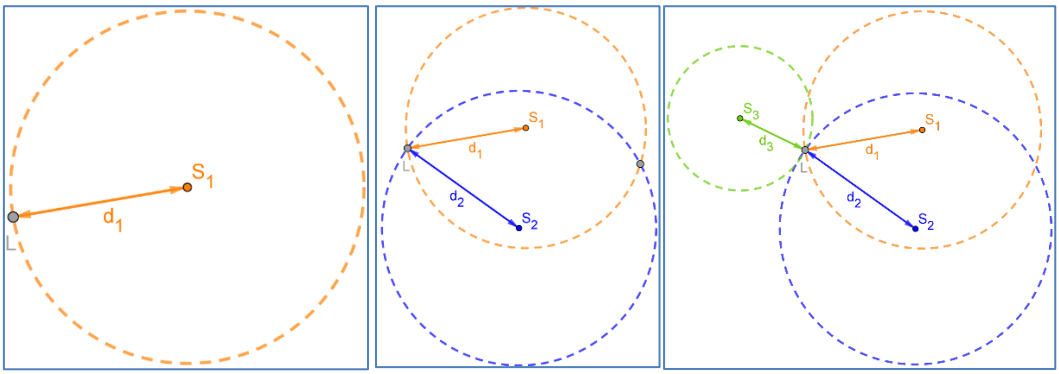
Globalni navigacijski satelitski sustavi se razlikuju u broju orbita, broju satelita u konstelaciji, načinu modulacije i frekvenciji signala, referentom vremenu i koordinatnom sustavu kojega koriste. Premda su spomenute samo neke od razlika prisutne po pojedinim segmentima, svi počivaju na temeljnim principima pozicioniranja. GNSS nastoji što preciznije prikazati točnu lokaciju, vrijeme i brzinu prijamnika kojega locira, ali i umanjiti utjecaj grešaka koje nastaju u tome procesu stoga će u ovom poglavlju kroz matematičke modele biti objašnjeni principi pozicioniranja, navedene najčešće greške koje se javljaju te objašnjeno kako ih umanjiti ili izbjeći.

Prilikom pozicioniranja nepoznatog objekta iz stajališta sustava su poznate informacije o položaju satelita te vrijeme sustava. Precizno mjerenje vremena signala od satelita (odašiljača) do prijamnika osnovni je parametar za utvrđivanja pozicije u GNSS-u. Bitno je naglasiti da nije dovoljno mjerenje samo vremena propagacije signala od jednog satelita, već je potrebno imati informaciju sa minimalno 4 satelita, a kako bi se dodatno umanjio utjecaj grešaka koje se javljaju potrebno je komunicirati sa 5 ili više satelita. Iz navedenih razloga, u nastavku će biti objašnjena metoda trilateracije u dvodimenzionalnom prostoru kao jedan od temeljnih principa pozicioniranja. Trilateracija je određivanje položaja točaka u mreži međusobno povezanih trokuta mjerenjem duljina stranica trokuta.

Na lijevom dijelu slike 2 vidljiva je kružnica i njeno središte S1, pri čemu se središta kružnica u ovom primjeru promatraju kao sateliti. Za svaki satelit prvo je potrebno izračunati vrijeme propagacije signala. Udaljenost između satelitske i prijamničke antene određena mjerenjem vremena propagacije signala naziva se pseudoudaljenost. Pseudoudaljenost se može izraziti formulom:

$$d_i = c \cdot \Delta t = c \cdot (t_s - t_p) \tag{2.5.1}$$

gdje je c brzina propagacije signala (brzina svijetlosti), Δt razlika u vremenu od trenutka slanja do primitka signala, t_s vrijeme atomskog sata, t_p vrijeme sata u prijamniku. Za svaki satelit koji se prati, prijamnik dobiva informaciju o položaju satelita za vrijeme odašiljanja signala (jer satelit emitira svoje efemeride) i odredio je udaljenost do satelita. [4]



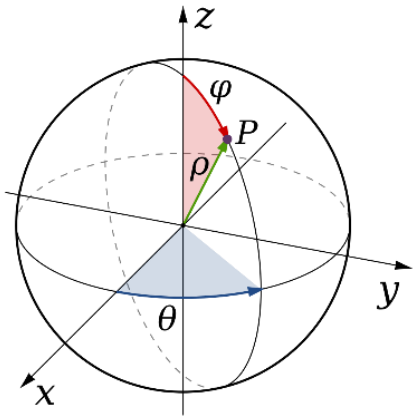
Slika 2. Prikaz tehnike trilatacije

Nakon određivanja udaljenosti može se zaključiti da se prijamnik, točka L, može nalaziti bilo gdje na opisanoj kružnici sa središtem S_1. Po istom principu određuje se udaljenost do satelita S_2. Iz srednjeg dijela slike 2 vidljive su dvije kružnice sa dva sjecišta koje potencijalno mogu biti naši traženi položaji. Za točno određivanje položaja točke o kojoj je riječ, potreban je i treći satelit, te je krajnji rezultat vidljiv na desnom dijelu slike 1. Ovaj primjer može se matematički zapisati pomoću jednadžbe za udaljenost točke od središta kružnice te je tako dobiven sustav jednadžbi s dvije nepoznanice:

$$\begin{cases} (x_{S_1} - x_L)^2 + (y_{S_1} - y_L)^2 = d_1^2 \\ (x_{S_2} - x_L)^2 + (y_{S_2} - y_L)^2 = d_2^2 \\ (x_{S_3} - x_L)^2 + (y_{S_3} - y_L)^2 = d_3^2 \end{cases} \tag{2.5.2}$$

pri čemu su (x_L, y_L) nepoznate koordinate željene točke, (x_S, y_S) koordinate pojedinog satelita i d je udaljenost od satelita do prijamnika. [2], [4]

Potrebno je naglasiti da je prethodni primjer sa tri satelita isključivo primjenjiv ako se radi o dvodimenzionalnom prostoru, širina i dužina, i pod pretpostavkom da su satovi satelita i prijamnika savršeno sinkronizirani što u praksi nije slučaj.



Slika 3. Prikaz položaja na površini sfere, [4]

Primjer iz dvodimenzionalnog prostora može se jednostavno proširiti u trodimenzionalni prostor. Prije računanja pozicije prijamnika potrebno je uzeti u obzir da Zemlja ima gotovo oblik kugle te prema tome treba primijeniti odgovarajući koordinatni sustav. Koordinatni sustavi su sustavi koji omogućuju da se točke na krivulji, pravcu, plohi, u ravnini ili prostoru opišu pomoću brojeva, tzv. koordinata. Kako se u primjer uvodi treća dimenzija, visina, krugove moramo pretvoriti u sfere koje imaju zajedničko sjecište. Drugim riječima prelazi se iz pravokutnog koordinatnog sustava u sferni koordinatni sustav. Prilikom prikaza položaja ili gibanja koje se odvija na površini sfere prikladan je sferni koordinatni sustav. Sferni koordinatni sustav, slika 3, je definiran sa tri koordinate (ρ, θ, φ). Prijelaz iz pravokutnog koordinatnog sustava u sferni računamo koristeći:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{2.5.3}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \tag{2.5.4}$$

$$\theta = \frac{\arctan\left(\sqrt{x^2+y^2}\right)}{z} \tag{2.5.5}$$

pri čemu je ρ udaljenost od ishodišta, θ kut u odnosu na z-os i φ nagib s obzirom na x-os. Iako je u pojednostavljenim primjerima sferni koordinatni sustav pogodan za prikaz položaj na površini sfere u realnom slučaju to nije dovoljno, jer Zemljin oblik se opisuje geoidom, a ne savršenom kuglom. Zbog toga se u praksi koriste dva koordinatna sustava, ECI (engl. *Earth-Centered Intertial*) koji je pogodan za prikaz koordinata u svemiru i ECEF (engl. *Earth-Centered Earth-Fixed*) pogodan za prikaz koordinata na Zemlji. Kako bi se odredila pozicija prijamnika potrebno je prije računanja transformirati satelitske efemeridne podatke iz ECI u ECEF koordinatni sustav. [3], [4]

Prilikom pozicioniranja u trodimenzionalnom prostoru koordinatne točke se mogu izračunati sjecištem sfera ako su im poznata središta i polumjeri što se može prikazati na način:

$$(x_i - x_L)^2 + (y_i - y_L)^2 + (z_i - z_L)^2 = R_i^2 \tag{2.5.6}$$

gdje je (x_L, y_L, z_L) nepoznate koordinate točke L, (x_i, y_i, z_i) koordinate promatranog i-tog satelita i R_i udaljenost između i-tog satelita i prijamnika. [10]

U svrhu preciznog utvrđivanja udaljenosti između satelita i prijamnika potrebno je vrlo precizno mjeriti vrijeme propagacije signala. Vrijeme, kao najbitniji aspekt GNSS pozicioniranja se temelji na vrlo velikoj točnosti mjerenja vremena, a takvu vrstu mjerenja pružaju stabilni atomski satovi. Atomski satovi cezijevog izvora imaju relativnu frekvencijsku stabilnost reda od 10^{-13} do 10^{-14} sekundi po danu što im omogućuje mjerenje vremena s točnošću od nekoliko nanosekundi. Stoga sustav radi u vlastitom vremenu te nije potrebna stalna sinkronizacija, npr. vrijeme sustava GPS-a je GPST zasnovano na preciznom mjerenju atomskih satova, pri čemu se nulti sat mjeri u ponoć sa 5. na 6. siječnja 1980. godine prema UTC-u. Unatoč visokoj stabilnosti, atomski satovi akumuliraju određeni vremenski pomak. Pomak se procjenjuje uz pomoć zemaljskih postaja u kontrolnom segmentu i prenosi se korisnicama da isprave mjerenja. S druge strane korisnički prijamnici koji su opremljeni oscilatorima na bazi kvarca nisu toliko precizni te unose određene greške. Satovi na bazi kvarca imaju relativnu frekvencijsku stabilnost reda 10^{-9} Hz. [3], [4]

U primjeru u kojem nema utjecaja grešaka na propagaciju signala vrijedilo bi $R_i = d_i$, ali budući da postoji utjecaj negativnih učinaka poput nedostatka sinkronizacije između satelitskog i korisničkog sata, pogreška ionosfere i troposfere, pogreške višestaznog širenja

(engl. *multipath*) te ostale pogreške nevezane za okoliš, navedeno treba uzeti u obzir i uračunati u prijašnji izraz (2.5.1):

$$d_i = R_i + \ c \cdot \Delta t + \ \epsilon_{iono}(i) + \epsilon_{tropo}(i) + \epsilon_{mp}(i) + \epsilon_{oth}(i) \tag{2.5.7}$$

gdje je d_i promatrana pseudoudaljenost od i-tog satelita do prijamnika, R_i je vrijednost stvarne pseudoudaljenosti i-tog satelita do prijamnika, c je brzina svijetlosti, Δt je razlika u vremenu satova, ϵ_{iono} je pogreška zbog djelovanja ionosfere, ϵ_{tropo} je pogreška zbog djelovanja troposfere, ϵ_{mp} je pogreška nastala radi višestaznog širenja signala, ϵ_{oth} vrijednost ostalih pogreški nevezanih za okoliš. [10], [11]

Tablica 4. Pogreške u GNSS sustavu, [2]

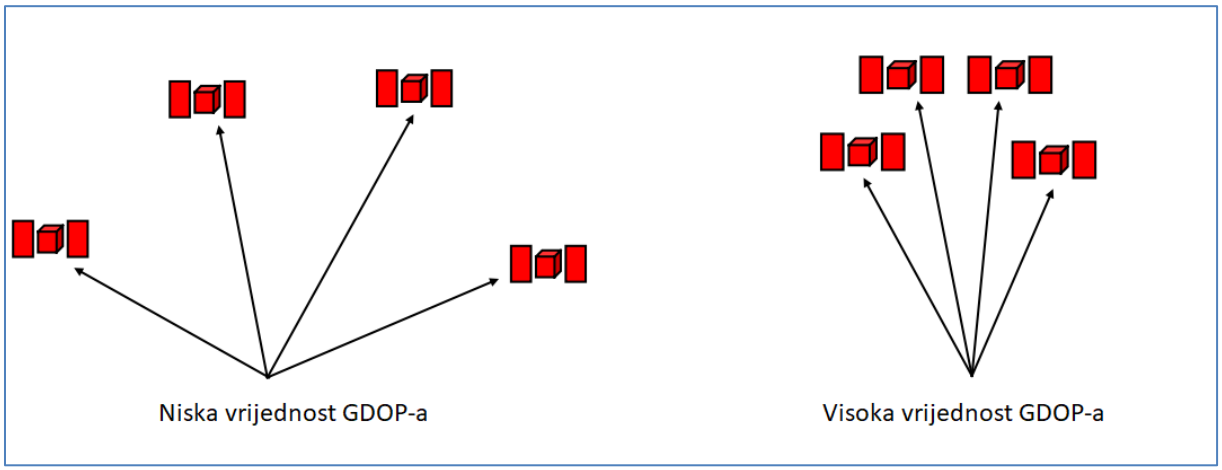
Izvor pogreške	Raspon greške
Atomski satovi	± 2 m
Emeferide	$\pm 2{,}5$ m
Ionosfersko kašnjenje	± 5 m
Troposfersko kašnjenje	$\pm 0{,}5$ m
Greška prijamnika	$\pm 0{,}3$ m
Višestazno širenje	± 1 m

Slijedom svih navedenih utjecaja koji negativno djeluju na propagaciju signala i unose šum u sustav potrebno je više od 3 satelita radi preciznog određivanja pozicije. S obzirom da sateliti koriste precizne satove, pogreška ne dolazi s njihove strane već od jeftinih satova koji su ugrađeni u prijamnike koji se nastoje locirati. Kako bi lociranje bilo moguće, mjerenje se mora proširiti na način da se uzme u obzir mjerenje pseudorazmaka s najmanje 4 satelita te se tako dobije sustav 4 nelinearne jednadžbe s 4 nepoznanice:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - x_L)^2 + (y_1 - y_L)^2 + (z_1 - z_L)^2} + c \cdot \Delta t + \Sigma\epsilon \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x_L)^2 + (y_2 - y_L)^2 + (z_2 - z_L)^2} + c \cdot \Delta t + \Sigma\epsilon \\ d_3 = \sqrt{(x_3 - x_L)^2 + (y_3 - y_L)^2 + (z_3 - z_L)^2} + c \cdot \Delta t + \Sigma\epsilon \\ d_4 = \sqrt{(x_4 - x_L)^2 + (y_4 - y_L)^2 + (z_4 - z_L)^2} + c \cdot \Delta t + \Sigma\epsilon \end{cases} \tag{2.5.8}$$

gdje je uz prijašnje oznake $\Sigma\epsilon$ suma svih navedenih grešaka koje se uzimaju u obzir. [4], [10], [11]

Unatoč svemu navedenom, na određivanje pozicije utječe i broj vidljivih satelita i njihova prostorna raspodjela na vidljivom dijelu neba, što je fenomen koji nazivamo degradacija točnosti, DOP (engl. *Dilution Of Precision*). Geometrijska degradacija točnosti, GDOP (engl. *Geometric Dilution Of Precision*) je mjera kvalitete udaljenosti od satelita do prijamnika. GDOP i pripadajuće mu komponente (PDOP, HDOP, VDOP, TDOP) proizlaze iz postupka određivanja položaja. Pod pretpostavkom da je položaj izračunat pomoću najmanje četiri satelita dobije se sustav jednadžbi (2.5.8) iz kojeg se formira položajna matrica. Elementi matrice sadrže informacije o vidljivosti satelita u odnosu na azimut i elevacijske kutove iz pozicije promatrača, GPS prijamnika. [4], [11], [12]

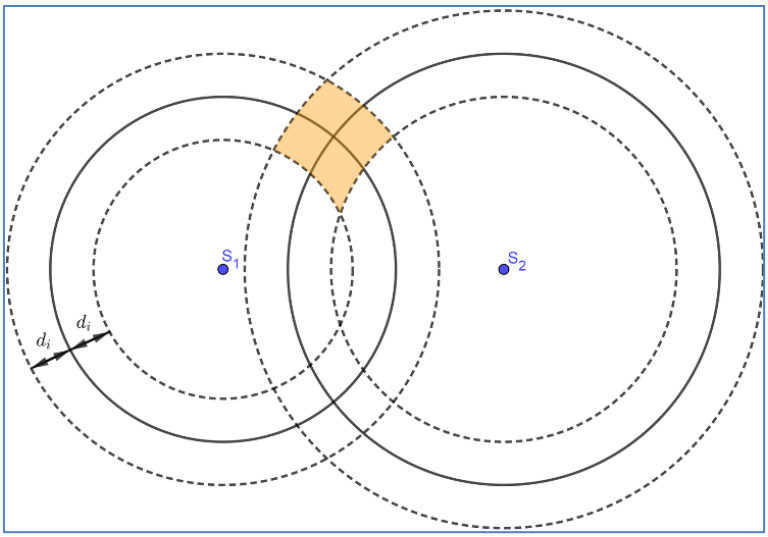


Slika 4. Utjecaj položaja satelita na GDOP vrijednost, [12]

Brojčani faktor koji kvantificira utjecaj prostornog rasporeda satelita, u odnosu na prijamnik, na točnost određivanja:

$$GDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 + TDOP^2 \tag{2.5.9}$$

gdje je HDOP horizontalna, VDOP vertikalna, TDOP vremenska i PDOP prostorna degradacija točnosti. [4], [11]



Slika 5. Utjecaj GDOP-a na procjenu položaja

U GPS sustavu, GDOP se mjeri u rasponu od 1 do beskonačno, a vrijednosti od 2 do 3 su tipične za GPS. Što je vrijednost GDOP-a manja, preciznost lociranja je veća, odnosno utjecaj greške je manji, što je prikazano na slici 4. Iz perspektive korisnika, na slici 5, prikazan je utjecaj grešaka radi čega dolazi do razlike u izračunatim pseudoudaljenostima. Kako se povećava broj satelita, tako se smanjuje područje moguće lokacije prijamnika. Zbog toga će prijamnik upotrijebiti signale više satelita kako bi se umanjila geometrijska degradacija točnosti, GDOP. [12]

2.6. Sustavi za poboljšanje preciznosti GNSS-a

U poglavlju 2.5 opisani su temeljni koncepti pozicioniranja na GNSS-u. Nužno je napomenuti da su razvijene tehnike i sustavi pozicioniranja koje poboljšavaju GNSS te im omogućuju centimetarsku točnost mjernih rezultata:

- ***Carrier-based* tehnika**: tehnika pozicioniranja koja koristi dodatnu prijamničku stanicu pri čemu se vrši razmjena pseudoslučajnih kodova između fiksnog prijamnika na zemlji sa četiri ili više satelita kako bi odredili njegov položaj i vrijeme, što rezultira točnošću pozicije od nekoliko centimetara. Ova tehnika je izričito korisna prilikom geodetskih izmjera. RTK (engl. *Real Time Kinematic*) tehnika zasnovana na *carrier-based* principu koristi dodatnu prijamničku stanicu te omogućuje GNSS

pozicioniranje s točnošću od nekoliko centimetara. Ova tehnika će biti detaljno opisana u kasnijem poglavlju. [2]

- **Inercijski navigacijski sustavi**: GNSS prijamnici mogu se integrirati s inercijskim navigacijskim sustavom kako bi se pokrili prostori koji radi geografskih obilježja nemaju dostupnu GNSS uslugu. Primjer korištenja takvog sustava je prolazak vozila kroz tunel u kojemu nije moguće locirati vozilo GNSS satelitima, pozicija se dalje prati računskim pozicioniranjem, rekurzivnim algoritmom, usporednom primjenom magnetskog kompasa i žiroskopa. Kada GNSS usluga postane dostupna nastavlja se pozicioniranje sa posljednje izračunate pozicije inercijskog sustava. [2]
- **Diferencijalni navigacijski sustavi**: temelje se na dva ili više prijamnika, tzv. referentnih stanica, smještenih na točno utvrđenim i precizno izmjerenim lokacijama. Referentna stanica računa razliku između položaja koje je izračunao GPS sustav i utvrđenih fiksnih točaka, nakon čega emitira izračunatu korekciju na prijamnike koji koriste korekciju za pozicioniranje s većom točnosti. Signal se emitira lokalno preko zemaljskih odašiljača kraćeg dometa, što znači da prijamnici i referentne stanice mogu biti udaljene nekoliko desetaka kilometara. U slučaju kada se prijamnik i referentna stanica nalaze na prevelikoj udaljenosti, odnosno propagacija signala se vrši kroz različite atmosferske uvjete, korekcijske podaci se mogu izračunati pomoću geostacionarnog satelita. Primjeri sustava koji se temelje na radu s geostacionarnim satelitima su SBAS (engl. *Satellite Based Augmentation Systems*), GBAS (engl. *Ground Based Augmentation Systems*), LAAS (engl. *Local Area Augmentation Systems*), GRAS (engl. *Ground-based Regional Augmentation Systems*) koji će biti objašnjeni u ovom poglavlju. [1], [2]

SBAS su geostacionarni satelitski sustavi koji pružaju uslugu poboljšanje točnosti te dostupnosti osnovnih GNSS signala. Geostacionarna orbita ima orbitalno razdoblje koje odgovara Zemljinom sideričkom periodu rotacije. Sateliti u takvoj orbiti imaju nulti nagib prema području pokrivanja te promatraču izgledaju nepomično. Sateliti se nalaze na jednom mjestu u svakom promatranom trenutku. Osnovne komponente ovog sustava su referentna stanica (engl. *reference station*), glavna stanica (engl. *master station, uplink station*) i geostacionarni satelit.

Referentne stanice raspoređene su po geografskom području koje pokriva SBAS geostacionarni satelit i služe za prosljeđivanje signala prikupljenih od GNSS satelita prema

glavnoj stanici. Glavna stanica koristi mjerenja za generiranje, izračun parametara korekcije satelitskih orbita, satelitskih satova i utjecaja ionosfere, tzv. korekcije širokog područja (engl. *Wide Area Corrections* - WAC). Korekcije za greške nastale višestaznim širenjem i lokalnim utjecajima troposfere nije moguće izračunati. Glavna stanica šalje WAC izračun prema SBAS satelitu, a zatim satelit prosljeđuje prijamnicima koji se nalaze u području pokrivanja na korekciju za točnije utvrđivanje lokacije. [1]

Poboljšanja koja SBAS omogućuje mogu se podijeliti u tri kategorije:

- povećanje točnosti utvrđivanja pozicije
- povećanje dostupnosti i raspoloživosti GNSS signala
- dostupnost informacije o integritetu sustava.

Povećanje točnosti utvrđivanja pozicije se postiže izračunom korekcijskog parametra. Povećanje dostupnosti i raspoloživosti je omogućeno pozicioniranjem geostacionarnog satelita iznad područja koji se pokriva SBAS uslugom. Informacije o integritetu povećavaju sigurnost, upozoravajući prijamnike unutar vrlo kratkog vremenskog perioda od 6 sekundi o bilo kakvim neispravnostima u GNSS-u, ali i SBAS funkcionalnostima. [1]

Svemirski segment SBAS-a sastoji se od najmanje dva geostacionarna satelita pri čemu se postiže redundancija ako dođe do problema sa primarnim satelitom. Informacija se modulira u signal koji se prenosi u L frekvencijskom pojasu, 1575,42 MHz, odnosno signale raspona GPS L1 pojasa, zajedno sa C/A kodom. Uz to, emitiraju se signali u C pojasu koji se u kombinaciji s signalima L pojasa i pomoću zemaljskog segmenta SBAS sustava koriste za izračunavanje WAC parametra. SBAS signali imaju razinu snage usporedivu s onom GPS signala kako bi se izbjegle smetnju propagaciji. Iako se sateliti nalaze u geostacionarnoj orbiti njihov položaj varira s vremenom. Pomoću glavne stanice utvrđuju se točni položaji satelita potrebni za što preciznije računanje WAC parametra. Geostacionarni položaj satelita nepovoljan je za korisnike u gradskom okruženju prvenstveno radi pojave višestaznog širenja. Kako bi se izbjegao navedeni problem razvijeni su koncepti za prijenos SBAS informacija putem Internet mreže. [1], [2]

Korisnički segment može se definirati kao kombinacija izračunatog WAC parametra korekcije i GNSS mjerenja tvoreći navigacijsko rješenje povećanih performansi. Usporedno samo sa GNSS mjerenjima točnost pozicioniranja poboljšava za 95% odnosno na oko 1 do 3

metra vodoravno i na 2 do 4 metra okomito. Također vremenska točnost je poboljšana na manje od 10 ns. SBAS sustav omogućuje preciznije mjerenje u trenutcima kada su vidljiva samo 4 satelita u odnosu na GNSS mjerenja bez WAC parametra s vidljivih 8 ili 9 satelita. [1]

Globalno dostupnu SBAS uslugu omogućuju američki sustav proširivanja šireg područja (engl. *Wide Area Augmentation System* - WAAS), japanski višenamjenski transportni satelitski svemirski sustav za proširenje (engl. *Multifunctional Transport Satellite Space Based Augmentation System* - MSAS), europska geostacionarna usluga navigacijskog pokrivanja (engl. *European Geostationary Navigation Overlay Service* - EGNOS) te indijski GPS i geoagumentirana navigacija (engl. *GPS And Geoaugmented Navigation* - GAGAN), dok međunarodni standardi jamče interoperabilnost navedenih sustava. [1]

Uz prethodno navedene sustave postoji i tzv. koncept kopnenih sustava za poboljšanje mjerenja (engl. *Ground Based Augmentation Systems* - GBAS). GBAS je zamišljen da zadovolji posebno stroge zahtjeve zrakoplovne zajednice. Podaci za povećavanje točnosti lociranja uobičajeno se pružaju za lokalno ograničeno područje, npr. zračne luke. Proširenje usluga na veće površine može rezultirati sustavom koji se naziva zemaljskim regionalnim sustavom poboljšanja lociranja (engl. *Ground-based Regional Augmentation Systems* - GRAS). GRAS funkcionira kao SBAS sustav, ali sa zemaljskom mrežom pri čemu se komunikacija vrši korištenjem VHF kanala. Sustav povećanja točnosti lociranja na lokalnom području (engl. *Local Area Augmentation Systems* - LAAS) jedna je od realizacija GBAS-a, definirana od strane Međunarodne organizacije civilnog zrakoplovstva (engl. *International Civil Aviation Organization* - ICAO). Referentna mreža koristi četiri ili više prijamnika za izračun diferencijalne korekcije. Referentna stanica mjeri raspon podataka iz svih dostupnih izvora, odnosno navigacijskih satelitskih signala, SBAS signala ili pseudoslučajnih signala. LAAS su obično dizajnirani tako da pružaju informacije korisnicima do 45 kilometara udaljenosti. [1], [2]

3. Pozicioniranje tehnikom dodatne prijamničke stanice RTK

RTK (engl. *Real Time Kinematics*) tehnika pozicioniranja temeljena na izračunu pozicije iz broja ciklusa prijenosnog signala (engl. *carrier-phase ranging*) počinje se upotrebljavati 1990-ih godina, a svrstava se u DGNSS tehnike jer počiva na istim principima upotrebe dodatne prijamničke stanice kao fiksne referentne točke za izračun korekcijskih mjerenja koje omogućuju visoke performanse pozicioniranja. Za razliku od DGNSS-a, koji ima metarsku preciznost i područje pokrivanja do 100 ili 200 kilometara, RTK postiže centimetarsku preciznost pozicioniranja, ali za udaljenosti koje pokriva dodatna prijamnička stanica do 10 ili 20 kilometara ovisno o fizičkim preprekama u prostoru. [13]-[15]

Osnovne komponentne RTK sustava su dodatna prijamnička stanica za izračun korekcijskih mjerenja, prijamnik kojemu se određuje pozicija te komunikacijskih kanal potreban za njihovu međusobnu komunikaciju. Postoje različite izvedbe referentnih stanica. Mobilne koje se mogu proizvoljno razmjestiti po potrebi, ali im je potrebno odrediti položaj prilikom njihova postavljanja ili stacionarne koje se postavljaju na nekom većem području za duži vremenski period te tako čine RTK mrežu. RTK mreže ili referentne virtualne stanice (engl. *Virtual Reference Stations* - VRS) kojima upravlja središnja stanica šalju korekcijske podatke RTK terminalima na njihov zahtjev. Prednost ovakvih mreža je potreba za manjim brojem dodatnih prijamničkih stanica te ovisno o implementaciji podaci se mogu prenositi sa obližnjih mobilnih baznih stanica ili neke druge bežične tehnologije. [2], [15]

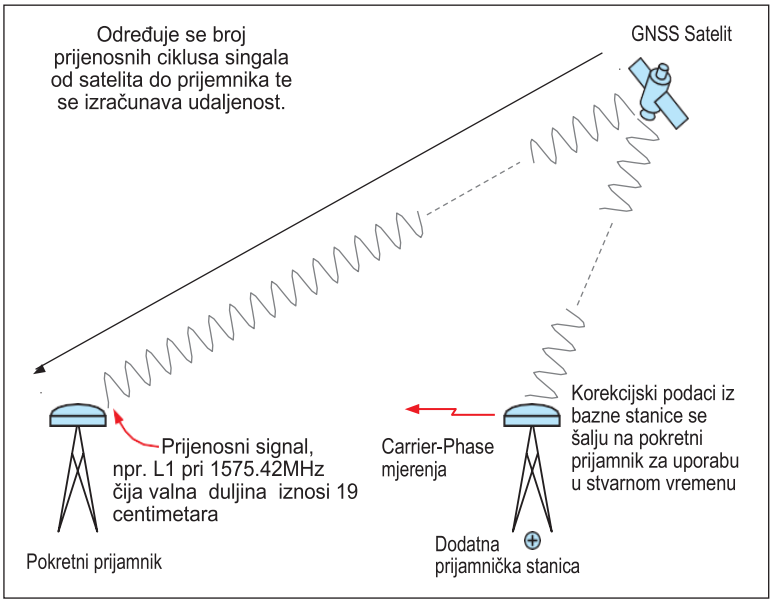
Komunikacija između RTK terminala, dodatne prijamničke stanice sustava RTK i satelita je definirana RTCM standardom. Također za RTK tehnologiju je definiran i još jedan CMR standard koji će biti više opisani kasnije u ovom poglavlju. [15]

3.1. Princip rada tehnike RTK

Tehnika pozicioniranja opisana u drugom poglavlju jest pozicioniranje na osnovi koda (engl. *code-phase ranging*), temeljeno na izračunu pozicije iz pseudoslučajnog koda. Prijamnik korelira i koristi pseudoslučajne kodove koje prenosi četiri ili više satelita za određivanje udaljenosti do satelita. Iz tih udaljenosti i znajući gdje su sateliti, prijamnik može

odrediti vlastiti položaj unutar nekoliko metara. Kako je ranije navedeno, RTK ima mogućnost pozicioniranja unutar nekoliko centimetara jer koristi pozicioniranje na principu određivanja ciklusa prijenosnog signala (engl. *carrier-phase ranging*) te mora imati vidljiva najmanje četiri satelita.

Pozicioniranje tehnikom RTK odvija se na način prikazan na slici 6, a uključuje upotrebu barem jednog stacionarnog referentnog prijamnika (dodatne prijamničke stanice) i jednog ili više pokretnih prijamnika (engl. *rover station*). Svi uključeni prijamnici, dodatne prijamničke stanice i pokretni prijamnici moraju istovremeno promatrati iste satelite. [16]

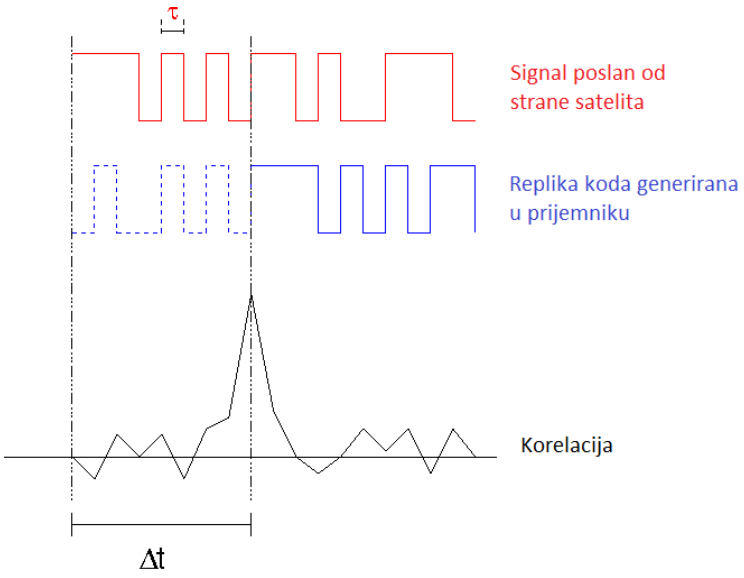


Slika 6. Princip rada Real-Time Kinematic tehnike, [2]

Udaljenost se izračunava određivanjem broja ciklusa prijenosnog signala između satelita i dodatne prijamničke stanice, zatim množenjem dobivenog rezultata s valnom duljinom prijenosnog signala. Izračunate udaljenosti uključuju pogreške iz izvora kao što su satelitski sat, efemeride, te atmosferska kašnjenja. Kako bi se navedene greške uklonile primjenom RTK tehnike i iskoristile njene prednosti potrebno je prenijeti korekcijska mjerenja s dodatne prijamničke stanice na pokretni prijamnik. Dodatna prijamnička stanica emitira vlastitu dobro poznatu fiksnu lokaciju zajedno s mjerenjima za sve vidljive satelite. Pokretni prijamnik pomoću navedenih informacija može odraditi korekciju faze prijenosnog signala i s velikom preciznošću odrediti vlastiti položaj u odnosu na dodatnu prijamničku stanicu. Pokretni prijamnici određuju vlastiti položaj pomoću algoritama koji uključuju

izračun tzv. nejasnoća (engl. *ambiguity resolution*) te diferencijsku korekciju. Točnost položaja koju pokretni prijamnik može postići ovisi o njegovoj udaljenosti od dodatne prijamničke stanice, odnosno osnovne linije (engl. *base line*) i točnosti diferencijalnih korekcija. Odabir mjesta je također važan za minimiziranje utjecaja okoliša, poput interferencija i pojave višestaznog širenja. Uz navedeno, bitan čimbenik koji utječe na točnost pozicije je kvaliteta dodatne prijamničke stanice, pokretnog prijamnika i antena. [2], [16]

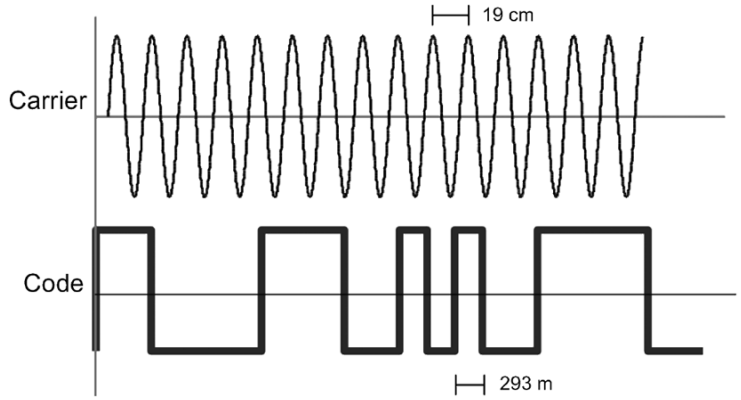
Ranije je navedeno da je RTK tehnika mnogo preciznija jer koristi frekvenciju prijenosnog signala prilikom pozicioniranja. Iz navedenog razloga je bitno razumjeti koja je razlika između tzv. *carrier-phase* i *code-phase* pozicioniranja. Dakle, GPS prijamnik određuje vrijeme putovanja signala sa satelita, uspoređujući kod iz signala sa satelita s identičnim pseudoslučajnim kodom koji generira. Prijamnik vremenski pomiče svoj generirani signal sve dok ga ne sinkronizira sa satelitskim kodom. Vrijeme koje je potrebno za sinkronizaciju jednako je vremenu propagacije signala. Bitovi, ili ciklusi, pseudoslučajnog koda toliko su široki da se nikada ne sinkroniziraju savršeno. Kao rezultat nesavršene sinkronizacije, mjerenja ciklusa pseudoslučajnih kodova precizna su do metarske razine. [16], [17]



Slika **7**. Korelacija signala satelita i signala prijamnika, [17]

Frekvencija prijenosnog signala mnogo je veća pa su njegovi impulsi mnogo bliži jedni drugima i stoga precizniji. Pseudoslučajni kod ima brzinu prijenosa od oko 1 MHz, ali njegov prijenosni signal ima frekvenciju reda veličine GHz, što znači da je oko 1000 puta brži. Pri brzini svjetlosti, GPS L1 signal frekvencije 1,57 GHz s valnom duljinom koja iznosi

nešto više od 19 centimetara može se iskoristiti kao mnogo preciznija referenca od samog pseudoslučajnog koda. Mjerenje faze prijenosnog signala je mjera udaljenosti između satelita i prijamnika izražena u jedinicama ciklusa frekvencije prijenosnog signala. Navedeno mjerenje moguće je izvršiti s vrlo velikom preciznošću, do milimetarske razine. Problem nastaje kada je frekvenciju prijenosnog signala teško prebrojati zbog njezine jednoličnosti. Svaki prethodni ciklus izgleda kao svaki sljedeći. S druge strane, pseudoslučajni kod ciljano je složen kako bi bilo lakše znati o kojem ciklusu se radi. [1], [18]



Slika 8. Usporedba valne duljine prijenosnog signala i pseudoslučajnog koda, [19]

U suštini, spomenuta metoda nastoji utvrditi točan broj ciklusa frekvencije prijenosnog signala prilikom propagacije između satelita i prijamnika. Za lakše razumijevanje može se zamisliti mjerna traka koja se proteže od satelita do prijamnika i na kojoj je označen svaki milimetar toga puta. Brojanje počinje na početku ciklusa i broji se od 0 do 9. Vrijednost 0 označava da nema kašnjenja. Shema numeriranja vraća se u vrijednost 0 sa svakim periodom valne duljine, otprilike 19 centimetara za GPS L1 prijenosni signal. U tom slučaju 0 ne označava da nema kašnjenja, već predstavlja jedno brojanje cijelog ciklusa. Kako bi se izračunala točna udaljenost mora se riješiti problem *ambiguity resolution*, što omogućuje da se utvrdi točan broj ciklusa prijenosnog signala i poziciju prijamnika. [20]

Neophodno je napomenuti da se u praksi ne koristi jedna ili druga tehnika, već gotovo svi prijamnici rade s kombinacijom obje tehnike. Prijamnici upotrebom pseudoslučajnog koda odrede svoju približnu lokaciju, reda veličine metar, a zatim pomoću tehnike brojanja ciklusa prijenosnog signala prijamnik odredi poziciju sa centimetarskom preciznošću. [18]

3.2. Standardi RTK korekcijskih signala

Protokol za komunikaciju između dodatnih prijamničkih stanica i pokretnih prijamnika prvo je dizajniran za upotrebu u pomorskoj plovidbi od strane organizacije poznate kao Radiotehnička komisija za pomorske usluge (engl. *Radio Technical Commission for Maritime Services* - RTCM). RTCM je neovisna neprofitna organizacija koja obrazuje i pruža informacije o radio navigaciji, pravilima i propisima vezanim za radio navigaciju, uz navedeno razvijaju i tehničke standarde za pojedine tehnologije. [21], [22]

RTCM sastavlja specijalni odbor, SC-104, koji je stvorio standard, format navigacijske poruke, koji se uveliko primjenjuje i danas. Format je opće namjene i nije ograničen na određenu vrstu prijamnika. Format proširuje poruku sa satelita informacijama koji pružaju bržu navigaciju. Prvobitno je dizajniran za prilagodbu brzine GPS podataka s konfiguracijom donekle sličnom navigacijskoj poruci. RTCM 2.0 standard podržava samo GPS kod, ali kako se ubrzo pokazalo da podaci dobiveni iz faze prijenosnog signala mogu uvelike poboljšati navigacijske sposobnosti sustava, uveden je novi standard RTCM 2.1. koji podržava kodne i fazne korekcije samo iz GPS signala. Standardom RTCM 2.2 dodaje se podrška za GLONASS sustav, uz već postojeći GPS, dok verzija 2.3 dodatno proširuje format kako bi mogao sadržavati korekcijske parametre za greške generirane od strane antena prijamnika. Veći iskorak prema RTK tehnologiji je napravljen 2007. godine kada je kreirana verzija 3.0 RTCM standarda koji uz sve prijašnje funkcionalnosti uvodi učinkovitiju strukturu poruka koja se pokazuje korisnom prilikom razmjene velike količine podataka u komunikaciji između pokretnog prijamnika i dodatne prijamničke stanice. [21], [22]

RTCM 3.1 dodaje poruku o ispravku mreže koja omogućuje pokretnim prijamnicima da primaju točne RTK informacije na velikom području, a verzija 3.2 objavljena u 2013. godini donosi značajku pod nazivom višestruke signalne poruke (engl. *Multiple Signal Message* - MSM) koja uključuje sposobnost komuniciranja europskim Galileo i kineskim BeiDou satelitskim sustavima. Također bitna značajka verzije 3.2 RTCM standarda je također i mogućnost istovremenog korištenja prijamnika različitih proizvođača, ali i signala od različitih GNSS satelita. Uređaji koji koriste verziju 2.x i uređaji koji koriste verziju 3.x nisu međusobno kompatibilni. Budući da su mnogi RTK prijamnici dizajnirani i programirani za rad s verzijom 2.x, RTCM propisuje oba standarda 2.x i 3.x kao standarde koji se trenutno nalaze u upotrebi. [22]

Tablica 5. Format poruke prema RTCM 3.2 standardu, [23]

Identifikator vrste poruke	Naziv poruke
1	*Differential GPS Corrections*
2	*Delta Differential GPS Corrections*
3	*Reference Station Parameters*
4	*Surveying*
5	*Constellation Health*
6	*Null Frame*
7	*Beacon Almanacs*
8	*Pseudolite Almanacs*
9	*Partial Satellite Set Differential Corrections*
10	*P-Code Differential Corrections (all)*
11	*C/A-Code L1, L2 Delta Corrections*
12	*Pseudolite Station Parameters*
13	*Ground Transmitter Parameters*
14	*Surveying Auxiliary Message*
15	*Ionosphere (Troposphere) Message*
16	*Special Message*
17	*Ephemeris Almanac*
18	*Uncorrected Carrier Phase Measurements*
19	*Uncorrected Pseudorange Measurements*
20	*RTK Carrier Phase Corrections*
21	*RTK Pseudorange Corrections*
22 - 58	*Undefined*
59	*Proprietary Message*
60 - 63	*Multipurpose Usage*

Uz navedeni standard treba spomenuti i CMR/CMR+ format tvrtke Trimble. CMR/CMR+ omogućuje RTK korisnicima da koriste više konstelacija, satelita i signala te dodavanje novih kako postaju dostupni za poboljšanje bržih inicijalizacija pozicioniranja i poboljšane performansi. CMR/CMR+ nudi značajnu kompresiju svih podataka, što omogućuje veću propusnost komunikacijskog kanala, a također se pozitivno odražava na vijek baterije uređaja, generiranu količinu podataka te mogućnost slanja veće količine

korekcijskih podataka u uvjetima manje propusnosti kanala. CMR/CMR+ kao konkurentski RTK format zahtijeva otprilike dvostruko manju propusnost u usporedbi s RTCM formatom, radi čega je postao široko prihvaćen. Uslijed rastućih potreba za prijenosom sve više informacija putem novih satelita, konstelacija i dodatnih frekvencija, paralelno raste i potreba za njihovom brzom integracijom i osiguravanjem komunikacijskih kanala veće propusnosti. Trimble je stoga razvio CRMx format koji omogućuje još veću kompresiju podataka kako bi udovoljio zahtjevima propusnosti kanala, ali i omogućio način, odnosno format, koji će se moći brzo prilagoditi promjenama nastalim na GNSS sustavima kao što je dodavanje novih informacijama o konstelacijama budućih satelita, frekvencijama prijenosa i sl. [24]

4. Pregled i analiza potrebnih alata za pozicioniranje tehnikom RTK i metodologija rada

Cilj ovog rada je izmjeriti kojom preciznošću letjelica, koja se navigira tehnikom RTK, prati trajektoriju leta te usporediti dobivena mjerenja s onima prikupljenim klasičnim satelitskim tehnikama i uređajima za satelitsku navigaciju npr. GPS prijamnikom. Radi prikupljanja mjerenja odrađeni su preleti s bespilotnom letjelicom koja je bila navigirana pomoću dva različita prijamnika prilikom svakog leta.

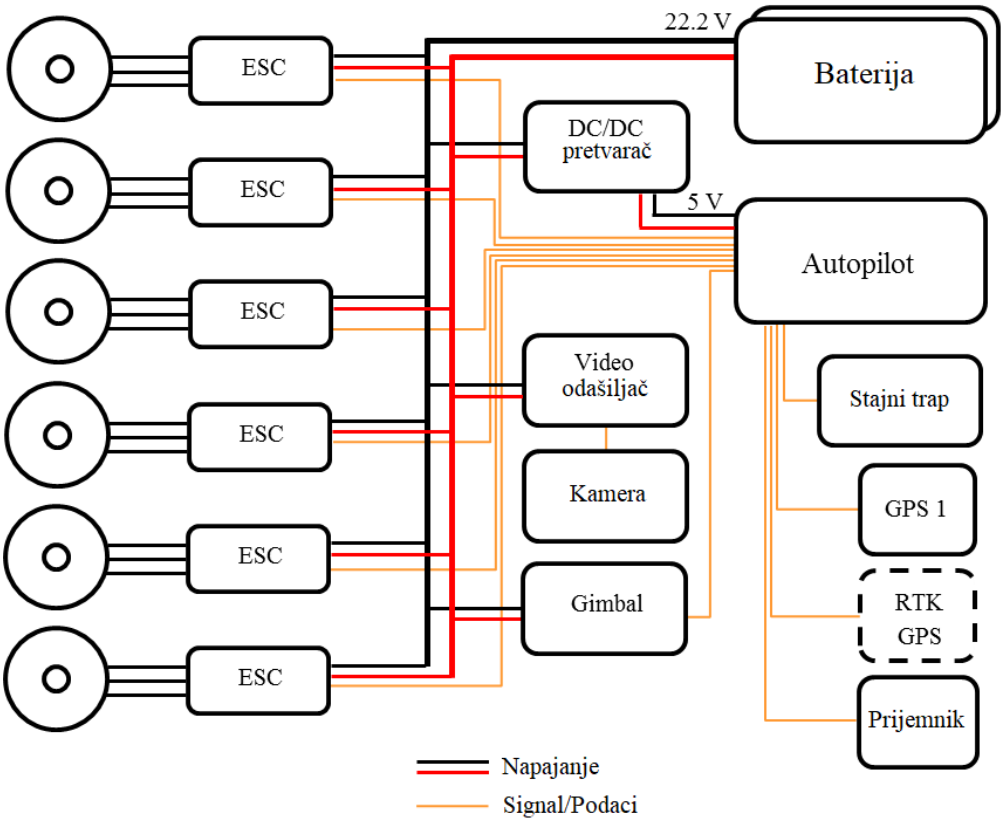
Slika 9. Bespilotna letjelica

U ovoj cjelini će ukratko biti objašnjeni uređaji korišteni prilikom prikupljanja mjerenja, shema bespilotne letjelice te alati potrebni da se mjerenja obrade i prikažu.

4.1. Bespilotna letjelica i GNSS prijamnici

Prilikom prikupljanja mjerenja korištena je bespilotna letjelica sa spojenim Here GPS prijamnikom i Here+ RTK prijamnik, a za snimanje je korištena GoPro kamera. Ruta je predefinirana kroz Pixhawk autopilot, a UAV se samostalno navigirao pomoću satelitske navigacije koristeći Here GNSS prijamnik i GNSS + RTK tehniku. Bespilotna letjelica korištena u ovom diplomskom radu po mjeri je izrađen multirotorski heksakopter. Vrsta motora je Outrunner, snaga svakog motora iznosi 850 W koji pogone propelere dimenzije 17,5". Elektronički kontroler brzine (engl. *Electronic Speed Controler* – ESC) kontrolira i

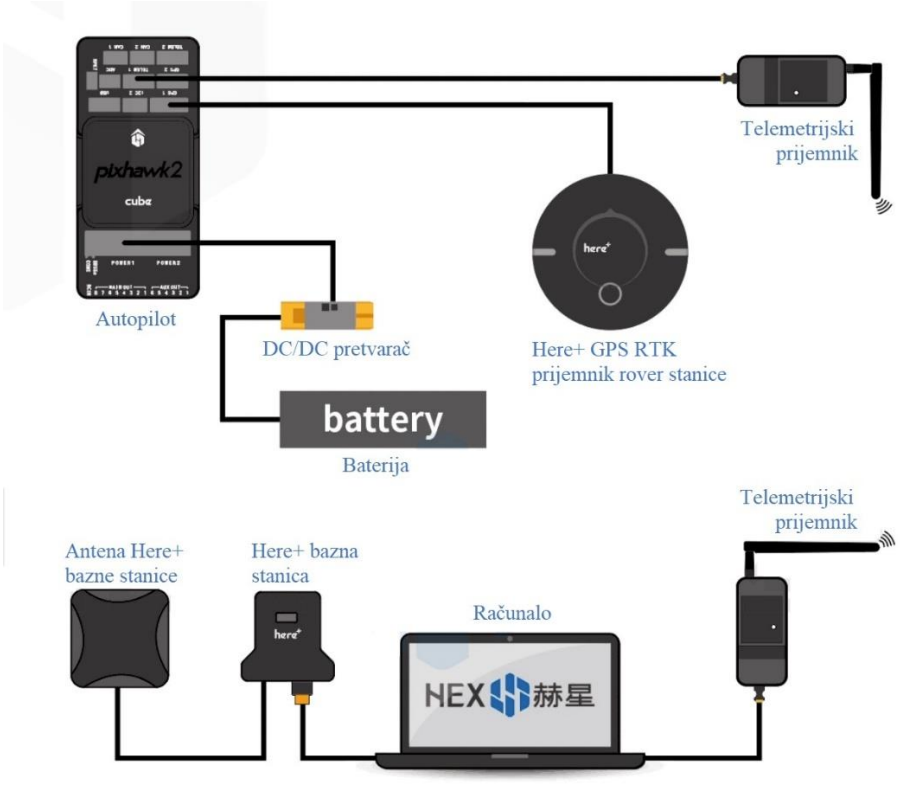
regulira brzinu električnog motora što daje veću mogućnost kontrole bespilotne letjelice tokom leta. Slika 9 prikazuje izgled, a slika 10 shemu bespilotne letjelice sa svim ključnim komponentama.



Slika 10. Shema bespilotne letjelice s ključnim komponentama, [25]

Korišteni GPS prijamnik je Here GPS (M8N) od tvrtke Hex. Tip prijamnika koji koristi 72 kanalni u-blox M8 prijamnik s podrškom za satelitsku navigaciju prijamom signala GPS/QZSS L1 C/A, GLONASS L1, Galileo E1, BeiDou B1 te sustavima za poboljšanje točnosti lociranja SBAS L1 C/A: WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN. Maksimalna brzina ažuriranja je 10 Hz, a preciznost u horizontalnom lociranju iznosi između 2,5 i 4 metra, ovisno o GNSS-u koji se koristi. Osjetljivost prijamnika prilikom navigacije iznosi -167dBm-a te posjeduje podršku za aktivne i pasivne antene. Vrijeme potrebno za prijam signala i navigacijske podatke te izračun pozicije, odnosno fiksira se (engl. *Time To First Fix* – TTFF) iznosi 26 sekundi za hladan start (engl. *cold start*), 2 sekunde za start uz pomoć sustava za poboljšanje točnosti lociranja (engl. *aided start*) te 1 sekundu kada izgubi signal te mu isti bude ponovno dostupan (engl. *reacquisition*). [26]

RTK prijamnik je također od tvrtke Hex model Here+ RTK GPS. Prijamnik je mali, lagan i energetski učinkovit RTK GPS modul, zasnovan na u-bloxu M8P prijamniku iz serije u-blox M8. Ovaj prijamnik je također 72 kanalni baziran s podrškom za satelitsku navigaciju za prijam signala GPS L1 C/A, GLONASS L1, BeiDou B1. Ukoliko prijamnik radi u modu istodobnog prijama signala GPS-a i GLONASS-a maksimalna brzina ažuriranja lokacije je 5 Hz za RTK dok preciznost u horizontalnom lociranju iznosi za samostalan način rada prijamnika 2,5 m, a uz korištenje RTK tehnike 0,0025 m + 1 ppm. Osjetljivost prijamnika prilikom navigacije iznosi -160 dBm-a. Vrijeme prijama signala i početak lociranja (engl. *Time To First Fix* – TTFF) iznosi 26 sekundi za hladan start, 2 sekunde za start uz pomoć sustava za poboljšanje preciznosti (engl. *aided start*) te 1 sekundu za ponovni prijam signala nakon što se signal izgubio. Na slici 11 vidljiva je shema spajanja RTK prijamnika na autopilot, te spajanje RTK bazne stanice na računalo. [27], [28]



Slika 11. Shema spajanja RTK komponenti, [29]

Autopilot Pixhawk 2.1, poznat i po nazivu kontroler leta Cube, je korišten kao centralna komponenta i jedinica za upravljanje letom, koji upravlja svim bitnim komponentama. Fleksibilni autopilot namijenjen profesionalnim komercijalnim sustavima.

Jedinica za upravljanje letom (engl. *Flight Management Unit* – FMU) i jedinica za inercijska mjerenja (engl. *Inertial Measurement Unit* – IMU) su odvojene, što smanjuje međusobnu interferenciju senzora. Jedinica za upravljanje letom također sadrži redundantne IMU senzore, a čine je 3 akcelerometra, 3 žiroskopa, 3 magnetometra i 2 barometra. Sve ulazne i izlazne jedinice su povezane na 80-pinski konektor što omogućuje lakšu integraciju sa različitim dijelovima te krajnjim korisnicima omogućuje dizajniranje vlastitog *carrier board*-a kako bi uklopili autopilot u svoj sustav. [30], [31]

Planiranje rute leta konfigurirano je uz pomoć Mission Planner-a, softver razvojnog tima ArduPilot Development Team baziranom na operativnom sustavu Windows koji predstavlja kontrolnu stanicu za avione, helikoptere i bespilotne letjelice te je također kompatibilan sa autopilotima iz Pixhawk serije. Mission Planner koristi se kao uslužni program za konfiguraciju ili kao dodatak za dinamičku kontrolu autonomnog vozila. Neke od ključnih funkcionalisti ovog sustava su: [32]

- podešavanje optimalnih performansi letjelice
- planiranje, spremanje i učitavanje misija u autopilot jednostavnim unosom rute kroz Google maps ili neke druge karte
- preuzimanje i analiziranje zapisnika misija koje generira autopilot
- praćenje status letjelice prilikom leta
- spremanje telemetrijskih zapisnika
- pregled i analiza telemetrijskih zapisnika
- upravljanje letjelicom iz pogleda u prvom licu (engl. *First Person View* – FPV).

Kako se podaci koje je potrebno prikazati nalaze u video zapisu potrebno ih je izvući kako bi se njima moglo manipulirati. U svrhu izvlačenja podataka iz video zapisa korišten je programski jezik Python verzija 3.6.4 i biblioteka OpenCV. Open Source Computer Vision Library je biblioteka softvera otvorenog koda za računalni vid i strojno učenje. Biblioteka sadrži optimizirane najsuvremenije algoritme, a neki od njih su u ovom radu iskorišteni za prepoznavanje objekata iz video zapisa, praćenja objekta u pokretu, prepoznavanje specifičnih dijelova snimke u jednoj slici i povezivanje istih dijelova u sljedećoj slici snimke.

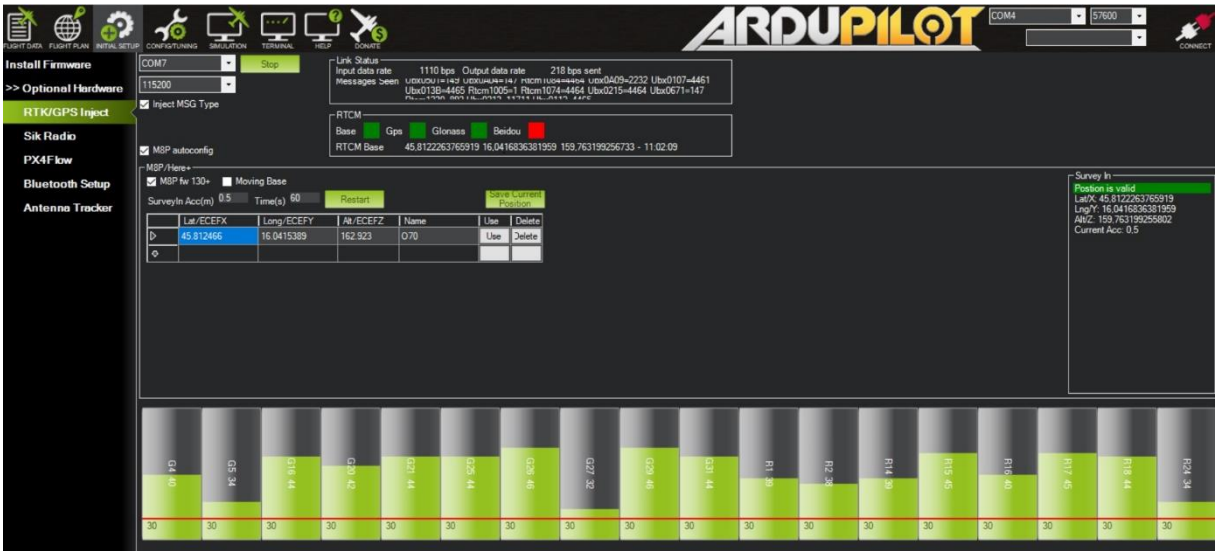
4.2. Praktična izvedba procjene točnosti lociranja primjenom sustava Here+ RTK

Ranije je već navedeno kako je za potrebe prikupljanja mjerenja bilo potrebno odraditi dva preleta bespilotnom letjelicom. Prvi prelet gdje se bespilotna letjelica navigira uz samo Here GPS prijamnik te drugi prelet, pri kojemu se letjelica navigira Here+ GPS/RTK prijamnikom uz pomoć dodatne prijamničke stanice. Bespilotna letjelica kretala se iznad parkirališnih mjesta na znanstveno-učilišnom kampusu Borongaj.

Slika 12. Prikaz RTK bazne stanice spojene na računalo

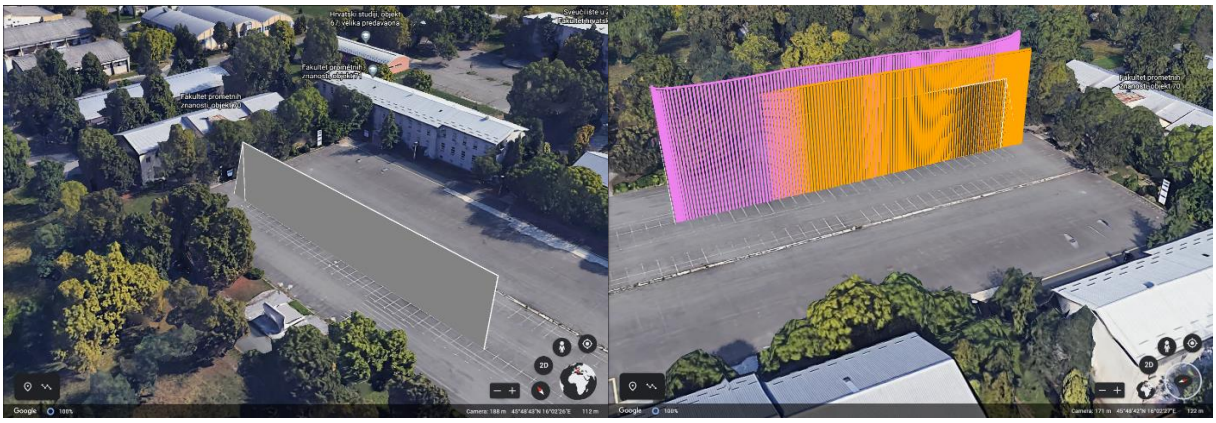
Prije preleta bespilotnom letjelicom uz navigaciju Here+ RTK prijamnikom je potrebno postaviti dodatnu prijamničku stanicu za navigaciju RTK tehnikom što je vidljivo na slici 12. Dodatna prijamnička stanica koja služi sa slanje korekcijskih podataka pokretnom prijamniku, u našem primjeru pokretni prijamnik, je bespilotna letjelica koja se mora locirati kako bi utvrdila vlastitu poziciju na temelju koje se računaju korekcijski podaci.

Putem Mission Planner-a također se određuje s kojom će se preciznošću dodatna prijamnička stanica locirati u prostoru, što je vidljivo sa slike 13, a za svrhe ovih snimanja dodatna prijamnička stanica je odredila svoj položaj s greškom ±0,5 m za što je bilo potrebno 80 minuta.



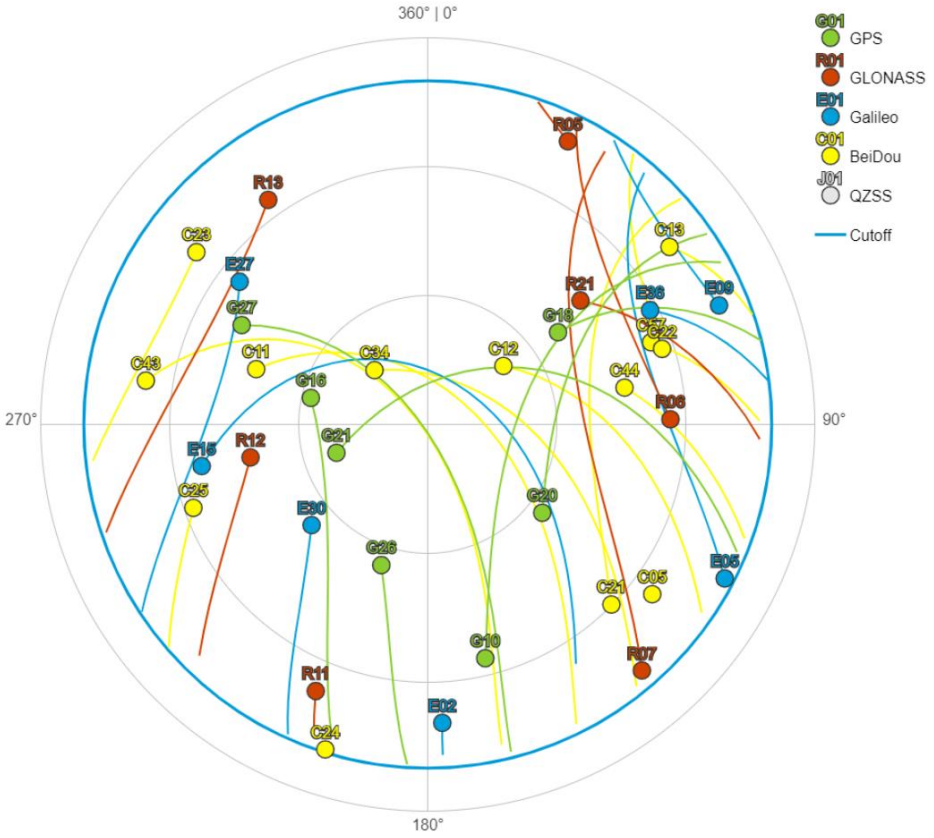
Slika 13. Prikaz lociranja RTK dodatne prijamničke stanice u Mission Planner-u

Prije leta je također potrebno isplanirati rutu leta, odnosno točke, koordinate puta te ih unijeti u Mission Planner. Planirana ruta je vidljiva na lijevoj strani slike 14, dok je na desnoj strani slike 14 vidljiva putanja letjelice nakon provedenih letova.



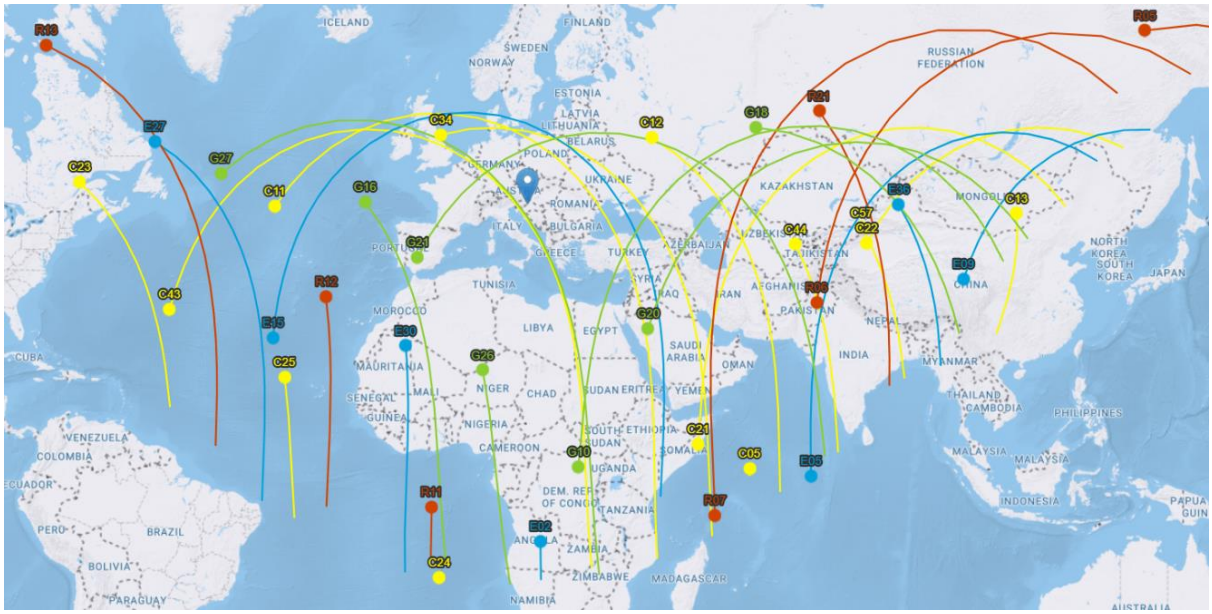
Slika 14. Prikaz planirane rute lijevo i putanje provedenih letova desno

Potrebno je napomenuti kako su letovi odrađeni na datum 22.7.2020. između 13 i 16 sati. Koordinate početne točke leta jesu 45°48'44,6956" sjeverne zemljopisne širine i 16°2'28,8409" istočne zemljopisne dužine. Služeći se ovim podacima o lokaciji i vremenu, a pomoću Trimble GNSS Planning web aplikacije, može se prikazati konstelaciju dostupnih satelita što je vidljivo iz slike 15. Prikaz konstelacije satelita prikazan je za period od 6 sati to jest interval od 12 do 18 sati.



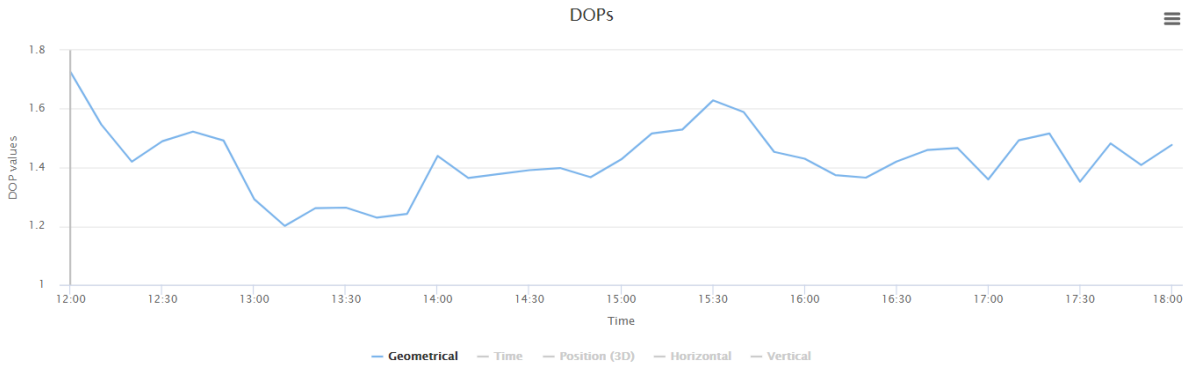
Slika 15. Prikaz nebeske parcele s promatranom lokacijom u središtu, [33]

Konstelacija vidljivih satelita u navedenom periodu može se i prikazati na karti svijeta, a vidljiva je na slici 16. Pozicija leta označena je plavim markerom.



Slika 16. Konstelacija vidljivih satelita prikaz na karti Zemlje, [33]

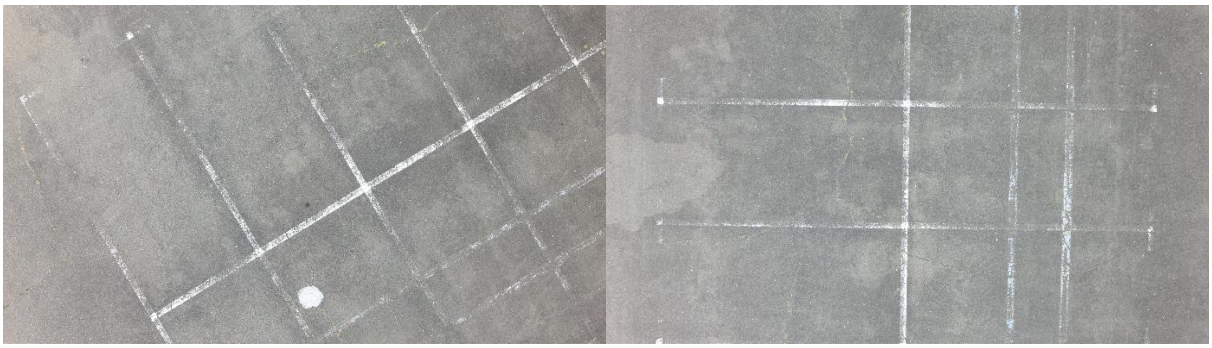
Na temelju podataka o vremenu i lokaciji leta također se može prikazati kretanje GDOP vrijednosti za period kada se let odvijao, što je prikazano grafikonom 1.



Grafikon 1. Kretanje GDOP vrijednosti, [33]

Iz grafikona je vidljivo da se vrijednost GDOP-a u vrijeme trajanja leta, od 13 do 16 sati, kretao u vrijednostima od 1,2 do 1,63. GDOP je vrijednost koja se kreće od 1 do beskonačno. Što je vrijednost manja, manji je i utjecaj greške prilikom lociranja. S obzirom na činjenicu da je u periodu leta bilo oko 30 vidljivih satelita, utjecaj greške je vrlo mali što i potvrđuje sama vrijednost GDOP-a.

Nakon provedenih letova i odrađenih snimanja potrebno je pregledati snimke i izvući odgovarajuća mjerenja. Cilj je snimiti bijelu liniju parkirališnih mjesta iznad koje se bespilotna letjelica kreće. Na temelju odstupanja kretanja bespilotne letjelice od željene linije bit će određena mogućnost praćenja trajektorije pojedinom tehnologijom. Odstupanja će biti izračunata brojanjem piksela iz pojedine slike video zapisa. Pikseli se broje od lijeve strane slike do srednje bijele linije iznad koje bespilotna letjelica leti. U idealnim uvjetima, gdje ne postoje greške u lociranju niti nema utjecaja vanjskih faktora, bespilotna letjelica bi trebala biti savršeno pozicionirana iznad bijele linije. Kako je rezolucija slika postavljena u Full HD format, 1920×1080, bijela linija bi se trebala nalaziti uvijek na sredini slike odnosno na 960. pikselu. Primjer dvije slike iz snimke je vidljiv na slici 17. Svaki uzorak koji je veći ili manji od 960 piksela, čija će udaljenost biti veća ili manja od 960 piksela u horizontalnoj ravnini predstavljati će grešku u pomaku odnosno odstupanje od ispravne pozicije.



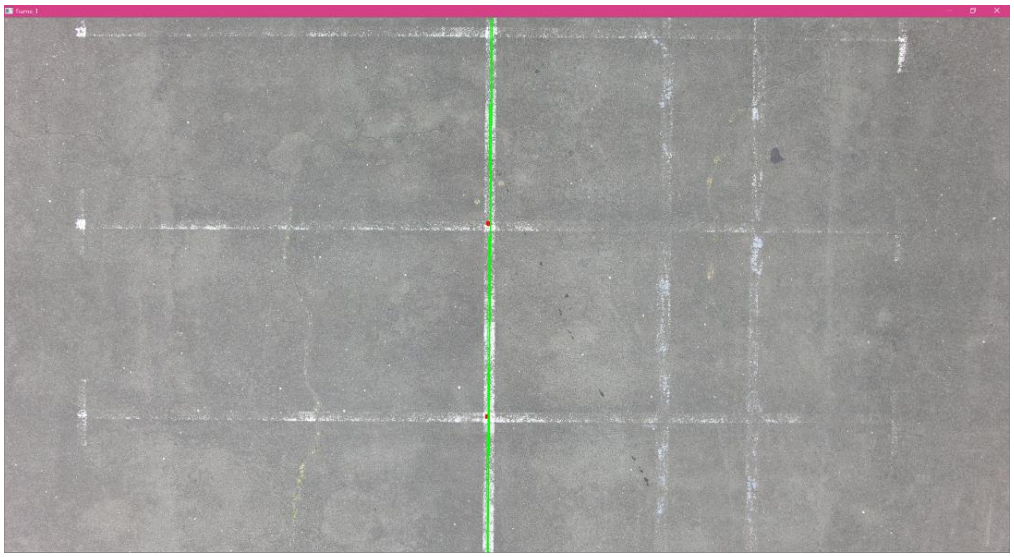
Slika 17. Primjer dvije slike iz videosnimke

Video zapis leta koji traje 24 sekunde sastoji se od približno 560 slika, a iz svake slike može se dobiti 1080 uzoraka jer visina slike iznosi 1080 piksela. S obzirom na to da nije potreban tako veliki uzorak mjerenja u obzir će se uzimati svaka treća slika video zapisa. Tada će iz svakog video zapisa biti raspoložive ukupno 184 slike, pri čemu će se generirati ukupno 198720 uzoraka s kojima će se vršiti usporedba. Usporedba će se vršiti između odstupanja snimke preleta koja je odrađena Here GPS prijamnikom i snimke preleta koja je odrađena uz Here+ RTK prijamnik. Rezultati su prikazani u sljedećoj cjelini.

Za mjerenje udaljenost u pikselima sa slike, potrebno je obraditi video u Pythonu uz OpenCV algoritme. Nužno je naglasiti kako je radi brže obrade podataka, prilikom brojanja piksela, odrađena promjena rezolucije slika. Slike su konvertirane iz izvorne rezolucije 3840×2160 u Full HD rezoluciju 1920×1080. Kao rezultat promijene rezolucije, dobivene mjere piksela su u decimalnom zapisu što će kasnije biti vidljivo u poglavlju 5.

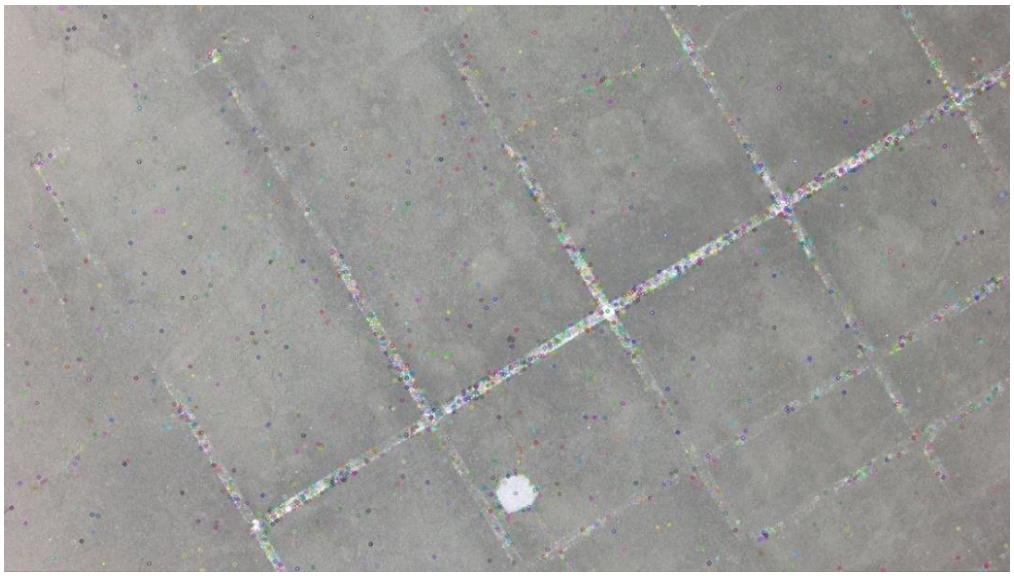
Prvi korak u procesu mjerenja udaljenosti je određivanje pravca na prvoj slici video zapisa, što je učinjeno određivanjem dvije jedinstvene, karakteristične točke na slici koje određuju pravac kroz središnju liniju parkirališta. Složena je vizualizacija prve slike i omogućeno da se dvoklikom miša ispisuju koordinate položaja miša u slici. Nakon prvog koraka dobivene su točke koje definiraju pravac za prvu sliku. Cilj je preslikati točke u sljedeće slike video zapisa i na taj način odrediti pravac kroz središnju liniju parkirališta u svim slikama.

Dovoljno je opisati algoritam za preslikavanje točaka između dviju susjednih slika za što je potrebno odrediti homografiju između istih. Dakle, homografija koja omogućuje određivanje položaja točaka između dvije susjedne ravnine u ovom primjeru je korištena za određivanje pravca kroz slike iz video zapisa. Homografija se određuje u dva koraka:



Slika 18. Definirani pravac pomoću dvije točke

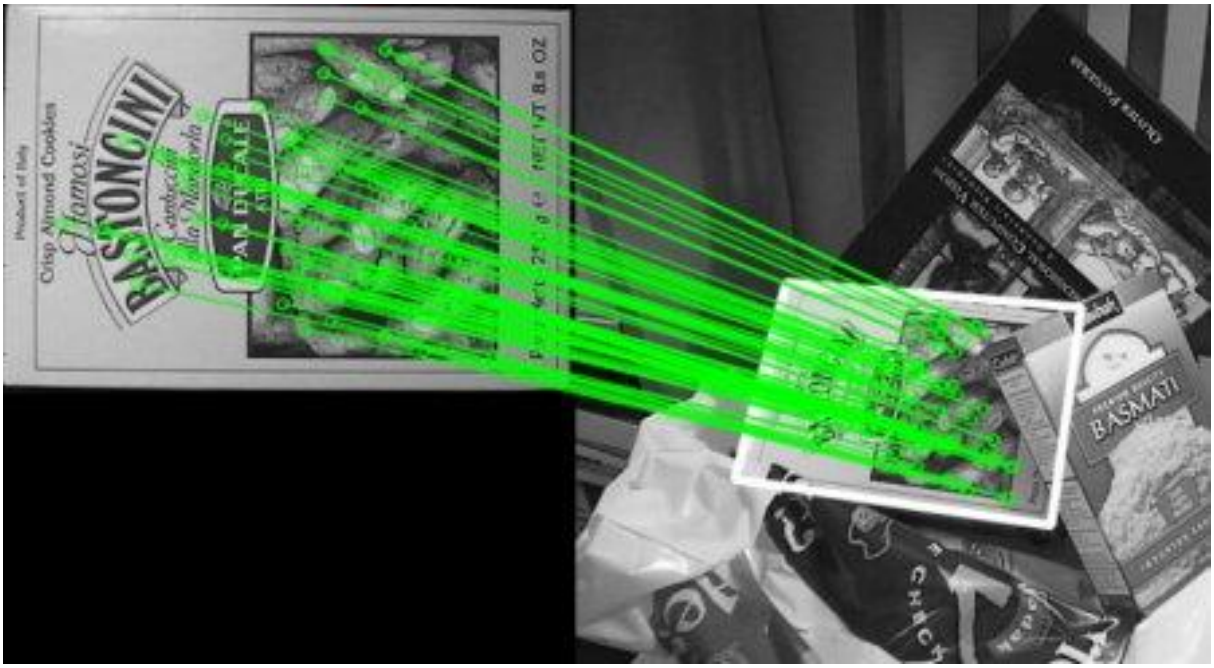
1) Pomoću SIFT (engl. *Scale-Invariant Feature Transform*) algoritma u svakoj slici određuju se ključne točke i njihovi deskriptori. Ključna točka je lokacija u slici na kojoj postoji velika promjena u gradijentu slike, odnosno gdje je magnituda gradijenta velika. Deskriptor je vektor dimenzije 128 koji opisuje pojedine ključne točke, odnosno lokacije.



Slika 19. Prikaz ključnih točaka označenih kružićima

2) Usporedba deskriptora između dvije susjedne ravnine, u ovom slučaju između dvije slike, napravljena je tzv. *FlannBasedMatcher*-om te su na taj način dobiveni parovi sličnih deskriptora iz kojih se filtriraju oni s lošijim podudaranjem. Lokacije dobrih podudaranja koriste se za određivanje homografije. Dakle, određene su točke u prvoj

slici te njihove nove lokacije u drugoj slici. Koristeći OpenCV-u funkciju *findHomografy* računa se matrica homografije koja preslikava točke prve slike u točke druge slike.



Slika 20. Prikaz principa rada algoritma za računanje homografije

Slikom 20. su prikazani deskriptori specifični za prikazani proizvod iz slike. Na desnoj strani slike 20. vidljivo je da je proizvod promijenio svoj položaj, ali usporedbom deskriptora moguće je odrediti da se radi doista o tom proizvodu te čak odrediti njegov novi položaj. Na istom principu prati se srednja bijela linija iz video zapisa snimljenih bespilotnom letjelicom. Ako se pogleda lijeva strana slike 17., vidi se različit položaj srednje bijele linije u odnosu na desnu stranu slike. Usporedbom deskriptora uspijeva se uvijek pronaći pravac koji je određen na toj liniji.

Prethodno opisanim algoritmom mogu se transformirati točke između dvije susjedne slike, a s obzirom da je potrebna lokacija početnih dviju točaka kroz cijeli video, spomenuti algoritam bit će primijenjen između svake dvije susjedne slike.

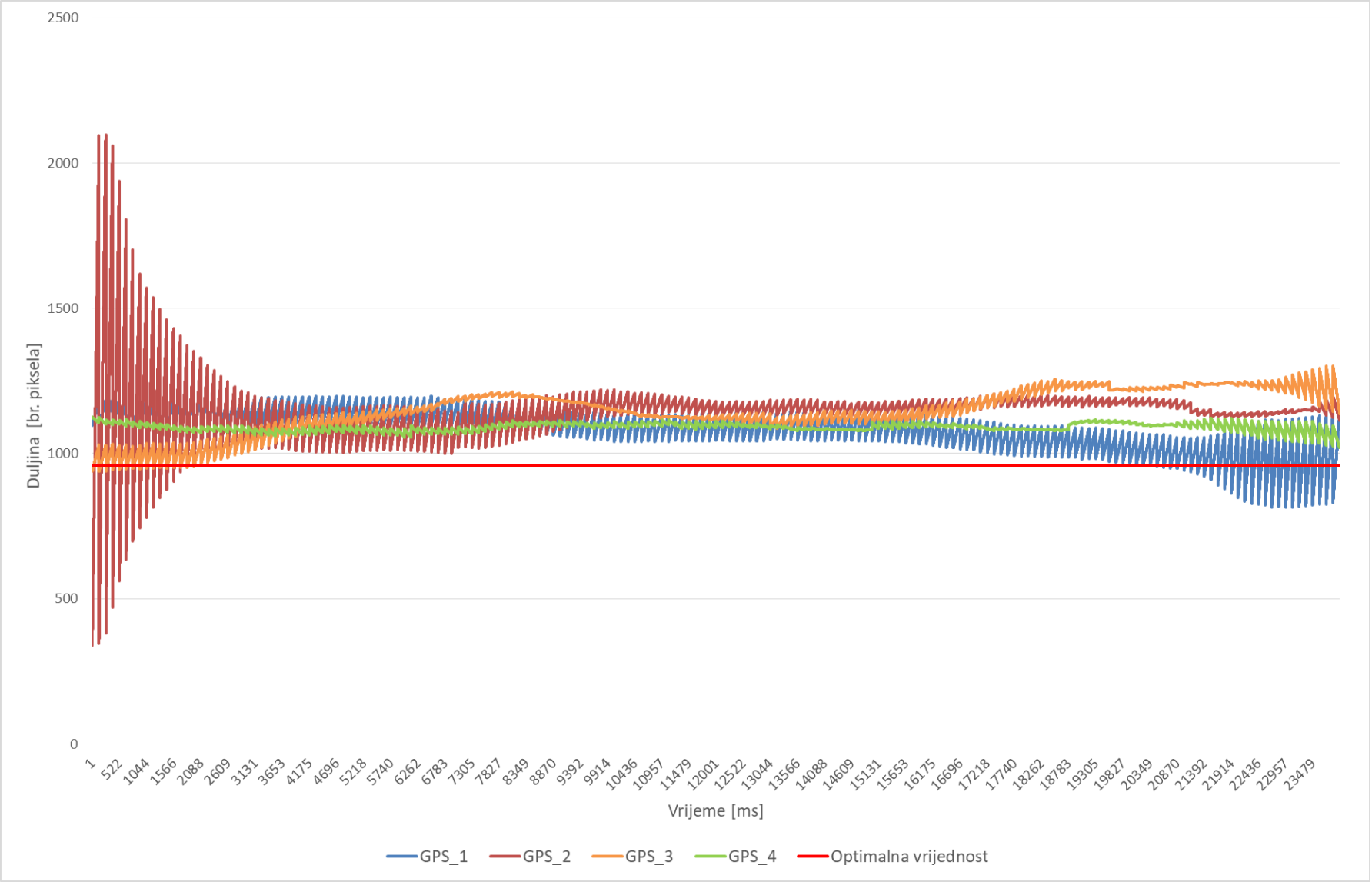
5. Rezultati mjerenja

Obrada mjerenja, koja su prikupljena kako je opisano u prethodnom poglavlju, odrađena je kroz MS Office Excel. S obzirom na to da je odrađeno 4 preleta svakim prijamnikom, GPS i RTK, prvo su odabrana dva najbolja leta, po jedan let od svakog prijamnika. Na temelju odabrana najbolja dva leta napravljena je usporedba mogućnosti praćenja trajektorije leta bespilotne letjelice, ovisno o prijamniku. Najbolji, odnosno najpreciznji let odabran je promatranjem ukupnog odstupanja pojedinog leta od definirane fiksne vrijednosti. Prvi let GPS prijamnikom nosi oznaku GPS_1, drugi oznaku GPS_2, treći GPS_3, a četvrti let nosi oznaku GPS_4. Svi prikupljeni uzorci poredani su vremenski. Uzorci su izraženi brojem prebrojanih piksela, a ukupan broj uzoraka iznosi 198720 kao i kod svih letova. Ukupni vremenski period trajanja leta je 24 sekunde. Vrijeme je u tablicama izraženo u milisekundama radi preciznijeg prikaza distribucije uzoraka kroz kratak vremenski period.

Tablica 6. Usporedba GPS letova

Broj uzorka	Vrijeme [ms]	GPS_1 [br. piksela]	GPS_2 [br. piksela]	GPS_3 [br. piksela]	GPS_4 [br. piksela]	Optimalna udaljenost [br. piksela]
1	1	1096,00	338,99	937,99	1125,48	960
2	1	1096,08	340,62	938,08	1125,46	960
3	1	1096,16	342,25	938,16	1125,45	960
4	1	1096,24	343,87	938,25	1125,43	960
...						
198717	24000	1140,53	1115,37	1138,15	1019,55	960
198718	24000	1140,82	1115,29	1137,99	1019,48	960
198719	24001	1141,10	1115,22	1137,84	1019,41	960
198720	24001	1141,39	1115,14	1137,69	1019,34	960

U tablici 6 vidljivi su uzorci za pojedini let s GPS prijamnikom. Svaki uzorak predstavlja izmjerenu udaljenost od lijevog ruba slike do promatranog pravca u jedinici broj piksela. Idealna udaljenost je 960 piksela kako je navedeno u stupcu „Optimalna udaljenost“. Grafički prikaz podataka iz tablice 7 vidimo na grafikonu 2.



Grafikon 2. Usporedba letova GPS prijamnikom

Za određivanje najpreciznijeg leta, potrebno je izračunati koji od njih ima najmanje odstupanje. Za izračun odstupanja, prvo je izračunato odstupanje pojedinog uzorka od optimalne udaljenosti kao apsolutna vrijednost njihove razlike. Optimalnu vrijednost definirana je kao 960 piksela. Ukoliko ne postoji prisutnost greške prilikom leta razlika ovih vrijednosti će iznositi 0.

Primjerice, prvi uzorak leta GPS_1 je 1096,00 piksela. Apsolutna vrijednost razlike tog uzorka od optimalne udaljenosti je $|1096{,}00 - 960| = 136{,}00$ piksela. Taj podatak je vidljiv kao prva vrijednost u stupcu GPS_1 tablice 7., dok je krajnji rezultat vidljiv u zadnjem retku tablice 7.

Identičan postupak odrađen je za sve uzorke svakog leta. Dobivene vrijednosti vidljive su u tablici 7. Nakon izračuna razlika za svaki uzorak, ukupno odstupanje pojedinog leta dobiva se zbrajanjem izračunatih apsolutnih vrijednosti za taj let.

Tablica 7. Suma apsolutnih vrijednosti GPS letova

Broj uzorka	GPS_1 [br. piksela]	GPS_2 [br. piksela]	GPS_3 [br. piksela]	GPS_4 [br. piksela]
1	136,00	621,01	22,01	165,48
2	136,08	619,38	21,92	165,46
3	136,16	617,75	21,84	165,45
4	136,24	616,13	21,75	165,43
...				
198717	180,53	155,37	178,15	59,55
198718	180,82	155,29	177,99	59,48
198719	181,11	155,22	177,84	59,41
198720	181,39	155,14	177,69	59,34
SUMA:	26049980,53	38097553,53	37045499,84	25952675,93

Najprecizniji let je onaj s najmanjom sumom apsolutnih vrijednosti. Najmanja suma označava da mjerenja pojedinog leta imaju najmanju pogrešku u lociranju, odnosno, u globalu, najmanje odstupaju od optimalne vrijednosti u odnosu na vrijednosti izmjerenih kod ostalih letova. Zelenom bojom je označen let GPS_4 koji ima najmanju sumu, a time i najmanje ukupno odstupanje od optimalne vrijednosti.

Identičan postupak potrebno je učiniti s RTK uzorcima. U tablici 9. vidljiv je prikaz usporedbe letova odrađenih RTK prijamnikom uz dodatnu prijamničku stanicu. Kao i kod GPS letova, prvi RTK let nosi naziv RTK_1, drugi let RTK_2, treći RTK_3 te posljednji četvrti let nosi naziv RTK_4. Uzorci su izraženi brojem prebrojanih piksela, a ukupan broj uzoraka iznosi 198720 kao i kod svih letova. Optimalna vrijednost je također 960 piksela jer predstavlja konstantnu na temelju koje se vrši usporedba između RTK i GPS letova. Vrijeme trajanja leta je 24 sekunde, a radi preciznijeg prikaza, podaci su kao i za GPS letove prikazani u milisekundama.

Tablica 8. Usporedba RTK letova

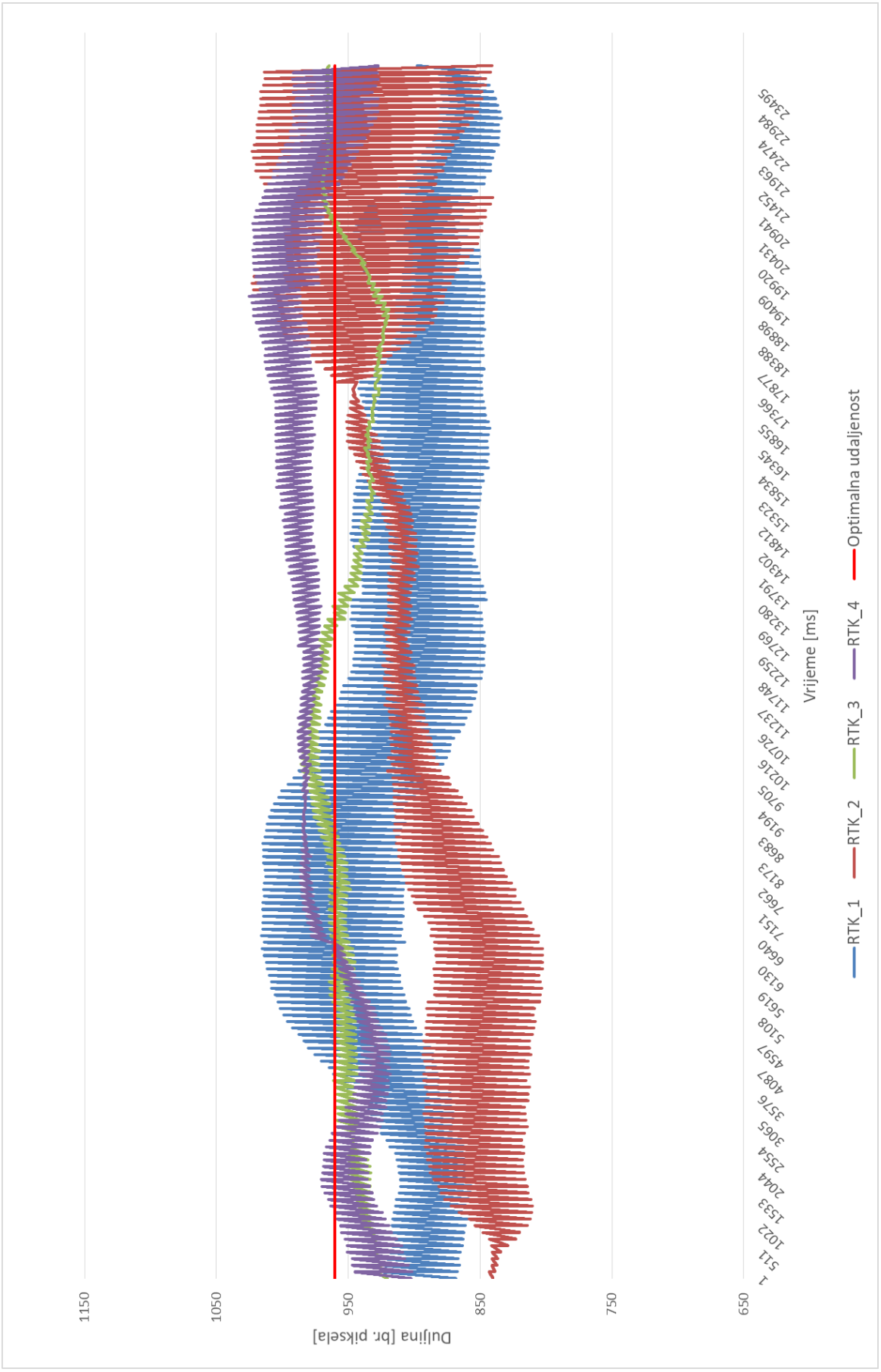
Broj uzorka	Vrijeme [ms]	RTK_1 [br. piksela]	RTK_2 [br. piksela]	RTK_3 [br. piksela]	RTK_4 [br. piksela]	Optimalna udaljenost [br. piksela]
1	1	868,37	840,19	920,48	902,30	960
2	1	868,42	840,19	920,48	902,34	960
3	1	868,47	840,20	920,49	902,38	960
4	1	868,52	840,20	920,49	902,42	960
…						
198717	24000	897,66	841,17	964,63	927,97	960
198718	24000	897,71	841,01	964,63	927,91	960
198719	24001	897,75	840,85	964,63	927,85	960
198720	24001	897,79	840,69	964,62	927,67	960

Grafički prikaz vrijednosti uzoraka iz tablice 8 nalazi se na grafikonu 3. Najprecizniji let odabran je istom metodom kao i za GPS letove, računanjem sume apsolutnih vrijednosti razlika uzoraka i optimalne vrijednosti. Izračunate sume su prikazane tablicom 9. Kako je ranije već spomenuto, radi promjene izvorne rezolucije slika video zapisa iz 3840×2160 u rezoluciju 1920×1080, vrijednosti piksela nisu cjelobrojne vrijednosti već su prilikom pretvorbe ostali zapisani kao decimalni brojevi.

Tablica 9. Suma apsolutnih vrijednosti RTK letova

Broj uzorka	RTK_1 [br. piksela]	RTK_2 [br. piksela]	RTK_3 [br. piksela]	RTK_4 [br. piksela]
1	91,63	119,80	39,52	57,69
2	91,58	119,80	39,52	57,66
3	91,53	119,79	39,51	57,62
4	91,48	119,79	39,50	57,58
...				
198717	62,34	118,83	4,63	32,03
198718	62,29	118,99	4,63	32,09
198719	62,25	119,15	4,62	32,15
198720	62,21	119,31	4,62	32,33
SUMA:	11205252,97	13381006,69	3059909,72	4811893,60

Let s najmanjim odstupanjima je RTK_3 što je vidljivo iz izračunatih suma. Daljnja usporedba će se vršiti između dva najpreciznija leta, GPS_4 i RTK_3, a udaljenosti, izražene brojem piksela, bit će preračunate u duljinu u centimetrima radi lakše interpretacije rezultata.



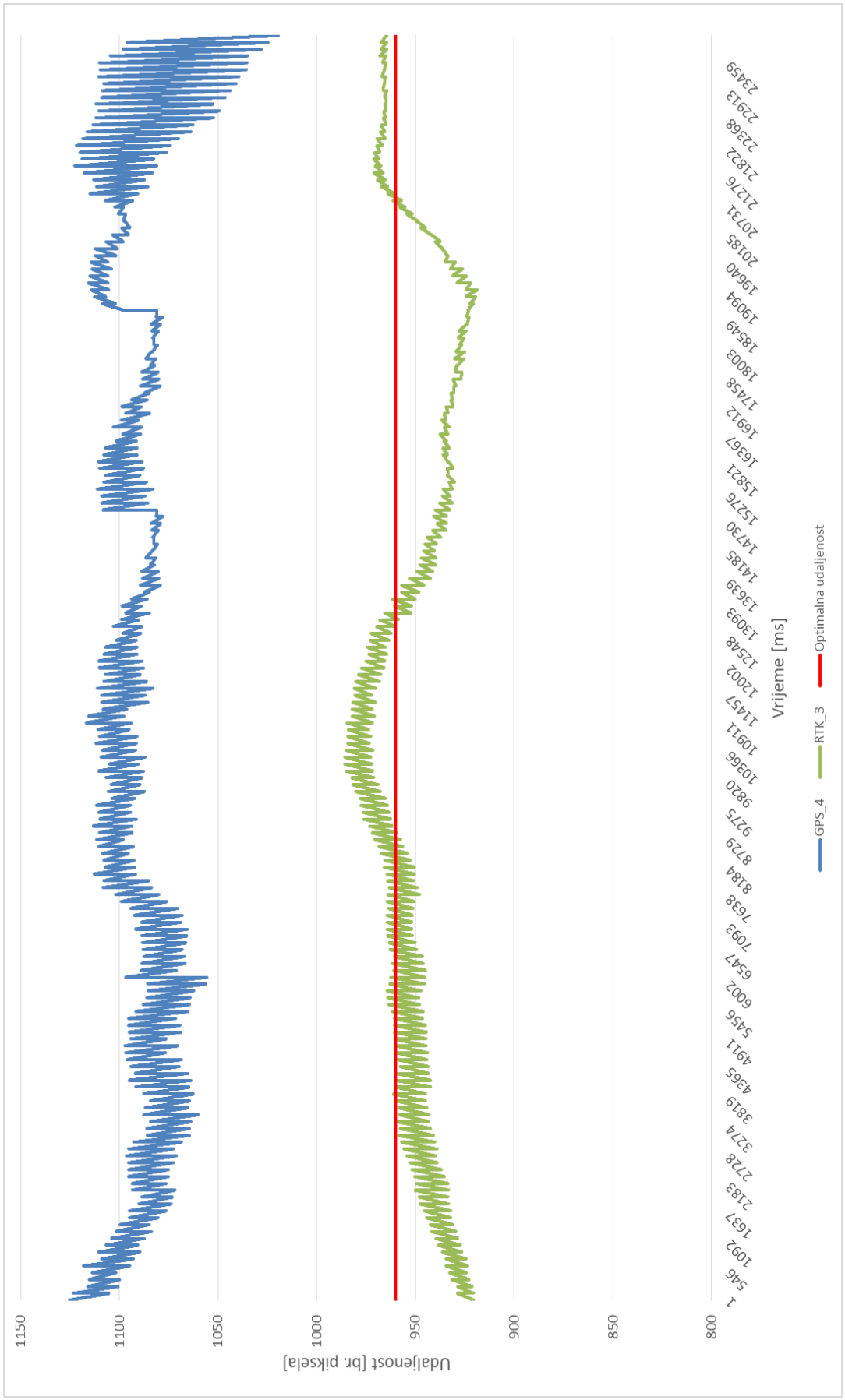
Grafikon 3. Usporedba letova RTK prijamnikom

Prilikom daljnje usporedbe dva odabrana leta bit će primijenjena ista metoda za utvrđivanje onog preciznijeg. S obzirom na to da je suma dobar pokazatelj koliko pojedini let ukupno odstupa od optimalne vrijednosti, letove je lako usporediti. Na temelju podataka iz tablice 6. za GPS_4 te tablice 8. za RTK_3, kreirana je nova tablica s izdvojenim podacima samo za te letove (Tablica 10.). Iz podataka u tablici 10. generiran je novi graf radi vizualizacije izmjerenih podataka.

Tablica 10. Usporedba najpreciznijih letova

Broj uzorka	Vrijeme [ms]	GPS_4 [br. piksela]	RTK_3 [br. piksela]	Optimalna udaljenost [br. piksela]
1	1	1125,48	920,48	960
2	1	1125,46	920,48	960
3	1	1125,45	920,49	960
4	1	1125,44	920,50	960
...				
198717	24000	1019,55	964,63	960
198718	24000	1019,48	964,63	960
198719	24001	1019,41	964,63	960
198720	24001	1019,34	964,62	960

Grafički prikaz uzoraka prikazan je grafikonom 3. Iz njega je vidljivo da generirana krivulja RTK mjerenja ima mali pomak u odnosu na optimalnu udaljenosti te gotovo kroz cijeli vremenski period promatranja približno leži na pravcu optimalne udaljenosti. Vidljivo je da GPS krivulja kretanja ima veći pomak od pravca optimalne udaljenosti u odnosu na RTK. Iako se već iz toga može zaključiti kako lociranje RTK prijamnikom manje odstupa od optimalne udaljenosti to će biti potkrepljeno izračunom suma dva najbolja leta.



Grafikon 4. Usporedba najpreciznijih letova

Vrijednosti iz tablice 10 koje su izražene brojem piksela bit će pretvorene u udaljenosti izražene u centimetrima. Sa snimke je izmjereno da je širina promatrane bijele linije 23 piksela. S obzirom na to da je njena stvarna duljina 13 centimetara, 1 piksel sa slike odgovara 0,565217 centimetara. Sukladno tome, vrijednosti iz tablice 11. pomnožene su s 0,565217 te su tako vrijednosti izražene u centimetrima, što je kao rezultat vidljivo u tablici 11.

Tablica 11. Usporedba najpreciznijih letova s udaljenostima u centimetrima

Broj uzorka	Vrijeme [ms]	GPS_4 [cm]	RTK_3 [cm]	Optimalna udaljenost [cm]
1	1	636,14	520,27	542,61
2	1	636,13	520,27	542,61
3	1	636,12	520,28	542,61
4	1	636,11	520,28	542,61
...				
198717	24000	576,27	545,23	542,61
198718	24000	576,23	545,22	542,61
198719	24001	576,19	545,22	542,61
198720	24001	576,15	545,22	542,61

Sada je lakše staviti udaljenosti u određene omjere te vidjeti da je optimalna tražena udaljenost zapravo 542,61 centimetara. Iz ovih par vrijednosti se naslućuje da je RTK precizniji oko 70 centimetara u odnosu na GPS pozicioniranje. Već samom usporedbom par uzoraka koji su prikazani u tablici 13 može se zaključiti da GPS prijamnik puno više odstupa od trajektorije leta u odnosu na odstupanje koje je izmjereno RTK prijamnikom. Prije nego izračuna ukupne sume potrebno je izračunati odstupanje od optimalne vrijednosti za svaki uzorak te je krajnji rezultat vidljiv u tablici 12.

Tablica 12. Suma apsolutnih vrijednosti najpreciznijih letova

Broj uzorka	GPS_4 [cm]	RTK_3 [cm]
1	93,53	22,34
2	93,52	22,34
3	93,51	22,33
4	93,50	22,32
...		
198717	33,66	2,62
198718	33,62	2,62
198719	33,58	2,61
198720	33,54	2,61
SUMA:	14668903,79	1729514,19

Kao dokaz da su prethodno navedene tvrdnje istinite, u tablici 12 je izračunata suma apsolutnih razlika između izmjerenih udaljenosti i optimalne udaljenosti. Suma za RTK_3 let iznosi značajno manje što potvrđuje da lociranje RTK prijamnikom odstupa manje o optimalne vrijednosti, odnosno lociranje je točnije za promatranu rutu kretanja bespilotne letjelice. Za bolje razumijevanje dobivenih podataka na temelju podataka iz tablice 12 izračunate su nove vrijednosti, prikazane u tablici 13.

Tablica 13. Statističke mjere odstupanja

Prijamnik	Prosjek duljina [cm]	Interkvartil duljina [cm]	Standardna devijacija duljina [cm]	Raspon varijacije duljina [cm]	Standardna devijacija od optimalne udaljenosti [cm]
GPS	73,82	10,40	7,70	60,00	74,22
RTK	8,7	10,48	6,02	23,25	10,58

Kao što je ranije navedeno, veće odstupanje od optimalne vrijednosti dobiveno je korištenjem GPS prijamnika u odnosu na odstupanja primjenom tehnike RTK, što pokrepljuju dobiveni iznosi prosjeka odstupanja. Kod GPS prijamnika odstupanje od optimalne udaljenosti je u prosjeku 73,82 cm dok je kod RTK prijamnika odstupanje u prosjeku 8,7 cm.

Zanimljivo je uočiti i kako su kretanja i GPS i RTK sustava zapravo pravolinijska što možemo vidjeti, iz standardnih devijacija svakog pojedinog skupa odstupanja. Standardne devijacije su vrlo slične, ali GPS prijamnik sa standardnom devijacijom iznosa 7,7 cm ipak ima manje pravilno kretanje u usporedbi sa RTK prijamnikom čija standardna devijacija iznosi 6,02 cm.

Isto tako, interkvartil duljina pokazuje kako i GPS i RTK prijamnik u 50% slučajeva imaju odstupanja nešto više od 10 cm. Međutim kada dolazi do većih devijacija po rasponu duljina odstupanja možemo vidljivo je da su ipak veća odstupanja prisutna kod GPS prijamnika te raspon iznosi 60 cm dok kod RTK prijamnika iznosi 23,25 cm. Dodatno iz raspona varijacije duljina odstupanja proizlazi kako GPS prijamnik više varira oko svoje aritmetičke sredine.

Standardna devijacija, koja prikazuje srednje kvadratno odstupanje, od optimalne udaljenosti kod GPS-a iznosi 74,22 cm, a kod RTK 10,58 cm, što pokrepljuje sve prethodno navedene zaključke kako je GPS manje precizan u odnosu na RTK te kako ima veći stupanj pogreške kod praćenja mjerene trajektorije.

Neophodno je napomenuti kako je standardna devijacija duljina kvadratno odstupanje od prosjeka skupa mjerenja i s njom je prikazano prosječno odstupanje od prosječnih vrijednosti mjerenja. Navedena je veličina neovisna o optimalnoj udaljenosti te je ne treba miješati sa standardnom devijacijom koja prikazuje prosječno odstupanje od optimalne udaljenosti.

6. Zaključak

Potreba za navigacijom s velikom preciznošću je krajnje neophodna za dinamičan i globalizirani svijet kakav danas poznajemo i u kojem živimo. Bitnu ulogu u globalnoj ekonomiji navigacijska preciznost ima već unazad desetak godina, a s daljnjim razvojem autonomnih sustava ova će uloga postati još značajnija. Satelitski navigacijski sustavi morati će se stoga konstantno poboljšavati kako bi omogućili vrlo precizna mjerenja. Naravno, postoje mnoge tehnike koje poboljšavaju lociranje, poput tehnike RTK. Danas se ova tehnika već uveliko primjenjuje za npr. geodetske izmjere, poljoprivredi, šumarstvu i sl. za upravljanje bespilotnim letjelicama ili nekim drugim autonomnim vozilima.

U ovom diplomskom radu primjenom tehnike RTK i potrebne opreme, prikazano je i dokazano kako je moguće postići centimetarsku preciznost prilikom lociranja i navigiranja vozila u stvarnom vremenu, što je dodatno istaknuto dokazima izvedenima iz mjerenja prikupljenih preletima bespilotnom letjelicom koja se samostalno navigirala prethodno spomenutom tehnikom. Mjerenja su obrađena pomoću biblioteke OpenCV i primjenom algoritama računalnog vida u svrhu izračuna rezultata odstupanja. Prelet odrađen samostalnim GPS prijamnikom postigao je sub-metarsku preciznost s odstupanjem od željene trajektorije iznosa 70-ak centimetara. Prilikom snimanja linije i praćenja odstupanja od željene trajektorije, primjenom tehnike RTK, postignuta je nešto veća preciznost koja je iznosila 20-ak centimetara. Rezultat pokazuje kako je korištenjem dodatne prijamničke stanice za izračun korekcijskih mjerenja moguće znatno poboljšati navigacijske sposobnosti autonomnih vozila.

Nedostatak ove tehnike leži u tome što je područje pokrivanja značajno ograničeno, s obzirom na to da je prijamniku bitna komunikacija s dodatnom prijamničkom stanicom radi primanja korekcijskih mjerenja. Povezivanjem više dodatnih prijamničkih stanica može se stvoriti mreža RTK koja pokriva veće područje, što naravno zahtijeva dodatna ulaganja koja nisu nužno isplativa ukoliko se ne radi o sustavima koji zahtijevaju iznimno visoku preciznost, a GPS za sada predstavlja još uvijek dobru alternativu za pozicioniranje i lociranje.

Literatura

[1] Hofmann–Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., „GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more“, SpringerWienNewYork, 2008.

[2] Jeffrey, C., „An Introduction to GNSS - GPS, GLONASS, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems“, First Edition, NavAtel Inc., 2010.

[3] Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J.M., Hernandez Pajares, M., „GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms“, ESA, 2013.

[4] Muštra, M., Separati s predavanja iz kolegija „Lokacijski i navigacijski sustavi“, Zagreb, 2018.

[5] Oxley, A., „Uncertainties in GPS Positioning“, Elsevier, 2017. Dostupno na *https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/l1-frequency*, pristup stranici: 6.9.2020.

[6] Galileo Programme, Dostupno na: *https://www.gsc-europa.eu/galileo/programme*, pristup stranici: 30.8.2020.

[7] Galileo Constellation Information, Dostupno na: *https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information*, pristup stranici: 30.8.2020.

[8] BeiDou Global Navigation Satellite System, Dostupno na: *https://www.GLONASS-iac.ru/en/guide/BeiDou.php*, pristup stranici 30.8.2020.

[9] Development of BeiDou Navigation Satellite System, Dostupno na: *http://en.BeiDou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202001/P020200116329195978690.pdf*, pristup stranici 30.8.2020.

[10] Filjar, R., „On suitability of massive GNSS pseudorange data for GNSS positioning performance studies“, 12th annual Baška GNSS Conference, Baška, Krk Island, Croatia, 2018. Dostupno na: *https://www.pfri.uniri.hr/web/hr/dokumenti/2018-GNSS-12.pdf*, pristup stranici: 12.7.2020.

[11] Kos, S., Filjar, R., Brčić, D., „GPS performance degradation caused by single satellite outage: A GPS PRN24 Croatia case study“, Scientific Journal of Maritime Research, 2012;26(1): 165-179, Dostupno na: *https://hrcak.srce.hr/file/124285*, pristup stranici: 12.7.2020.

[12] Introduction to GPS and other Global Navigation Satellite Systems, 2017. Dostupno na: *https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170004590.pdf*, pristup stranici: 13.7.2020.

[13] Real Time Kinematics, Dostupno na: *https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Real_Time_Kinematics*, pristup stranici: 22.7.2020.

[14] RTK Systems, Dostupno na: *https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/RTK_Systems*, pristup stranici: 22.7.2020.

[15] Introduction to Network RTK, Dostupno na: *http://www.wasoft.de/e/iagwg451/intro/introduction.html*, pristup stranici: 22.7.2020.

[16] RTK, Dostupno na: *https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1845*, pristup stranici: 24.7.2020.

[17] GNSS Basic Observables, Dostupno na: *https://gssc.esa.int/navipedia//index.php/GNSS_Basic_Observables*, pristup stranici 28.7.2020.

[18] Code-Phase GPS vs. Carrier-Phase GPS, Dostupno na: *https://www.trimble.com/gps_tutorial/sub_phases.aspx*, pristup stranici: 28.7.2020.

[19] Navigation, Interference Suppression, and Fault Monitoring in the Sea-Based Joint Precision Approach and Landing System, Dostupno na: *http://www.navlab.iit.edu/uploads/5/9/7/3/59735535/samer_ieee08_jpals.pdf*, pristup 28.7.2020.

[20] Generating Carrier Phase Measurements, Dostupno na: *https://insidegnss.com/generating-carrier-phase-measurements/*, pristup stranici 26.7.2020.

[21] RTK standards, Dostupno na: *https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/RTK_Standards*, pristup stranici: 30.7.2020.

[22] The Correction Signal, Dostupno na: *https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1838*, pristup stranici: 30.7.2020.

[23] DGNSS standards, Dostupno na: *https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/DGNSS_Standards*, pristup stranici: 31.7.2020.

[24] CMRx: A New Correction Format From Trimble, Dostupno na: *http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-469944/WhitePaper_HeavyHighway_CMRxrev1.pdf*, pristup stranici: 31.7.2020.

[25] Muštra, M., Radišić, T., Fosin, J., Petrec, D., „Capturing Bees using UAVs“, Mine Action Symposium 2018, Slano, Croatia, 2018.

[26] Here GNSS (M8N), Dostupno na: *https://www.u-blox.com/en/docs/UBX-15031086,* pristup stranici: 3.9.2020.

[27] HEX/ProfiCNC Here+ RTK GPS, *https://docs.px4.io/v1.9.0/en/gps_compass/rtk_gps_hex_hereplus.html*, pristup stranici: 3.9.2020.

[28] Here+ RTK (M8P), Dostupno na: *https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P_DataSheet_%28UBX-15016656%29.pdf,* pristup stranici 3.9.2020.

[29] Here+V2 User Manual, Dostupno na: *https://docs.cubepilot.org/user-guides/here+/here+v2-user-manual*, 5.9.2020.

[30] Pixhawk 2.1, Dostupno na: *http://www.proficnc.com/*, pristup stranici 5.9.2020.

[31] Cube Flight Controller, Dostupno na: *https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk-2.html*, pristup stranici 5.9.2020.

[32] Mission Planner Overview, Dostupno na: *https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html*, pristup stranici: 5.9.2020.

[33] Trimble GNSS Planning Online, Dostupno na: *https://www.gnssplanning.com/#/settings,* pristup stranici: 12.9.2020.

Popis ilustracija

Slika 1. Položaj antipodalnih satelita, [2] 5
Slika 2. Prikaz tehnike trilatacije 11
Slika 3. Prikaz položaja na površini sfere, [4] 12
Slika 4. Utjecaj položaja satelita na GDOP vrijednost, [12] 15
Slika 5. Utjecaj GDOP-a na procjenu položaja 16
Slika 6. Princip rada Real-Time Kinematic tehnike, [2] 21
Slika 7. Korelacija signala satelita i signala prijamnika, [17] 22
Slika 8. Usporedba valne duljine prijenosnog signala i pseudoslučajnog koda, [19] 23
Slika 9. Bespilotna letjelica 27
Slika 10. Shema bespilotne letjelice s ključnim komponentama, [25] 28
Slika 11. Shema spajanja RTK komponenti, [29] 29
Slika 12. Prikaz RTK bazne stanice spojene na računalo 31
Slika 13. Prikaz lociranja RTK dodatne prijamničke stanice u Mission Planner-u 32
Slika 14. Prikaz planirane rute lijevo i putanje provedenih letova desno 32
Slika 15. Prikaz nebeske parcele s promatranom lokacijom u središtu, [33] 33
Slika 16. Konstelacija vidljivih satelita prikaz na karti Zemlje, [33] 33
Slika 17. Primjer dvije slike iz videosnimke 35
Slika 18. Definirani pravac pomoću dvije točke 36
Slika 19. Prikaz ključnih točaka označenih kružićima 36
Slika 20. Prikaz principa rada algoritma za računanje homografije 37

Popis tablica

Tablica 1. Specifikacija GPS signala 4
Tablica 2. Galileo signali 7
Tablica 3. BeiDou signali 9
Tablica 4. Pogreške u GNSS sustavu, [2] 14
Tablica 5. Format poruke prema RTCM 3.2 standardu, [23] 25
Tablica 6. Usporedba GPS letova 38
Tablica 7. Suma apsolutnih vrijednosti GPS letova 40
Tablica 8. Usporedba RTK letova 41
Tablica 9. Suma apsolutnih vrijednosti RTK letova 42
Tablica 10. Usporedba najpreciznijih letova 44
Tablica 11. Usporedba najpreciznijih letova s udaljenostima u centimetrima 46
Tablica 12. Suma apsolutnih vrijednosti najpreciznijih letova 47
Tablica 13. Statističke mjere odstupanja od optimalne vrijednosti 47

Popis grafikona

Grafikon 1. Kretanje GDOP vrijednosti, [33] 34
Grafikon 2. Usporedba letova GPS prijamnikom 39
Grafikon 3. Usporedba letova RTK prijamnikom 43
Grafikon 4. Usporedba najpreciznijih letova 45

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj diplomski 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 diplomskog rada pod naslovom **POVEĆANJE TOČNOSTI LOCIRANJA SATELITSKIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA S DODATNOM PRIJAMNIČKOM STANICOM** na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 16.9.2020.

Student/ica:

D. Petrec

(potpis)