

Stručni članak (nerecenziran)

## Utjecaj interferencije GNSS signala u neposrednoj blizini radiotelevizijskog tornja Sljeme u Zagrebu

Roberto Bešker, univ. bacc. ing. geod. et geoinf., e-mail: [rbesker@geof.hr](mailto:rbesker@geof.hr)

Antonio Gojak, univ. bacc. ing. geod. et geoinf., e-mail: [agojak@geof.hr](mailto:agojak@geof.hr)

**SAŽETAK.** U ovom radu analiziran je utjecaj radiotelevizijskih signala, s posebnim naglaskom na DVB-T2 tehnologiju, na kvalitetu GNSS pozicioniranja u okolici tornja Sljeme. Mjerenja su pokazala da harmonijske komponente DVB-T2 signala mogu uzrokovati povećanje šuma i degradaciju točnosti GNSS sustava, osobito na L2 i G2 frekvencijama. Premda nije zabilježen potpuni gubitak GNSS signala, opaženi su značajni poremećaji koji se manifestiraju smanjenjem preciznosti određivanja položaja. Dobiveni rezultati naglašavaju potrebu za dodatnim istraživanjima radiotelevizijskih interferencija te za razvojem metoda za njihovo ublažavanje kako bi se osigurala pouzdanost GNSS sustava u urbanim i tehnički kompleksnim područjima.

**Ključne riječi:** GNSS, interferencija, radiotelevizijski toranj Sljeme, urbane sredine, točnost i preciznost

## 1 Uvod

GNSS (Globalni navigacijski satelitski sustavi) predstavljaju ključni tehnološki stup modernog društva, omogućujući preciznu navigaciju i pozicioniranje u širokom spektru vojnih, civilnih i komercijalnih primjena. Kao osnovni sustav za pružanje podataka o poziciji, navigaciji i vremenu (PNT), GNSS je postao neizostavan u svakodnevnim aktivnostima – od upravljanja prometom, financijskih transakcija i poljoprivrede do vojne strategije i spašavanja života. Međutim, rastuća ovisnost o GNSS tehnologiji donijela je sa sobom i nove izazove, uključujući ranjivost na različite vrste ometanja.

Ometanje GNSS signala, koje može biti nenamjerno ili namjerno, prijetnja je koja ugrožava pouzdanost ovih sustava. Slaba snaga GNSS signala, njihova poznata struktura te dostupnost jednostavnih uređaja za ometanje čine sustav ranjivim. Posebice u vojnom kontekstu, GNSS signal se često koristi za navođenje besposadnih sustava i oružja, a njegovo ometanje može znatno smanjiti učinkovitost takvih sredstava. Ova tema postala je središte interesa zbog potencijalnih implikacija na sigurnost, gospodarstvo i svakodnevni život.

Ometanje GNSS signala odnosi se na postupke koji narušavaju preciznost, pouzdanost ili funkcionalnost navigacijskih sustava. Može uključivati blokiranje (jamming), slanje lažnih signala (spoofing) ili presretanje i ponovno emitiranje signala (meaconing). Ciljevi ometanja mogu biti vojni (uskraćivanje navigacijskih mogućnosti protivniku) ili civilni (financijski ili teroristički motivirani).

Istraživanja su pokazala da slaba snaga GNSS signala čini sustave ranjivima na čak i jednostavne uređaje za ometanje. Dokumentirani su brojni slučajevi ometanja, uključujući incidente u zračnim lukama, pomorskim područjima i urbanim sredinama, pri čemu su ugrožene sigurnosne i službe za spašavanje.

Poznato je da GNSS signali rade na vrlo niskim snagama, zbog čega su osjetljivi na interferencije. Također, struktura signala je javna, što omogućava izradu uređaja za ometanje. Ometanje može imati ozbiljne posljedice, uključujući prekid rada vitalnih službi i infrastrukturnih sustava.

Trenutna istraživanja usmjerena su na razvoj tehnika zaštite, uključujući pojačanje otpornosti prijemnika na ometanje, primjenu novih protokola za otkrivanje lažnih signala te korištenje pomoćnih sustava kao što su inercijska navigacija.

U ovom radu analizirat će se problem ometanja GNSS signala na području Sljemenskog tornja. Ovaj toranj, kao ključni komunikacijski čvor, predstavlja specifično mjesto potencijalnih izazova povezanih s GNSS signalima. Poseban naglasak bit će stavljen na identificiranje izvora interferencije kako bi osigurali pouzdanost GNSS signala u ovom kontekstu.

## 2 Materijali i metode

### 2.1 Instrumentarij

RINEX (Receiver Independent Exchange Format) je standardizirani format za pohranu GNSS opažanja koji omogućuje univerzalnu upotrebu podataka neovisno o proizvođaču opreme. Ovaj format koristi se za razmjenu podataka među različitim softverskim platformama i omogućuje analizu opažanja iz različitih izvora.

Jedan od ključnih parametara u RINEX formatu je *Signal to Noise Ratio (SNR)*. SNR predstavlja omjer snage korisnog GNSS signala prema razini šuma u signalu. SNR je izražen u decibelima (dB-Hz) i koristi se kao indikator kvalitete signala. Visoki SNR ukazuje na jak i kvalitetan GNSS signal, dok nizak SNR signalizira moguće probleme s interferencijama, smetnjama ili slabim prijemom signala zbog prepreka poput vegetacije, zgrada ili vremenskih uvjeta.

SNR podaci se pohranjuju u RINEX datoteci kao dio opažanja signala za svaki satelit na određenoj frekvenciji. Ovi podaci se mogu analizirati kako bi se procijenila kvaliteta opažanja i identificirale potencijalne interferencije.

RINEX datoteke su generirane od strane GNSS prijavnika tijekom opažanja i obično se nalaze pohranjene u memoriji prijavnika ili vanjskom uređaju povezanom s prijajnikom. Nakon prikupljanja, podaci se prebacuju na računalo radi daljnje obrade.

RINEX datoteke sadrže:

1. *Podatke o opažanjima*: informacije o pseudoulazima, fazama nosača, dopplerskom pomaku i SNR-u za svaki opažani satelit.
2. *Navigacijske podatke*: efemeride satelita koje definiraju njihov položaj u određenom trenutku.
3. *Meteorološke podatke* (ako su dostupni): informacije o temperaturi, tlaku i vlazi.
4. *Metapodatke*: informacije o opremi, vremenu opažanja, koordinatama točke opažanja i korištenom sustavu.

RINEX format je ključan za post-processing metode jer omogućuje integraciju podataka iz različitih izvora i njihovu standardiziranu obradu.

Instrumentarij korišten prilikom mjerenja jest Trimble R8 (Model 2, Model 3) komplet GNSS opreme koji se sastoji od sljedećih dijelova:

- višefrekvencijskog GNSS prijavnika s integriranom antenom,
- unutarnje baterije (i rezervne baterije),
- TSC2 kontrolera
- podnožne ploče i adaptera,
- mjerne vrpce (za mjerenje visine antene),
- stativa.

Trimble R8 (Slika 1.) je višefrekvencijski GNSS prijajnik dizajniran za profesionalna geodetska mjerenja. Glavne specifikacije za modele 2 i 3 uključuju:

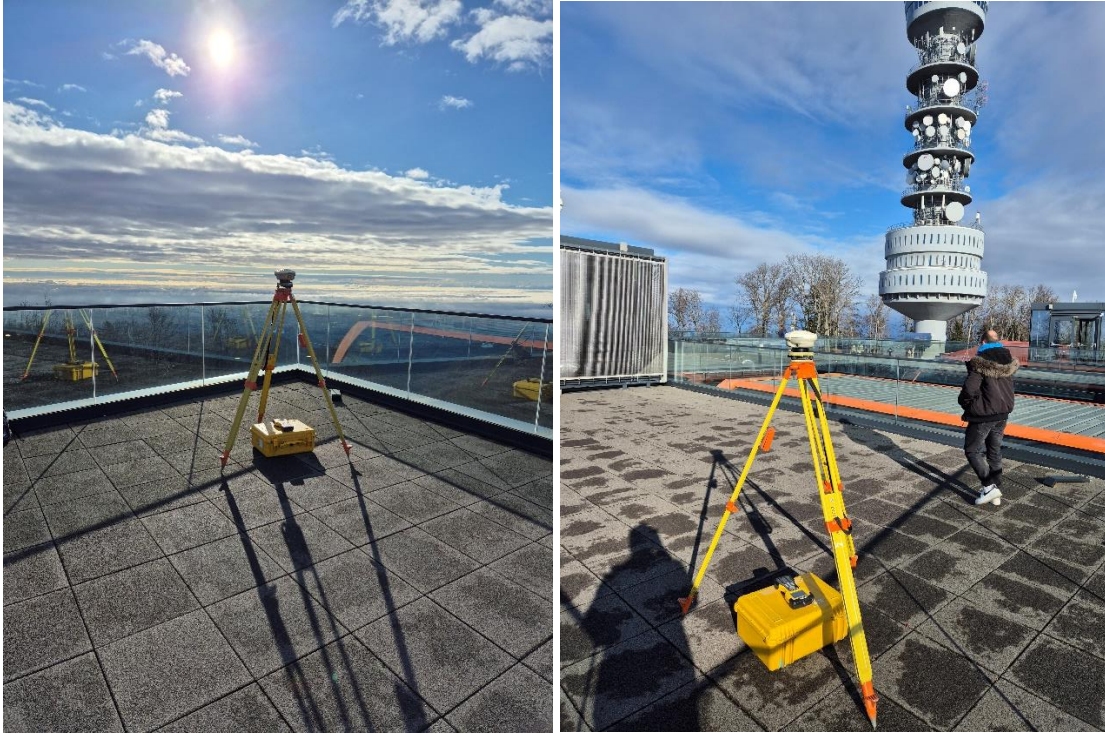
1. GNSS mogućnosti:

- Podrška za GPS, GLONASS, SBAS, i dodatne satelitske sustave (ovisno o modelu).
  - Mogućnost praćenja signala na više frekvencija (L1, L2, L5).
2. Integrirana antena:
- Precizna antena za višefrekvencijsko opažanje.
  - Minimalno utjecanje višestaznog (multipath) signala zahvaljujući optimiziranom dizajnu.
3. Izdržljivost:
- Robusno kućište otporno na vodu i prašinu (IP67).
  - Otpornost na udarce i vibracije, pogodna za zahtjevne terenske uvjete.
4. Baterija:
- Litij-ionske baterije koje omogućuju dugotrajna mjerenja (do 10 sati rada).
  - Mogućnost zamjene rezervnih baterija na terenu.
5. Komunikacija:
- Ugrađeni Bluetooth i bežična komunikacija za povezivanje s kontrolerom (TSC2).
  - Pohrana podataka na vanjske uređaje putem USB-a.



Slika 1. Trimble R8.

Potrebno je orijentirati antenu (prijamnik) prema sjeveru na način da MMI (Man-Machine Interface) gleda prema sjeveru te pričvrstiti antenu (prijamnik) odgovarajućim vijkom (Slika 2).



Slika 2. Stajalište opažanja.

Izvorni format mjerenja je Trimble format T01, a nakon opažanja je transformiran u Rinex. Obradivana su opažanja satelitskih sustava GPS i GLONASS.

## 2.2 Mjerenja

Mjerenje je provedeno 29. studenog 2024. Nakon preuzimanja instrumentarija u vijećnici Geodetskog Fakulteta, opažana je interferencija GNSS signala na sljemenskom Tornju od 10h – 12h UTC. Vrijeme je bilo vjetrovito i oblačno (Slika 3).



Slika 3. Toranj Sljeme.

Prilikom ovog rada promatra se samo položajna točnost, stoga instrument nije bilo potrebno centrirati, već samo horizontirati. Prilikom dolaska na dodijeljenu geodetsku točku stativ je postavljen na način da GNSS prijamnik bude čim više iznad geodetske točke. Prilikom postavljanja instrumenta i za vrijeme mjerenja nije došlo do nikakvih poteškoća.

## 2.3 Metode

Korišteni softver RTKLIB služi za vizualizaciju GNSS opažanja u RINEX formatu. Post-processing static metoda, kojom optimiramo bazni vektor opažanja korištena je u softveru Trimble Business Center, osnovna verzija 5.52.7888.18164 GNSS 2.20.2.30895.

Metoda *Post-Processing Static* koristi se za obradu GNSS opažanja prikupljenih na statičan način, gdje prijamnik ostaje nepomičan tijekom trajanja mjerenja. Cilj ove metode je izračunati precizne koordinate točke na temelju opažanja baznog vektora između prijarnika.

Proces uključuje:

1. Prikupljanje sirovih GNSS opažanja u RINEX formatu.
2. Obrada podataka pomoću referentne stanice ili mreže referentnih stanica.
3. Optimizaciju baznog vektora kroz algoritme preciznog određivanja položaja (PPP ili diferencijalni GNSS).

Post-processing static metoda omogućuje visoku točnost pozicioniranja, obično u milimetarskom ili centimetarskom rasponu, ovisno o duljini baznog vektora i kvaliteti opažanja.

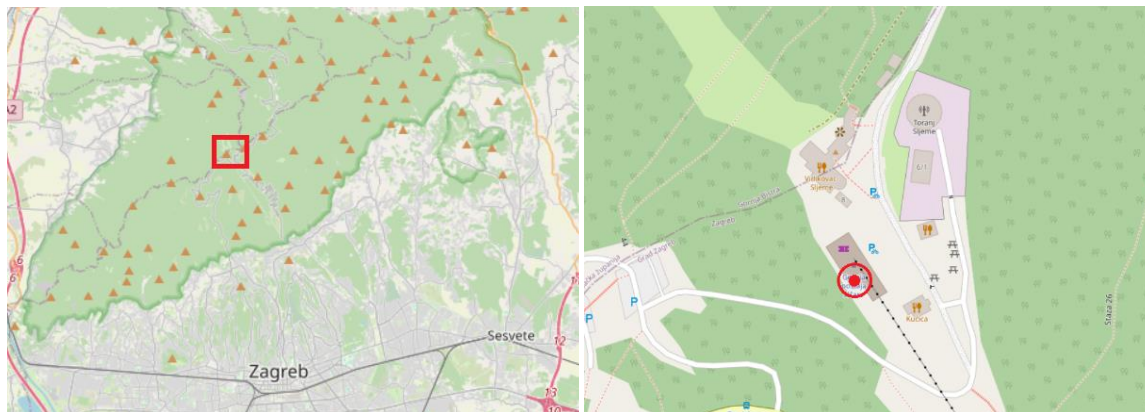
*Trimble Business Center (TBC)* je napredni softver za obradu i analizu GNSS podataka. Osnovna verzija ovog softvera omogućuje sljedeće funkcije:

1. *Import podataka:*
  - Uvoz podataka u Trimble formatima (npr. T01) i standardnim formatima poput RINEX-a.
2. *Post-processing static:*
  - Analiza baznih vektora i optimizacija koordinata opažanja.
  - Prilagodba podataka prema referentnim stanicama ili mreži.
3. *Vizualizacija:*
  - Grafički prikaz GNSS opažanja, uključujući položaj satelita, SNR i kvalitetu opažanja.
4. *Analiza kvalitete:*
  - Identifikacija potencijalnih grešaka u opažanjima poput multipatha ili slabe geometrije satelita.
5. *Izvoz podataka:*
  - Generiranje izvještaja i rezultata u različitim formatima za daljnju analizu ili arhiviranje.

Kombinacija RINEX formata i TBC softvera omogućuje preciznu obradu podataka, što je ključno za analizu interferencije GNSS signala na Sljemenskom tornju i sličnim projektima.

### 3 Rezultati

Točnost izjednačenog optimiranog baznog vektora promatrana je u usporedbi s baznim vektorom za opažanja satelita u smjeru tornja Sljeme. Izvedena opažanja i naknadna obrada statičkih opažanja provedena su za proizvoljnu točku smještenu na jugozapadnom dijelu terase gornje postaje žičare Sljeme (Slika 4).



Slika 4. Lokacija stajališta.

Kao referentna točka korištena je CORS RGNF, koja je dio CROPOS-a. Koordinate referentne točke navedene su u Tablici 1.

Tablica 1. Koordinate referentne točke CORS RGNF.

RGNF	
Easting (m)	458328,386
Northing (m)	5074267,076
Geografska duljina (°)	N 45°48'25,22132"
Geografska širina (°)	E 15°57'49,87430"
Elipsoidna visina (m)	202,447

Lokacija opažanja općenito nema značajnih prepreka izuzev samoga tornja koje bi mogle ograničavati prijem GNSS signala. Na sjevernoj i istočnoj strani nalaze se konstrukcije terase, dok su na sjeveroistočnoj strani toranj Sljeme i šuma. Postavljena je elevacijska maska od 10° radi smanjenja utjecaja višestruke refleksije signala od drveća.

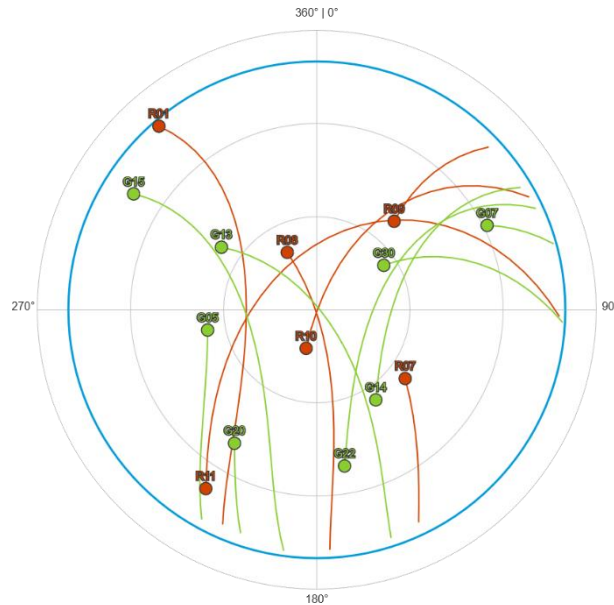
Vektor bazne linije optimiran je (Tablica 2). Tijekom izjednačenja redom su isključena opažanja sljedećih satelita: R12, R2, G7, G23, G20, R7 (10:51–12:00), G19 i R9. Razlog isključenja bila je visoka višestruka refleksija signala ili niža vrijednost omjera signal-šum (SNR).

Tablica 2. Koordinate stajališta.

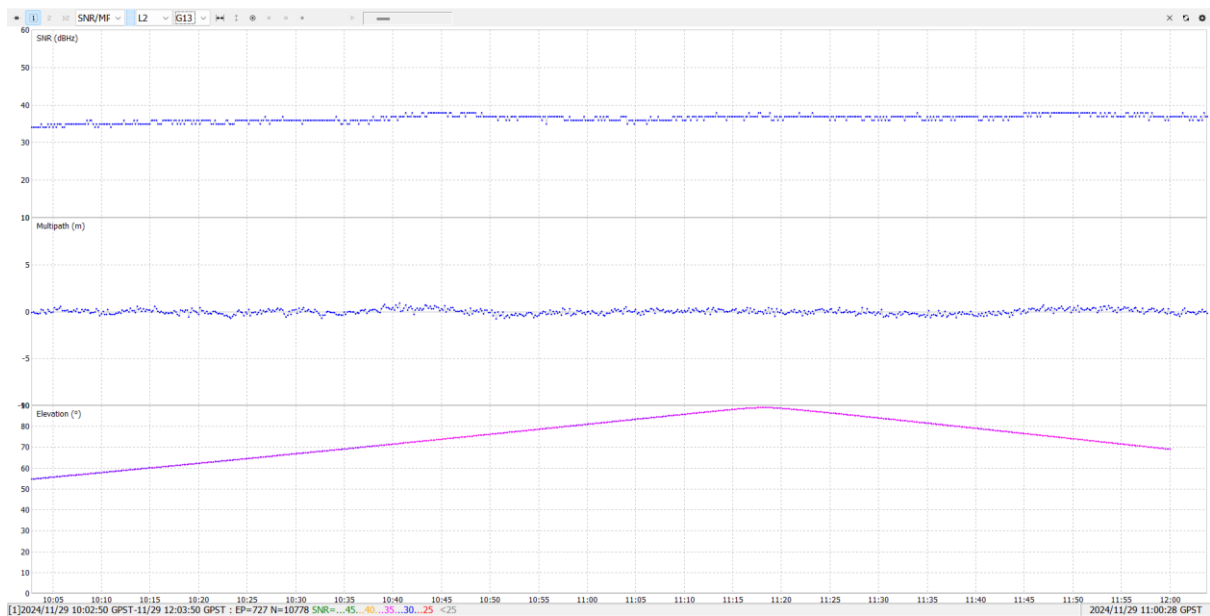
P1	
Easting (m)	457122,689 ± 0,0032
Northing (m)	5084458,228 ± 0,0041
Položajna točnost (m)	0,0101
Srednja kvadratna pogreška (m)	0,0184
Duljina baznog vektora (m)	10263,0206
Geografska duljina (°)	N 45°53'55,05557"

Geografska širina (°)	E 15°56'50,76557"
Elipsoidna visina (m)	1082,8

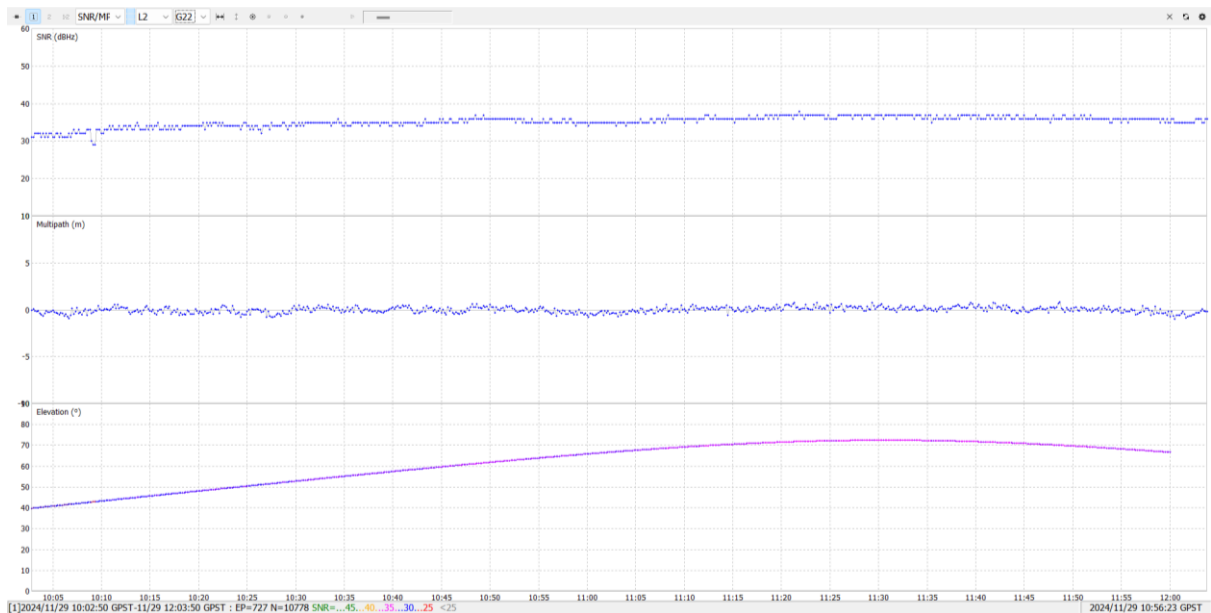
Vrijednosti SNR-a za opažanja kretale su se između 35 i 50. Niže vrijednosti SNR-a zabilježene su kod satelita s elevacijom iznad 45°, s prijemom signala iz smjera pravca sjeveroistok-jugoistok, što uključuje toranj Sljeme (Slika 5). Najveći pad SNR-a uočen je kod frekvencija L2 i G2, osobito za satelite G13 (Slika 6), G22 (Slika 7), R8 i R11.



Slika 5. Skyplot graf.



Slika 4. Graf SNR, višestruka refleksija i elevacija za satelit G13 (kanal L2).



Slika 5. Graf SNR, višestruka refleksija i elevacija za satelit G22 (kanal L2).

Iz opažanja satelita G13, G20, G22, R8 i R11 izračunat je bazni vektor (Tablica 3).

Tablica 3. Koordinate stajališta za opažanja s interferencijom.

P1	
Easting (m)	457122,692 ± 0,0096
Northing (m)	5084458,224 ± 0,0089
Položajna točnost (m)	0,0290
Srednja kvadratna pogreška (m)	0,0285
Duljina baznog vektora (m)	10263,0206
Geografska duljina (°)	N 45°53'55,05543"
Geografska širina (°)	E 15°56'50,76569"
Elipsoidna visina (m)	1082,8

Pouzdanost rezultata baznog vektora iz opažanja izdvojenih satelita bila je 1,5 puta manja u usporedbi s optimiranim vektorom svih opažanja. Maksimalne vrijednosti PDOP-a iznosile su 2,171 za optimirani vektor, dok su za vektor iz opažanja s interferencijom dosezale 15,875.

## 4 Diskusija

Rezultati pokazuju da televizijski i radio signali izazivaju interferenciju GNSS signala. Iako nije zabilježen gubitak signala, zamijećen je povećan šum signala, što izravno utječe na kvalitetu pozicioniranja.

Toranj Sljeme služi kao odašiljač za analogni FM radio (88,1–98,5 MHz), digitalni radio DAB+ (220,352 MHz) te televizijski signal DVB-T2 (506 i 626 MHz). Televizijski kanali emitiraju se kružno ili usmjereno u rasponu od 100° do 360°. U neposrednoj blizini odašiljača može doći do pojave drugog i trećeg harmonika. Posebno je problematičan DVB-T2 signal, čiji drugi harmonik doseže frekvencije od 1012 i 1252 MHz, a treći harmonik 1518 i 1878 MHz. Frekvencije drugog harmonika nalaze se u dijelu spektra namijenjenog GNSS signalima (L5, G3, L2 i G2).

Rezultati opažanja ukazuju na interferenciju drugog harmonika televizijskog signala DVB-T2 sa GNSS signalom L2. To je uočeno kod satelita G13 i G22 (dio GPS bloka 2R) te satelita R8 i R11, kod kojih je registriran L2 signal, odnosno G2. Galileo sateliti nisu opaženi, pa nije bilo moguće potvrditi prisutnost iste interferencije na ostalim ranjivim frekvencijama (L5, G3, E5a i E5b).

De Bakker i sur. (2006) također su potvrdili interferenciju GNSS signala izazvanu radio signalima, osobito za GPS L2 i L5 te Galileo E5 i E6. Razvili su algoritam za procjenu utjecaja, pod uvjetom da su poznati parametri interferencijskih signala. Terenska opažanja GPS Patrona (URL 1) na udaljenosti od 90 m od televizijskog tornja zabilježila su SNR od 28 i RMS od 12 m, uz smanjenje kvalitete pozicioniranja do pet puta. Na udaljenosti od 5 km, SNR je iznosio 35 dB, a RMS se smanjio na 2,5 m.

Wildemeersch i sur. (2010) proučavali su utjecaj trećeg harmonika DVB-T signala, uz direktno generiranje frekvencije, te razvili matematički model za detektiranje interferencije. Sánchez-Naranjo i sur. (2017) navode da frekvencije digitalne televizije imaju zanemariv utjecaj na GNSS signale. Querol Borràs (2018) zaključuje da niže GNSS frekvencije imaju izvore terestričkih smetnji, poput televizijskih signala i WiFi pristupnih točaka. Međutim, utjecaj tih interferencija na GNSS signal nije kritičan, za razliku od mikrovalne i GNSS radiometrije, koje zahtijevaju minimalno ometanje.

Unatoč različitim tvrdnjama u literaturi, ovim je radom potvrđeno da se u neposrednoj blizini odašiljača kvaliteta GNSS signala smanjuje. Utjecaj interferencije nije uočen kod svih opažanja satelita i kanala. Manje vrijednosti SNR-a zabilježene su kod satelita u pravcu prema odašiljaču s elevacijom većom od 45°. Ova opažanja upućuju na utjecaj emitiranih radiotelevizijskih signala, a ne na nisku elevaciju ili višestruku refleksiju. Interferencija je zabilježena samo u nižim frekvencijama, poput kanala L2 i G2, zbog utjecaja drugog harmonika DVB-T2 signala. S obzirom na tehničke mogućnosti satelita u vrijeme opažanja, nije bilo moguće analizirati L5 i G3 kanale u pravcu prema odašiljaču. Interferencija u kanalima L1 i G1 nije zabilježena.

Zaključno, utvrđena je interferencija GNSS signala u neposrednoj blizini odašiljača, što smanjuje kvalitetu pozicioniranja za približno 50% kod satelita pod utjecajem interferencije.

Postojeća istraživanja razvila su matematičke modele za detekciju i smanjenje utjecaja interferencije (De Bakker i sur. (2006), Querol Borràs (2018)), ali postoje razlike u tvrdnjama o razmjeru smetnji na terenu. Za buduća mjerenja preporučuje se dokumentiranje svih izvora interferencije, uključujući frekvencije i snagu odašiljača, kako bi se bolje razumjeli potencijalni utjecaji na GNSS signale.

Za buduća istraživanja i terenska mjerenja preporučuje se sustavan pristup u analizi utjecaja interferencije na GNSS signale. Prije svega, potrebno je detaljno evidentirati sve potencijalne izvore interferencije, uključujući frekvencije, način odašiljanja (usmjereno ili kružno), snagu signala i geometrijsku lokaciju izvora u odnosu na stajalište opažanja. Uz to, trebalo bi provesti opažanja u različitim prostornim i vremenskim uvjetima kako bi se dobila šira slika o dinamici interferencijskih učinaka.

Poseban fokus budućih istraživanja mogao bi biti na utjecaju viših harmonika snažnih televizijskih i radijskih odašiljača na GNSS signale, s obzirom na mogućnost njihovog preklapanja s ključnim GNSS frekvencijama poput L5 i G3. Ovo bi uključivalo i korištenje suvremenih prijamnika koji podržavaju nove GNSS signale i omogućuju usporedbu različitih sustava, uključujući GPS, Galileo, GLONASS i BeiDou.

## 5 Zaključak

Zaključno, rezultati istraživanja ukazuju na značajan utjecaj interferencije radiotelevizijskih signala na kvalitetu GNSS pozicioniranja u neposrednoj blizini tornja Sljeme. Iako nije zabilježen potpuni gubitak GNSS signala, detektirano je povećanje razine šuma i degradacija položajne točnosti, osobito na frekvencijama signala L2 i G2. Analiza je pokazala da harmonici televizijskog signala, posebice drugi harmonik DVB-T2, interferiraju s GNSS signalima, što negativno utječe na preciznost opažanja.

Dobiveni rezultati potvrđuju potrebu za daljnjim istraživanjima s ciljem bolje identifikacije izvora i učestalosti interferencija te primjenu razvijenih metoda za smanjenje njihovog utjecaja na GNSS sustave. Ovi nalazi posebno su relevantni u urbanim sredinama i područjima s visokom koncentracijom radiotelevizijske infrastrukture, gdje pouzdanost GNSS sustava ima ključnu ulogu u osiguravanju preciznog i neometanog pozicioniranja.

## 6 Literatura

- de Bakker, P., Samson, J., Joosten, P., Spelat, M., Martin, H., Ambrosius, B. (2006): Effects of radio frequency interference on GNSS receiver output, <https://doi.org/10.13140/2.1.1355.7763>
- Querol Borràs, J. (2018): Radio frequency interference detection and mitigation techniques for navigation and Earth observation (disertacija, UPC, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions), <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-125028>
- Sánchez-Naranjo, S. M., Ferrara, N. G., Paśnikowski, M. J., Raasakka, J., Shytermeja, E., Ramos-Pollán, R., Osorio, F. A. G., Martínez, D., Lohan, E.-S., Nurmi, J., López, M. T., Kotaba, O., Julien, O. (2017): GNSS Vulnerabilities, J. Nurmi, E.-S. Lohan, H. Wymeersch, G. Seco-Granados, O. Nykänen (Ur.), Multi-Technology Positioning, 55–77, Springer International Publishing, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50427-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50427-8_4)
- Wildemeersch, M., Rabbachin, A., Cano, E., Fortuny, J. (2010): Interference assessment of DVB-T within the GPS L1 and Galileo E1 band, 2010 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), 1–8, <https://doi.org/10.1109/NAVITEC.2010.5708046>
- URL 1: DVB-T2 Can Distort GNSS Performance, <https://gpspatron.com/dvb-t2-can-distort-gnss-performance/>, (17.1.2025.).