

Sveučilište u Zagrebu

Geodetski fakultet

Zavod za geomatiku

Katedra za satelitsku geodeziju

Kolegij: Integrirani sustavi u geomatici

Profesor: prof. dr. sc. Željko Bačić

Izradile: Marija Jerkić i Ljiljana Šimić

**Uzroci i posljedice interferencije GNSS signala u
urabnim sredinama**

Seminarski rad

U Zagrebu, siječanj, 2025.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. GNSS SIGNAL.....	2
3. OMETANJE GNSS SIGNALA.....	4
3.1. Namjerno ometanje GNSS signala	4
3.2. Nenamjerno ometanje GNSS signala.....	5
3.2.1. Multipath.....	6
3.3. Posljedice interferencije GNSS signala	7
4. PRIKUPLJANJE PODATAKA.....	8
4.1. Rinex format	10
4.2. Signal-to-Noise Ratio (SNR) podaci	12
4.3. CROPOS	13
5. ANALIZA PODATAKA.....	14
5.1. Rezultati analize podataka	14
5.2. Detaljna analiza L1 frekvencije	22
5.3. Usporedba opažanja s instrumenta s opažanjima na CROPOS stanici.....	25
6. OBRADA PODATAKA.....	31
6.1. Analiza i obrada podataka u TBC-u.....	32
7. ZAKLJUČAK.....	39
8. LITERATURA	40
9. POPIS SLIKA.....	42
10. POPIS TABLICA	43

1. UVOD

Globalni navigacijski satelitski sustavi (GNSS) neizostavna su tehnologija u geodetskim mjerenjima, navigaciji i mnogim drugim primjenama koje zahtijevaju visoku preciznost i pouzdanost. Prvotno razvijeni za vojne svrhe, GNSS sustavi brzo su našli široku primjenu u geodeziji, donoseći značajna poboljšanja u točnosti, učinkovitosti i smanjenju troškova. S razvojem tehnologije i minijaturizacijom senzora, GNSS je integriran s raznolikim sensorima, omogućujući inovativne primjene u geodetskoj struci i šire.

Danas GNSS sustavi pružaju precizne prostorne informacije koje su ključne za upravljanje vozilima na vodi, u zraku i na kopnu. Osim profesionalnih primjena, GNSS se sve više koristi u svakodnevnim aktivnostima, uključujući mobilnu navigaciju i usluge temeljene na lokaciji, poput Google karata i društvenih mreža. Međutim, unatoč širokoj primjeni i važnosti GNSS-a, njihova pouzdanost u urbanim sredinama može biti ozbiljno ugrožena zbog specifičnih uvjeta prijema signala.

U urbanim područjima kvaliteta GNSS signala često je kompromitirana izazovima poput višestrukih refleksija signala (multipath efekti), namjernog i nenamjernog ometanja te drugih oblika interferencija. Ovi faktori značajno utječu na točnost opažanja, otežavajući primjenu GNSS tehnologije u uvjetima koji zahtijevaju visoku preciznost.

Točnost GNSS signala uvelike je povezana s mogućnošću prepoznavanja i razumijevanja interferencija koje se javljaju tijekom opažanja. Ovaj rad posvećen je analizi podataka prikupljenih GNSS opažanjem u urbanim sredinama kako bi se utvrdilo kako faktori poput višestrukih refleksija signala (multipath efekata), omjera signala i šuma (SNR) te lokalnih ometača utječu na kvalitetu opažanja. Kroz analizu podataka cilj je razjasniti obrasce smetnji i njihovo prepoznavanje u podacima te procijeniti njihovu ulogu u degradaciji kvalitete signala.

U ovom istraživanju korištena je statička relativna metoda GNSS opažanja na odabranoj lokaciji u Zagrebu, uz usporedbu prikupljenih podataka s podacima CROPOS referentne stanice. Obrada podataka izvršena je pomoću naprednih softverskih alata, uključujući Trimble Business Center i RTKLIB, kako bi se analizirali ključni parametri koji utječu na kvalitetu signala.

2. GNSS SIGNAL

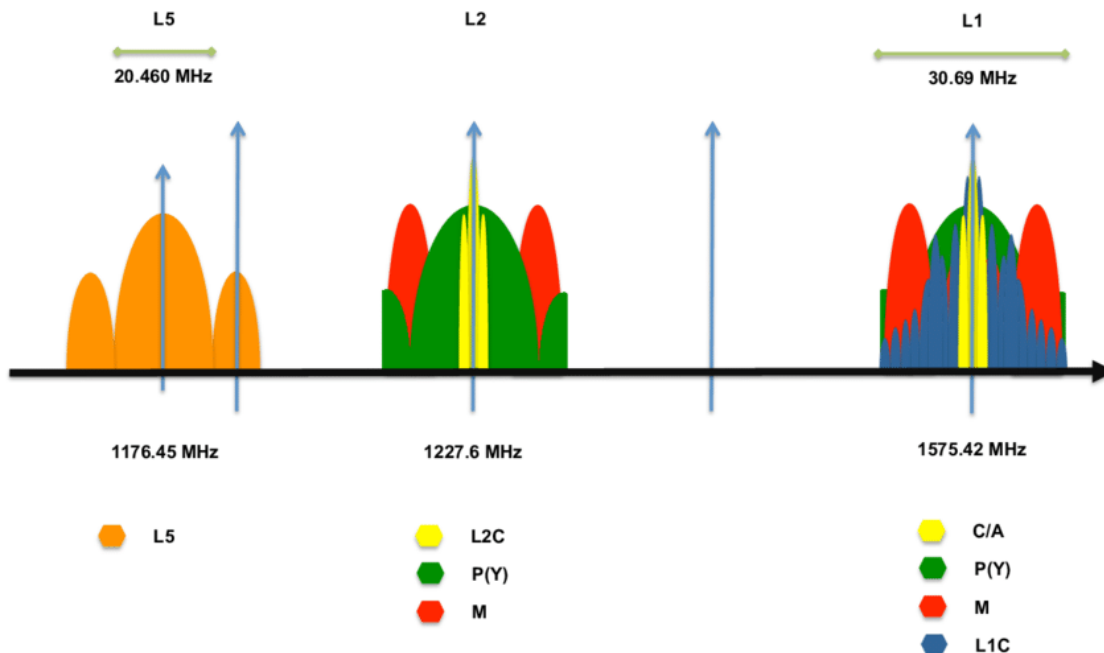
Glavna zadaća GNSS satelita je da kontinuirano odašilje frekvencijske signale. Frekvencijski signali emitiraju se u L-područje. L- frekvencijski raspon se odnosi na frekvencije između 1 i 2 GHz, što je definirala i Međunarodna unija za telekomunikacije (engl. International Telecommunications Union, ITU). Upravo valovi tih frekvencija imaju mogućnost prodiranja oblaka, magle, kiše i vegetacije, no ne i velikih šumskih krošnji i betonskih zgrada (Dević, 2021). Signali se prostiru sinusoidalno i kružno polarizirani prema pravilu desne ruke. Njihov sadržaj uključuje kodove i navigacijske podatke koji korisnicima omogućuju precizan izračun vremena putovanja signala od satelita do prijemnika te određivanje koordinata u bilo kojem trenutku. Možemo razlikovati tri glavne komponente signala (Slika 1):

- Noseći val: Predstavlja sinusni signal radiofrekvencije na određenoj frekvenciji. Kod GPS sustava, elektromagnetski signal generira se pomoću oscilatora ili frekvencijskih standarda (satova). Oscilatori na satelitima generiraju fundamentalnu frekvenciju od $f = 10,23$ MHz. Ova frekvencija se cjelobrojnim multipliciranjem koristi za stvaranje tri noseća vala u L-području, označena kao L1, L2 i L5. Multiplikatori su 154, 120 i 115, čime se dobivaju frekvencije odgovarajućih nosećih valova.
Tako generirane frekvencije ključne su za preciznu eliminaciju utjecaja ionosfere, osobito uz korištenje dviju nosećih frekvencija.
- Pseudoslučajni šumni kodovi (PRN kodovi): moduliraju noseće signale satelita, omogućujući prijemnicima očitavanje sata satelita i prijenos informacija, uključujući parametre orbite. PRN kodovi sastoje se od nizova stanja +1 i -1, što odgovara binarnim vrijednostima 0 i 1. Iako izgledaju poput šuma, imaju poznatu frekvenciju i valnu duljinu. Korelacijom koda generiranog u satelitu s kodom generiranim u prijemniku, dolazi do prividnog ubrzanja signala, tj. pseudoudaljenosti između satelita i prijemnika. U GPS sustavu postoje različiti kodovi: C/A kod (grube točnosti) za civilnu uporabu na L1 nosaču, P kod (precizne točnosti) na L1 i L2, te Y kod (zaštićeni, kombinacija P i W kodova). Moderni sateliti koriste i M kod za bolju sigurnost. Osim PRN koda, modulira se i D kod koji nosi navigacijsku poruku s efemeridama, parametrima za korekciju sata i almanahom. Efemeride se ažuriraju svaka dva sata, a almanah najmanje svaka četiri do šest dana. Za

precizno pozicioniranje, prijemnici analiziraju signale za izračun pseudoudaljenosti. Točnije mjerenje dolazi iz faznih razlika valova, no ta mjerenja mogu biti višeznačna.

- Navigacijska poruka: Binarna kodirana poruka koja pruža informacije o sinkronizacijskoj maski, epohi, koeficijentima kvadratnog polinoma za modeliranje korekcije sata satelita, broadcast efemeridama dotičnog satelita, satelitski zdravstveni status i druge komplementarne podatke. Većina informacija je samo za vojnu uporabu, ostatak je rezerviran za podatke almanaha za sve satelite u orbiti (Hulina, 2018).

Velik dio snage signala rasprši se tijekom putovanja od satelita do prijemnika, pa na prijemnik dolazi samo mali dio signala zajedno s neželjenim šumom i smetnjama. Korisni signal bi bio neprepoznatljiv od šuma da nije značajno širi u frekvencijskom opsegu. Ovaj širi opseg omogućava ne samo prepoznavanje signala u odnosu na šum, već i smanjenje smetnji, bilo da su namjerne ili nenamjerne, te minimizira pogreške koje nastaju zbog višestrukih refleksija. Kako bi se izdvojio signal od šuma i dobili svi potrebni podaci za određivanje pozicije, GNSS prijemnik mora biti složen sustav za prijem i obradu signala.



Slika 1. Spektar GNSS signal (URL 8)

3. OMETANJE GNSS SIGNALA

Rastuća primjena GNSS-a suočava se s izazovima poput slučajne ili namjerne interferencije signala, koja nastaje kada drugi radijski signali ometaju GNSS signale. Takva interferencija smanjuje točnost PNT-a (pozicioniranja, navigacije i vremenske sinkronizacije) ili čak uzrokuje potpuni prekid usluga sustava (Bačić, 2024).

GNSS signali su slabe snage i vrlo osjetljivi, što ih čini podložnima degradaciji uslijed elektromagnetskih valova u frekvencijskom opsegu bliskom njihovim prijenosnim frekvencijama. Čak i slab izvor smetnji može uzrokovati kvar prijemnika ili proizvodnju pogrešnih i potencijalno opasnih informacija. Zbog toga se ulažu značajni naponi u razvoj tehnologija otpornijih na takve smetnje (Drobnjak i sur., 2021).

3.1. Namjerno ometanje GNSS signala

Razlikujemo tri vrste ometanja GNSS signala (Bačić, 2024 i URL 2):

- Elektroničko ometanje (jamming):

Proces u kojem uređaj emitira signale iste frekvencije koji pregaze GNSS signal s ciljem da ga nadjača i onemogući pouzdanu navigaciju. Ovaj fenomen može biti rezultat namjernog djelovanja, poput upotrebe uređaja za ometanje koji se često koriste u vojne svrhe ili za zaštitu privatnosti, ali može biti i posljedica nenamjernih smetnji, na primjer, zbog neispravne elektroničke opreme.

- Spoofing (varanje, zavaravanje):

Uređaj emitira lažne GNSS signale koji rezultiraju pogrešnom lokacijom. Napad GNSS spoofinga pokušava obmanuti GNSS prijemnik emitiranjem netočnih GNSS signala koji su strukturirani tako da nalikuju skupu uobičajenih GNSS signala ili ponovnim emitiranjem autentičnih signala snimljenih na drugoj lokaciji ili u drugo vrijeme. Lažni signali mogu biti modificirani na način da prijemnik procijeni svoju poziciju na mjestu koje nije stvarno ili da bude na stvarnoj lokaciji, ali u pogrešnom vremenu.

- Meaconing (vrsta varanja):

Presretanje i reemitiranje navigacijskih signala. Signali se ponovno emitiraju na primljenoj frekvenciji, obično s većom snagom od originalnog signala s ciljem da zbuni neprijateljsku navigaciju. Za ovu metodu potrebna je jednostavnija oprema nego za klasični „spoofing“. Izvor meaconing napada može biti GNSS repetitor, poput onih koji se instaliraju u hangarima zračnih luka kako bi omogućili prijem GPS signala unutar objekta za potrebe testiranja. Ako se snaga takvog repetitora namjerno ili nenamjerno poveća, to bi moglo dovesti do slanja lažne lokacije.

3.2. Nenamjerno ometanje GNSS signala

Nenamjerno ometanje GNSS signala može prouzročiti:

- Radio frekvencijsko ometanje (RFI) :

Nenamjerno radio-frekvencijsko ometanje (RFI) može nastati kada odašiljači koji nisu dizajnirani za rad u GNSS (Global Navigation Satellite System) spektru, zbog nesavršenosti svojih oscilatora ili propusnih filtara, emitiraju signale na frekvencijama koje se preklapaju s GNSS signalima. To ometanje može biti uzrokovano različitim vrstama uređaja, kao što su komunikacijski odašiljači, radarske ili televizijske stanice, pa čak i elektronički uređaji poput mobitela ili računala.

- Ionosfersko ometanje:

Ionosfersko ometanje nastaje kada satelitski signal prolazi kroz ionosferu, zbog refrakcije i refleksije elektromagnetskih valova. Ionosfera, koja sadrži slobodne elektrone, usporava signal jer promjena indeksa loma medija mijenja brzinu širenja vala. Ovisno o frekvenciji, ovo kašnjenje može doseći do 300 nanosekundi, što može uzrokovati pogreške u pozicioniranju do 100 metara. Valovi u L pojasu (1-2 GHz) manje su podložni ovom ometanju, zbog čega se koriste za GNSS navigaciju. Tijekom solarnog maksimuma, povećana solarna aktivnost izaziva veću ionizaciju u ionosferi, što povećava gustoću slobodnih elektrona. To rezultira jačim ionosferskim ometanjima, usporavajući GNSS signale i povećavajući pogreške u određivanju pozicije, posebno u područjima visokih geografskih širina gdje je ionosferska aktivnost snažnija.

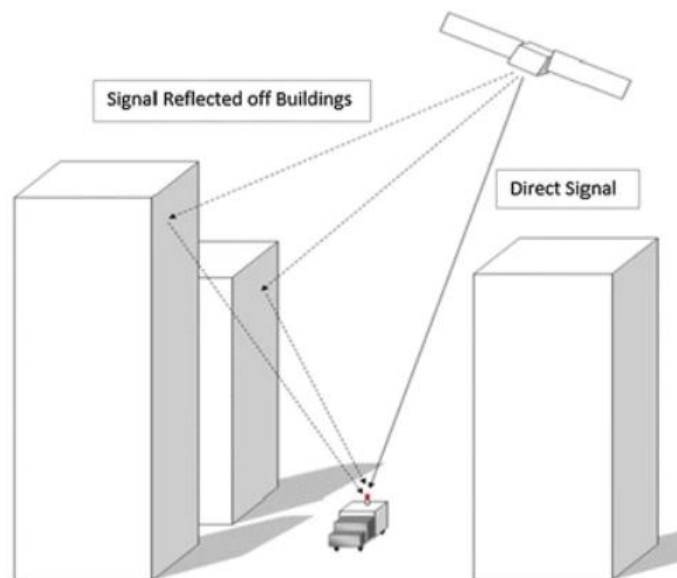
- Zagušenje spektra:

Zagušenje spektra predstavlja izazov za GNSS jer broj bežičnih tehnologija koje koriste iste frekvencije raste, što uzrokuje interferenciju među uređajima. Ove smetnje mogu negativno utjecati na kvalitetu i točnost GPS signala. S obzirom na to da mnogi uređaji koriste iste ili vrlo slične frekvencijske opsege, zagušenje spektra postaje sve veći problem, osobito u urbanim sredinama gdje je broj emitera veći. Rastuća upotreba komunikacijskih tehnologija čini ovo opterećenja spektra ozbiljnim izazovom za GNSS sustave.

3.2.1. Multipath

Osim prethodno nabrojanih (vidi [poglavlje 3.2.](#)) u nenamjerno ometanje spada i višestruka refleksija signala (multipath). Multipath je jedan od glavnih izvora pogrešaka u GNSS-u jer reflektirani signali, koji putuju dužim putem, ulaze u prijemnik i miješaju se s izravnim signalom (Slika 2). To uzrokuje kašnjenje i fazne pomake signala, što dovodi do odstupanja u mjerenju pozicije. Ove pogreške postaju izraženije u statičkim prijemnicima smještenim u blizini velikih reflektora, kao što su zgrade, vodene površine i metalne površine. Multipath pogreške ovise o okolini i ne mogu se eliminirati upotrebom diferencijalnih metoda. Također, ove pogreške mogu biti specifične za vrstu antene prijemnika i njegovu postavku, što znači da je važno pažljivo planirati instalaciju prijemnika za statičke aplikacije, poput referentnih stanica.

Tijekom procesa širenja GNSS signala, signal reflektiran od reflektora ulazi u prijemnik i interferira s direktnim signalom, uzrokujući vremenska i fazna kašnjenja. Ova interferencija, koja nastaje uslijed preklapanja i širenja signala iz različitih putanja, naziva se multipath efektom, a odstupanje u GNSS mjerenju koje uzrokuje multipath efekt zove se multipath pogreška. Multipath pogreške mogu se pojaviti s obje strane – sa strane satelita i sa strane stanice. Multipath pogreške sa strane stanice ovise o okolini stanice i ne mogu se eliminirati pomoću metoda dvostruke razlike.



Slika 2. Primjer interferencije uslijed višestruke refleksije signala (URL 3)

3.3. Posljedice interferencije GNSS signala

Interferencija GNSS signala uzrokuje gubitak točnosti pri određivanju pozicije, brzine i vremena, te može potpuno onemogućiti navigaciju. To izravno utječe na gospodarstvo, okoliš, transport, financije, komunikacije i vojsku.

Gubitak podataka o lokaciji može izazvati prometne nesreće, otežati hitne intervencije i uzrokovati probleme u komunikacijskim mrežama. U pomorstvu, posebice noću ili u magli, interferencija povećava rizik sudara.

Financijski i energetske sustavi ovise o točnom vremenskom označivanju koje osigurava GNSS. Interferencija može uzrokovati kvarove i financijske gubitke. Vojne operacije također su ugrožene jer ovise o GNSS za koordinaciju i planiranje.

Zakoni većine zemalja zabranjuju ometanje GNSS signala. Međutim, zlouporaba poput spoofinga i namjernog ometanja i dalje predstavlja izazov za sigurnost i pouzdanost GNSS sustava.

4. PRIKUPLJANJE PODATAKA

Dana 28. studenog 2024. godine na križanju Zagrebačke avenije i Selske ceste obavljeno je prikupljanje podataka primjenom statičke relativne metode GNSS opažanja.

Statičko relativno pozicioniranje koristi najmanje dva GNSS prijamnika koji su tijekom mjerenja stacionarni na svojim točkama i simultano opažaju iste satelite. Metoda se temelji na korištenju jednofrekvencijskih ili dvofrekvencijskih podataka faze za određivanje prostornog vektora (bazne linije) između dviju točaka. Koordinate nepoznate točke određuju se relativno u odnosu na poznatu referentnu točku, a obrada mjerenja može se provoditi naknadno (klasična metoda) ili u stvarnom vremenu (RTK – kinematika u stvarnom vremenu). Statičko relativno pozicioniranje najraširenija je i najtočnija GNSS metoda kojom se postižu relativne točnosti od 1 ppm do 0,1 ppm, što je čini ključnom za precizna geodetska mjerenja (Bačić, 2022).

Cilj ovog mjerenja bio je analizirati kvalitetu prikupljenih podataka, te utvrditi prisutnost mogućih smetnji koje bi mogle utjecati na njihovu točnost.

Mjerenje je provedeno na unaprijed odabranoj lokaciji, koja je zadovoljavala osnovne uvjete za GNSS opažanja. Točka je odabrana na temelju nekoliko kriterija. Prvo, lokacija je imala otvoren horizont, bez visokih objekata, zgrada ili drveća, čime je minimizirana mogućnost pojave višestrukih putova signala. Nadalje, odabrano mjesto osiguravalo je stabilnu podlogu kako bi se izbjegli pomaci opreme tijekom opažanja.

Za prikupljanje podataka korišten je Trimble R8 GNSS prijamnik, s kontrolerom TSC2. Prijamnik je bio postavljen na stativ visine 2 metra (Slika 3). Uz stativ i uređaj, prezeta je i ostala oprema: podnožna ploča s adapterom, mjerna vrpca, rezervne baterije i prsluci.

Za izvođenje GNSS opažanja podnožna ploča pažljivo je postavljena iznad geodetske točke te horizontirana i centrirana uz pomoć ugrađene libele kako bi se osigurala pravilna orijentacija antene. Nakon toga, GNSS uređaj uključen je pritiskom na zelenu tipku. Na antenu (prijemnik) navrnut je mesingani nastavak, a sklop je postavljen na adapter podnožne ploče i učvršćen odgovarajućim vijkom. Prijemnik je orijentiran prema sjeveru tako da je MMI (engl. Man-Machine Interface) okrenut prema sjeveru.



Slika 3. Trimble R8 GNSS prijemnik s kontrolerom TSC2

Kontroler Trimble TSC2 uključen je pritiskom na zelenu tipku smještenu u donjem lijevom kutu tipkovnice. Prijemnik je konfiguriran za rad u statičkom načinu, koristeći stil mjerenja SatPoz-F5, definiran u samom kontroleru. Ovaj stil omogućuje pohranjivanje podataka svakih 10 sekundi s elevacijskom maskom od 10°.

Opažanje je trajalo ukupno 2 sata, što je osiguralo prikupljanje dovoljne količine podataka za naknadnu obradu i analizu potencijalnih smetnji u signalu.

Tehničke specifikacije Trimble R8 GNSS prijamnika su dane u tablici 1.

Tablica 1. Tehničke specifikacije Tribble R8 GNSS prijmnika

RADNE SPECIFIKACIJE	
Simultano praćeni satelitski signali	GPS (L1/L2/L5), GLONASS (L1/L2), SBAS (WAAS/EGNOS), Galileo, QZSS, BeiDou
TOĆNOST	
Statićka mjerenja	Horizontalno: ± 5 mm + 0.5 ppm RMS Vertikalno: ± 5 mm + 1 ppm RMS
Kinematićka mjerenja	Horizontalno: ± 10 mm + 1 ppm RMS Vertikalno: ± 20 mm + 1 ppm RMS
Kodno diferencijalno pozicioniranje	Horizontalno: ± 0.25 m + 1 ppm RMS Vertikalno: ± 0.50 m + 1 ppm RMS
HARDWARE	
Dimenzije	19 cm \times 11.2 cm
Masa	1.35 kg s baterijom, internim radiom i standardnom UHF antenom
NAPAJANJE	
	Ulaz za vanjsko napajanje 11–28 V DC

4.1. Rinex format

Tijekom GNSS opažanja, podaci se prenose s prijmnika na računalo uz pomoć specijaliziranog softvera i pohranjuju u binarnom obliku koristeći vlasnićki format definiran od strane proizvođaća prijmnika. Međutim, ovi vlasnićki formati često se razlikuju među proizvođaćima, pa čak i među različitim modelima istog proizvođaća, što stvara poteškoće pri obradi podataka. Kako bi se riješio ovaj problem, 1989. godine Werner Gurtner s Astronomskog instituta Sveučilišta u Bernu predložio je RINEX format (URL 4).

Receiver Independent Exchange (RINEX) je tako danas međunarodni standard koji se koristi za pohranu i razmjenu podataka prikupljenih pomoću Globalnog navigacijskog satelitskog sustava (GNSS). Omogućuje interoperabilnost između razlićkih brendova prijmnika i softverskih paketa za obradu podataka, kao i stvaranje brojnih vrijednih proizvoda i usluga za GNSS zajednicu (Janssen, 2023).

Uz to, zaglavlje sadrži i informacije poput intervala uzorkovanja (10 sekundi), te vremena prvog i posljednjeg opažanja.

4.2. Signal-to-Noise Ratio (SNR) podaci

Signal-to-Noise Ratio (SNR) predstavlja omjer između snage željenog signala i snage pozadinske buke. SNR je ključan parametar u znanosti i inženjeringu, posebno u područjima poput telekomunikacija, geodetskih mjerenja i navigacijskih sustava. Izražava se u decibelima (dB), gdje veće vrijednosti ukazuju na jači signal u odnosu na šum, što omogućava precizniju i pouzdaniju analizu podataka.

U GNSS sustavima, SNR se koristi za procjenu kvalitete signala primljenog od satelita. Održavanje optimalnog SNR-a osigurava da se signali sa satelita ne samo primaju, već i točno dekodiraju, čak i u izazovnim uvjetima (URL 5). Svaka frekvencija ima određene SNR vrijednosti koje omogućuju sustavu da prepozna i obradi signale.

Važnost SNR-a se može sagledati kroz sljedeće aspekte:

- **Preciznost mjerenja:** Visoke SNR vrijednosti minimiziraju smetnje u prijemu signala, što rezultira točnijim podacima.
- **Pouzdanost u izazovnim uvjetima:** Bilo da se radi o gustim šumama, urbanim područjima ili nepovoljnim vremenskim uvjetima, visok SNR omogućuje sustavima da i dalje ispravno funkcioniraju unatoč vanjskim smetnjama.
- **Manja potrošnja energije:** Obrada signala s visokim SNR-om zahtijeva manje resursa, što produžava trajanje baterija u uređajima. Ovo je posebno važno za prijenosne uređaje i sustave gdje je energetska učinkovitost ključna.

Za povećanje SNR-a ključno je odabrati kvalitetnu antenu koja učinkovito filtrira smetnje i prima signal. U optimalnim uvjetima, s kvalitetnom antenom, SNR bi trebao biti iznad 42 dB-Hz (Strode i Groves, 2015).

4.3. CROPOS

Tijekom ispitivanja uzroka i posljedica interferencije GNSS signala korištena je RTK metoda uz primjenu CROPOS-a (engl. Croatian Positioning System). CROPOS je državna mreža referentnih GNSS stanica Republike Hrvatske, koja omogućava određivanje položaja u realnom vremenu s preciznošću od 2 cm u horizontalnom i 4 cm u vertikalnom smislu na cijelom području države. Sustav se sastoji od 37 referentnih GNSS stanica, ravnomjerno raspoređenih na međusobnim udaljenostima od 70 km. Kontinuirano prikupljaju podatke i šalju ih u kontrolni centar. U centru se podaci obrađuju, izjednačuju i izračunavaju korekcijski parametri, koji su korisnicima dostupni putem mobilnog interneta.

CROPOS je u punoj funkciji od 8. prosinca 2008. godine, a već u prvoj godini rada našao je široku primjenu u svakodnevnim geodetskim zadacima (Hulina 2018). Korisnicima su dostupna tri servisa CROPOS sustava, koji se razlikuju prema metodi rješenja, načinu prijenosa podataka, vremenu dostupnosti, točnosti određivanja položaja i formatu podataka (Tablica 2). U praktičnom dijelu ovog rada korišten je servisi GPPS (Geodetski precizni servis pozicioniranja).

Tablica 2. CROPOS servisi i njihove karakteristike (Hulina, 2018)

CROPOS USLUGA	METODA RJEŠENJA	TOČNOST	PRIJENOS PODATAKA	FORMAT PODATAKA
DPS	umreženo rješenje kodnih mjerenja u realnom vremenu	0,3 – 0,5 m	Wireless Internet (GPRS, UMTS), NTRIP Protocol	RTCM 2.3
VPPS	umreženo rješenje faznih mjerenja u realnom vremenu	0,02 m (2D) 0,04 m (3D)	Wireless Internet (GPRS, UMTS), NTRIP Protocol, GSM	RTCM 2.3 RTCM 3.1
GPPS	naknadna (<i>post-processing</i>) obrada podataka	< 0,01 m	Internet (FTP, e-mail)	RINEX RINEX VRS

5. ANALIZA PODATAKA

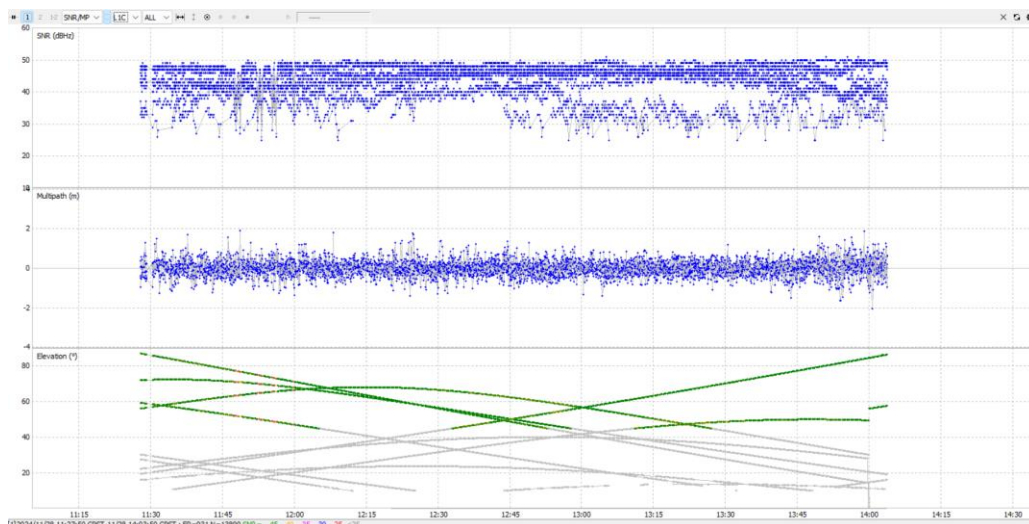
U sklopu ove analize, provedeno je istraživanje temeljem RINEX podataka opažanja kako bi se razumjeli uzroci i posljedice interferencije GNSS signala u urbanim sredinama. Analiza je uključivala procjenu distribucije vrijednosti SNR-a, istraživanje multipatha, te utvrđivanje korelacije između elevacije satelita i vrijednosti SNR-a i multipatha. Naglasak je stavljen je na analizu signala satelita na svim dostupnim frekvencijama kako bi se identificirali ključni faktori koji utječu na kvalitetu GNSS signala.

Za analizu je korišten RTKLIB Plot, vizualni alat unutar popularnog RTKLIB softvera. RTKLIB je softver otvorenog koda, razvijen za obradu GNSS podataka. Od svog prvog izdanja 2009. godine, stekao je široku popularnost kao jedno od vodećih rješenja za analizu GNSS signala. Softver podržava formate poput RINEX-a i RTCM-a te omogućuje obradu podataka s više satelitskih konstelacija i višefrekvencijskih signala (Everett i sur., 2022).

5.1. Rezultati analize podataka

U ovom poglavlju prikazani su rezultati analize podataka provedene pomoću RTKLIB Plot-a

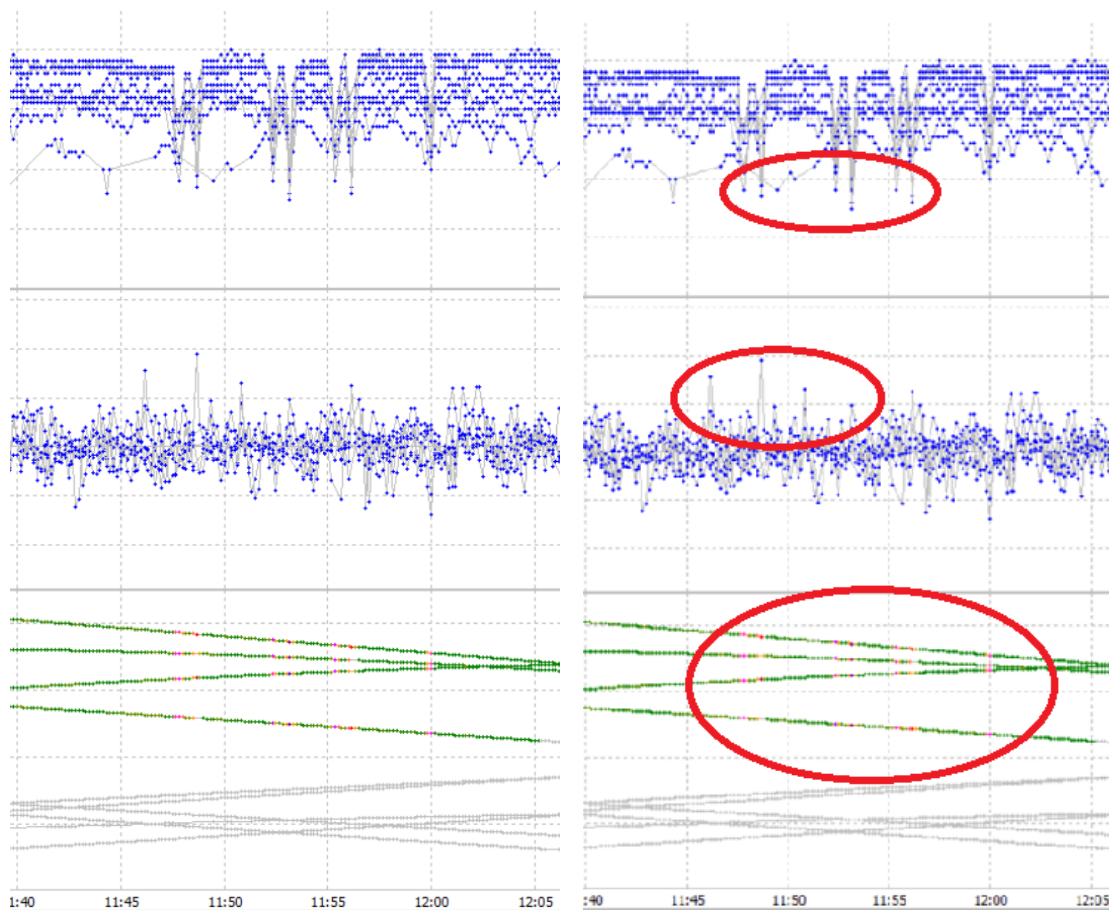
Prikazani graf na slici ispod ilustrira povezanost elevacije, SNR-a i multipatha za L1 frekvenciju, čime omogućuje identifikaciju prirodnih uzroka degradacije signala i razlikovanje tih utjecaja od efekata jamminga (Slika 5).



Slika 5. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L1 frekvenciju

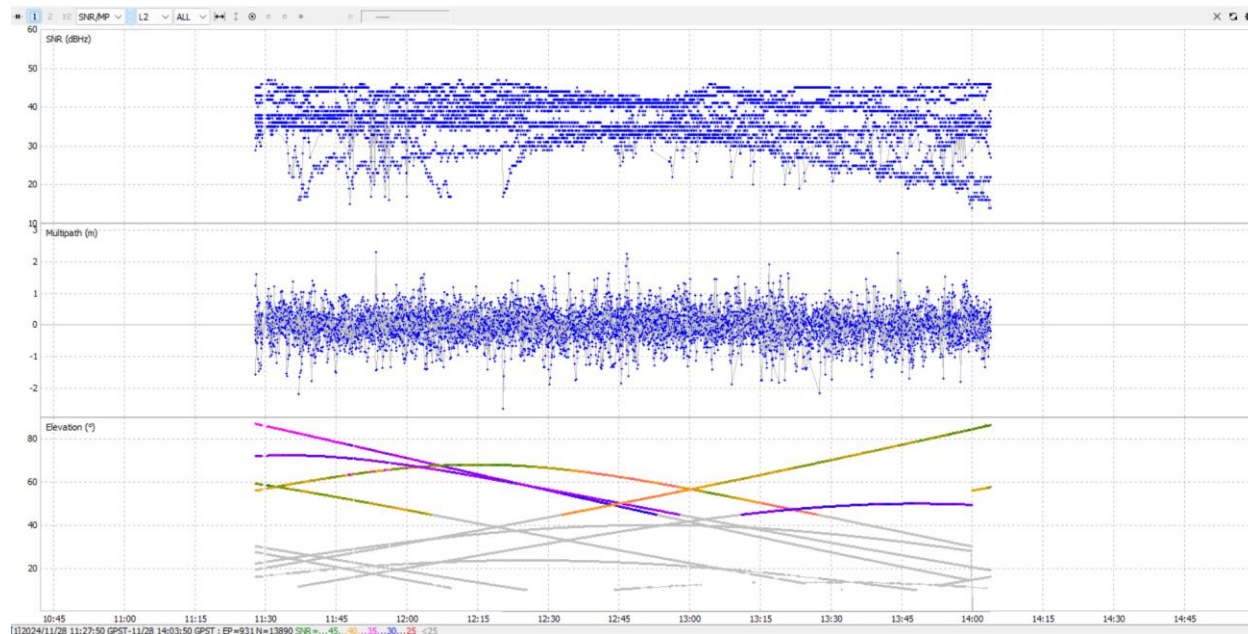
Proizlazi da su pri niskim elevacijama GNSS signali podložniji degradaciji zbog atmosferskih utjecaja i multipath refleksija, što dovodi do nižih SNR vrijednosti i izraženijih oscilacija na multipath grafu. Nasuprot tome, visoke elevacije donose stabilne i visoke SNR vrijednosti uz smanjenje multipath efekata.

Boje na elevacijskom grafu (zeleno, žuto, crveno i ljubičasto) vizualno označavaju razine SNR-a: crvena i ljubičasta ukazuju na degradaciju signala (Slika 6). Ako se degradacija javlja samo pri niskim elevacijama, uzrok je prirodan, dok uniformni pad SNR-a na svim elevacijama sugerira prisutnost jamminga. Na slici je u par navrata vidljiv neobjašnjiv pad vrijednosti SNR-a, povezan s "divljanjem" multipath vrijednost što također ukazuje na prisutnost jammera. Jammer ne utječe na elevaciju, ali značajno smanjuje kvalitetu signala, što može biti prikriveno prirodnim efektima pri niskim elevacijama.



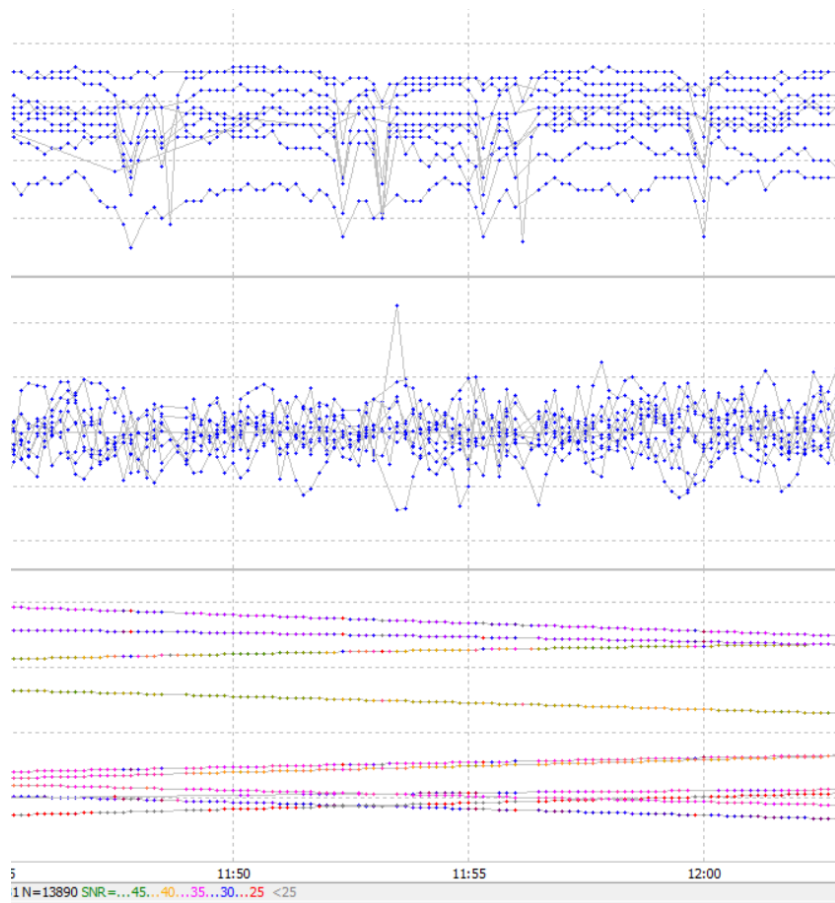
Slika 6. Prikaz degradacije signala ometačem za L1 frekvenciju

Raznolikost boja na elevacijskom grafu za L2 frekvenciju ukazuje na značajnu degradaciju signala, pri čemu su SNR vrijednosti često ispod 40 dB-Hz, a oscilacije izraženije i nepravilnije u usporedbi s L1 frekvencijom (Slika 7). Dok na L1 prevladava stabilan signal (zeleno boja), L2 signal je osjetljiviji na degradaciju zbog manje snage, izraženijeg multipatha uzrokovanog duljom valnom duljinom te većeg utjecaja ionosferskih slojeva. Multipath oscilacije kod L2 dodatno naglašavaju slabiju kvalitetu signala i čine ga podložnijim smetnjama.



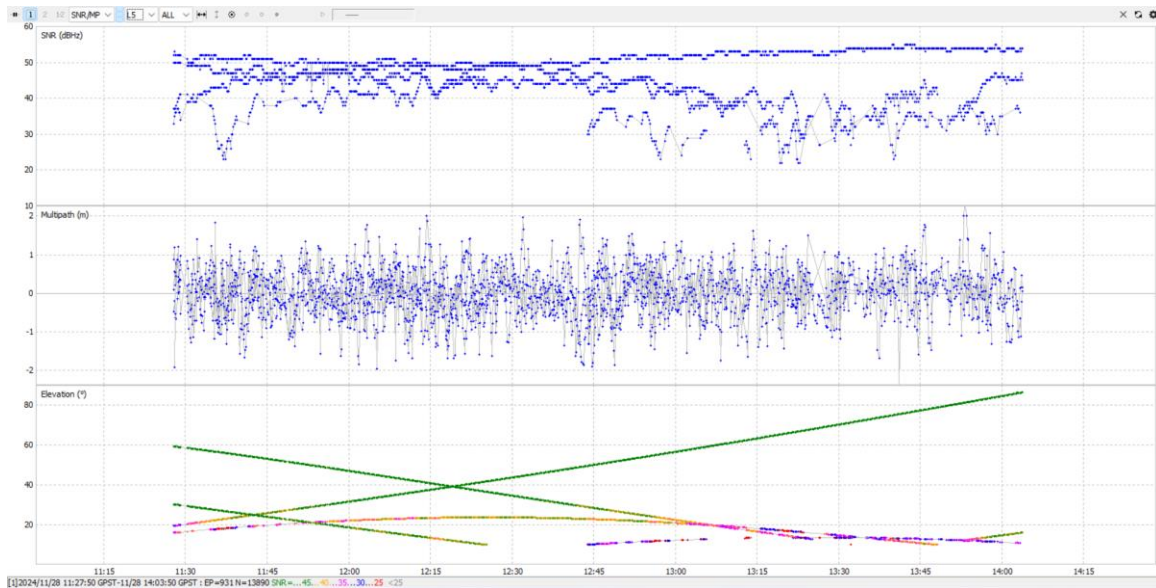
Slika 7. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L2 frekvenciju

Istovremeni nagli padovi SNR-a na L2 frekvenciji za više satelita, vidljivi na Slici 8, ukazuju na prisutnost ometača (jammera). Ovi padovi su sinkronizirani i događaju se neovisno o elevaciji satelita, što isključuje prirodne uzroke poput multipatha ili ionosferskog utjecaja. Također, izražena nepravilnost u multipath oscilacijama dodatno potvrđuje smetnje. Ometanje je najvjerojatnije prisutno u vremenskom intervalu između 11:45 i 12:00, gdje su zabilježeni najizraženiji padovi SNR-a.



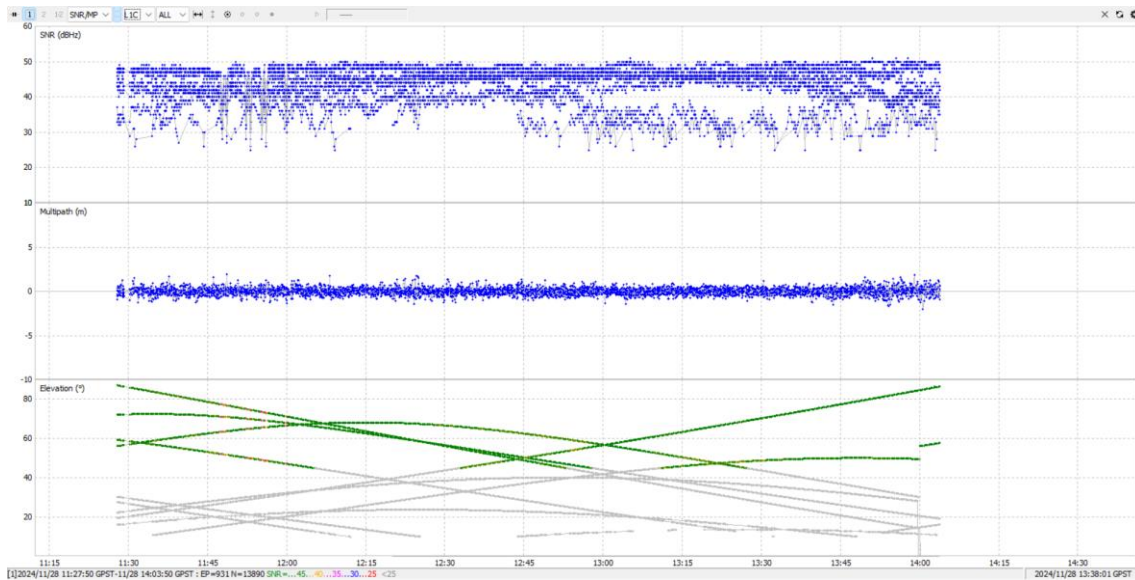
Slika 8. Prikaz degradacije signala ometačem za L2 frekvenciju

Na temelju analize prikazanih grafova, može se zaključiti da se signal na L5 frekvenciji suočava s periodičnim degradacijama uzrokovanim kombinacijom više faktora. Vrijednosti SNR-a osciliraju između 35 dB-Hz i 50 dB-Hz, pri čemu su povremeni padovi ispod 35 dB-Hz vidljivi, osobito oko 11:50 i nakon 13:00 (Slika 9). Ove degradacije mogu biti rezultat lokalnih ometajućih čimbenika ili nepovoljnih uvjeta prijenosa signala kroz atmosferu. Multipath efekti su izraženi, s oscilacijama do ± 1 metar, a posebno su istaknuti kada je SNR niži. Ovi podaci ukazuju na prisustvo ometanja, što se očituje u naglim padovima SNR-a i nepravilnostima u multipath podacima, osobito kod satelita s nižim kutovima elevacije.



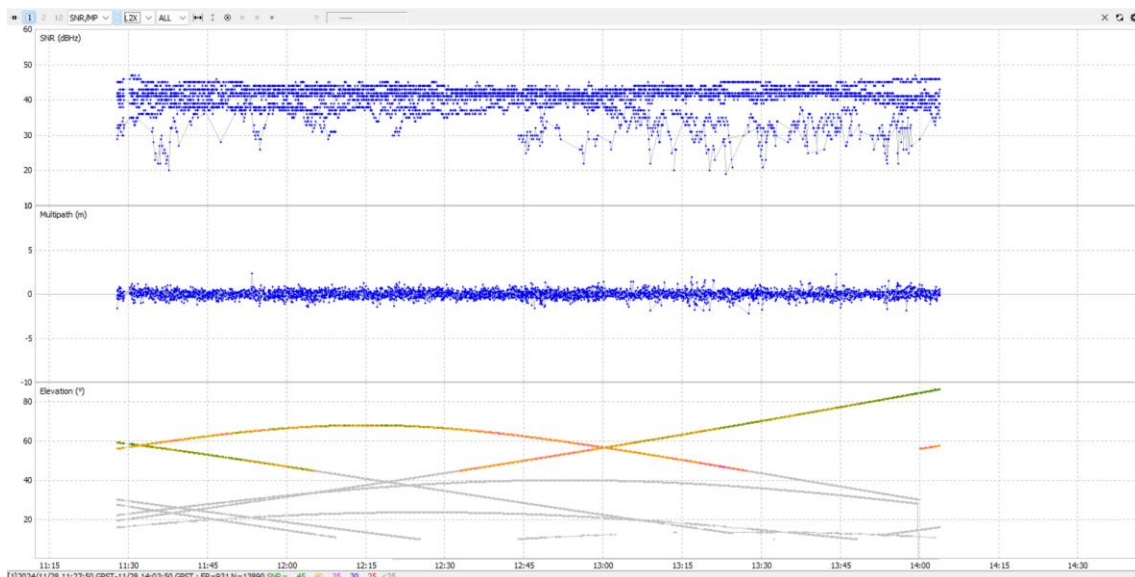
Slika 9. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L5 frekvenciju

Graf prikazuje stabilan prijem signala satelita za frekvenciju L1C (Slika 10). SNR) se većinom kreće u rasponu od 40 dBHz do 50 dBHz, što ukazuje na dobar signal, ali povremeni padovi ispod 40 dBHz sugeriraju potencijalne smetnje ili slabljenje signala, osobito za satelite na nižoj elevaciji. Multipath efekt oscilira u rasponu od -1 m do +1 m, što ukazuje na umjerene refleksije signala. Uočava se da se pri padu SNR-a multipath efekt povećava, što sugerira veću prisutnost reflektiranih signala u uvjetima slabije kvalitete prijema. Elevacija satelita pokazuje da sateliti na visokoj elevaciji (zeleno boja) imaju stabilniji signal i manje utjecaja multipatha, dok sateliti s nižom elevacijom (žuta, narančasta i ružičasta boja) pokazuju niže SNR vrijednosti i veće varijacije. Jammer-i su pristuni u periodu od 11:45 do 12:00.



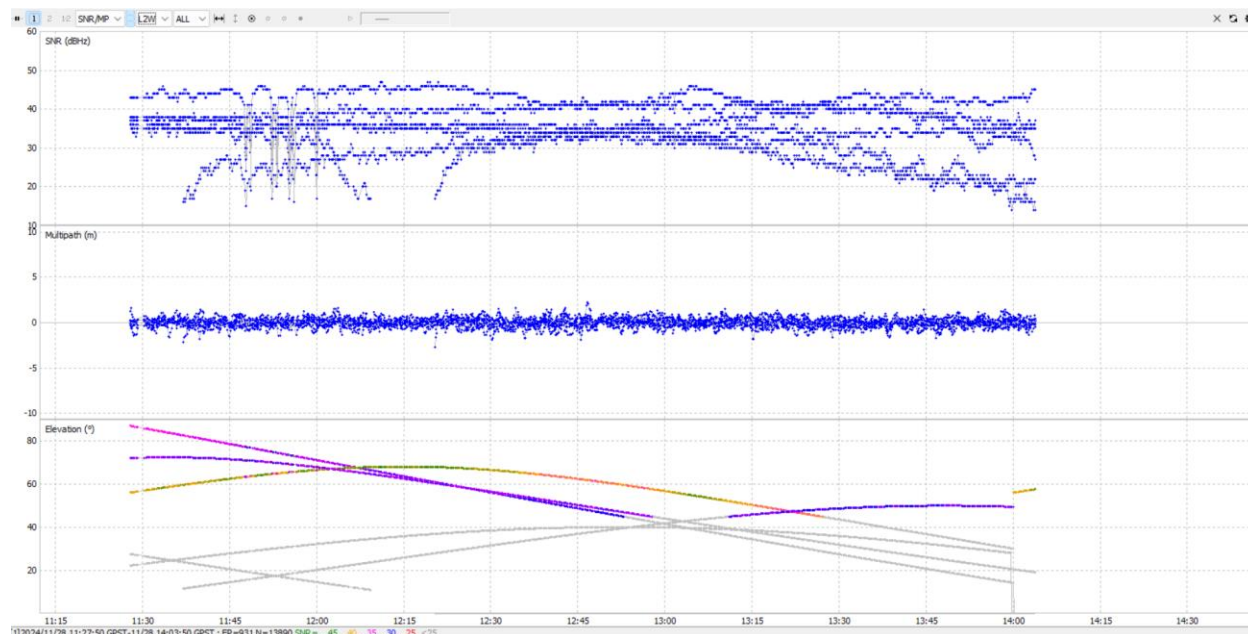
Slika 10. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za LIC frekvenciju

Na temelju analize grafa za L2X frekvenciju, vidljive su određene fluktuacije SNR-a, ali multipath efekti ostaju stabilni i unutar očekivanih granica (Slika 11). Iako promjene u SNR-u i različite boje na elevacijskom grafu mogu ukazivati na degradaciju signala, nema jasnih pokazatelja prisutnosti ometača (jammer-i). Padovi kvalitete signala vjerojatnije su rezultat atmosferskih utjecaja i niske elevacije satelita nego umjetnih smetnji.



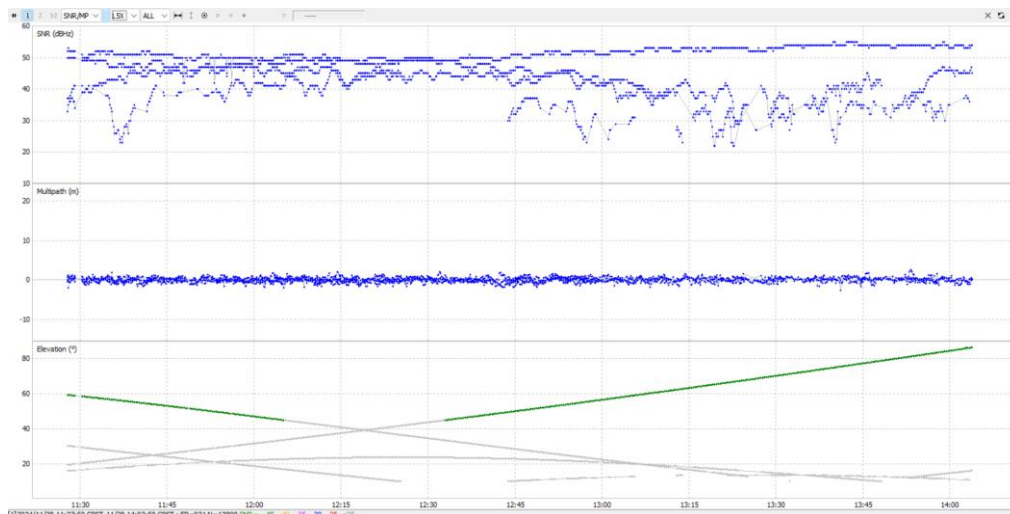
Slika 11. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L2X frekvenciju

Iz prikazanog grafa, može se zaključiti da su prisutne smetnje (jamming) kod frekvencije L2W (Slika 12). Iako su vrijednosti elevacije visoke, što bi inače trebalo rezultirati stabilnim i visokim SNR-om, na grafu je uočljiv nagli pad SNR-a te se pojavljuju crvene vrijednosti. Takav obrazac ne odgovara prirodnim uzrocima poput multipatha ili slabog signala na niskim elevacijama, već sugerira vanjski utjecaj, poput ometača koji uzrokuje degradaciju signala.



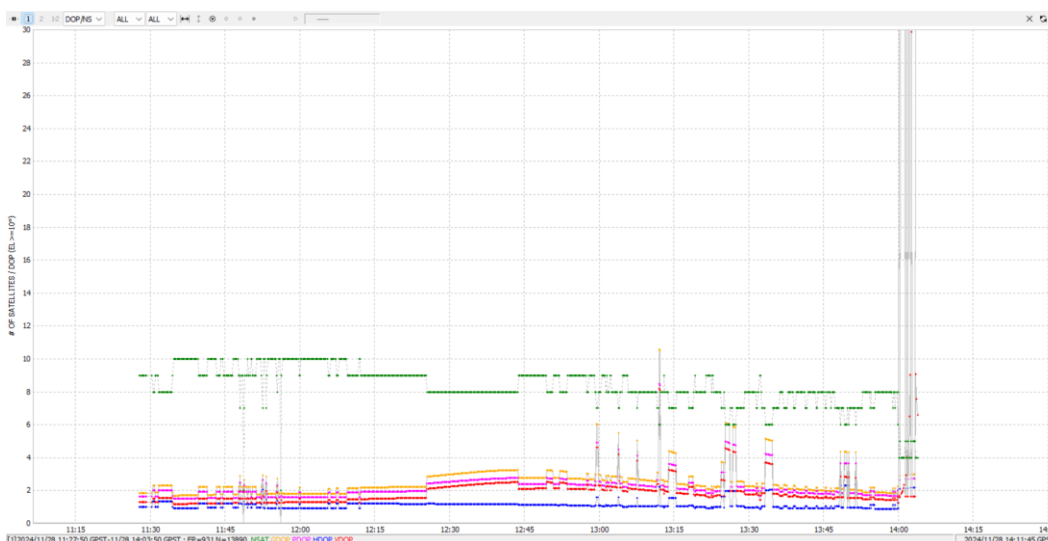
Slika 12. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L2W frekvenciju

Na temelju prikazanog grafa za frekvenciju L5X, čini se da nema jasnih znakova značajnih smetnji (jamminga). Vrijednosti SNR-a su relativno stabilne, iako postoje male oscilacije (Slika 13).



Slika 13. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L5X frekvenciju

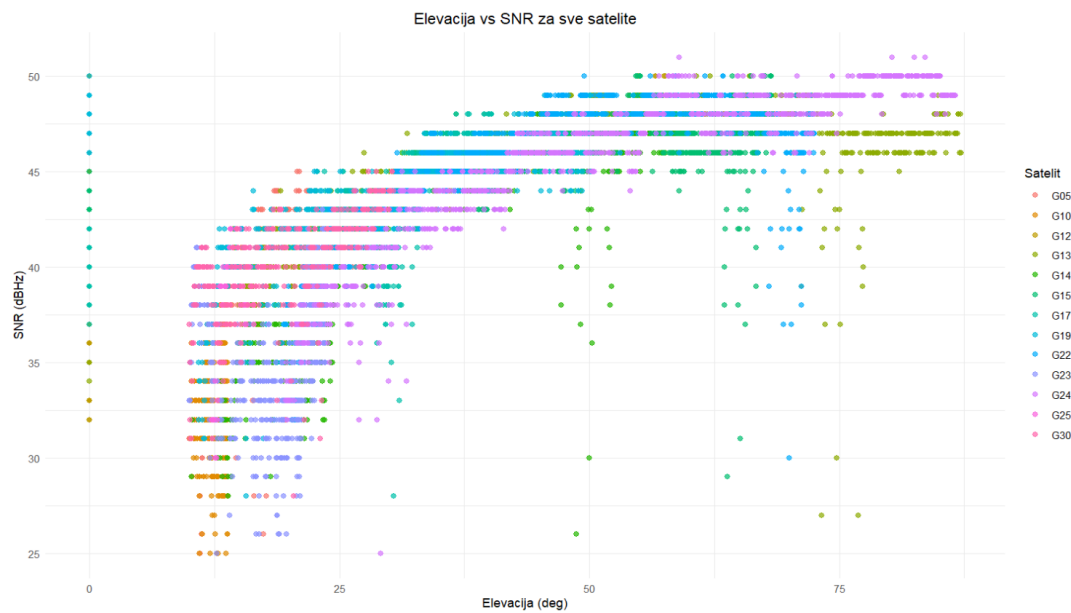
Na slici ispod prikazan je odnos između DOP vrijednosti i broja vidljivih satelita, što također omogućuje analizu degradacije GPS signala (Slika 14). U određenim trenucima dolazi do naglog smanjenja broja vidljivih satelita, što rezultira skokovima DOP vrijednosti, osobito GDOP-a i PDOP-a. Ova pojava može biti uzrokovana djelovanjem ometača (jammera), koji blokira signale od određenog broja satelita, smanjujući geometrijsku preciznost. Istovremeno, povremeni porasti DOP-a mogu biti povezani s multipath efektom, gdje reflektirani signali uzrokuju nepovoljan izračun pozicije. Kombinacija pada broja satelita i povećanja DOP vrijednosti jasno ukazuje na trenutke kada su GPS signali značajno narušeni.



Slika 14. Odnos DOP vrijednosti i broja vidljivih satelita

5.2. Detaljna analiza L1 frekvencije

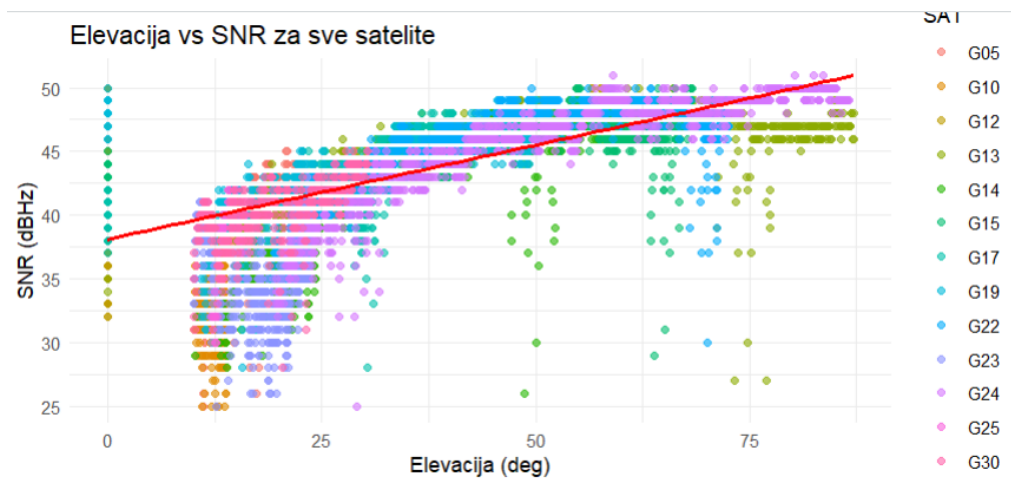
U nastavku je korištenjem programskog jezika R, detaljnije analiziran odnos između elevacije satelita (izražene u stupnjevima) i kvalitete signala (SNR, izražen u dBHz) za sve dostupne satelite. Podaci su vizualizirani kao raspršeni grafikon, gdje svaka boja predstavlja pojedini satelit (Slika 15).



Slika 15. Grafički prikaz odnosa elevacije i SNR-a

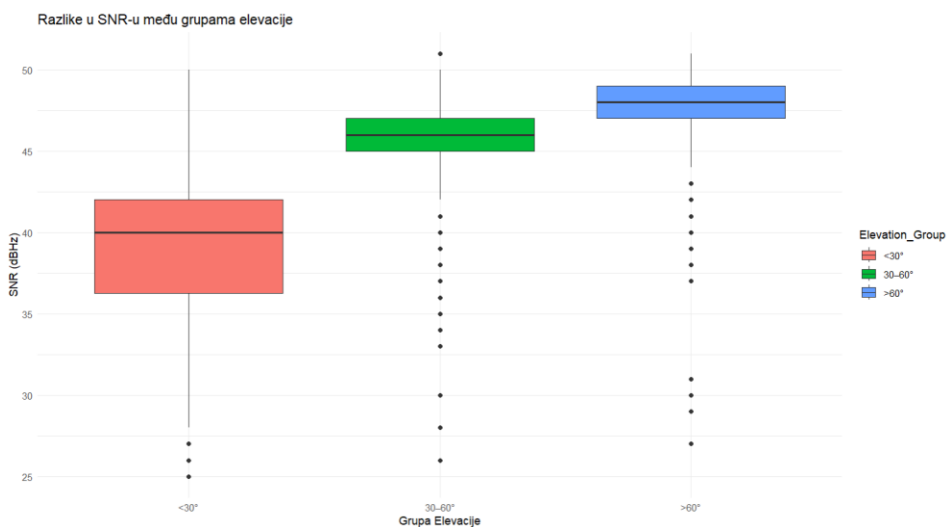
Rezultati pokazuju snažnu pozitivnu povezanost između elevacije i SNR-a. S porastom elevacije, signal postaje stabilniji i jači, što je vidljivo kroz više i ujednačenije vrijednosti SNR-a na višim elevacijama ($> 30^\circ$). Kod niskih elevacija ($< 10^\circ$), SNR pokazuje veću raspršenost i niže vrijednosti, što ukazuje na prisutnost smetnji poput atmosferskih efekata i lošije linije vidljivosti satelita prema prijemniku.

Nadalje, izračunata je korelacija između elevacije satelita i SNR-a koja iznosi 0.64. To ukazuje na umjerenu do snažnu pozitivnu povezanost, što potvrđuje kako elevacija ima značajan utjecaj na kvalitetu signala. Linearni trend prikazan na grafu dodatno naglašava ovu povezanost, prikazujući rast SNR-a s povećanjem elevacije (Slika 16).



Slika 16. Grafički prikaz odnosa elevacije i SNR-a uz dodatak linearne regresije

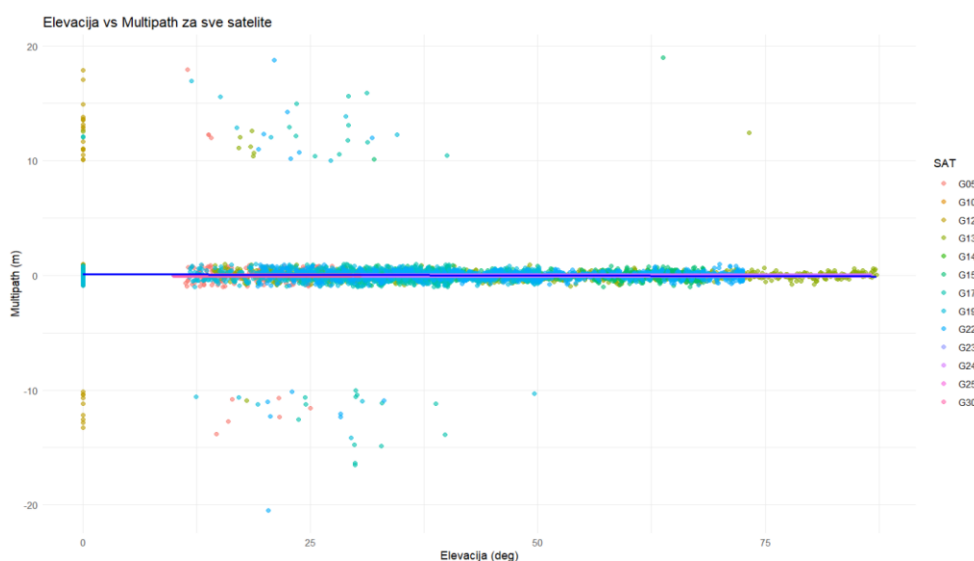
Nakon što je analizirana povezanost elevacije satelita i SNR-a za pojedine satelite, provedena je dodatna analiza kako bi se istražile razlike u SNR-u među različitim grupama elevacije. Podaci su podijeljeni u tri grupe: satelite s elevacijom manjom od 30°, između 30° i 60°, te većom od 60° (Slika 17). Rezultati pokazuju kako se s porastom elevacije povećava stabilnost i jačina signala, što je vidljivo kroz uže distribucije i više prosječne vrijednosti SNR-a u grupama s višim elevacijama. Suprotno tome, grupa s niskim elevacijama (<30°) pokazuje najveću raspršenost i niže SNR vrijednosti.



Slika 17. Razlike u SNR-u među grupama elevacije

Daljnje istraživanje usmjereno je na ispitivanje utjecaja elevacije na multipath efekte. Analiza je pokazala vrlo slabu negativnu korelaciju (koeficijent -0.0338), što ukazuje da povećanje elevacije ima minimalan utjecaj na smanjenje multipath efekata. Na grafičkom prikazu vidljivo je da su vrijednosti multipatha uglavnom koncentrirane blizu nule, bez značajnih promjena pri višim elevacijama (Slika 18.).

Međutim, pri nižim elevacijama ($< 10^\circ$) uočene su rijetke ekstremne vrijednosti multipatha, koje ukazuju na povećanu prisutnost refleksija signala. Ovi rezultati sugeriraju da multipath efekti nisu značajno povezani s elevacijom, već ovise o okolnim uvjetima i vidljivosti satelita.



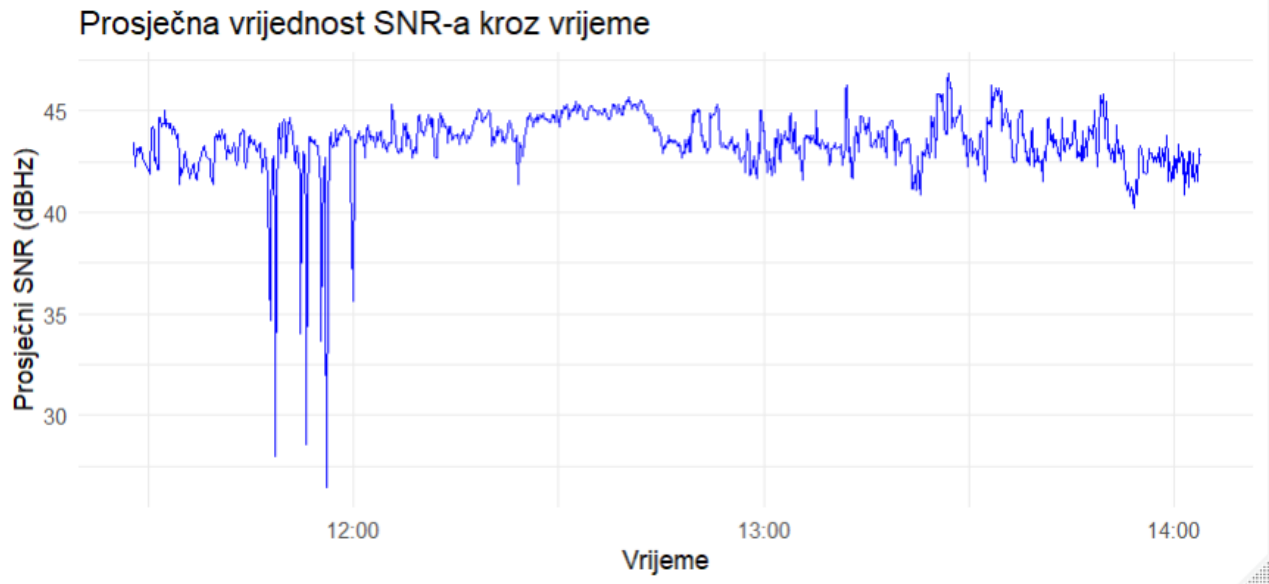
Slika 18. Grafički prikaz odnosa elevacije i multipatha

Da bi se došlo do konkretnijeg rješenja gdje SNR opada zbog multipatha, a gdje zbog jammer-a, ilustriran je grafikon koji prikazuje prosječnu vrijednost SNR-a za sve dostupne satelite u određenim vremenskim trenucima (Slika 19).

Uočava se opći trend stabilnosti SNR-a, gdje vrijednosti osciliraju oko prosječnih 45 dBHz, što je uobičajeno za normalan rad satelitskih navigacijskih sustava. Međutim, grafikon jasno pokazuje značajne i nagle padove SNR-a u vremenskom intervalu 11:45–12:00.

Ovi padovi SNR-a nisu slučajni niti uzrokovani prirodnim fenomenima, jer su svi sateliti pogođeni u istom vremenskom trenutku. Takva uniformna degradacija signala snažno ukazuje na prisutnost

jammer-a. Padovi SNR-a do vrijednosti ispod 30 dBHz također ukazuju na visoku razinu interferencije.



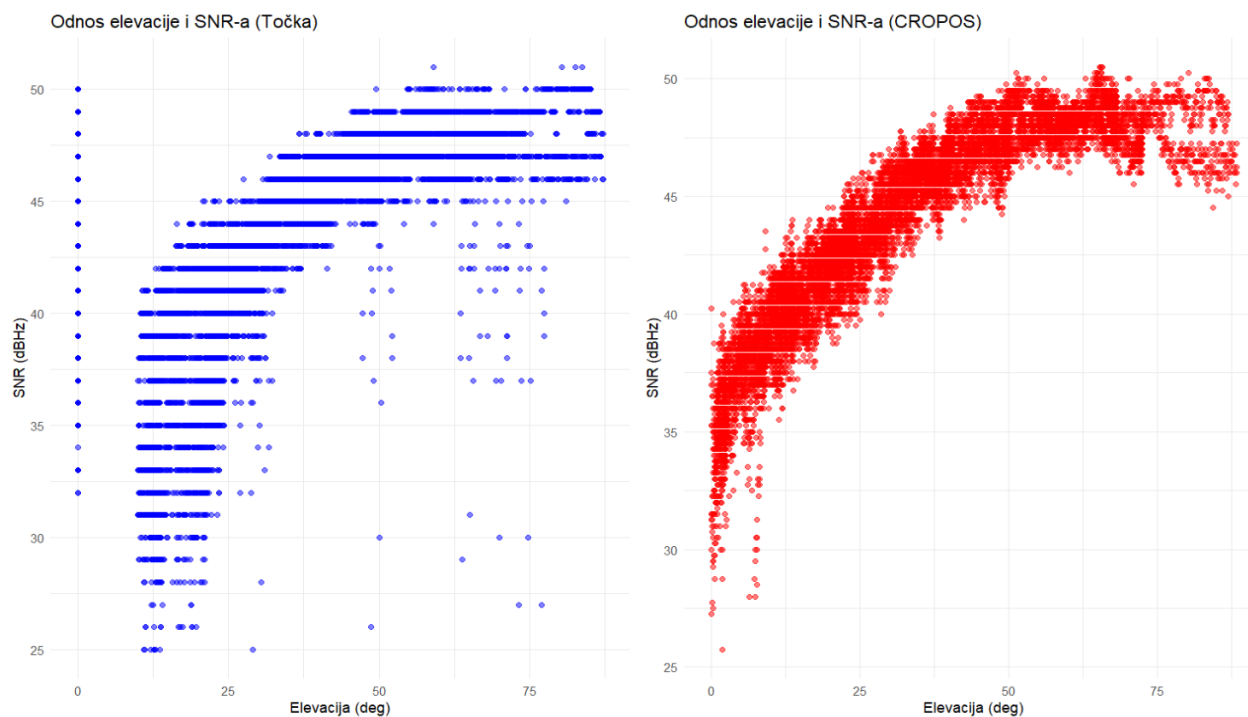
Slika 19. Prosječna vrijednost SNR-a za sve dostupne satelite u određenom trenutku

5.3. Usporedba opažanja s instrumenta s opažanjima na CROPOS stanici

U nastavku su uspoređena opažanja s instrumenta s opažanjima na CROPOS stanici.

Prikazani grafovi prikazuju razlike u odnosu između elevacije i SNR-a za opažanja s instrumenta ("Točka") i referentne CROPOS stanice (Slika 20). Kod opažanja s instrumenta, vrijednosti SNR-a pokazuju veću varijabilnost i slabiju povezanost s elevacijom. SNR ostaje relativno stabilan za većinu elevacija, dok na nižim elevacijama ($< 25^\circ$) dolazi do pada SNR-a, što ukazuje na utjecaj atmosfere refrakcije i multipatha. S druge strane, opažanja s CROPOS stanice pokazuju jasnu pozitivnu korelaciju između elevacije i SNR-a, pri čemu SNR raste s povećanjem elevacije te se stabilizira na višim vrijednostima za elevacije iznad 50° . Nisu vidljivi nagli padovi SNR-a pri visokim elevacijama. Ova razlika ukazuje na bolju kvalitetu i pouzdanost CROPOS opažanja, što je očekivano zbog optimiziranih uvjeta opažanja i smanjenog utjecaja vanjskih faktora. S druge

strane, podaci s instrumenta vjerojatno su podložni većem utjecaju prepreka i nepovoljnih uvjeta, što smanjuje konzistentnost opažanja.



Slika 20. Usporedba elevacija i SNR za opažanu točku i CROPOS

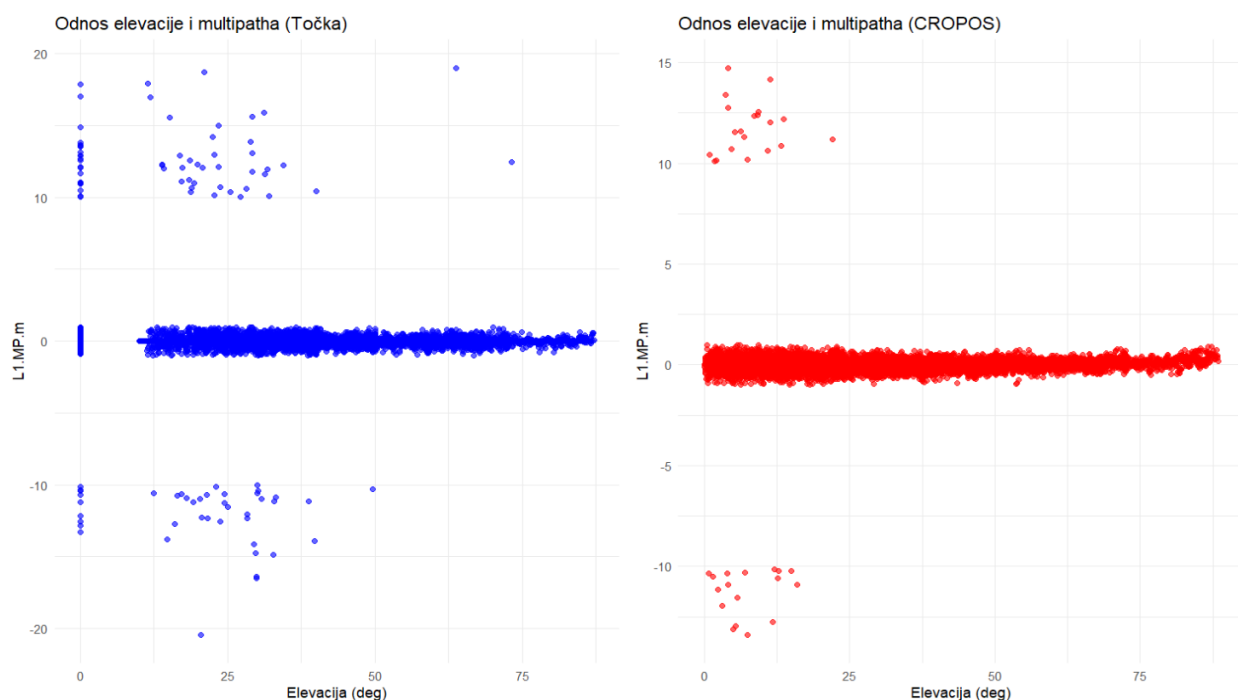
Zbog još bolje analize izračunati su koeficijenti korelacije (Slika 21). Rezultati pokazuju da postoji umjerena pozitivna povezanost između elevacije i SNR-a za opažanja s instrumenta "Točka" ($r=0.64$). S druge strane, opažanja s CROPOS stanice pokazuju snažnu pozitivnu korelaciju između elevacije i SNR-a ($r=0.88$), što jasno pokazuje stabilan i predvidljiv porast SNR-a s rastom elevacije.

```
> cor_tocka <- cor(tocka$EL.deg, tocka$SNR.dBHz, method = "pearson")
> cor_tocka # Rezultat
[1] 0.6405744
> cor_cropos <- cor(cropos$EL.deg, cropos$SNR.dBHz, method = "pearson")
> cor_cropos # Rezultat
[1] 0.8843515
```

Slika 21. Pearsonovi koeficijenti korelacije - izračunato u R-u

Zatim su izrađeni grafovi kako bi se vizualno procijenila povezanost između elevacije i multipatha za oba skupa podataka (Slika 22). Kod opažanja s instrumenta primjećuje se značajna varijabilnost multipatha, osobito pri nižim elevacijama ($< 25^\circ$), gdje su prisutne i ekstremne negativne, ali i visoke pozitivne vrijednosti. Visoke vrijednosti multipatha ukazuju na izražen utjecaj refleksije GPS signala od okolnih prepreka, poput građevina, tla ili vegetacije, što može značajno narušiti točnost opažanja. Negativne vrijednosti, s druge strane, također su pokazatelj kompleksnih refleksija i interferencija koje dodatno umanjuju kvalitetu podataka. S povećanjem elevacije, vrijednosti multipatha se stabiliziraju oko 0, što sugerira smanjenje efekta refleksije signala.

Kod CROPOS stanice multipath pokazuje visoku stabilnost, s vrijednostima blizu 0 kroz cijeli raspon elevacija. Visoke i negativne vrijednosti multipatha su rjeđe, što potvrđuje kontrolirane uvjete opažanja u optimiziranom okruženju, bez značajnog utjecaja refleksija ili prepreka.



Slika 22. Usporedba elevacija i multipatha za opažanu točku i CROPOS

Rezultati Pearsonovih koeficijenata korelacije između elevacije i multipatha pokazuju vrlo slabu povezanost za oba skupa podataka (Slika 23). Za opažanja s instrumenta ("Točka"), korelacijski koeficijent iznosi -0,0338, što upućuje na gotovo nepostojeću negativnu vezu između elevacije i

multipatha. Ovo sugerira da elevacija ne utječe značajno na vrijednosti multipatha, iako se vizualno mogu uočiti veće varijacije pri nižim elevacijama.

Kod CROPOS stanice, koeficijent iznosi 0,0253, što također ukazuje na vrlo slabu pozitivnu povezanost. Ovo je očekivano, budući da vrijednosti multipatha za CROPOS stanicu ostaju blizu 0 za sve elevacije, kako je prikazano na grafu.

```
> cor_tocka_mp
[1] -0.03377946
> cor_cropos_mp
[1] 0.0253355
> |
```

Slika 23. Pearsonovi koeficijenti korelacije između elevacije i multipatha

Za dublju analizu utjecaja elevacije na multipath efekt, podaci su podijeljeni u tri intervala elevacije: 0-25°, 25-50° i 50-75°. U svakom od ovih intervala izračunate su prosječne vrijednosti multipatha i standardna devijacija za oba skupa podataka. Rezultati su prikazani u tablici ispod (Tablica 3).

Tablica 3. Usporedba multipatha u različitim intervalima elevacije

Interval elevacije (°)	Točka		CROPOS	
	mean	st. devijacija	mean	st. devijacija
0-25	0,0529	1,7200	0,0034	1,0600
25-50	-0,0177	1,2200	-0,0370	0,2400
50-75	0,0007	0,5700	0,0490	0,2010

Interpretacija rezultata:

- Niže elevacije (0-25°):

"Točka" pokazuje veći prosjek i standardnu devijaciju, što ukazuje na značajnu varijabilnost multipatha u ovom rasponu.

CROPOS ima stabilniji signal, s nižim prosjekom i standardnom devijacijom.

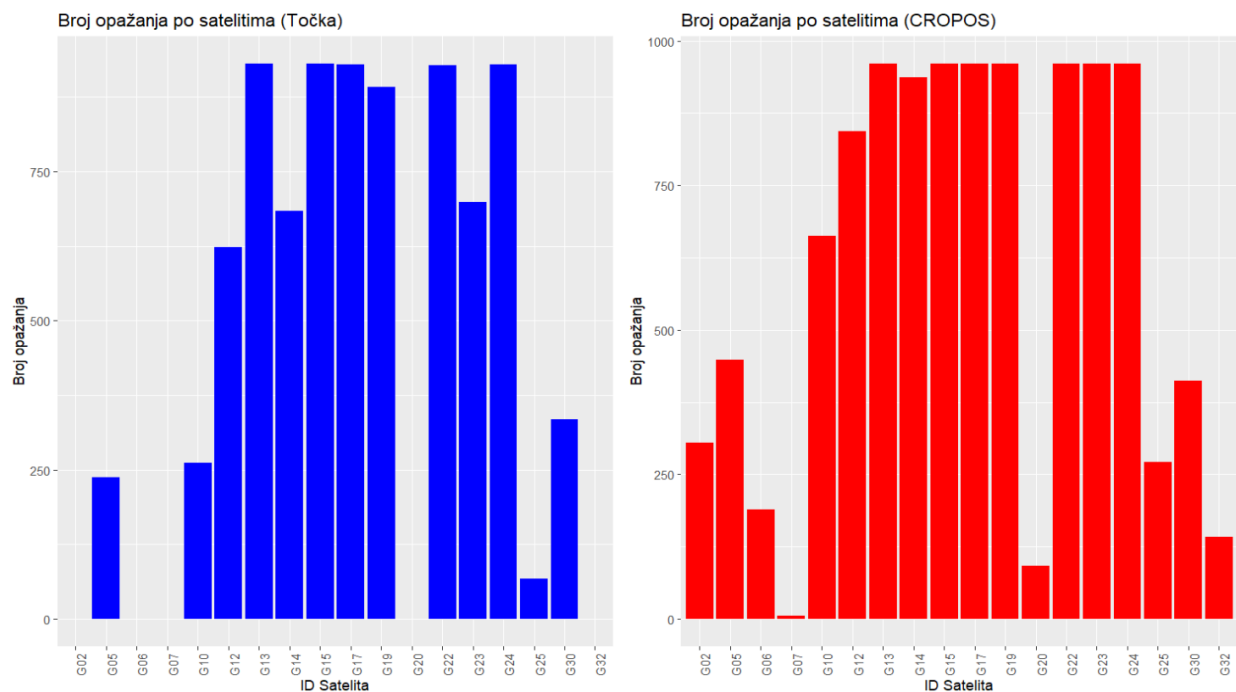
- Srednje elevacije (25-50°):

Stabilnost signala značajno se povećava za oba skupa podataka, s time da CROPOS pokazuje vrlo nisku standardnu devijaciju (0.240), dok "Točka" zadržava nešto veću varijabilnost (1.22).

- Visoke elevacije (50-75°):

U ovom rasponu oba sustava pokazuju minimalne vrijednosti multipatha i nisku varijabilnost, iako CROPOS još uvijek nadmašuje "Točku" s prosjekom bližim nuli i manjom devijacijom.

Kako bi identificirali razlike u pokrivenosti satelitima između točke koju smo opažali i CROPOS stanice izrađeni su grafovi koji prikazuju broj opažanja pojedinih satelita (Slika 24). Određeni sateliti imaju značajno različitu zastupljenost između ova dva izvora podataka. Kod opažanja s "Točke" uočena je neujednačena zastupljenost satelita, gdje su pojedini sateliti, poput G12, G14 i G25, dominantni s najvećim brojem opažanja, dok su drugi, poput G02 i G05, zastupljeni u znatno manjoj mjeri. Slično tome, opažanja s CROPOS stanice pokazuju koncentraciju na slične satelite, ali s nešto većom ukupnom zastupljenošću satelita poput G20 i G23.



Slika 24. Usporedba broja opažanja pojedinih satelita

Zatim je uslijedila analiza odnosa vrijednosti DOP-a i ukupnog broja vidljivih satelita (Slika 25). Usporedba je pokazala jasne razlike između CROPOS referentne stanice i točke opažanja. Za

CROPOS stanicu, broj vidljivih satelita bio je stabilniji kroz vrijeme, s manjim oscilacijama u DOP vrijednostima, što ukazuje na konzistentniju kvalitetu geometrije satelita.

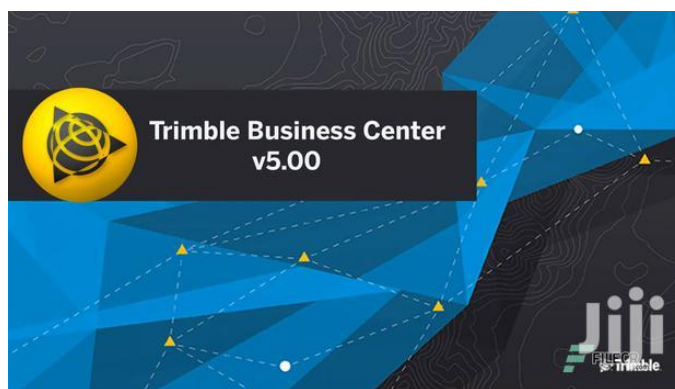
Nasuprot tome, na točki opažanja zabilježene su veće varijacije u broju vidljivih satelita, što je rezultiralo izraženijim promjenama DOP vrijednosti, osobito u određenim vremenskim razdobljima. Ova razlika upućuje na to da su lokalni uvjeti, poput horizonta i mogućih prepreka, značajno utjecali na dostupnost satelita i geometrijsku preciznost na točki opažanja.



Slika 25. Gornja slika - odnos DOP-a i ukupnog broja satelita CROPOS referentne stanice; donja slika- odnos DOP-a i ukupnog broja satelita opažane točke

6. OBRADA PODATAKA

Obrada opažanja izvršena je u softveru *Trimble Business Center* (TBC) američke tvrtke *Trimble Inc.* Korištena verzija je 5.00 (Slika 26).



Slika 26. *Trimble Business Center* verzija 5.00

Trimble Business Center je softver za obradu geoprostornih podataka koji omogućuje korisnicima učinkovito uređivanje, obradu i izjednačenje geoprostornih podataka (URL 1).

Pri izradi našeg projekta u TBC-u definiran je nacionalni koordinatni sustav Republike Hrvatske, uključujući ravninsku projekciju HTRS96/TM, službeni referentni koordinatni sustav za državnu izmjeru i katastar nekretnina. Kao referentno vrijeme odabrano je UTC (Coordinated Universal Time). Nakon definiranja parametara učitani su podaci opažanja.

Sirovi podaci opažanja iz uređaja Trimble R8 prepoznaju se po ekstenziji .T01. Nakon unosa podataka, provedeno je usklađivanje s terenskim zapisnikom, uključujući naziv točke, tip prijemnika i antene, serijske brojeve, visinu antene te način mjerenja antene. Za mjerenja provedena na Zagrebačkoj aveniji preuzeti su podaci s točke koja je opažena koristeći GPPS CROPOS-a u vrijeme mjerenja.

Koordinate preuzete točke bile su fiksirane, čime je omogućen izračun vektora. Obradom opažanja i računanjem vektora dobivene su numeričke vrijednosti poput duljine vektora, vremena procesiranja, maksimalne vrijednosti PDOP-a, ocjene horizontalne i vertikalne preciznosti te RMS-a (engl. Root Mean Square). Parametri su vidljivi u izvješću o računanju vektora (engl. Baseline Processing Report).

RMS u kontekstu GNSS podataka predstavlja mjeru preciznosti koja pokazuje prosječno odstupanje mjerenja od očekivane vrijednosti. Obuhvaća sve vrste pogrešaka u mjerenjima, uključujući šum mjerenja, ali i utjecaj geometrije satelita i okolnih uvjeta. Iako RMS neizravno računa geometriju satelita (koja se izražava pomoću PDOP-a, GDOP-a itd.), geometrija ima značajan utjecaj na kvalitetu mjerenja. Loša geometrija (npr. kada su sateliti blizu horizonta ili previše grupirani) može povećati ukupne pogreške u položaju i, posljedično, RMS vrijednosti.

Rješenje vektora temelji se na opažanjima simultano vidljivih satelita na točki opažanja, dok se konačno rješenje uspoređuje s opažanjima iz svake epohe kako bi se izračunao RMS.

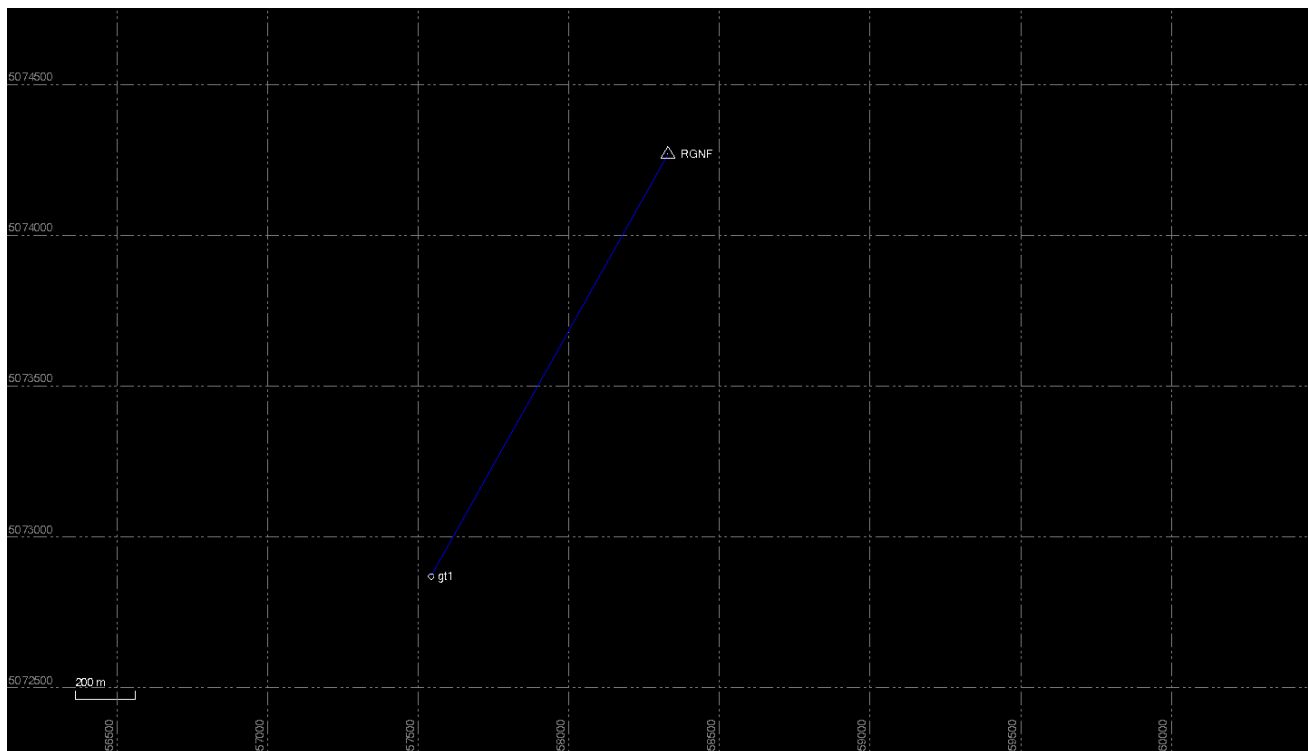
6.1. Analiza i obrada podataka u TBC-u

Prvi korak u postupku obrade podataka bio je kreiranje novog projekta u Trimble Business Centru (TBC). Nakon toga, definiran je odgovarajući koordinatni sustav putem alata Coordinate System Manager, a zatim su postavljene potrebne postavke projekta (vidi [poglavlje 6](#)). Koordinatni sustav povezan je s projektom kako bi svi podaci bili usklađeni s geodetskim referencama.

U sljedećem koraku učitani su podaci s CROPOS-a. Podaci su podvrgnuti provjeri, označeni su proizvođači uređaja, tipovi antena, način mjerenja visine, model prijavnika i drugi relevantni parametri. Nakon učitavanja podataka, u postavkama projekta fiksirane su elipsoidne koordinate na točki kako bi rezultati bili usklađeni sa stvarnim geodetskim uvjetima.

Nadalje, učitani su podaci s Trimble R8 prijavnika, koji su se također trebali uskladiti s podacima poput imena točke, proizvođača uređaja, tipa antene, modela prijavnika, serijskog broja antene i izmjerene visine.

Nakon učitavanja svih podataka, temeljem podataka iz CROPOS-a i Trimble R8 prijavnika, TBC prikazuje jedan potencijalni vektor. Slika 27. prikazuje vektor između točke CROPOS RGNF i točke gt1 na kojoj se nalazio prijemnik Trimble R8.



Slika 27: Dobiveni vektor

U drugom koraku obrade podataka korištena je funkcija Survey Baselines za izračun vektora, čime je dobiven „nulti prolaz“. U kontekstu geodetske obrade, nulti prolaz označava prvi izračun rezultata temeljen na početnim podacima, prije provođenja bilo kakvih dodatnih korekcija ili optimizacija. Ovaj proračun daje referentne vrijednosti preciznosti za fiksno rješenje, gdje su svi dostupni sateliti uključeni u izračun.

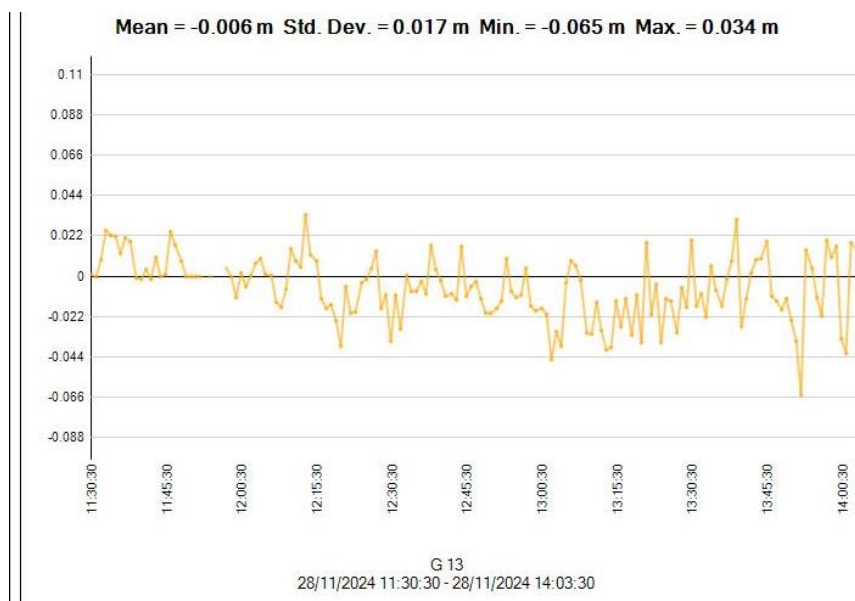
Nulti prolaz pruža uvid u standardnu preciznost temeljem početnih mjerenja. U idealnim uvjetima, rezultati nultog prolaza trebali bi biti unutar dopuštenih granica preciznosti, što ukazuje na dobro usklađene početne podatke i ispravnu geometriju satelita. Ako su rezultati unutar tih granica, daljnje korekcije ili prilagodbe obično nisu potrebne.

Međutim, ako rezultati nultog prolaza odstupaju od očekivanih vrijednosti ili prelaze dopuštene granice preciznosti, to može ukazivati na probleme poput nepovoljne geometrije satelita, prisutnosti ometača, šuma u signalima, utjecaja multipath efekta ili drugih ometajućih faktora. Ako se rezultati ne poklapaju s prihvatljivim granicama, mogu biti potrebne dodatne obrade ili prilagodbe. Na Slici 28 prikazani su rezultati nultog prolaza.

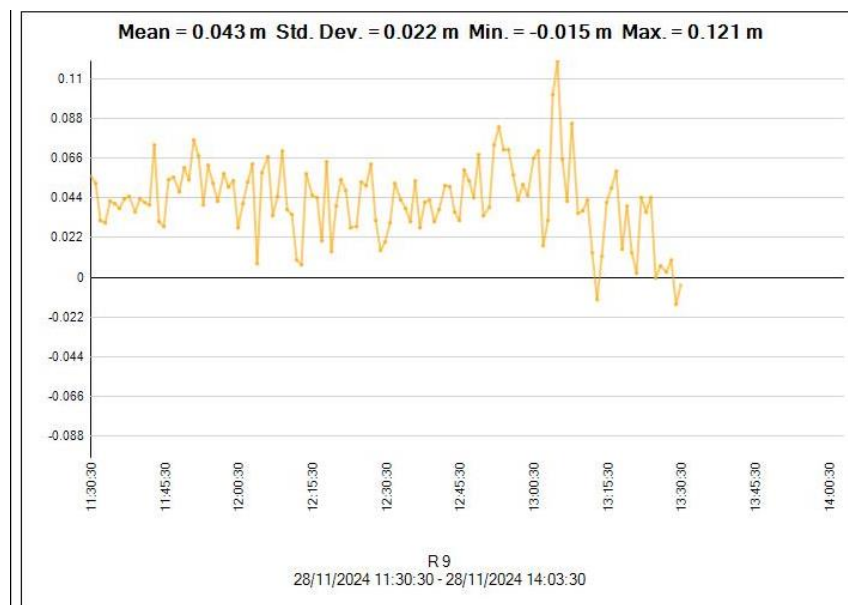
Processing Results						
Save	Observation	Solution T	Horiz. Precision (Vert. Precision (9	RMS	Length
<input checked="" type="checkbox"/>	RGNF --- gt1	Fixed	0.003	0.014	0.012	1605.109

Slika 28: Nulti prolaz

Nakon izračuna vektora, generirano je izvješće o računanju baznih linija (Baseline Processing Report), koje sadrži nekoliko ključnih dijelova. Izvješće uključuje informacije poput reziduala, koji prikazuju preostale pogreške u mjerenju, te standardnih pogrešaka, koje ukazuju na preciznost vektora. Također, u izvješću je prikazana matrica kovarijance, koja daje uvid u varijaciju između parametara, kao i detalji sesije, koji uključuju vrijeme i uvjete opažanja. Ovi dijelovi izvješća omogućuju temeljitu analizu kvalitete podataka i točnosti izračuna. Na Slici 29 i 30 prikazani su grafovi koji prikazuju rezidualne vrijednosti za određene satelite (npr. G3 i R9), što pomaže u prepoznavanju grešaka ili odstupanja u podacima. Grafovi također prikazuju standardnu devijaciju, koja ukazuje na varijabilnost podataka, te minimalna i maksimalna odstupanja, koja mogu ukazivati na ekstremna odstupanja ili greške u mjerenjima.



Slika 29: Reziduali- kako bi trebalo izgledati



Slika 30: Reziduali- kako ne bi trebalo izgledati

Reziduali u kontekstu GNSS mjerenja predstavljaju razliku između izmjerenih i očekivanih vrijednosti, a obično se odnose na pogreške u mjerenju koje nastaju zbog različitih faktora, uključujući šum, nesavršenosti u instrumentima, atmosferske uvjete i ometače. Reziduali su indikatori pogrešaka koje se pojavljuju u procesu izračuna vektora, posebno u odnosu na pojedinačne satelite.

U idealnom slučaju, reziduali bi trebali biti centrirani oko nule, što znači da bi razlike između izmjerenih i očekivanih vrijednosti trebale biti ravnomjerno raspoređene, bez sustavnih pogrešaka koje bi izazvale tendenciju prema višim ili nižim vrijednostima. Takva raspodjela ukazuje na to da su mjerenja u skladu s očekivanjima i da su pogreške u velikoj mjeri slučajne (samo šum).

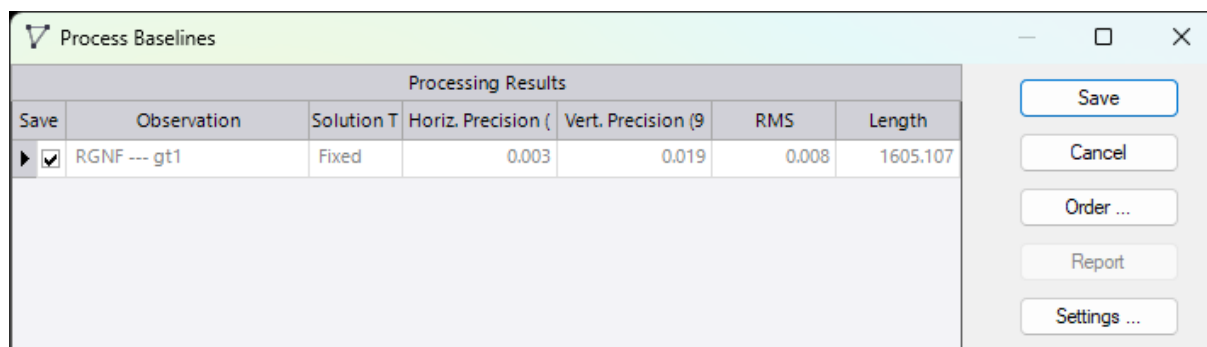
Visoka vrijednost reziduala ukazuje na to da postoje veće pogreške u određenim mjerenjima, što može biti posljedica različitih čimbenika, poput: šuma mjerenja, nesavršenosti instrumenta, utjecaj multipatha ili utjecaj ometača.

Iznos reziduala povezan je s ukupnim šumom mjerenja koji sudjeluje u rješenju vektora. Što su reziduali veći, to znači da su prisutne veće pogreške u mjerenju, što može dovesti do smanjenja preciznosti izračunatih koordinata. Ometanja, zajedno s drugim čimbenicima poput šuma i multipath efekata, mogu značajno povećati veličinu reziduala i smanjiti preciznost GNSS rješenja.

Na temelju dobivenog Baseline Processing reporta i vrijednosti reziduala, iako TBC verzija 5.0 pruža optimalno rješenje vektora, postoji mogućnost daljnjeg optimiziranja rezultata. To se može postići ponovnim računanjem vektora, odnosno optimiranjem na nekoliko načina:

1. Promjenom evelacijske maske
2. Skraćivanjem prozora računanja
3. Isključivanjem signala (podataka) pojedinog satelita

Vektor se optimizira ponovnim izračunavanjem, pri čemu se isključuju podaci satelita ili dijelovi podataka satelita koji su pokazali najlošije rezidualne u prethodnom rješenju. Nakon što se provede ovaj postupak, potrebno je pregledati rezultate iz novog izračuna, uključujući parametre kao što su vrsta rješenja (Solution Type), horizontalna preciznost (Horiz. Precision), vertikalna preciznost (Vert. Precision) i korijen srednje kvadratne pogreške (RMS). Ove dobivene vrijednosti treba usporediti s onima iz početnog „nulnog prolaza“ kako bi se procijenila poboljšanja u točnosti i preciznosti izračuna.



The screenshot shows a window titled 'Process Baselines' with a 'Processing Results' table. The table has columns for 'Save', 'Observation', 'Solution T', 'Horiz. Precision (', 'Vert. Precision (9', 'RMS', and 'Length'. A single row is visible for observation 'RGNF --- gt1' with a checked 'Save' checkbox, 'Fixed' solution type, and precision values of 0.003, 0.019, and an RMS of 0.008 over a length of 1605.107. To the right of the table are buttons for 'Save', 'Cancel', 'Order ...', 'Report', and 'Settings ...'.

Save	Observation	Solution T	Horiz. Precision (Vert. Precision (9	RMS	Length
<input checked="" type="checkbox"/>	RGNF --- gt1	Fixed	0.003	0.019	0.008	1605.107

Slika 31: Rezultat ponovnog računanja

Rezultati GNSS obrade jasno ukazuju na osjetljivost različitih komponenti preciznosti na promjene u konfiguraciji satelita. Analiza izmjena u proračunu, nakon isključivanja signala pojedinih satelita u odnosu na nulti prolaz, otkriva kako se horizontalna i vertikalna preciznost, kao i ukupna točnost, mijenjaju pod utjecajem geometrije satelita i kvalitete signala.

Prvi i osnovni prolaz proračuna, koji uključuje sve dostupne satelite, postavlja referentne vrijednosti. Vertikalna preciznost u ovom slučaju iznosila je 0,014 m, horizontalna preciznost

0,003 m, a RMS (Root Mean Square) 0,012 m. Isključivanjem signala određenih satelita dolazi do značajnih promjena, ponajprije u vertikalnoj komponenti. Vertikalna preciznost se pogoršala na 0,019 m, što se može izravno povezati s povećanjem VDOP-a (Vertical Dilution of Precision). VDOP je metrika koja pokazuje koliko je geometrija satelita povoljna za određivanje visine – veće vrijednosti VDOP-a ukazuju na slabiju geometriju i veću osjetljivost na pogreške. Budući da su vertikalne mjere osjetljivije na promjene geometrije satelita nego horizontalne, uklanjanje ključnih satelita dovelo je do smanjenja preciznosti u vertikalnoj ravnini.

Nasuprot tome, horizontalna preciznost ostala je nepromijenjena. To se može objasniti stabilnom horizontalnom geometrijom satelita, gdje HDOP (Horizontal Dilution of Precision) nije značajno pogođen. Horizontalna geometrija obično je povoljnija jer sateliti pokrivaju široku površinu horizonta, što omogućuje stabilnost i pouzdanost horizontalnih mjerenja, čak i kada dolazi do uklanjanja satelita iz izračuna.

Smanjenje RMS-a s 0,012 m na 0,008 m ukazuje na poboljšanje ukupne točnosti izračuna, što se može objasniti eliminacijom satelita čiji su signali potencijalno bili podložniji šumu ili nepovoljnim uvjetima prijenosa. RMS se koristi kao indikator ukupne kvalitete izračuna, a smanjenje vrijednosti sugerira bolju dosljednost i stabilnost mjerenja unutar seta podataka. Uklanjanjem satelita s lošijom kvalitetom signala (npr. zbog niskog elevacijskog kuta, višestrukih putanja signala ili ometača), izračun postaje manje osjetljiv na šumove, što rezultira manjim RMS-om. Ovo poboljšanje dolazi unatoč smanjenju vertikalne preciznosti jer uklonjeni sateliti često imaju veći utjecaj na povećanje pogrešaka nego na doprinos preciznosti.

Duljina vektora pokazala je minimalnu promjenu (smanjenje s 1605,109 m na 1605,107 m), što ukazuje na to da uklanjanje određenih satelita nije značajno utjecalo na prostornu udaljenost između referentnih točaka. To dodatno potvrđuje da su promjene uzrokovane isključivanjem satelita prvenstveno lokalizirane na vertikalnu komponentu preciznosti, dok su horizontalna mjerenja i duljine ostale stabilne.

Ovi rezultati jasno naglašavaju dvojak učinak isključivanja satelita na izračun GNSS vektora. S jedne strane, isključivanje nepouzdanih satelita poboljšava ukupnu točnost i stabilnost (smanjenje RMS-a), dok s druge strane, slabija geometrija zbog manjeg broja satelita negativno utječe na vertikalnu preciznost.

Na koncu, nulti prolaz, s vertikalnom preciznošću od 0,014 m, pokazuje bolju sposobnost određivanja visine u usporedbi s ponovljenim izračunom, gdje je preciznost pala na 0,019 m. Ovo ukazuje na povoljniju geometriju satelita u nultom prolazu, dok je uklanjanje satelita u ponovljenom izračunu negativno utjecalo na vertikalnu komponentu. S druge strane, ponovljeni izračun rezultirao je nižim RMS-om (0,008 m u odnosu na 0,012 m), što sugerira smanjenje šuma i poboljšanje ukupne točnosti te veću stabilnost rezultata. Horizontalna preciznost ostala je nepromijenjena u oba slučaja (0,003 m), što je očekivano s obzirom na stabilan HDOP. Minimalna promjena duljine vektora (smanjenje od 0,002 m) dodatno potvrđuje da uklanjanje satelita nije značajno utjecalo na prostornu udaljenost između točaka.

Svrha ovog pristupa je identificirati i minimizirati utjecaj nepouzdanih podataka, poput onih koji su podložni šumu, multipathu ili interferencijama, te osigurati što veću točnost i stabilnost konačnih rezultata. Isključivanje nepouzdanih satelita i dodatni postupci obrade, kao što su prilagodba elevacijske maske, skraćivanje prozora računanja ili primjena naprednih algoritama, omogućuju poboljšanje kvalitete mjerenja. Međutim, cilj nije samo smanjiti šum, već i postići ravnotežu između točnosti, pouzdanosti i stabilnosti svih komponenti mjerenja (horizontalne, vertikalne i ukupne preciznosti). To uključuje razumijevanje kako promjene u geometriji satelita, kvaliteta signala i drugi uvjeti okoliša utječu na rezultate obrade podataka. U konačnici, TBC pruža korisnicima alate za optimizaciju obrade podataka na temelju specifičnih uvjeta mjerenja, omogućujući prilagodbu postupaka kako bi se što bolje adresirali potencijalni problemi, poput ometača, te postigli pouzdani i precizni GNSS rezultati.

7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedene analize prikupljenih GNSS podataka u urbanoj sredini, rad se usredotočio na prepoznavanje interferencija i njihov utjecaj na kvalitetu signala. Korištenjem naprednih metoda obrade i usporedbom podataka s CROPOS referentnom stanicom, identificirani su ključni faktori koji doprinose degradaciji GNSS signala.. Rezultati su potvrdili da na GNSS signale najznačajnije utječu višestruke refleksije (multipath efekti) i ometanja uzrokovana lokalnim izvorima. Ključni parametri poput omjera signala i šuma (SNR) te elevacije satelita pokazali su se kao pouzdani indikatori kvalitete opažanja i prisutnosti interferencija.

Analiza je pokazala da se interferencije očituju kroz nagle padove SNR vrijednosti i izražene oscilacije multipath efekata, osobito pri nižim elevacijama satelita. Pri niskim elevacijama, signali su podložniji degradaciji zbog veće udaljenosti signala kroz atmosferu i većeg utjecaja refleksija od okolnih objekata. Multipath efekti posebno su uočeni u uvjetima gdje reflektirani signali pristižu do prijemnika zajedno s direktnim signalom, uzrokujući kašnjenja i fazne pomake koji značajno narušavaju kvalitetu podataka.

Usporedba podataka opažanih instrumentom s podacima CROPOS referentne stanice dodatno je naglasila razlike u performansama između terenskih i referentnih opažanja. CROPOS stanica, smještena u optimiziranim uvjetima s minimalnim ometanjima, osigurava stabilne i pouzdane podatke uz visoke vrijednosti SNR-a i niske razine multipatha. S druge strane, terenski podaci pokazali su veću varijabilnost i osjetljivost na lokalne uvjete, pri čemu su određeni vremenski intervali zabilježili uniformne padove SNR vrijednosti za više satelita, što je indikativno za prisutnost lokalnih ometača.

Obrada podataka provedena je u softverskim alatima Trimble Business Centar i RTKLIB. U Trimble Business Centru fokus je bio na optimizaciji podataka kroz uklanjanje šumova i prilagodbu parametara, što je rezultiralo smanjenjem reziduala te poboljšanjem RMS-a, kao i horizontalne i vertikalne preciznosti. RTKLIB je korišten za detaljnu analizu ključnih parametara, poput SNR-a, multipath efekata i elevacije satelita, omogućujući identifikaciju vremenskih intervala s izraženim smetnjama. Kombinacija ovih alata osigurala je pouzdaniju interpretaciju podataka i poboljšanje kvalitete opažanja.

8. LITERATURA

Popis literature

- [1] Bačić, Ž. (2024./2025.): Integrirani sustavi u geomatici, predavanja Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet.
- [2] Bačić, Ž. (2022./2023.): Satelitsko pozicioniranje, predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet.
- [3] Čopo M. (2023.): Pogreške satelitskih sustava za navigaciju, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet
- [4] Dević T. (2021.): Utjecaj ometača na kinematička GNSS mjerenja, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet
- [5] Drobniak, S. i sur. (2021.): Bezbednost GNSS pozicioniranja, navigacije i određivanja vremena
- [6] Everett, T., Taylor, T., Akos, D.,M., Lee, D.,K. (2022.): Optimizing the Use of RTKLIB for Smartphone-Based GNSS Measurements
- [7] Hulin D. (2018.): Ispitivanje utjecaja GNSS ometača, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet
- [8] INTERTANKO (2019.): Jamming and Spoofing of Global Navigation Satellite Systems (GNSS)
- [9] Nevistić, Z. (2024.): Obrada statičkih opažanja u Trimble Business Center 5.00, vježbe iz kolegija Satelitsko pozicioniranje
- [10] Strode, P., Groves, P.,D. (2016.): GNSS multipath detection using three-frequency signal-to-noise measurements. GPS Solut 20, 399–412
- [11] Šugar, D., Nevistić, Z., Jelić, P. (2024): Trimble R8 GNSS uređaj i oprema - upute za rad, vježbe iz kolegija Satelitsko pozicioniranje

Popis mrežnih adresa

URL 1: Trimble Business Center, <https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-business-center>

URL 2: Ometanje GNSS-a: implikacije i rješenja za sigurnu navigaciju, <https://www.szmidjammer.com/hr/blog/gnss-jamming/> (6.1.2025.)

URL 3: GNSS multipath detection using three- frequency signal-to-noise measurements, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-015-0449-1/figures/1> (7.1.2025.)

URL 4: What is RINEX format and its latest version?, tersus-gnss.com/tech_blog/What-is-RINEX-format-and-its-latest-version (11.1.2025.)

URL 5: What is Signal to Noise Ratio (SNR) in the World of GNSS/GPS Antennas?, <https://novotech.com/pages/signal-to-noise-ratio-snr> (12.1.2025.)

URL 6: What is Signal to Noise Ratio and how to calculate it?, <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-signal-to-noise-ratio-and-how-to-calculate-it> (9.1.2025.)

URL 7: GPS Signal To Noise Ratio Data, [GPS Signal To Noise Ratio Data | GPS Basics | How GPS Works | GPS Spotlight](#) (10.1.2025.)

URL 8: GNSS Reflectometry for Land Remote Sensing Applications, https://www.researchgate.net/figure/GPS-signal-spectrum_fig6_280732466 (12.1.2025.)

URL 9: CROPOS, <https://www.cropos.hr/servisi/gpps> (13.1.2025.)

URL 10: Solarni ciklus 25 i utjecaj na GNSS tehnologiju, <https://geomatika-smolcak.hr/savjeti/solarni-ciklus-25-i-utjecaj-na-gnss-tehnologiju/> (8.1.2025.)

URL 11: OVERVIEW OF GNSS SIGNAL DEGRADATION PHENOMENA, https://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/SpecialPublications/KIS%2001/PDF/0301.PDF (7.1.2025.)

URL 12: Multipath, <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Multipath> (8.1.2025.)

URL 13: Multipath, <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1721> (8.1.2025.)

URL 14: What is GNSS multipath mitigation?, <https://www.u-blox.com/en/technologies/multipath-mitigation> (8.1.2025.)

9. POPIS SLIKA

Slika 1. Spektar GNSS signal (URL 8).....	3
Slika 2. Primjer interferencije uslijed višestruke refleksije signala (URL 3)	7
Slika 3. Trimble R8 GNSS prijemnik s kontrolerom TSC2	9
Slika 4. Rinex datoteka u formatu verzije 3.01	11
Slika 5. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L1 frekvenciju	14
Slika 6. Prikaz degradacije signala ometačem za L1 frekvenciju.....	15
Slika 7. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L2 frekvenciju	16
Slika 8. Prikaz degradacije signala ometačem za L2 frekvenciju.....	17
Slika 9. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L5 frekvenciju	18
Slika 10. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L1C frekvenciju.....	19
Slika 11. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L2X frekvenciju	19
Slika 12. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L2W frekvenciju.....	20
Slika 13. Grafikon SNR-a, multipatha i elevacije za L5X frekvenciju	21
Slika 14. Odnos DOP vrijednosti i broja vidljivih satelita.....	21
Slika 15. Grafički prikaz odnosa elevacije i SNR-a	22
Slika 16. Grafički prikaz odnosa elevacije i SNR-a uz dodatak linearne regresije	23
Slika 17. Razlike u SNR-u među grupama elevacije.....	23
Slika 18. Grafički prikaz odnosa elevacije i multipatha	24
Slika 19. Prosječna vrijednost SNR-a za sve dostupne satelite u određenom trenutku.....	25
Slika 20. Usporedba elevacija i SNR za opažanu točku i CROPOS	26
Slika 21. Pearsonovi koeficijenti korelacije - izračunato u R-u.....	26
Slika 22. Usporedba elevacija i multipatha za opažanu točku i CROPOS	27
Slika 23. Pearsonovi koeficijenti korelacije između elevacije i multipatha	28
Slika 24. Usporedba broja opažanja pojedinih satelita	29
Slika 25. Gornja slika - odnos DOP-a i ukupnog broja satelita CROPOS referentne stanice; donja slika- odnos DOP-a i ukupnog broja satelita opažane točke.....	30
Slika 26. Trimble Business Center verzija 5.00.....	31
Slika 27: Dobiveni vektor	33
Slika 28: Nulti prolaz	34
Slika 29: Reziduali- kako bi trebalo izgledati.....	34
Slika 30: Reziduali- kako ne bi trebalo izgledati	35
Slika 31: Rezultat ponovnog računanja	36

10. POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke specifikacije Trimble R8 GNSS prijemnika	10
Tablica 2. CROPOS servisi I njihove karakteristike (Hulina 2018).....	13
Tablica 3. Usporedba multipatha u različitim intervalima elevacije	28