



Care4SIGNAL: Ocena tveganja motenj signalov GNSS v slovenskem državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL

Ciljni raziskovalni program »CRP 2023« v letu 2023
Raziskovalni projekt št. V2-2342

KONČNO POROČILO

Avtorji:

izr. prof. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, asist. dr. Veton Hamza, doc. dr. Klemen Kozmus
Trajkovski, doc. dr. Miran Kuhar, Albin Mencin, asist. Klemen Ritlop, doc. dr. Oskar Sterle, prof. dr. Bojan
Stopar, doc. dr. Mihaela Triglav Čekada, Niko Fabiani, Natalija Novak, doc. dr. Franc Dimc, asist. dr. Matej
Bažec, asist. dr. Aljaž Blatnik, asist. dr. Andrej Lavrič, Staš Dolinšek, prof. dr. Boštjan Batagelj

Ljubljana, september 2025

PODATKI O PROJEKTU

CRP program: Ciljni raziskovalni program »CRP 2023« v letu 2023
Tema: Zaznavanje motenj signalov GNSS za zavarovanje kritične geodetske infrastrukture in njenih uporabnikov
Tematski sklop: Varna in globalno odgovorna Slovenija
Težišče: Vključujoča, zdrava, varna in odgovorna družba
Št. projekta: V2-2342

Naročnika

NAROČNIK

Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS)

Bleiweisova cesta 30, 1000 Ljubljana

Matična številka: 9390847000

Davčna številka: 31434860

Odgovorna oseba: Tjaša Dobnik, direktorica

SONAROČNIK

Ministrstvo za naravne vire in prostor RS, Geodetska uprava RS (MNVP-GURS)

Zemljemerska ulica 12

1000 Ljubljana

Matična številka: 2482886000

Davčna številka: 57410763

Predstavnik naročnika: Sandi Berk

Odgovorna oseba: Tomaž Petek, generalni direktor

II

Izvajalci

IZVAJALEC

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (UL FGG)

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Matična številka: 1626981000

Davčna številka: 98643339

Odgovorna oseba: prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, dekanja
prof. dr. Gregor Majdič, rektor

Vodja projekta: dr. **Polona Pavlovčič Prešeren**

Raziskovalna skupina:

P2-0227 – Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj

SOIZVAJALEC 1

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko (UL FE)

Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

Matična številka: 1626965000

Davčna številka: 11015489

Odgovorna oseba: prof. dr. Marko Topič, dekan
prof. dr. Gregor Majdič, rektor

SOIZVAJALEC 2

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet (UL FPP)

Pot pomorščakov 4, 6320 Portorož

Matična številka: 1627015000

Davčna številka: 99219778

Odgovorna oseba: prof. dr. Peter Vidmar, dekan
prof. dr. Gregor Majdič, rektor

SOIZVAJALEC 3

Geodetski inštitut Slovenije (GI)

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana
Matična številka: 5051649000
Davčna številka: 81498756
Odgovorna oseba: Milan Brajnik, direktor

Pogodba

Naslov pogodbe: Pogodba št. 2562-23-000085 o (so)financiranju in izvajanju raziskovalnega projekta z naslovom: »Care4SIGNAL: Ocena tveganja motenj signalov GNSS v državnem omrežju stalnih postaj GNSS SIGNAL« v okviru Ciljnega raziskovalnega programa »CRP 2023«

Zastopnika pogodbe

Vsebinski spremljevalec: Sandi Berk (MNVP-GURS)
Vodja projekta: dr. Polona Pavlovčič Prešeren (UL FGG)

Izvajalci

Vodja projekta: izr. prof. dr. Polona Pavlovčič Prešeren

Člani projektne skupine (po abecednem vrstnem redu):
UL FGG

asist. dr. Veton Hamza (51902)
doc. dr. Klemen Kozmus Trajkovski (23500)
doc. dr. Miran Kuhar (10398)
Albin Mencin (27940)
izr. prof. dr. Polona Pavlovčič Prešeren (19585)
asist. Klemen Ritlop (51000)
doc. dr. Oskar Sterle (25481)
prof. dr. Bojan Stopar (10196)
Maja Filač (študentka)

UL FE

prof. dr. Boštjan Batagelj (18174)
asist. dr. Aljaž Blatnik (50192)
asist. dr. Andrej Lavrič (53519)
Staš Dolinšek (študent)

UL FPP

asist. dr. Matej Bažec (21506)
doc. dr. Franc Dimc (14414)

GI

Niko Fabiani (39786)
doc. dr. Mihaela Triglav Čekada (23564)
Natalija Novak (55127)

Pregled nad izvedenimi dejavnostmi

Št.	Delovni sklopi in aktivnosti (načrtovane/ izvedene)	Načrtovano	Rezultati
DS1	Analiza in ocena ranljivosti uporabnikov tehnologije GNSS na različne namerno povzročene motnje signalov GNSS	od 1. 10. 2023 do 31. 1. 2024	M1: Sestanek na GURS
	DS1-1: Pregled možnosti ocene motenj v omrežju SIGNAL (študija programja SIGNAL)	od 1. 10. 2023 do 31. 1. 2024	
	DS1-2: Pregled možnosti zaznave motenj z geodetskimi sprejemniki	od 1. 10. 2023 do 31. 1. 2024	
	DS1-3 Pregled možnosti zaznave motenj z drugimi sprejemniki	od 1. 10. 2023 do 31. 1. 2024	
DS2	Razvoj metodologije ugotavljanja motenj in nadzora kakovosti opazovanj GNSS	od 1. 1. 2024 do 15. 5. 2024	
	DS2-1: Izdelava obrazca za vodenje meta-podatkov o scenarijih testiranja	od 1. 1. 2024 do 15. 2. 2024	
	DS2-2 Opredelitev metodologije ocene kakovosti opazovanj GNSS	od 1. 1. 2024 do 1. 3. 2024	
	DS2-3 Opredelitev načinov arhiviranja opazovanj GNSS različnih testnih scenarijev	od 1. 1. 2024 do 1. 3. 2024	
	DS2-4 Opredelitev testiranja motilnikov	od 1. 3. 2024 do 15. 5. 2024	
	DS2-5 Opredelitev testiranja sprejemnikov GNSS	od 1. 3. 2024 do 15. 5. 2024	M2: Prvo vmesno poročilo
	DS2-6 Izbor testnih območij in opreme za testiranje	od 1. 3. 2024 do 15. 6. 2024	
DS3	Testiranje predlagane metodologije nadzora kakovosti meritev v omrežju SIGNAL in na strani uporabnikov GNSS	od 1. 3. 2024 do 31. 8. 2025	
	DS3-1 Testiranje motilnikov v laboratoriju	od 1. 3. 2024 do 15. 9. 2024	
	DS3-2 Testiranje sprejemnikov GNSS na terenu	od 1. 4. 2024 do 1. 6. 2025	M3: Drugo vmesno (letno) poročilo do 30.9.2024
DS4	Integracija in implementacija metodologije in izdelava priporočil nadaljnjega dela	od 1. 5. 2025 do 31. 8. 2025	
	DS4-1 Integracija in implementacija metodologije	od 1. 5. 2025 do 31. 8. 2025	
	DS4-2 Izdelava priporočil nadaljnjega dela	od 1. 5. 2025 do 31. 8. 2025	
DS5	Koordinacija in diseminacija	31. 9. 2025	M4: Končno poročilo
	DS5-1 Koordinacija projekta	od 1. 10. 2023 do 30. 9. 2025	
	DS5-2 Objave rezultatov (strokovni članek v reviji)	od 1. 10. 2023 do 30. 9. 2025	
	DS5-3 Objave rezultatov (izvedba delavnic)	od 1. 2. 2024 do 30. 9. 2025	
	DS5-4 Obveščanje javnosti (simpozij)	od 1. 10. 2023 do 30. 9. 2025	

Vodje sklopov

Št.	Opis
DS1	dr. Mihaela Triglav Čekada
DS2	dr. Matej Bažec
DS3	dr. Franc Dimc
DS4	dr. Boštjan Batagelj
DS5	dr. Polona Pavlovčič Prešeren

Mejniki

Št.	Opis	Načrtovano	Komentar
M1	Prvi sestanek projektne skupine s predstavniki GURS	31.10. 2023	Sestanek 26. 10. 2023
M2	Prvo vmesno poročilo	31.05. 2024	Oddaja: 18. 4.2024 Digitalno podpisano: 6. 5. 2024 Sestanek 25. 4. 2024
M2	Drugo vmesno (letno) poročilo	do 30. 9. 2024	Oddaja: 9. 9. 2024 Sestanek: 17. 9. 2024
M4	Zaključek in sinteza rezultatov eksperimentalnega dela	31.05.2025	Predhodni sestanek FGG, FE, FPP na dan 23. 4. 2025 (ni poročila)
M5	Končno poročilo	30. 9. 2025	Oddano na GURS, spletna stran
M6	Objavljeni strokovni znanstveni članek	01.05.2025	Objava v reviji Electronics (MDPI)

Legenda:

Opravljeno
V teku
Načrtovano

KAZALO

KAZALO PREGLEDNIC	14
A. Uvod	15
B. Pregled dosedanjih raziskav	19
C. Teoretična izhodišča	25
1 Analiza in ocena ranljivosti uporabnikov tehnologije GNSS na različne namerno povzročene motnje signalov GNSS.....	34
1.1 Pregled možnosti ocene motenj v omrežju SIGNAL (Naloga 1.1).....	34
1.1.1 Spektralni analizator v sprejemnikih Trimble.....	38
1.1.2 Spektralni analizator v sprejemnikih Leica Geosystems	41
1.2 Pregled možnosti ocene motenj z geodetskimi sprejemniki (Naloga 1.2).....	42
1.2.1 Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Javad Inc.	42
1.2.2 Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Leica Geosystems.....	44
1.2.3 Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Trimble Inc.	45
1.3 Pregled zaznave motenj z drugimi sprejemniki (Naloga 1.3)	46
1.3.1 Spremljanje spektra v sprejemniku u-blox ZED-F9P	46
1.3.2 Spremljanje spektra v sprejemniku Septentrio Mosaic x5	46
2 Razvoj metodologije ugotavljanja motenj in nadzora kakovosti opazovanj GNSS.....	49
2.1 Izdelava obrazca za vodenje meta-podatkov o scenarijih testiranj.....	49
2.2 Opredelitev metodologije ocene kakovosti opazovanj GNSS	50
2.2.1 Naknadna obdelava opazovanj in meritev	51
2.3 Opredelitev načrta arhiviranja podatkov s poimenovanjem datotek.....	51
2.4 Predlog poročila rezultatov testiranja motilnikov v laboratoriju in na terenu	54
2.4.1 Opredelitev dogodka	57
2.4.2 Poročanje o meritvah	58
2.5 Načrt izvedbe testov.....	59
2.6 Izbor območij in opreme za testiranje	60
3 Testiranje predlagane metodologije nadzora kakovosti meritev v omrežju SIGNAL in na strani uporabnikov.....	62
3.1 Testiranje motilnikov v laboratorijskem okolju brez prisotnosti drugih morebitnih elektromagnetnih motenj.....	62
3.2 Testiranje sprejemnikov GNSS na terenu.....	65
3.2.1 Nenamerne motnje – testno območje: stalna postaja FGG3.....	67

3.2.2	Nenamerne motnje – testno območje na geodetski točki Malijsa (izmera 26. 4. 2024)	74
3.2.3	Nenamerne motnje - testno območje na novi točki 0. reda Livade (izmere: 26. 4. 2024)	82
3.2.4	Nenamerne motnje - testno območje na novi točki 0. reda Livade (izmeri: 29. 4. 2024, 30. 4. 2024)	87
3.2.5	Nenamerne motnje - testno območje na Pasji ravni (izmera: 5. 11. 2024)	89
3.2.6	Namerne motnje – testno območje: Črnotiče (15. 5. 2024)	91
3.2.7	Nenamerne motnje (Luka Koper, maj – junij 2024)	145
4	GNSS simulacija ponovljivih meritev za določitev tipov motenj	147
4.1	Metodologija pristopa k izvedbi ponovljivih meritev GNSS	147
4.2	Simulacija GNSS kot orodje za ponovljive meritve	148
4.2.1	Uporaba smernega sklopnika	149
4.3	Tipi motenj	149
4.4	Podatki	150
4.5	Časovni prikaz vrednosti C/N0 za vse ponovitve	151
4.5.1	Prikaz sprememb določitve geografske širine in dolžine ob prisotnosti motnje	155
4.5.2	Časovni potek signalne jakosti C/N0 za več GNSS konstelacij	159
4.6	Zaključki poizkusa s simulacijami	161
5	Integracija in implementacija metodologije in izdelava priporočil nadaljnjega dela	162
5.1	Integracija in implementacija metodologije	163
5.1.1	Eksperimentalna postavitve	163
5.2	Model nevronske mreže GRU (angl. Gated Recurrent Unit)	164
5.2.1	Učenje nevronske mreže	166
5.2.2	Evalvacija učenja z nevronske mreže	166
5.2.3	Rezultati in komentar	167
5.2.4	Grafična predstavitev rezultatov	169
6	Zaključek	172
6.1	Izdelava priporočil nadaljnjega dela	172
	Viri in literatura	174
	Dodatek 1: Obrazec priprave na izmero	176
	Dodatek 2: Terenski obrazec izmere	177

KAZALO SLIK

Slika 1: Ranljivost tehnologije globalnih navigacijskih satelitskih sistemov.....	15
Slika 2: Omrežje NOAA (ang. <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>) [10].....	20
Slika 3: Omrežje SWEPOS s pregledom namestitve tipov sprejemnikov, kjer se izvaja sistematično zaznavanje motenj vsako uro.....	20
Slika 4: Primerjava razmerij moči motilnika proti močnostni gostoti šuma za testirane sprejemnike.....	22
Slika 5: Vertikalni profil motenj na lokaciji Stara Vrhnika. Zgornja kovinska konstrukcija ograje in drog za zastavo sta bila ozemljena, kar je izboljšalo prenos motenj do sicer za motnje zasenčenega vznožja stolpa.....	23
Slika 6: Primer uspešnega upasanja na CNR satelita z oznako G04.....	24
Slika 7: Signali GNSS so na poti od satelita do antene sprejemnika oslavljeni [28].....	25
Slika 8: Signal GPS L1/CA, toplotni šum in Gaussov šum [28].	26
Slika 9: Frekvenčni načrt signalov GNSS.....	26
Slika 10: Struktura sprejemnika GNSS.....	27
Slika 11: Razmerje med signalom (S) in šumom (N).....	29
Slika 12: Razmerje med signalom in šumom (SNR), in sicer: (a) brez upoštevanja notranjega šuma, (b) z upoštevanjem notranjega šuma [30].....	30
Slika 13: Razmejitev med časovnim in frekvenčnim prostorom (splošno).....	31
Slika 14: Poenostavljen blokovni načrt visokofrekvenčnega spektralnega analizatorja.....	32
Slika 15: Omrežje SIGNAL, ki ga dopolnjujejo izbrane stalne postaje omrežij sosednjih držav (italijanski FVG, avstrijski APOS, madžarski GNSSnet.hu in hrvaški CROPOS). Na sliki so izrisane tudi stalne postaje državnega omrežja 0. reda, do katerega uporabniki nimajo dostopa.	34
Slika 16: Sprejemniki, ki so v uporabi v omrežju SIGNAL; (a) Leica GR10, (b) Leica GR25, (c) Leica GR30, (d) Trimble NetR9, (e) Trimble Alloy.....	35
Slika 17: Izris odboja signalov iz programa Trimble Pivot Platform.....	36
Slika 18: Izpis vrednosti razmerij med jakostjo signala in šuma (Trimble Pivot Platform).	36
Slika 19: Izpis števila nenadnih skokov signalov za posamezen satelit (Trimble Pivot Platform).	37
Slika 20: Izpis kakovosti opazovanj v smislu uporabnosti pri končni določitvi položaja (Trimble Pivot Platform).	37
Slika 21: Možnost spremljanja spektra signalov GNSS na omrežjih SIGNAL in 0. red; rdeče: ni možnosti, rumeno: mogoče, vendar storitev trenutno ni vključena, zeleno: je mogoče.	38
Slika 22: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy brez uporabe sit.....	39
Slika 23: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy, način "Max hold".	39
Slika 24: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy, način "Filtered".	40
Slika 25: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy Spekter za celoten dan (Trimble Alloy).	40
Slika 26: Leicino orodje <i>Interference ToolBox</i> ; slika prikazuje spekter signalov GPS na območju L1 brez prisotnih motenj in brez uporabljenih sit.....	41
Slika 27: Leicino orodje <i>Interference ToolBox</i> ; signal. Uporabljeno sito (modro) za odstranitev motečih signalov nad 1580 MHz.....	42
Slika 28: Sito v sprejemnikih Javad Inc, J-Shield [33].....	43
Slika 29: Spektralni analizator v sprejemniku Javad Triumph-LS – grafična predstavitev.....	43
Slika 30: Spektralni analizator v sprejemniku Javad Triumph-LS – numerični izpis avtomatske kontrole ojačenja (AGC) signalov.....	44
Slika 31: Spremljanje vrednosti SNR v realnem času (sprejemnik Leica GS18T).	44
Slika 32: Spremljanje vrednosti SNR v realnem času (sprejemnik Trimble R12i).	45
Slika 33: Spremljanje spektra signalov GNSS v realnem času s sprejemnikom Trimble R12i.....	45
Slika 34: Spremljanje spektra signalov GNSS v realnem času s sprejemnikom ZED-F9P, program u-center.	46
Slika 35: Prilagodljiv sistem za zmanjšanje širokopasovnih motenj; možnost uporabe ali izključitve sit v sprejemnikih Septentrio.....	47

Slika 36: Spekter signalov na L1, ki ni obremenjen z motnjami. Prilagodljiv sistem za zmanjšanje širokopasovnih motenj; možnost uporabe ali izključitve sit – izris.....	47
Slika 37: Izbor signalov, kjer nas zanima spekter signalov.	47
Slika 38: Spekter signalov ob prisotnosti naprav v bližini letališč.	48
Slika 39: Spekter signalov ob prisotnosti motilnika s preletnim signalom (ang. <i>Chirp jammer</i>).	48
Slika 40: Obrazec planiranja izmere (a) in obrazec, ki ga bomo v celoti izpolnili po terenskem delu (b)....	50
Slika 41: Oznake makrolokacij, kjer bomo izvajali meritve motenj signalov GNSS, bomo naredili kar na karti, kjer so vidne lokacije stalnih postaj GNSS SIGNAL in 0. red.....	53
Slika 42: Primer prenosnega spektralnega analizatorja Rigol.	54
Slika 43: Prikaz trenutnih vrednosti signala motilnika z oznako Rušička na spektralnem analizatorju.	55
Slika 44: Prikaz trenutnih vrednosti signala motilnika z oznako Rušička na spektralnem analizatorju s spremenjeno centralno frekvenco, z večjo frekvenčno širino (span), s ovišano referenčno vrednostjo (Ref) in večjim slabljenjem (Att).	55
Slika 45: Pripomočki za meritev moči motilnika z oznako usb na področjih L1, L2 in L5: spektralni analizator, kabel in paličasta antena.	56
Slika 46: Vršne vrednosti signalov pri nastavitvi Max hold na frekvenčnih področjih GNSS (zgoraj) motilnika št. 1 (Rušička) na področju L1, (spodaj) motilnikov št. 2 (accu) in št. 3 (usb) na področjih L1, L2 in L5.....	56
Slika 47: (levo) V vozilu nameščen motilnik povzroča kinematične motnje mirujočim obcestnim sprejemnikom, (desno) Značilni presihi povprečij CNR vseh trenutno zaznanih satelitov, posneti z geodetskim sprejemnikom Javad Triumph LSA pod vplivom motenj na področju L1, ki jih je povzročal motilnik v mimovozečem vozilu.	57
Slika 48: Merilna postavitev GNSS-simulacije v laboratorijskem okolju.....	62
Slika 49: Fotografija testne merilne postavitve v laboratoriju.....	63
Slika 50: Deviacija položaja ob motenju z eno-frekvenčnim (CW) motilnikom - TESEO-LIV3R. Zgoraj: spremembe položaja proti severu, spodaj: spremembe položaja proti vzhodu.....	63
Slika 51: Deviacija položaja ob motenju z eno-frekvenčnim (CW) motilnikom - GP-01. Zgoraj: spremembe položaja proti severu, spodaj: spremembe položaja proti vzhodu.....	64
Slika 52: Stalna postaja na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, točka FGG3 ter dodatno izmera spektrov s sprejemnikom u-blox ZED-F9P.	67
Slika 53: FGG3, 27/04/2024, 07:15 UTC do 08:25 - spektralne meritve s Trimble Alloy na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.	68
Slika 54: FGG3, 28/04/2024, 06:28 UTC - 07:40 UTC - spektralne meritve s Trimble Alloy na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.	69
Slika 55: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz. Zgoraj: trenutek z manj motnjami (07:42:52 UTC), spodaj: prisotne motnje 08:10:19 UTC).	70
Slika 56: FGG3, 28/06/2024, 07:30 – 08:30 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij.	70
Slika 57: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami za skoke signalov (rdeče črtice); sprejemnik ZED-F9P.	71
Slika 58: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami za skoke signalov (rdeče črtice); sprejemnik Trimble R12i.....	71
Slika 59: FGG3, 28/06/2024. 07:25 do 08:40 UTC (na sliki lokalni čas); izris prekinjenih opazovanj GNSS (sprejemnik ZED-F9P).	72
Slika 60: FGG3, 28/06/2024. 07:25 do 08:40 UTC (na sliki lokalni čas); izris prekinjenih opazovanj GNSS (sprejemnik ZED-F9P).	73
Slika 61: Geodetska točka 180 Malija; (a) pogled proti severu; (b) pogled proti jugo-vzhodu.....	74
Slika 62: Terenski zapisnik izmere z dne 26/04/2024	75

Slika 63: Malija, 26/04/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.....	76
Slika 64: Malija, 26/04/2024 - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P. Levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz. Zgoraj: meritve v mirnem delu (06:29:38 UTC), spodaj: meritve v trenutku motenj (06:30:08 UTC).....	77
Slika 65: Malija, 09/05/2024 - spektralne meritve z u-blox NEO-F10N. Levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz. Zgoraj: meritve v mirnem delu (14:27:30 UTC), spodaj: meritve v trenutku motenj (15:35:30 UTC).....	78
Slika 66: Malija, 26/04/2024. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij (levo); signali satelitov GLONASS, ki so zelo obremenjeni s skoki.....	79
Slika 67: Malija, 26/04/2024 od 10:38 do 11:03 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami skokov signalov (rdeče črtice).....	79
Slika 68: Malija, 26/04/2024, od 10:38 do 11:03 UTC (na izrisu je označen lokalni čas); izris vidnih satelitov vseh konstelacij – vidne so prekinitve signalov, ki sovpadajo s skoki signalov na prejšnji sliki (Slika 67).....	80
Slika 69: Malija 26/04/2024, izvedba preizkusa sprejemnikov po standardu ISO17123-8.	81
Slika 70: Livade, 26/04/2024.....	82
Slika 71: Terenski zapisnik izmere Livade, 26/04/2024.	82
Slika 72: Livade, 26/04/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.....	83
Slika 73: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz.	84
Slika 74: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC. Levo: izris tirnic vseh satelitov z oznakami skokov signala (rdeča črtica); desno: izris tirnic satelitov Galileo.	85
Slika 75: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami skokov signala (rdeča črtica).	85
Slika 76: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij – vidne so prekinitve signalov, ki sovpadajo s skoki signalov na prejšnji sliki.....	86
Slika 77: Terenski zapisnik izmere Livade, 26/04/2024. Uporabljeni sprejemnik je ZED F9P, u-blox.	87
Slika 78: Livade, 29/04/2024, 11:30 do 12:00 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P (L1 in L5); levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz.	87
Slika 79: Terenski zapisnik izmere Livade, 30/04/2024. Uporabljeni sprejemnik je ZED F9P, u-blox.	88
Slika 80: Livade, 29/04/2024, 11:59:30 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz.	88
Slika 81: Pasja ravan, 5/11/2024.....	89
Slika 82: Pasja ravn, 05/11/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.....	90
Slika 83: Črnotiče, 15/05/2015: izmera z geodetskimi sprejemniki (spreda) z namernimi motnjami signalov.....	91
Slika 84: Črnotiče, 15/05/2015: terenski zapisnik.....	91
Slika 85: Črnotiče, 15/05/2024, , 09:57:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Rušička.	92
Slika 86: Črnotiče, 15/05/2024, 09:57:00 - spektralne meritve (Max Hold) s sprejemnikom Trimble R12i pred motenjem z motilnikom Rušička (zgoraj) ter v času motenja z motilnikom Rušička (spodaj).	93
Slika 87: Sprejemnik u-blox ZED-F9P (L1, L2). Spekter GNSS na frekvenci L1 (levo) in L2 (desno), motilnik Rušička; (a) pred motnjami, 07:55:00 UTC, (b) med motnjami; 07:57:10.....	94
Slika 88: Sprejemnik u-blox ZED-F9P (L1, L5). Spekter GNSS na frekvenci L1 (levo) in L5 (desno), motilnik Rušička; (a) pred motnjami, 07:55:00 UTC, (b) med motnjami; 2024/05/15, 09:57:00 94	

Slika 89: Spekter GNSS na frekvenci L1, brez filtra, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 07:59:59	95
Slika 90: Spekter GNSS na frekvenci L1, Max Hold, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 08:00:00	95
Slika 91: Črnotiče, 15/05/2024: vidni satelit v času motnje z motilnikom Keysight N5182B.....	95
Slika 92: Črnotiče, 15/05/2024, 11:25:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Keysight.....	96
Slika 93: Spekter GNSS na območju okoli L1 (levo) in na območju L2 (desno), motilnik Keysight; (a) pred motnjami 08:50:51 UTC, (b) med motnjami; 2024/05/15, 08:55:00 UTC.....	97
Slika 94: Spekter GNSS na frekvenci L1 (levo) in L5 (desno), motilnik Keysight; (a) pred motnjami 08:50:51 UTC, (b) med motnjami; 2024/05/15, 08:55:00 UTC	97
Slika 95: Izris vrednosti SNR (zgoraj), odboja signala (sredina) in višinskega kota (spodaj) za izbrane satelite v času motenj	98
Slika 96: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS L1	99
Slika 97: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	99
Slika 98: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	100
Slika 99: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1	100
Slika 100: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2.....	101
Slika 101: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	101
Slika 102: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b.	102
Slika 103: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2.	102
Slika 104: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji GPS.....	104
Slika 105: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji GPS, podlaga Google Earth.....	104
Slika 106: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, GLONASS	105
Slika 107: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, GLONASS, podlaga Google Earth	105
Slika 108: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, Galileo	106
Slika 109: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, Galileo, podlaga Google Earth	106
Slika 110: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, BeiDou.....	107
Slika 111: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, BeiDou, podlaga Google Earth.....	107
Slika 112: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, vse konstelacije	108
Slika 113: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, vsi sistemi (GPS+GLN+GAL+BDS), podlaga Google Zemlja.....	108
Slika 114: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1	110
Slika 115: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	110
Slika 116: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	111
Slika 117: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2	111

Slika 118: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	112
Slika 119: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b	112
Slika 120: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5	113
Slika 121: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a.....	113
Slika 122: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS.....	115
Slika 123: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS, podlaga Google Earth.....	115
Slika 124: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GLONASS	116
Slika 125: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GLONASS , podlaga Google Eath.....	116
Slika 126: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, Galileo.....	117
Slika 127: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, Galileo, podlaga Google Earth.....	117
Slika 128: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS + GLONASS + Galileo	118
Slika 129: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS + GLONASS + Galileo, podlaga Google Earth.....	118
Slika 130: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1	120
Slika 131: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	120
Slika 132: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	121
Slika 133: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1	121
Slika 134: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2.....	122
Slika 135: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	122
Slika 136: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b	123
Slika 137: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2.....	123
Slika 138: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5.....	124
Slika 139: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a.....	124
Slika 140: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a.....	125
Slika 141: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, GPS.....	126
Slika 142: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, GPS. Podlaga Google Earth.....	126
Slika 143: Črnotiče, 15/05/2024 Leica GS18T, SPP-položaji, GLONASS.....	127
Slika 144: Črnotiče, 15/05/2024 Leica GS18T, SPP-položaji, GLONASS, podlaga Google Earth.....	127
Slika 145: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, Galileo.....	128
Slika 146: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, Galileo, podlaga Google Earth.....	128
Slika 147: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, BeiDou	129
Slika 148: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, BeiDou, podlaga Google Earth.....	129
Slika 149: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, vse konstelacije	130

Slika 150: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, vse konstelacije, podlaga Google Earth	130
Slika 151: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1	132
Slika 152: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	132
Slika 153: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	133
Slika 154: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B1	133
Slika 155: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2	134
Slika 156: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	134
Slika 157: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b	135
Slika 158: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2	135
Slika 159: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5	136
Slika 160: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a	136
Slika 161: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a	137
Slika 162: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2b	137
Slika 163: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B3	138
Slika 164: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, GPS	139
Slika 165: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, GPS, podlaga Google Earth	139
Slika 166: Črnotiče, 15/05/2024 Trimble R12i, SPP-položaji, GLONASS	140
Slika 167: Črnotiče, 15/05/2024 Trimble R12i, SPP-položaji, GLONASS, podlaga Google Earth	140
Slika 168: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, Galileo	141
Slika 169: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, Galileo, podlga Google Earth	141
Slika 170: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, BeiDou	142
Slika 171: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, BeiDou, podlaga Google Earth	142
Slika 172: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, vse konstelacije	143
Slika 173: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, vse konstelacije, podlaga Google Earth	143
Slika 174: Prikaz različnih metrik za detekcijo prisotnosti motenj GNSS signalov	146
Slika 175: Merilna postavitev	149
Slika 176: Razmerje C/N_0 za satelite sistema BeiDou pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji FM z močjo -60 dBm	152
Slika 177: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji FM z močjo -60 dBm	152
Slika 178: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in CW motnji z močjo -60 dBm	153
Slika 179: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in fr. skakanja motnji z močjo -70 dBm	153

Slika 180: Razmerje C/N_0 za satelite sistema GPS pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in fr. skakanja motnji z močjo -70 dBm.	154
Slika 181: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji CW z močjo -55 dBm.	154
Slika 182: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji CW z močjo -80 dBm.	155
Slika 183: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti FM motnje z močjo -55 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.	156
Slika 184: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti FM motnje z močjo -65 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.	156
Slika 185: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti FM motnje z močjo -85 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.	157
Slika 186: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti motnje CW z močjo -70 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.	158
Slika 187: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti motnje s fr. skakanjem z močjo -70 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.	158
Slika 188: Vrednosti C/N_0 treh sistemov GNSS ob prisotnosti motnje FM z močjo -55 dBm pri simuliranih signalih GNSS moči -130 dBm.	159
Slika 189: Vrednosti C/N_0 treh sistemov GNSS ob prisotnosti motnje FM z močjo -80 dBm pri simuliranih signalih GNSS moči -130 dBm.	160
Slika 190: Merilna postavitev.	163
Slika 191: Model GRU, vir: By Jeblad - Own work, CC BY-SA https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=66225938	4.0, 165
Slika 192: Uspešna napoved motnje z modelom GRU	169
Slika 193: Zaznava začetka in konca dolgotrajne motnje CW	169
Slika 194: Kratka 2-sekundna motnja, ki je model ne zazna kot motnjo	170
Slika 195: Lažno pozitivna zaznava brez dejanske prisotnosti motnje	170
Slika 196: Primer neuspešne zaznave šibke pulzirajoče motnje	171

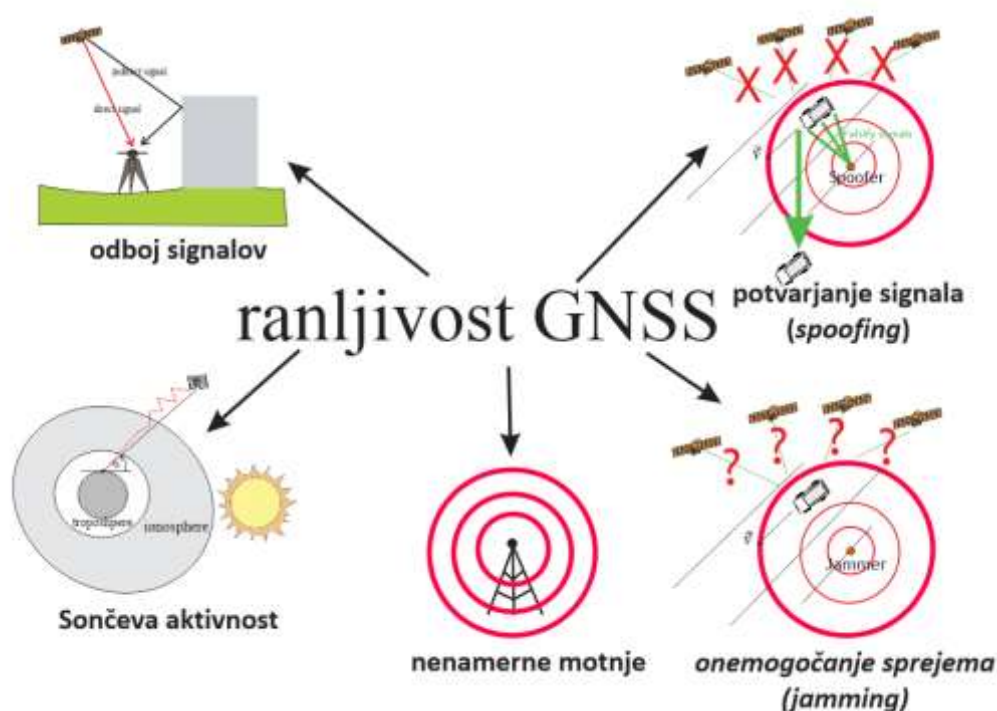
KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Stalne postaje omrežij SIGNAL in 0. red, tip sprejemnikov, ki je nameščen na stalni postaji in zabeležka možnosti spremljanja spektrov signalov na posamezni postaji	35
Preglednica 2: Lastnosti prikaza motenj na posameznih frekvencah [32]	41
Preglednica 3: Arhiviranje opazovanj - Poimenovanje datotek RINEX	52
Preglednica 4: Dopolnitev zapisa za arhiviranje sprejetega spektra radijskih spektralnih analizatorjev ..	54
Preglednica 5: Seznam motilnikov, s katerimi bodo (so) izvedene motnje	60
Preglednica 6: Seznam sprejemnikov GNSS, ki bodo vključeni v raziskavo namernih motenj	61
Preglednica 7: Lokacije meritev spektrov signalov in meritev s sprejemniki GNSS, ki so jih predlagali sodelavci z GURS-a. Sivo: ni bilo meritev.	66
Preglednica 8: Časi motenja	92
Preglednica 9: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami	103
Preglednica 10: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	109
Preglednica 11: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami	114
Preglednica 12: Črnotiče, 15/05/2024,, Leica GS15. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	119
Preglednica 13: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami	125
Preglednica 14: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	131
Preglednica 15: Trimble R12i. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami	138
Preglednica 16: Trimble R12i. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	144
Preglednica 17: Zaznava motnje z nevronske mrežo v odvisnosti od tipa motnje.	167
Preglednica 18: Skupna uspešnost učenja z nevronske mrežo in lažni alarmi	168
Preglednica 19: Zaznava motnje glede na moč	168

A. Uvod

Osnovni namen ciljnega raziskovalnega projekta V2-2342: *Care4SIGNAL: Ocena tveganja motenj signalov GNSS v državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL* je preučiti težave delovanja globalnih navigacijskih satelitskih sistemov (ang. *Global Navigation Satellite Systems* – GNSS) zaradi prisotnosti naravnih ali umetnih motenj, ki lahko povzročijo netočnost določitve položaja in sinhronizacije časa ali v nekaterih primerih sploh onemogočijo storitve. Cilj projekta je pridobiti informacije in vzpostaviti koncepte, da se na takšne dogodke ustrezno pripravimo.

Grožnje za GNSS ter s tem povezana ranljivost tehnologije, kot so povečana Sončeva aktivnost, ki jo doživljamo približno vsakih enajst let (25. sončni cikel se je začel decembra 2019, torej se približujemo njegovemu največjemu delovanju) ter elektromagnetne motnje iz zemeljskih virov in napadi z motenjem ter s ponarejanjem signalov (Slika 1), so pogosto skrite in jih je težko takoj odkriti. Motenja lahko predstavljajo veliko grožnjo za delovanje kritične infrastrukture in nanjo vezane storitve. Težava pri odkrivanju motenj signalov GNSS je njihova skrita narava, saj se pojavijo nenadoma ter z neznanih lokacij in ostanejo neopažene, dokler ne pride do težav uporabe storitev. Ponarejanje vsebine signalov GNSS lahko privede do neustrezne navigacije ali določitve geoprostorskih podatkov, in posledično lahko ogrozijo varnost posameznikov in lahko povzročijo tudi materialno škodo. V današnjem zelo nemirnem svetu so namerni napadi na signale GNSS pogosti, nenadni in nepredvidljivi. Že leta 2019 izdelana študija ekonomskega vpliva globalnega sistema pozicioniranja (ang. *Global Positioning System* – GPS) je pokazala, da bi v enem dnevu nedelovanja sistema samo v ZDA nastala ekonomska škoda milijarde dolarjev, enomesečno nedelovanje pa celo 45 milijard dolarjev škode [1]. Pet let po izdelani študiji so številke povzročene škode zaradi nedelovanja satelitskih navigacijskih sistemov lahko precej večje, saj je vedno več storitev odvisnih od GNSS.



Slika 1: Ranljivost tehnologije globalnih navigacijskih satelitskih sistemov.

Trenutno se motenje v smislu onemogočanja sprejema signalov GNSS (ang. *jamming*) in izkrivljanja signalov (ang. *spoofing*) uporabljata kot učinkovita metoda elektronskega vojskovanja visoke intenzivnosti v Severni Koreji, na Bližnjem vzhodu, zlasti na konfliktnih območjih, v Črnem morju, Kaliningradu in tudi v vzhodni Evropi, vse do nemške meje (glej dnevne podatke na <https://gpsjam.org/>), zlasti pa na vojnih območjih v Ukrajini. Motenje signalov GNSS manjšega obsega je prisotno po vsem svetu. Zavedati se je treba, da vse dejavnosti, povezane z motenjem, vplivajo tako na vojaško kot tudi civilno uporabo tehnologije GNSS, zato je zagotavljanje varnega delovanja storitev, ki temeljijo na GNSS, zelo pomembno.

Tehnološki razvoj globalnih satelitskih navigacijskih sistemov, uvedba novih signalov in napredek v izdelavi sprejemnikov, ki omogočajo sočasno sprejemanje signalov več globalnih satelitskih sistemov (GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou) na več frekvencah, vodi v smer kakovostnega pozicioniranja, navigacije in prenosa časa, ne podaja pa podrobnejše ocene z vplivi obremenjenih opazovanj. Vedno več satelitov na obzorju sicer predstavlja prednost, vendar pa se moramo ob tem zavedati tudi prisotnosti naprav, ki preko slabljenja ali potvarjanja signalov lahko onemogočijo ali ponaredijo z GNSS določen položaj in čas. Na Zemlji sprejeti signali GNSS so zaradi oddaljenosti satelitov in posledično nizkih jakosti zlahka ranljivi. Problematično pozicioniranje se nanaša tako na težave delovanja sistemov kot celote. Sem sodijo različne okvare, premik ure ali napake v tirnici, kot je izpad sistema Galileo julija 2019 [2]. Na pozicioniranje vplivajo tudi atmosferske razmere in fizične ovire, kot so stavbe, drevesa in druge značilnosti terena, ki povzročijo oslabitev, popolno izgubo signalov ali odboj signalov (večpotje), ter namerno motenje signalov. Trenutno poznamo več metod zmanjšanja ranljivosti signalov, kot so prostorsko in frekvenčno filtriranje signalov, uporabo redundantnih sistemov in preverjanje pristnosti signalov.

16

Za kakovostno pozicioniranje in prenos časa z GNSS so zelo pomembni dobri pogoji izmere oziroma zmožnost sprejemnikov, da prepoznajo z motnjami obremenjene signale. Večina raziskav v preteklosti je bila usmerjena v proučevanje kakovosti signalov ter obdelave opazovanj v oteženih pogojih izmere zaradi fizičnih ovir ali odboja signalov od ovir ter posledičnega več-žarkovnega razširjanja (ang. *multipath*). Naprave za namerne motnje so bile pretežno vojaška domena. Danes se je v vsesplošni uporabi tehnologije GNSS treba zavedati, da je satelitske signale preprosto motiti ali potvoriti do tolikšne mere, da storitev GNSS ni mogoča ali pa je njena zanesljivost vprašljiva. Pri tem je pomembno, da poznamo odziv delovanja sprejemnikov različnih proizvajalcev ter generacij v oteženih pogojih, saj se ti na namerne motnje odzivajo različno.

S spremljanjem kakovosti signala (ang. *Signal Quality Monitoring – SQM*) lahko v sprejemniku GNSS odkrijemo problematične ali lažne/potvorjene satelitske signale, ki drastično vplivajo na zanesljivost določitve položaja in prenosa časa. Večina geodetskih sprejemnikov za opredelitev kakovosti signala temelji na spremljanju določenih veličin, kot so preverjanje navzkrižne korelacije ter razmerja med signalom in šumom, zaznavanju nenadnih skokov v jakosti signala ter modeliranju razlik kodnih in faznih opazovanj. Nekatere vplive je mogoče uspešno zaznati in izločiti že v sprejemniku [3,4], medtem ko je ostale treba odstraniti v nadaljnji obdelavi opazovanj. Predvsem v kinematični določitvi položaja v realnem času je težava večja, saj v izračun položaja vključimo vsa razpoložljiva opazovanja, ne da bi predhodno naredili podrobno analizo njihove kakovosti. Težava izhaja iz hitrih in nepredvidenih okoliščin sprejema signalov, kjer težko razločimo izvor posameznih vplivov. Opazovanja nizke kakovosti lahko odkrijemo in izločimo v

naknadni obdelavi zajetih signalov z linearnimi kombinacijami opazovanj različnih tipov in frekvenc, ki so osnova za razlikovanje med geometrijskimi in atmosferskimi vplivi kot tudi motečimi dejavniki, ki imajo izvor v okolici sprejema signala. Pri tem je zelo pomembno, da vseskozi spremljamo moč sprejetega signala (opisano z razmerjem signala in šuma), ki služi za hitro odkrivanje motenj in nakazuje na prisotnost motilnikov (ang. *jammer*) ali ponarejevalnikov (ang. *spoofers*) signalov.

Cilj projekta je razviti konceptualni model in implementirati metode za zaznavanje motenj v slovenskem omrežju stalnih postaj GNSS, SIGNAL. Namen je opozoriti uporabnike na težave v kritičnih situacijah ter dodatno zaščititi delovanje kritične infrastrukture in njenih uporabnikov. Zaradi resnosti motenj signalov GNSS je ključnega pomena razviti učinkovite mehanizme za prepoznavanje in odkrivanje teh motenj. Za spopadanje s temi izzivi je treba razviti pristope za zaznavanje motenj ter dodatno preveriti kakovost pozicioniranja med motnjami.

Naloge projekta so organizirane v petih delovnih sklopih (DS), kjer prvi štirje sledijo vsebinskim ciljem predlaganega projekta, peti (DS5) pa je namenjen diseminaciji, in sicer:

- **Delovni sklop 1 (DS1):** Analiza in ocena ranljivosti geodetskih sprejemnikov ter uporabnikov tehnologije GNSS na različne namerno povzročene motnje signalov GNSS.
- **Delovni sklop 2 (DS2):** Razvoj metodologije ugotavljanja motenj in nadzora kakovosti opazovanj GNSS.
- **Delovni sklop 3 (DS3):** Testiranje predlagane metodologije nadzora kakovosti meritev v omrežju SIGNAL in na strani uporabnikov GNSS.
- **Delovni sklop 4 (DS4):** Integracija in implementacija metodologije in izdelava priporočil nadaljnjega dela.
- **Delovni sklop 5 (DS5):** Koordinacija in diseminacija.

17

V okviru ciljnega raziskovalnega projekta izvajamo temeljito analizo vpliva motenj na sprejemnike GNSS različnih kakovosti ter na celotno omrežje SIGNAL. Razreševanje problematike ni pomembno le za območje Slovenije, ampak tudi za širšo mednarodno javnost, saj še niso znane splošne rešitve problema.

Predstavitev projekta in rezultatov je na spletni strani projekta <https://www.fgg.uni-lj.si/raziskovalna-dejavnost/projekti/v2-2342-care4signal/>

Do sedaj objavljeni rezultati dela:

- predstavitev na 26. seminarju Radijske komunikacije 2024: Vidmar, M.: Zgodovina GPS, History of GPS, 31. 1. 2024 do 2. 2. 2024, <https://srk.fe.uni-lj.si/zborniki/ZBORNIK%SOSRK2024.pdf>
- predstavitev na 26. seminarju Radijske komunikacije 2024: Pavlovčič Prešeren, P. Motnje signalov GNSS v državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL, *GNSS interference in the national continuously operating reference station network SIGNAL*, 31. 1. 2024 do 2. 2. 2024, <https://srk.fe.uni-lj.si/zborniki/ZBORNIK%SOSRK2024.pdf>
- predstavitev na 26. seminarju Radijske komunikacije 2024: Blatnik, A. Sodobni globalni navigacijski sistemi, 31. 1. 2024 do 2. 2. 2024, <https://srk.fe.uni-lj.si/zborniki/ZBORNIK%SOSRK2024.pdf>

- predstavitev na srečanju Dan pozicioniranja, navigacije i točnog vremena 2024 v Zagrebu: Dimc, F., Bažec, M., Pavlovčič Prešeren, P., Blatnik, A. *Observed Noise within the GNSS Spectrum at Stations in the Koper Region*, 22. 5. 2024,
- znanstveni članek v mednarodni reviji: Blatnik, A., Batagelj, B. Evaluating GNSS receiver resilience: a study on simulation environment repeatability. *Electronics*. May-1 2025, vol. 14, iss. 9, [article no.] 1797, 20 str., ilustr. ISSN 2079-9292. <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/9/1797>, DOI: [10.3390/electronics14091797](https://doi.org/10.3390/electronics14091797),
- znanstveni prispevek na konferenci: Dolinšek, S., Pavlovčič Prešeren, P., Blatnik, A., Batagelj, B. Automated Characterization of Jamming Effects on Low-cost GNSS Receiver Performance. 17th Baška GNSS Conference, Global Navigation Satellite Systems and Green Navigation and Smart Systems, 11–15 May 2025, Baška, Croatia: https://cdn.ymaws.com/rin.org.uk/resource/resmgr/baskamicrosite/2025materials/Baska_Conference_Prog_9May25.pdf

Izobraževalne delavnice v okviru projekta

- **Izobraževanje za uslužbence Urada za geodezijo, Geodetska uprava Republike Slovenije**
Gotenica, 14/02/2024
- **Izobraževanje za člane IZS, Matična sekcija geodezija**
Ljubljana, 29/01/2025, 07/02/2025
Ljubljana, september 03/09/2025, 10/09/2025
- **Izobraževanje za člane IZS, Matična sekcija elektrotehnika**
Ljubljana, 17/06/2024,
Ljubljana, 10/06/2025
- **Izobraževanje za uslužbence Luke Koper**
Koper, 25/11/2024

Magistrska naloga

Maja Filač: Ocena vpliva motenj na kakovost GNSS-signalov in uspešnost pozicioniranja. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, september 2025. <https://repozitorij.uni-lj.si/Iskanje.php?type=napredno&lang=slv&stl0=Avtor&niz0=Maja+Fila%C4%8D>

B. Pregled dosedanjih raziskav

Prisotnost motenj signalov (najprej GPS in kasneje vseh GNSS) v meritvah in določanju položaja je znano dejstvo, ki so se ga zavedali že v preteklosti. Ravno zato proizvajalci vseskozi razvijajo boljše sprejemnike, ki so čedalje bolj odporni proti motenju. Sprva so bile motnje nenamerne, trenutno pa so čedalje bolj izrazite namerne motnje. V evropskem raziskovalnem projektu STRIKE3 so sistematično zbirali prijavljene motnje signalov GNSS (bilo jih je več kot 500.000), od katerih je bilo namerno povzročenih kar 10 % [5].

Kljub zavedanju o možni prisotnosti motenj v okolici sprejemnikov stalnih postaj GNSS se predhodnih obsežnejših študij, ki bi bile vezane na proučevanje prisotnosti motenj signalov, pred vzpostavitvijo stalnih postaj ne izvaja. O motnjah na stalnih postajah se trenutno začne razmišljati šele, ko je delovanje že postavljene stalne postaje problematično. Tudi v nedavnih objavah, vezanih na postavitev stalnih postaj GNSS, se avtorji podrobneje ne sprašujejo o prisotnosti motenj signalov, ampak se optimalni kakovostni indeks stalne postaje (ang. *Continuously Operating Reference station Quality index* - CSQI) določa primarno na osnovi [6]:

- a. izgube signala zaradi ovir sprejema v okolici stalne postaje,
- b. slabše vidnosti satelitov zaradi nezmožnosti sprejema signala zaradi topografije terena in vegetacije ter
- c. prisotnosti odbojev signalov v okolici stalne postaje (npr. študije omrežja SAPOS v Nemčiji [7] ter omrežij v Hong Kongu, Kanadi in ZDA [8]).

Čedalje večja pojavnost motenj signalov pa je vseeno pripeljala do zavedanja, da je motnje treba spremljati v realnem času in če je le mogoče identificirati njihov izvor. Tako so indonezijski raziskovalci v letu 2019 predlagali in podrobno opisali metodologijo izbora optimalne lokacije stalne postaje pred njeno postavitvijo [9]. V študiji so poleg drugih dejavnikov proučevali tudi postavko minimalne prisotnosti motenj, ki so jo najprej opredelili s simulacijo sevalnega vzorca potencialnega vira motenj in ga nadalje preverili s praktičnimi terenskimi meritvami.

B 1. Pregled možnosti zaznavanja motenj v stalno delujočih omrežjih postaj GNSS

Ob raziskovanju motenj signalov GNSS v omrežjih stalnih postaj se je porodila ideja, da bi lahko obstoječa omrežja stalnih postaj GNSS uporabljali tudi za zaznavanje različnih motenj na območju, ki ga omrežja pokrivajo. V odvisnosti od jakosti motenj so informacije omejene na ožjo oziroma širšo okolico stalne postaje. Zamisel so že leta 2010 predstavili v poročilu ameriške Nacionalne službe za geodezijo (ang. *National Geodetic Survey* – NGS), kjer so v takratnem omrežju 1400 stalnih postaj (Slika 2) sistematično skušali lokalizirati motnje signalov posredno iz obdelave opazovanj (tj. iz faznih opazovanj v datotekah RINEX) [10]. Z raziskavo so pokazali, da je z obdelavo krajših opazovanj (npr. enournih) dokaj enostavno ugotoviti prisotnost motenj; časovni zamik med pridobitvijo opazovanj in ugotavljanjem prisotnosti motenj je bil okoli ene ure.

V letu 2011 je Rubinov s sod. [11] objavil študijo spremljanja integritete omrežja stalnih TrigNet v Južni Afriki. Med pomembnejše dejavnike spremljanja kakovosti delovanja omrežja je vključil vse (nenamerne in namerne) motnje signalov. Za osnovo je privzel metodologijo, ki jo je leto pred

tem predstavil Weston [12], in je temeljila na obdelavi enournih RINEX-datotek ter nadaljnji primerjavi rezultatov pridobljenih koordinat z znanimi (uradno objavljenimi).



Slika 2: Omrežje NOAA (ang. *National Oceanic and Atmospheric Administration*) [10].

V letu 2014 so v Avstraliji izdelali priporočila in normative, ki naj bi jim posamezna stalna postaja (tako državna kot privatna) morala zadostiti [13]. V dokumentu so opozorili na previdnost glede pojava motenj, vendar podrobnejšega metodološkega pristopa delovanja stalne postaje za zaznavo motenj niso predstavili.

20

Najbolj aktualna objava, vezana na tematiko tega projekta, pa je iz leta 2021 [14]. Opisuje, kako v švedskem omrežju stalnih postaj GNSS SWEPOS (Slika 3) izvajajo neprekinjeno proučevanje motenj na osnovi podatkov iz enournih datotek RINEX. V prispevku so avtorji podrobno opisali metodologijo kontinuiranega izvajanja zaznavanja motenj v signalih GNSS na osnovi urnih in dnevnih opazovanj GNSS, shranjenih v datotekah RINEX, in sicer ločeno za posamezno stalno postajo omrežja.



Slika 3: Omrežje SWEPOS s pregledom namestitve tipov sprejemnikov, kjer se izvaja sistematično zaznavanje motenj vsako uro.

V omrežju SWEPOS so zaznavanje motenj avtomatizirali do take mere, da lahko analizirajo razmerje med signalom in šumom (SNR) v vseh frekvenčnih pasovih globalnih satelitskih navigacijskih sistemov (GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou). Gre za spremljanje vrednosti SNR vseh vidnih satelitov v realnem času, ki jih nato primerjajo s predvidenimi vrednostmi. Predvidene vrednosti SNR določijo posebej za vsako stojišče (postajo) na osnovi časovne vrste preteklih meritev, in sicer za vsak satelit ter ločeno za posamezno frekvenčno območje. V izračunu predvidene vrednosti SNR upoštevajo tudi odvisnost vrednosti od višinskega kota satelita (elevacije) [15]. Informacije o odkritih odstopanjih oz. motnjah posredujejo nacionalni službi za spremljanje motenj *Swedish Post and Telecom Authority*, da določi nadaljnjo opredelitev lastnosti motenj in jih po možnosti skuša geolocirati. Na nekaterih postajah imajo nameščene tudi sprejemnike Trimble Alloy ter Trimble NetR9, ki sicer omogočajo spektralno analizo, vendar te možnosti ne izrabljajo. Glavna metrika določanja prisotnosti motenj je razmerje med signalom in šumom (SNR).

B 2. Pregled raziskav ocene kakovosti delovanja slovenskega državnega omrežja SIGNAL

V slovenskem državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL sta bili do sedaj narejeni dve študiji, in sicer:

- a) v letih 2018 in 2019 študija z naslovom »Povečanje zanesljivosti javnih omrežij GNSS SIGNAL in 0. red« (V2-1729) in
- b) v letih 2019 in 2020 študija z naslovom »Razvoj metodologije sistema in verifikacije referenčnih omrežij in postaj GNSS« (V2-1944).

21

V prvi študiji (V2-1729) smo na podlagi pridobljenih izkušenj oblikovali metodologijo za posodobitev in izboljšanje veljavnih postopkov za celostno upravljanje omrežij SIGNAL ter 0. red, s poudarkom na povečanju zanesljivosti in boljšim nadzorom kakovosti njenega delovanja. Izsledki raziskave so bili predstavljeni na mednarodni konferenci EUREF 2019 v Talinu [16] in v domači reviji Geodetski vestnik [17]. V dani raziskavi smo opredelili možne razloge za nedostopnost omrežja oziroma motnje v njegovem delovanju, ki so bili vezani na:

- težave v samem delovanju omrežja SIGNAL (npr. težave na področju strojne in programske opreme, težave na področju kakovosti različnih produktov omrežja),
- težave individualnih uporabnikov omrežja SIGNAL (npr. težave pri povezavi z omrežjem, neustrezne nastavitve instrumenta GNSS),
- težave, ki niso bile neposredno povezane z omrežjem SIGNAL (npr. napačno izvajanje izmere GNSS, napake v postopku naknadne obdelave opazovanj, nepravilno delovanje instrumenta GNSS), kjer uporabniki omrežja najprej pomislijo na napako omrežja ter
- težave v samem delovanju omrežja 0. reda (npr. težave na področju strojne in programske opreme, težave na področju kakovosti produktov).

Študija ni vsebovala podrobnejše analize motenj signalov GNSS na stalnih postajah.

V drugem projektu, ki je imel naslov »Razvoj metodologije sistema in verifikacije referenčnih omrežij in postaj GNSS -V2-1944«, smo proučevali smernice in metode vzpostavitve ter vzdrževanja privatnih stalno delujočih postaj, ki niso sestavni del državnega omrežja postaj. Omejili smo se na določitev njihovih koordinat v ustreznem koordinatnem sistemu ter načine in

kakovost distribucije podatkov ter produktov GNSS. Na osnovi različnih študij, narejenih doma in v tujini, smo zasnovali metodologijo za vzpostavitev stalno delujočih postaj, kjer smo podrobneje opredelili:

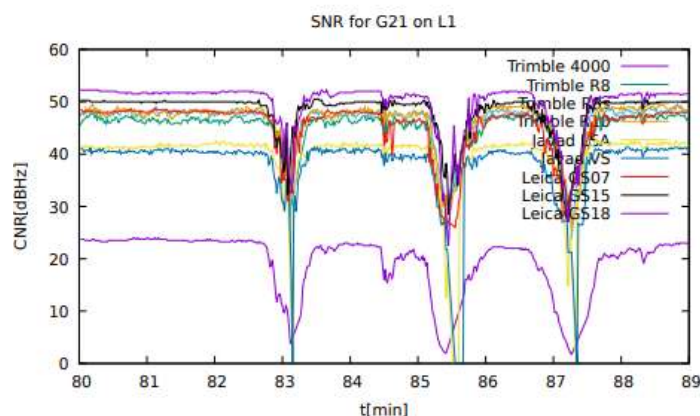
- izbor lokacije postaje in vpliv okolice na opazovanja GNSS skozi daljše časovno obdobje (brez upoštevanja motenj signalov),
- opremo na postajah, ki mora biti kakovostna, da lahko zagotovi neprestano delovanje in opazovanj GNSS,
- koordinate postaje, ki predstavljajo izhodišče za določitev položaja novih točk, in morajo biti določene v državnem koordinatnem sistemu z visoko kakovostjo ter skozi daljše časovno obdobje tudi ustrezno preverjene in
- postopke distribucije podatkov postaje, preko katerih se določa položaj novih točk v državnem koordinatnem sistemu.

Tudi ta študija ni vključevala podrobnejše analize motenj signalov GNSS.

B 3. Pregled raziskav ocene kakovosti geodetskih sprejemnikov GNSS ob namernih motnjah GNSS

Predhodno je skupina raziskovalcev, vključenih v projekt, že testirala odziv geodetskih sprejemnikov na namerno motenje z motilnikom preletnega signala L1 [18–20]. Praktični preizkusi so bili zasnovani tako za statični kot kinematični princip določitve položajev med namerno povzročenimi motnjami z motilnikom, ki smo ga uporabili na različnih oddaljenostih od sprejemnikov (od 10 m do 160 m). Vse meritve so potekale v soglasju z Agencijo za komunikacijska omrežja in storitve RS (AKOS).

V poizkusu smo na testnem polju blizu Črnotič v letu 2019 testirali devet geodetskih sprejemnikov različnih proizvajalcev (Trimble Inc. (Sunnyvale, CA, ZDA), Javad GNSS Inc. (San Jose, CA, ZDA), Leica Geosystems AG (Heerbrugg, Švica)) in generacij, in sicer: Trimble 4000 SSi, Trimble R8, Trimble R8S, Trimble R10, Javad Triumph-VS, Javad Triumph-LSA, Leica GS07, Leica GS15 in Leica GS18 [18]. Iz opazovanj posameznega sprejemnika (*.yyO datoteke RINEX) smo najprej ugotavljali spremembo vrednosti SNR, ki smo jih pretvorili v veličino CNR (ang. *Carrier-to-Noise Ratio*). Vrednosti smo proučevali posebej za vsak sprejemnik, satelit in izbrano frekvenčno območje opazovanj GNSS (Slika 4).



Slika 4: Primerjava razmerij moči motilnika proti močnostni gostoti šuma za testirane sprejemnike.

V prispevku smo pokazali, da lahko s kontinuiranim spremljanjem vrednosti CNR hitro in enostavno sklepamo na prisotnost namernih motenj ali ostalih vplivov na opazovanja (odboj oz. večpotje), predvsem ko sprejemnik GNSS deluje v statičnem načinu.

V nadaljevanju smo ugotavljali, kolikšen vpliv ima motenje signalov v odvisnosti o višinske lokacije postavitve motilnika glede na sprejemnike GNSS [19]. V eksperimentu smo geodetske sprejemnike namestili pod in na vrhu dvajsetmetrskega lesenega stolpa v okolici Stare Vrhlike (Slika 5). Predvidevali smo, da na vrhu stolpa zaradi sevalnega vzorca anten sprejemnikov ne bo večjega vpliva motenj. Z motilnikom smo se pomikali po stolpu, se vsakih nekaj metrov ustavili in sprožili nekajminutne motnje. V poizkusu se je nenamerno zgodilo, da je ozemljitvena prevodna struktura stolpa z nizko impedanco očitno prenašala sprejete signale od motilnika kot površinske elektromagnetne valove, ki so delovali kot motnje in povzročili s sprejemnikom zaznavne napake, ki so se pojavile ob vklopu motilnika in so imele rahel vpliv tudi na sprejemnike, ki so bili nameščeni nad motilnikom. V primeru sprejemnikov, ki so bili nameščeni na stolpu, smo tako nepričakovano zaznali šibke motnje, ko je bil motilnik pod nivojem sprejemnikov. To se je odražalo v slabši kakovosti relativne določitve položaja s fazo (rešitev »float«, tj. algoritem je fazne neznanke določil le v definicijskem območju realnih in ne celih števil). Sprejemniki pod stolpom so bili zaradi motenj pričakovano veliko bolj prizadeti, večinoma kar z izgubo zmožnosti sprejema signalov GNSS.



Slika 5: Vertikalni profil motenj na lokaciji Stara Vrhlike. Zgornja kovinska konstrukcija ograje in drog za zastavo sta bila ozemljena, kar je izboljšalo prenos motenj do sicer za motnje zasenčenega vznožja stolpa.

Kljub temu pa je eksperiment dodatno pokazal pomembno lastnost anten geodetskih sprejemnikov GNSS, in sicer, da v situacijah, ko je motilnik uporabljen pod horizontom anten, večjega vpliva motenja sprejemnikov ni pričakovati (razen v izjemnih situacijah). Glede na to, da so vse antene sprejemnikov omrežja SIGNAL nameščene na stavbah, je pričakovati, da motenje pod horizontom anten ne bo imelo večjega vpliva na sprejemnike omrežja SIGNAL, žal pa to ne velja za omrežje 0. reda, saj so sprejemniki nameščeni na talnih stebrih.

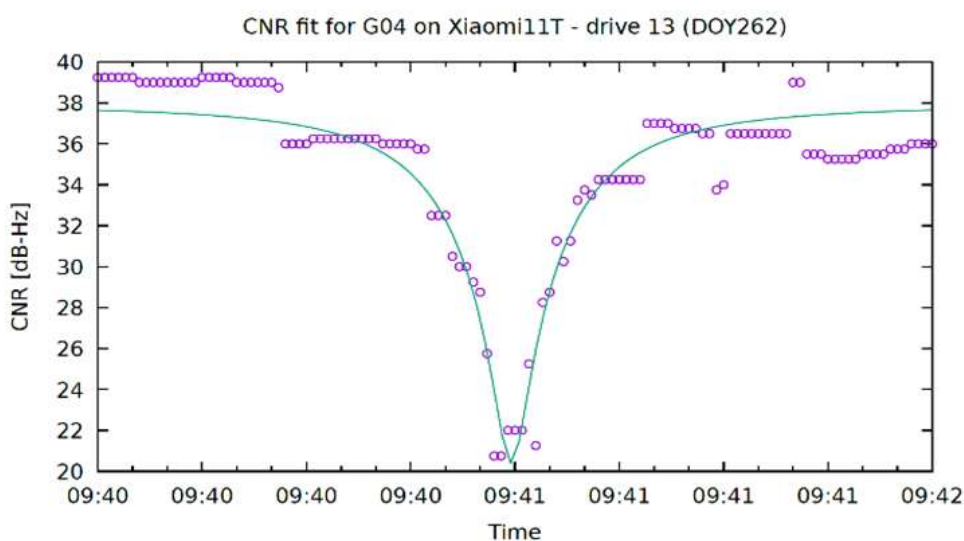
B 4. Študije lokalizacije motilnega signala

Za ugotavljanje prisotnosti motenj in lokacije njihovega izvora so Brown, Atterberg in Gerein leta 2000 [21] predstavili izboljšavo naprednega sprejemnika GPS (ang. *High-gained Advanced GPS*

receiver – HAGR), ki lahko zaznava prisotnost motenj in oceni smer, od koder je motnja prišla. Za lociranje izvora motenj, posebej širokopasovnih, je z dveh ali več opazovalnih postaj možno meriti smer prihoda motilnega signala (ang. *Angle Of Arrival* – AOA). Ob uporabi križne korelacije je možno metodo kombinirati z določanjem razlik časov prihodov signalov (ang. *Time difference of arrival* – TDOA) sinhroniziranih oddajnikov v te postaje in robustno določati položaj motilnika in/ali potvarjalnika [22].

Metoda lociranja motilnika z upoštevanjem razmerja nosilca signala in gostote šuma (CNR) ne potrebuje zapletene infrastrukture. V prvem pristopu, s katerim dobimo najboljše rezultate, če motilnik konstantne moči miruje, izkoriščamo zamisel, da je mogoče niz senzorjev na različnih položajih v prostoru nadomestiti z enim samim senzorjem, ki se premika po znani trajektoriji, drugi pristop pa temelji na rabi velikega števila pametnih telefonov, ki hkrati opazujejo dogodek motenja [23]. Lociranje je možno tudi z opazovanjem vrednosti izhodnega signala (ang. *Automatic Gain Control* – AGC) [24].

V letu 2022 smo raziskave motenj razširili tudi na uporabo pametnih telefonov. S sprejemnikom GNSS v pametnem telefonu smo testirali lociranje motilnika z opazovanjem razmerja CNR [25]. Iz opazovanj se namreč izkaže, da se v veliko primerih lahko odvisnost CNR od razdalje obnaša kot obrnjena Gaussova funkcija. Ob privzetku, da se motilnik premika s konstantno hitrostjo mimo sprejemnika, lahko z upasanjem te funkcije (Slika 6) dobimo čas preleta, oziroma preleta mimo točke na cesti, ki je sprejemniku najbližja. Pokazali smo, da se s tem da določiti čas, ob katerem se je motilnik nahajal najbližje tej točki. Trajektorijo motilnika določimo z interpolacijo teh točk, če imamo v spremljanju motenj vključenih več sprejemnikov.



Slika 6: Primer uspešnega upasanja na CNR satelita z oznako G04.

V raziskavi smo ugotovili, da geodetski sprejemniki niso primerni za lociranje izvorov motenj, saj tipično prenehajo oddajati podatke tako o svoji legi kot tudi o sprejetih signalih z navigacijskih satelitov, takoj ko zaznajo prisotnost močnejših elektromagnetnih šumov v področju GNSS. To je tudi razumljivo glede na njihovo namembnost, saj je z geodetskega zornega kota bolje ne dobiti nobene rešitve kot napačno. Nasprotno pa nizkocenovni sprejemniki nepretrgoma oddajajo podatke o sprejetih satelitih vključno s CNR, kar je pomembno za spremljanje pojavnosti šumov oz. motenj [26].

C. Teoretična izhodišča

C 1. Signali GNSS in šum

Signal GNSS je v trenutku, ko prispe do sprejemnika, zadušen (ang. *suppressed*) s šumom. V skladu s standardno dokumentacijo (ang. *Interface Control Documents* – ICD) [27] najnižja raven signala GPS L1 C/A, ki doseže zemeljsko površino, ne sme biti nižja od -130 dBm (-160 dBW). Velja: $1 \text{ mW} = 0,001 \text{ W} = 0 \text{ dBm} = -30 \text{ dBW}$. Zveza med močjo v dBW ($P_{(\text{dBW})}$) ter močjo, ki je izražena v vatih ($P_{(\text{W})}$), je:

$$P_{(\text{dBW})} = 10 \cdot \log(P_{(\text{W})}/1 \text{ W}). \quad (1)$$

Preprosta enačba za pretvorbo moči iz dBW v dBm je:

$$P_{(\text{dBm})} = P_{(\text{dBW})} + 30. \quad (2)$$

Slabljenje oddanih satelitskih signalov GNSS do sprejemnikov je odvisno od več dejavnikov, kot so: razdalja, atmosferski pogoji in topografija terena. Slabljenje v praznem prostoru (ang. *Free Space Path Loss* – FSPL) lahko izračunamo s Friisovo enačbo, in sicer:

$$\text{FSPL}_{(\text{dB})} = 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) - G_{T_x} - G_{R_x}, \quad (3)$$

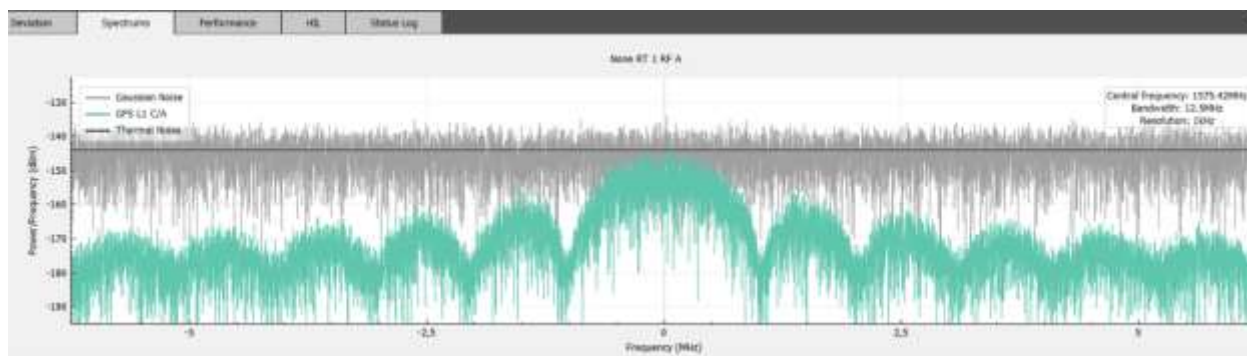
kjer je d razdalja v km med satelitom in sprejemnikom, f frekvenca valovanja v MHz, c hitrost svetlobe ter G_{T_x} in G_{R_x} dobitka satelitove (oddajnikove) in sprejemnikove antene (izraženo v dBi).

Če je moč oddajnika satelita GPS na L1 približno 25 W ($\sim 14 \text{ dBW}$) in je moč sprejetega signala v sprejemniku -130 dBm , je bil signal tekom razširjanja (dolžina poti ca. 20.200 km) slabljen za $173,4 \text{ dB}$ (Slika 7) [28].



Slika 7: Signali GNSS so na poti od satelita do antene sprejemnika oslabljeni [28].

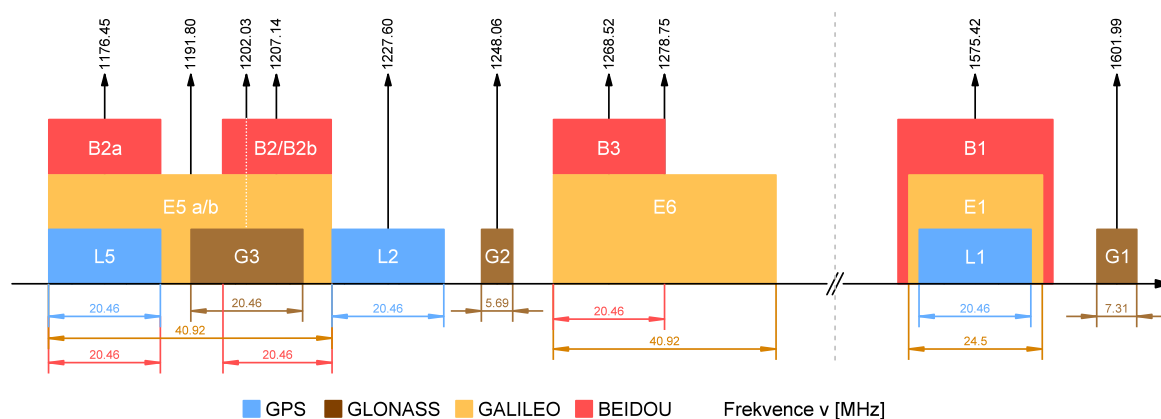
Posledično sprejeti signal GNSS na vhodu v anteno običajno preglasi šum (Slika 8). Moč sprejetih signalov je torej nižja od šuma, zato je naloga sprejemnika, da sprejeti signal ojača in ga izloči iz šuma s pomočjo kodnega demultipleksiranja.



Slika 8: Signal GPS L1/CA, toplotni šum in Gaussov šum [28].

C 2. Oblika spektra in vrste motenj

Spekter sistemov GNSS je precej raznolik in razgiban. Vsi štirje glavni sistemi, ki so zaznavni na območju Slovenije, oddajajo svoje signale v vsaj treh pod-področjih, v primeru BeiDou na štirih. Sistemi se razlikujejo v obliki spektra in načinu modulacije, pri čimer zgolj GLONASS uporablja frekvenčni multipleks (modulacija) v področju G1 in G2, preostali sistemi pa so osnovani na kodnem multipleksu. Slika 9 prikazuje razporeditev GNSS sistemov v frekvenčnem spektru in uporabljeno pasovno širino posamezne oddaje.



Slika 9: Frekvenčni načrt signalov GNSS

Večina GNSS sistemov prehaja na sistem modulacije BOC (ang. *Binary Offset Carrier*), ki omogoča lažji soobstoj različnih sistemov v istem frekvenčnem območju. Spektralna gostota signala je tako z izbiro vrste modulacije pomaknjena stran od osrednje frekvence. Ozkopasovni motilniki na eni sami frekvenci, npr. motilniki vrste CW (ang. *continuous wave*) tako niso več pretirano učinkoviti, saj ne napadejo v celoti posameznega frekvenčnega pod-področja. Precej enostavna izvedba motilnika je tudi preletni motilnik (ang. *chirp jammer*), kjer ozkopasovni (CW) signal navadno linearno preletava celotna frekvenčna pod-področja, na katerih sateliti oddajajo signale GNSS.

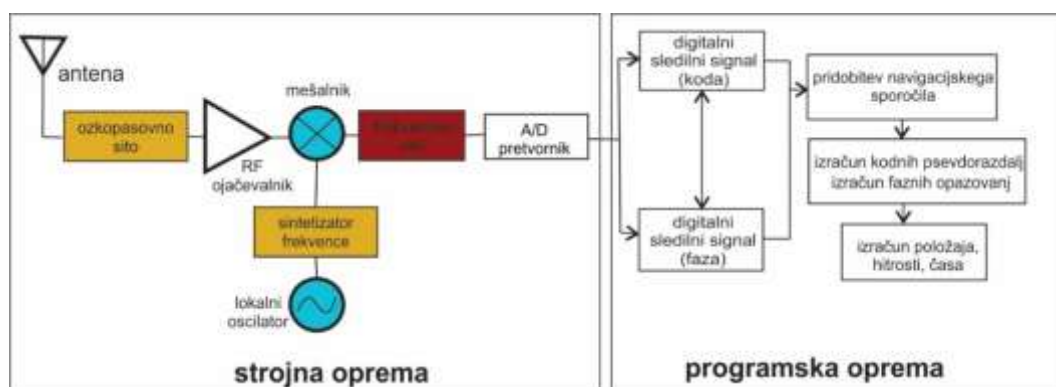
Širokopasovna motnja se lahko izvede z ustreznim modulatorjem ali v obliki razširjanja spektra s kodo, kjer je uporabljena modulacija BPSK (ang. *Binary Phase Shift Keying*). S tem motilnik hkrati pokriva želeno frekvenčno področje, pri tem pa je modulacija lahko povsem naključna (ne sinhronizirana z oddajo sistema GNSS) ali pa kodno ustreza oddaji resničnih signalov, da zavede programsko opremo znotraj sprejemnika, ki poskuša motnje zaznati in odpraviti.

C 3. Zgradba sprejemnika GNSS

Pri obdelavi sprejetih signalov je treba pred obravnavo opazovanj v datotekah RINEX poznati zgradbo sprejemnikov GNSS (Slika 10), ki jih sestavlja:

- strojna oprema (ang. *hardware*),
- programska oprema za obdelavo signalov (ang. *software*) in programska oprema za obdelavo opazovanj GNSS (kodnih in faznih).

Strojni del predstavlja radio-frekvenčno vezje, ki zagotavlja medfrekvenčni signal (ang. *Intermediate Frequency* – IF), ta pa je osnova nadaljnjo digitalno obdelavo. Programska oprema dekodira satelitska navigacijska sporočila in tako omogoča pridobitev kodnih in faznih opazovanj. Iz njih nato z digitalno obdelavo izlušči kodno in fazno nedoločeno psevdorazdaljo. Programska oprema lahko vključuje različne algoritme obdelave signala v kodni in fazni zanki (ang. *code-loop tracking*, *carrier-phase loop tracking*). Bolj učinkoviti algoritmi digitalne obdelave signalov omogočajo še dodatno izboljšanje delovanja sprejemnika GNSS v oteženih pogojih.



Slika 10: Struktura sprejemnika GNSS.

Glavne naloge radio-frekvenčnega (RF) integriranega vezja so ojačenje, mešanje (preslikava) na nižje frekvence, filtriranje ter vzorčenje signala GNSS. Pri tem morajo posamezni gradniki dodati čim manj lastnega šuma, da s tem ne poslabšujejo že tako zahtevnih lastnosti sprejema zelo šibkih signalov.

Zgradba strojnega dela sprejemnika GNSS zajema več ključnih elektronskih gradnikov in procesov za sprejem ter obdelavo satelitskih signalov, in sicer:

- antena** je prvi gradnik v sprejemniku. Njena naloga je sprejem elektromagnetnih valov, ki jih oddajajo sateliti. Antena mora sprejemati signale desne krožne polarizacije (ang. *Right-Handed Circular Polarization* – RHCP), saj tovrstne signale oddajajo sateliti GNSS. Dodatno mora imeti ustrezen smerni diagram, ki omogoča učinkovit sprejem pri različnih višinskih kotih (elevacijah), v primeru večfrekvenčnega sprejemnika tudi na več frekvenčnih področjih hkrati. V splošnem lahko antene delimo na pasivne in aktivne. Aktivna antena je povsem enaka pasivni, le da vsebuje še nizko šumni ojačevalnik (ang. *Low Noise Amplifier* – LNA), zmožen ojačenja šibkih signalov brez pretirane degradacije šumnega nivoja, ter pogosto tudi frekvenčno selektivno sito v obliki piezoelektrične strukture z izkoriščanjem

površinskega akustičnega valovanja (ang. *Surface Acoustic Wave filter* – SAW). Takšna sita so danes ključnega pomena, saj odstranjujejo signale neželenih frekvenc, ki se pogosto nahajajo v bližini spektra sistemov GNSS (Slika 9).

- **Nizko šumni ojačevalnik** (ang. *Low Noise Amplifier* – LNA) je pogosto prvi ojačevalnik v sprejemni verigi, katerega odlikuje predvsem nizko šumno število. Signal iz antene potuje v nizko šumni ojačevalnik, ki ojača šibke signale z minimalno degradacijo šumnega nivoja. Nizko šumni ojačevalnik ima izbrano ojačenje (G [dB]), šumno število (F [dB]) in neko pasovno širino (B [MHz]). Ojačevalniki navadno vključujejo tri gradnike:
 - (1) predselektorsko sito, ki odstranjuje motnje izven pasu in omejuje pasovno širino ojačenja,
 - (2) zaščito pred preobremenitvijo, ki preprečuje trajne poškodbe gradnikov pri sprejemu (pre)močnih signalov, ter
 - (3) nizko-šumni ojačevalnik (LNA); signali GNSS so navadno zelo šibki, okoli -160 dBW ali 10^{-6} W, zato LNA signale ojačuje za 20 do 35 dB, da jih ojača do stopnje, primerne za nadaljnjo obdelavo.
- V **mešalniku** pride do mešanja vhodnega radio-frekvenčnega signala s signalom lokalnega oscilatorja, ki se navadno nahaja na konstantni frekvenci. Ta obdelava je izvedena povsem analogno, kar omogoča neodvisno sprejemanje frekvenc vseh GNSS. Namen mešalnika je preslikava sprejetega signala na nižje frekvence, kar poenostavi naslednji korak analogno-digitalne pretvorbe. Dinamično območje mešalnika na zgornji frekvenčni meji omejuje popačenje, na spodnji pa toplotni šum (predstavitvev toplotnega šuma je na Slika 8).
- **Pasovno prepustno sito** ima v visokofrekvenčnem sprejemniku GNSS funkcijo odstranjevanja neželenih višjih harmonikov (ali mešalnih produktov) ter prepuščanje le želenega dela spektra, kjer se nahajajo signali GNSS. Pri tem želimo sita z visoko kakovostjo (Q), torej čim bolj strmim prehodom v zaporni pas in s čim manjšimi lastnimi izgubami.
- Za uspešno analogno-digitalno pretvorbo s sodobnimi gradniki mora skupno ojačenje signala v celotni analogni verigi znašati približno 115 dB. Po mešalniku signal najprej vstopi v **med-frekvenčno IF-sito** (ang. *Intermediate Frequency filter*), ki odstrani neželene produkte mešanja in postopoma ojači signal. Zadnja stopnja v verigi med-frekvenčnega sita je najbolj pogosto nastavljivi ojačevalnik (ang. *Programmable gain amplifier* – PGA), kateremu lahko ojačenje spreminja **zanka za avtomatsko kontrolo ojačenja** (ang. *Automatic Gain Control* – AGC). Ta vzdržuje optimalno ravnotežje signala na vходу vzorčevalnika.
- Analogni signal med-frekvence nato *analogno-digitalni pretvornik* (ang. *Analog to Digital Converter* – ADC) pretvori v digitalno obliko.
- Digitalni signal se nato obdela z algoritmi za sledenje posameznim satelitom, demodulacijo, demultipleksiranjem, izračunavanje položaja in z drugimi procesi za pridobivanje želenih informacij o položaju, hitrosti in času.

C 4. Razmerje med signalom in šumom (SNR) in razmerje med signalom in gostoto šuma (C/N0 oz. CNR)

Pri ustrezni obdelavi signalov GNSS sta pomembna izraza razmerje med signalom in šumom (ang. *Signal to Noise Ratio* – SNR) ter nosilnikom signala in gostoto šuma (ang. *Carrier to Noise Density* – C/N0 oz. CNR). Oba sta zelo pomembna tudi pri proučevanju motenj signalov. Velikokrat se

izraza zamenjujeta in uporabljata, kot da sta enaka, čeprav temu ni tako. SNR in C/N_0 opisujeta različni razmerji sprejetega signala [29].

C 4.1. Razmerje med močjo signala in šumom (SNR)

Razmerje med močjo signala in močjo šuma (SNR) sprejemnika GNSS je merilo moči sprejetih satelitskih signalov v primerjavi z močjo sprejetega šuma. Višji SNR pomeni močnejši, ne pa tudi zanesljivejši signal. V sistemu GPS velja, da je vrednost SNR nad določenim pragom dobra za natančno določanje položaja, medtem ko nižje vrednosti navadno degradirajo delovanje, zlasti v zahtevnih okoljih z ovirami ali motnjami.

Po svoji definiciji je SNR razmerje med močjo signala ali nosilnega signala (S) in močjo šuma (N) v določeni pasovni širini (Slika 11). Čeprav pasovna širina (ang. *Bandwidth*) v zapisu ni neposredno izražena, je pomembno, da jo pri meritvah SNR navedemo/omenimo.

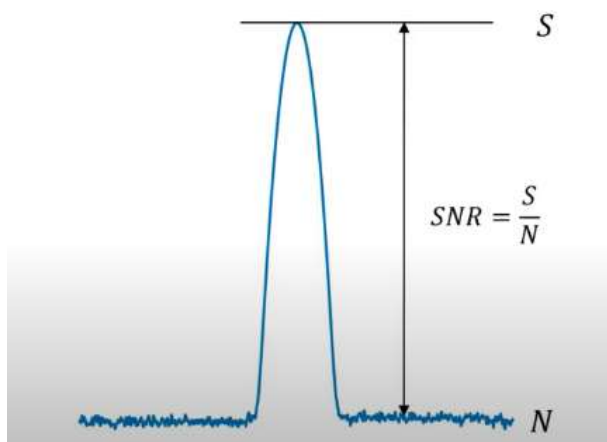
$$SNR = \frac{S}{N}$$

$$SNR_{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{S}{N}\right) \quad (1)$$

oziroma

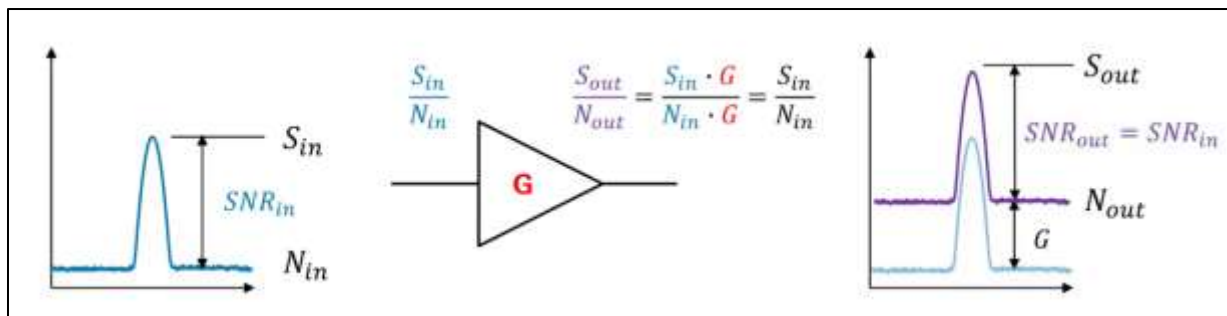
$$SNR_{dB} = S_{dB} - N_{dB}$$

SNR se izraža v decibelih (dB).

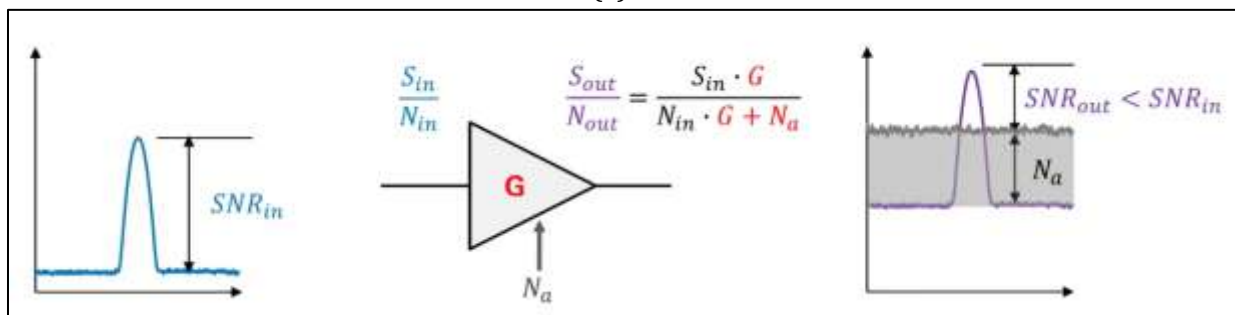


Slika 11: Razmerje med signalom (S) in šumom (N).

Izvori šuma so lahko zunanji (termični šum okolice) ali notranji dejavniki, ki izhajajo iz samega sprejemnika. Višja vrednost SNR navadno izboljša sposobnost zaznavanja in demodulacije signalov. Za signale z nizko vrednostjo SNR obstaja možnost, da le-to izboljšamo z ojačanjem, kjer sta tako signal kot šum ojačena z enako močjo G , tako da vhod in izhod SNR ostaneta enaka (Slika 12. a). Vendar imajo ojačevalniki tudi svoj notranji šum (N_a), zato je rezultat izhoda (SNR_{out}) vedno nižji kot vhodni SNR (SNR_{in}) (Slika 12. b).



(a)



(b)

Slika 12: Razmerje med signalom in šumom (SNR), in sicer: (a) brez upoštevanja notranjega šuma, (b) z upoštevanjem notranjega šuma [30].

Glavna uporaba SNR

- SNR je odvisen od pasovne širine, kar pomeni, da moramo opazovati enako pasovno širino, da lahko pošteno primerjamo vrednosti SNR različnih signalov,
- SNR je odvisen tudi od algoritmov zajema in sledenja signalov v sprejemnikih GNSS,
- služi kot kazalnik prisotnosti šuma v meritvi,
- SNR se lahko uporablja pri analizi simuliranih signalov. Če imamo v naših simulacijskih podatkih C/N_0 , ga moramo pretvoriti v SNR , da lahko ocenimo varianco šuma v simulaciji.

C 4.2. Razmerje med signalom in spektralno gostoto šuma (C/N_0)

Po definiciji je C/N_0 razmerje med močjo nosilnika in močjo šuma na enoto pasovne širine. C/N_0 se običajno izračuna z Welchvim algoritmom, ki je algoritem za izračun spektralne gostote moči (ang. *Power Spectral Density* – PSD). Izrazimo ga v enotah dB-Hz ter ga zapišemo kot:

$$\begin{aligned} C/N_0_{dB-Hz} &= SNR + 10 \cdot \log(bw) \\ &\text{ali} \\ C/N_0_{dB-Hz} &= C - N_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{ali} \\ C/N_0_{dB-Hz} = (C - N) + BW = SNR + BW,$$

kjer je bw pasovna širina vhoda v Hz, $BW = 10 \cdot \log(bw)$, C moč nosilnega signala v dBm ali dBW in N moč šuma dBm ali dBW.

Prednosti C/N0

- v praksi je neodvisen od pasovne širine sprejemnika, zato se lahko uporablja za primerjavo različnih sprejemnikov,
- lahko se neposredno uporablja za prikaz kakovosti sprejetega signala,
- kaže moč signala sledenih satelitov kot tudi gostoto šuma na vhodu v sprejemnik in
- je pokazatelj kakovosti signala in je neodvisen od algoritmov zajema in sledenja.

C 4.3. Določitev SNR in C/N0 za signal GPS L1 C/A

Toplotni šum antene in strojne opreme sprejemnika se lahko uporabi za določitev spektralne gostote šuma. Izračunamo ga z Johnson-Nyquistovo enačbo:

$$\begin{aligned} N0_{(W/Hz)} &= k \cdot T \\ N0_{(dBW/Hz)} &= 10 \cdot \log(k \cdot T), \end{aligned} \quad (3)$$

kjer je k Boltzmannova konstanta ($k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$). Za $T = 290 \text{ K}$ spektralna gostota šuma znaša -204 dBW/Hz . Tipična moč nosilnega signala GPS L1 C/A na sprejemniku je približno $-158,5 \text{ dBW}$, zato vrednost C/N0 na sprejemniku znaša $45,5 \text{ dB-Hz}$ [29]:

$$C/N0 = C - N0 = -158,5 \text{ dBW} - (-204 \text{ dBW/Hz}) = 45,5 \text{ dB-Hz}. \quad (4)$$

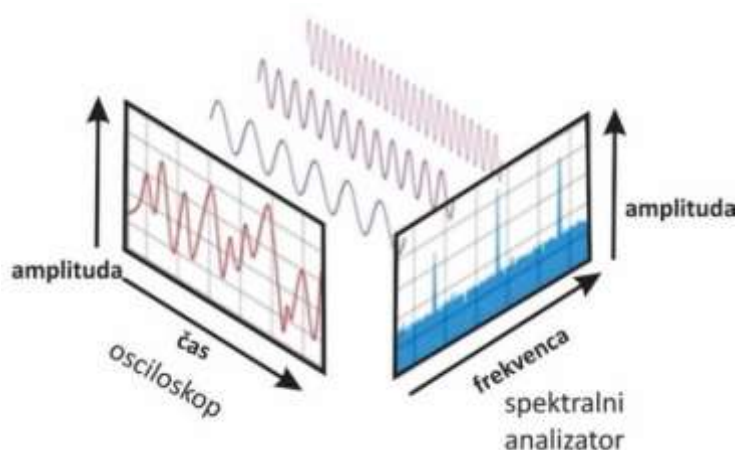
Če predpostavimo, da imamo na izhodu sito s pasovno širino 10 MHz , lahko izračunamo, da je $BW = 10 \cdot \log(10^6) = 70 \text{ dB}$. Tako lahko iz C/N0 izračunamo SNR kot:

$$SNR = \frac{C}{N0} - BW = 45,5 \text{ dB} - 70 \text{ dB} = -24,5 \text{ dB}. \quad (5)$$

Negativen SNR pomeni, da je signal pod nivojem šuma.

C 5. Spektralni analizator

Za proučevanje lastnosti signalov v odvisnosti od časa običajno uporabimo elektronski instrument, ki ga imenujemo osciloskop. Žal nam ta ne daje celotne slike, sploh v primerih, ko imamo na nekem frekvenčnem območju opravka z več signali različnih jakosti.



Slika 13: Razmejitev med časovnim in frekvenčnim prostorom (splošno).

V primeru GNSS vemo, da so signali šibki, njihovo jakost približno poznamo. S spektralno analizo želimo določiti pojavnost motečih ter močnejših signalov, za katere predvidevamo, da niso produkt satelitske oddaje. Vseeno se lahko zgodi, da so motnje šibkejše od signalov GNSS, a vseeno motijo delovanje.

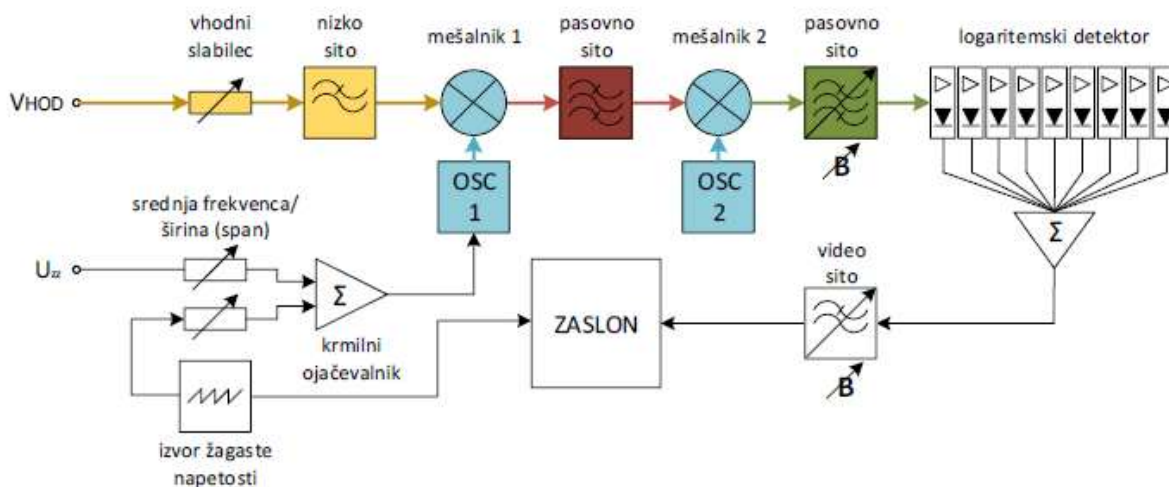
Za razumevanje delovanja sprejemnikov ali celotnega sistema je signale treba analizirati v frekvenčni domeni (Slika 13). Gre za grafični prikaz amplitude signala v odvisnosti od frekvence. Spektralni analizator je za frekvenčno področje to, kar je osciloskop za časovno področje. Slika 13 prikazuje signal v časovnem in frekvenčnem področju. V časovni domeni se vse frekvenčne komponente signala seštejejo in prikažejo na sliki v časovni domeni. V frekvenčnem področju so kompleksni signali (tj. signali z več kot eno frekvenčno komponento) ločeni na njihove frekvenčne komponente tako, da je lahko prikazana amplituda vsake komponente posebej. Če bi signale merili v odvisnosti od časa, torej z osciloskopom, različnih šibkih signalov ne bi uspeli razločiti. Meritve v frekvenčni domeni imajo več prednosti. Recimo, da na osciloskopu opazujemo signal, ki je videti kot čisti sinusni val. Čisti sinusni val nima harmonskih popačenj. Če si signal ogledamo na spektralnem analizatorju, lahko vidimo, da je signal dejansko sestavljen iz več frekvenc. Kar na osciloskopu ni bilo opazno, postane zelo očitno na spektralnem analizatorju. Spektralni analizatorji tako služijo za vpogled v frekvenčni spekter moči, vključno z vsemi želenimi in neželenimi signali.

Za meritev kakovosti signalov GNSS na določeni lokaciji je zato smiselno uporabiti spektralni analizator, ki razloči signale z večjo dinamiko in jih prikaže kot frekvenčno odvisne. Spektralni analizator je selektivni merilni sprejemnik, ki preiskuje frekvenčno področje in izpisuje frekvenčni spekter na zaslonu. Pri spektralnem analizatorju spodnjo mejo določa toplotni šum, gornjo mejo pa pojav nelinearnih popačenj v sprejemniku.

32

C 5.1. Kako deluje spektralni analizator

Na poenostavljenem načrtu (Slika 14) je prikazano delovanje spektralnega analizatorja. Vhodni signal vstopi v nastavljivi slabilec, ki oslabi vhodni signal do te mere, da morebitna prevelika moč ne poškoduje sestavnih delov. Za njim se nahaja nizkoprepustno sito, ki zaduši frekvence, višje od načrtovane frekvence območja merjenja.



Slika 14: Poenostavljen blokovni načrt visokofrekvenčnega spektralnega analizatorja.

Signal gre nato v prvi mešalnik s pripadajočim napetostno-krmljenim oscilatorjem, ki nam celotno frekvenčno področje vhodnega signala prestavi na višjo frekvenco. Dejansko gre za preslikavo z nižje na višjo frekvenco. Skupaj s pasovnim sitom, ki mu sledi, tvori selektivni sprejemnik. Pasovno sito spusti skozi le signale okoli izbrane osrednje frekvence, ostale pa zaduši. Če spektralni analizator krmili oscilator tako, da mu spreminja frekvenco, bo na neki točki naš signal preslikan ravno v območje, kjer pasovno sito signal spusti skozi. Tako selektivno izbira, kateri del spektra vhodnega signala merimo in opazujemo tisti hip. Ker se delček spektra nahaja na previsoki frekvenci, da bi ga na preprost način analizirali in izmerili, ga z drugim mešalnikom, ki vsebuje svoj oscilator na znani frekvenci, preslikamo navzdol. Spektralnemu analizatorju dodamo nastavljivo pasovno sito. Če spreminjamo pasovno širino tega sita, večamo frekvenčno razločljivost merilnega inštrumenta. Nato signal vstopi v logaritemski detektor, ki nam amplitudo signala pretvori v moč (po naravi v logaritemski skali), prikaz pa vrši računalnik preko namenskega zaslona.

C 6. Avtomatska regulacija ojačenja

Dodatna metrika ugotavljanja prisotnosti motenj, ki je vključena le v določene sprejemnike GNSS (tudi v pametne telefone), je avtomatska kontrola ojačenja AGC. AGC je zaprto-zančno povratno regulacijsko vezje v ojačevalniku ali verigi ojačevalnikov, katerega namen je samodejno regulirati ustrezno amplitudo signala na izhodu in s tem vzdrževati enako vrednost kljub spreminjanju amplitude signala na vhodu. AGC pomaga ohranjati stabilen in uporaben signal, tudi če so prisotne motnje ali spremembe v moči sprejetega signala. Določeni sprejemniki (npr. Javad Triumph-LSA) izpisujejo stanje AGC v realnem času, da s posebno programsko opremo uporabnik lahko oceni, ali so signali obremenjeni z motnjami ali pa celo prenašajo napad potvarjanja. Preden signal prevzame analogno-digitalni pretvornik (ADC), ga AGC obdelava kot sito s prilagodljivim ojačenjem, čigar glavna naloga je zmanjšanje izgub zaradi kvantizacije, tako da prilagodi jakost sprejetih signalov vhodnim signalom ADC glede na pričakovano porazdelitev amplitude gostote verjetnosti [31]. Pri sprejemnikih GNSS, pri katerih je uporabna moč signala pod ravno toplotnega šuma, delovanje AGC pogojuje šum okolja in ne moč signala. Še eno zelo pomembno sosledje dejstev je treba omeniti: vsi sprejemniki so občutljivi na motilne in potvorjene signale. Če sprejemnik GNSS ne 've', ali da je moten ali da sprejema potvorjene signale, je nezanesljiv tudi podatek o času, ki ga izpisuje.

1 Analiza in ocena ranljivosti uporabnikov tehnologije GNSS na različne namerno povzročene motnje signalov GNSS

Glavni cilj delovnega svežnja DS1 je Analiza in ocena ranljivosti uporabnikov tehnologije GNSS na različno namerno povzročene motnje signalov GNSS. Delovni sveženj sestavljajo naloge:

- Naloga 1.1: Pregled možnosti ocene motenj v omrežju SIGNAL (študija programa SIGNAL)
- Naloga 1.2: Pregled možnosti zaznave motenj z geodetskimi sprejemniki
- Naloga 1.3: Pregled možnosti zaznave motenj z drugimi sprejemniki

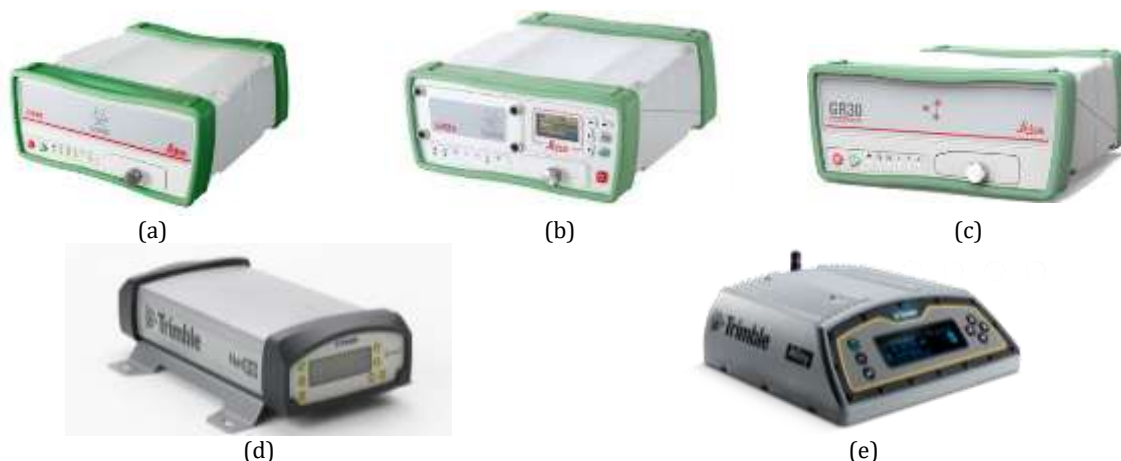
1.1 Pregled možnosti ocene motenj v omrežju SIGNAL (Naloga 1.1)

Upravljanje in nadzor omrežja SIGNAL ter distribucijo produktov izvajamo s celovito programsko rešitvijo Trimble Pivot Platform v 5.1 (TPP). TPP je ogrodje za upravljanje, nadzor in distribucijo produktov omrežij GNSS, ki ga je mogoče dodatno razširiti z različnimi aplikacijami, prilagojenimi potrebam uporabnika. Zasnovan je modularno, kjer lahko posamezne module združimo v t. i. kontejnerje, ki so lahko nameščeni na različnih strežnikih. Redno se posodablja, pri čemer velja omeniti dve večji posodobitvi. TPP uporabljamo od 5. decembra 2014, pred tem smo med 4. julijem 2011 in 5. decembrom 2014 za upravljanje omrežja uporabljali Trimble VRS3Net, ki je predhodnik programske platforme TPP. Pred VRS3Net smo uporabljali skupek različnih programov (Trimble GPSNet, Trimble Ephemeris Download, Trimble GPSTServer, Trimble NTRIP Caster), ki so bili med seboj sicer povezani, vendar ne preko skupnega ogrodja, kot je to značilno za TPP. Poleg tega posamezni programi niso delovali kot servisi, kot je to primer pri VRS3Net in TPP, temveč kot običajni programi.

34



Slika 15: Omrežje SIGNAL, ki ga dopolnjujejo izbrane stalne postaje omrežij sosednjih držav (italijanski FVG, avstrijski APOS, madžarski GNSSnet.hu in hrvaški CROPOS). Na sliki so izrisane tudi stalne postaje državnega omrežja 0. reda, do katerega uporabniki nimajo dostopa.



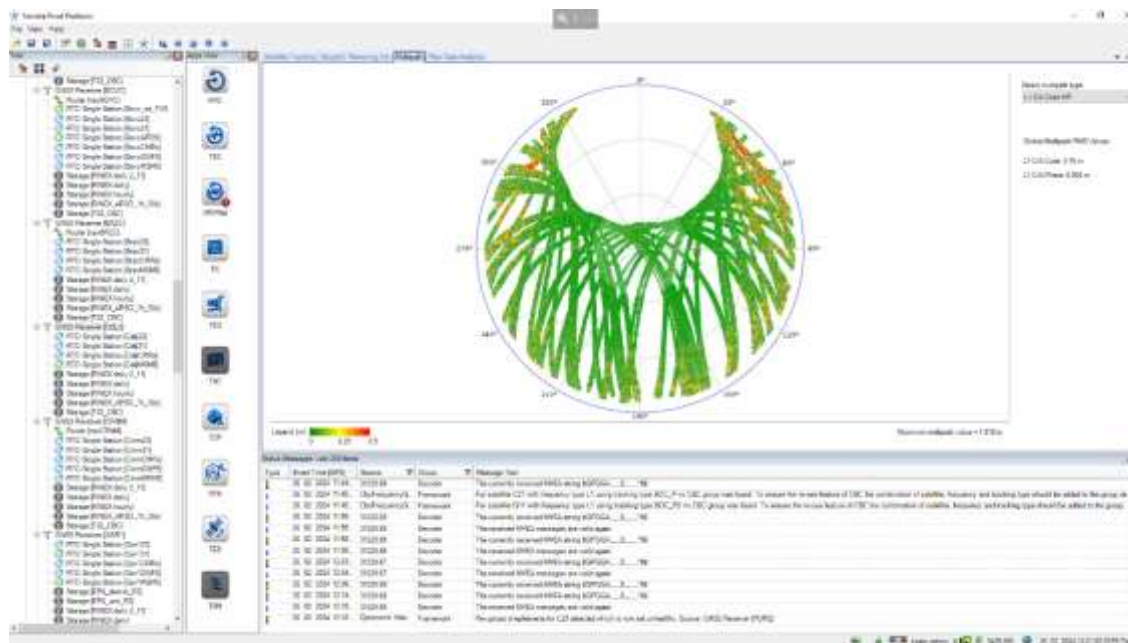
Slika 16: Sprejemniki, ki so v uporabi v omrežju SIGNAL; (a) Leica GR10, (b) Leica GR25, (c) Leica GR30, (d) Trimble NetR9, (e) Trimble Alloy

Preglednica 1: Stalne postaje omrežij SIGNAL in 0. red, tip sprejemnikov, ki je nameščen na stalni postaji in zabeležka možnosti spremljanja spektrov signalov na posamezni postaji

Omrežje	Oznaka postaje	Lokacija postaje	Sprejemnik	Spektralni analizator
SIGNAL	BODO	Bodonci	Trimble NetR9	Ne
SIGNAL	BOVC	Bovec	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	BRZC	Brežice	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	CELJ	Celje	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	CRNM	Črnomelj	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	GSR1	Ljubljana	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	IDRI	Idrija	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	ILIB	Ilirska Bistrica	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	KOPR	Koper	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	LEND	Lendava	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	MRBR	Maribor	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	NOVG	Nova Gorica	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	PTUJ	Ptuj	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	RDVL	Radovljica	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	SLOG	Slovenj Gradec	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	TRBN	Trebnje	Trimble Alloy	Nameščen
0. red	ARA1	Areh	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
0. red	ARA2	Areh	Leica GR25	Ne
0. red	KDA1	Korada	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
0. red	KDA2	Korada	Leica GR25	Ne
0. red	KGA1	Kog	Leica GR25	Ne
0. red	KOPE	Koper	Leica GR25	Ne
0. red	PZA1	Prilozje	Leica GR25	Ne
0. red	PZA2	Prilozje	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
0. red	STA1	Šentvid pri Stični	Leica GR10	Ne
0. red	STA2	Šentvid pri Stični	Leica GR25	Ne

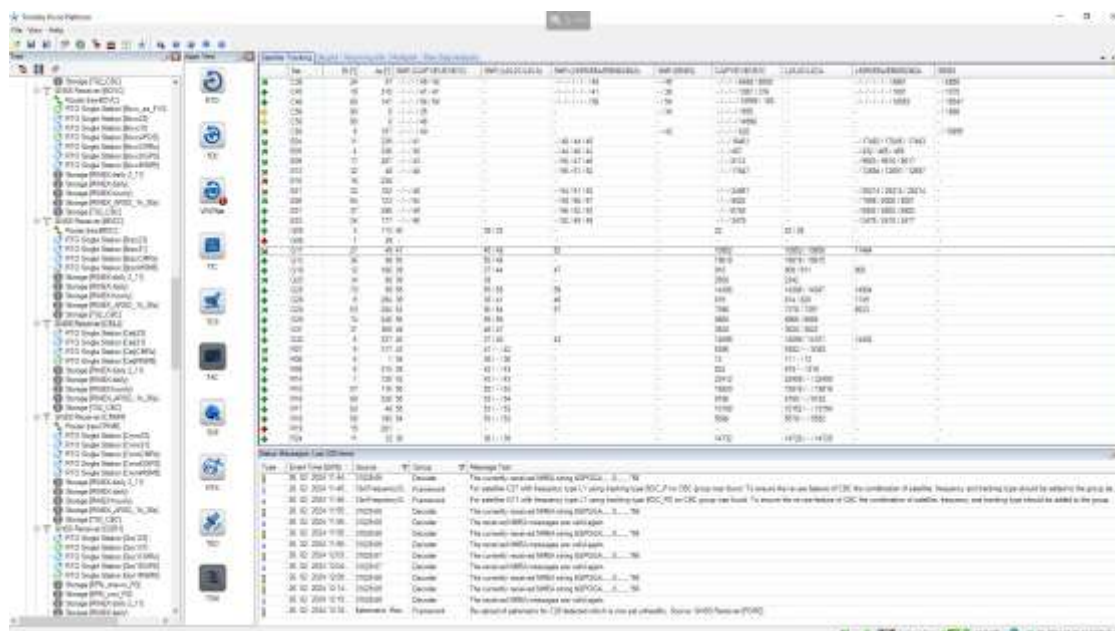
Na stalnih postajah omrežij SIGNAL in 0. red (Slika 15) so nameščeni različni sprejemniki. Določeni imajo vgrajeno tudi možnost spremljanje spektra signalov GNSS, določeni imajo to možnost, če dokupimo programsko opremo (Preglednica 1).

Programska oprema omrežja Trimble Pivot Platform v 5.1 (TPP) nudi vpogled v delovanje stalnih postaj, vključno z lokalnimi motečimi vplivi, kot so odboj signalov, nenadni skoki signala (ang. *cycle slips*) in razmerje moči med signalom in šumom (*SNR*) (Slika 17 – Slika 20).

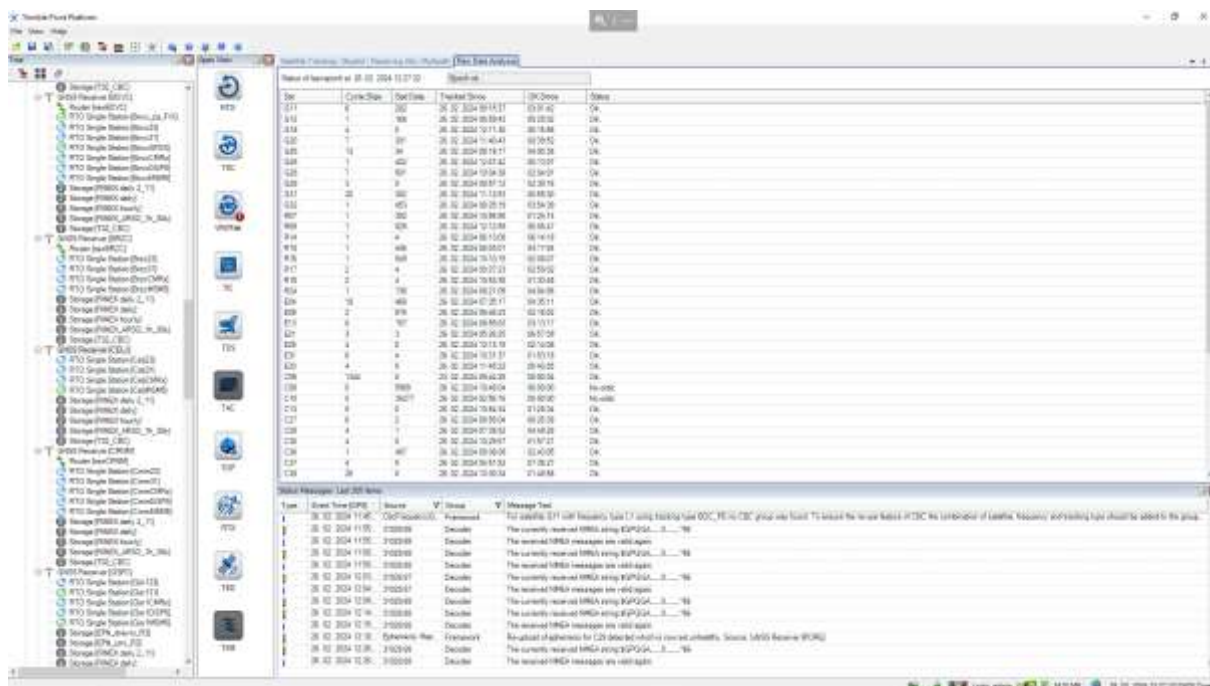


36

Slika 17: Izris odboja signalov iz programa Trimble Pivot Platform.



Slika 18: Izpis vrednosti razmerij med jakostjo signala in šuma (Trimble Pivot Platform).



Slika 19: Izpis števila nenadnih skokov signalov za posamezen satelit (Trimble Pivot Platform).

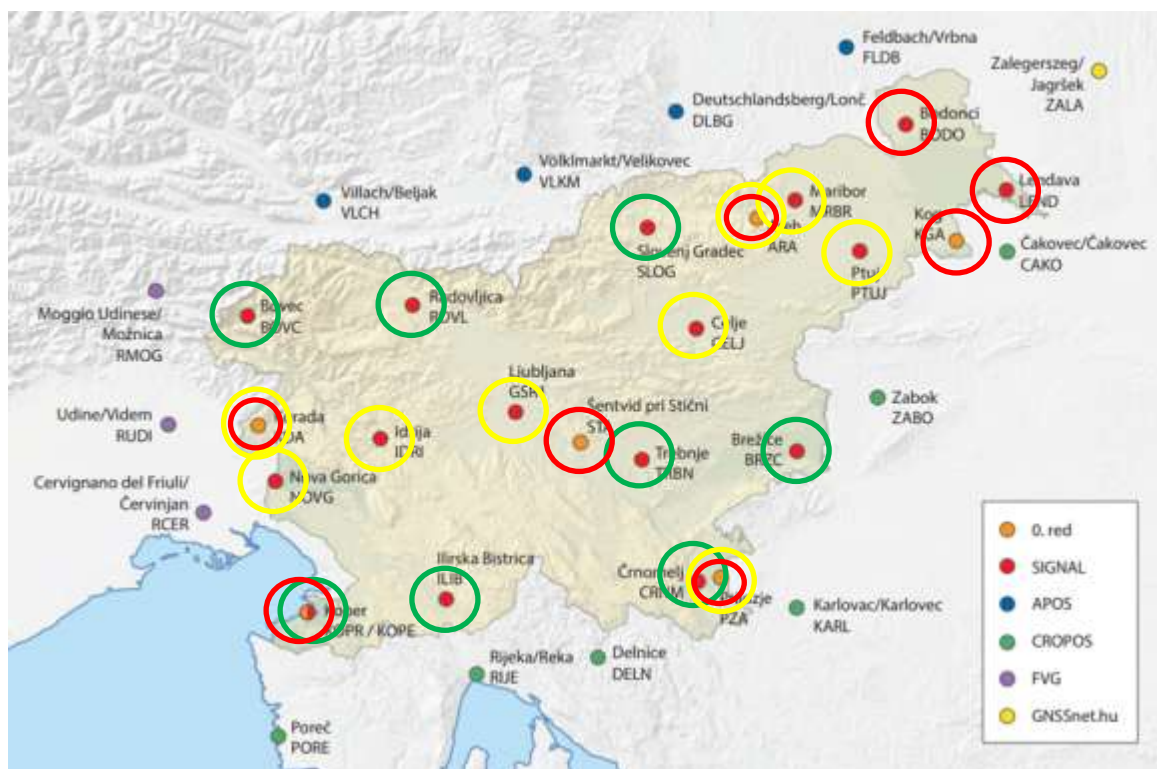


Slika 20: Izpis kakovosti opazovanj v smislu uporabnosti pri končni določitvi položaja (Trimble Pivot Platform).

Razpoložljiva oprema na omrežju 0. reda le deloma omogoča spremljanje spektra signalov v realnem času, medtem ko je na nekaterih postajah (Slika 21) omrežja SIGNAL to:

- že mogoče: Bovec (BOVC), Brežice (BRZC), Črnomelj (CRNM), Ilirska Bistrica (ILIB), Radovljica (RDVL), Slovenj Gradec (SLOG), Koper (KOPR), Trebnje (TRBN),
- je mogoče, vendar opcija trenutno ni aktivirana: Celje (CELJ), Ljubljana (GSR1), Idrija (IDRI), Lendava (LEND), Maribor (MRBR), Nova Gorica (NOVG), Ptuj (PTUJ).

Na omrežju 0. reda trenutno spektralne analize ni mogoče izvesti, od šestih lokacij obstaja možnost, da se storitev vključi na enem sprejemniku posamezne lokacije, in sicer na lokaciji Areh (ARA1), Korada (KDA1) in Prilozje (PZA2) (Preglednica 1).



Slika 21: Možnost spremljanja spektra signalov GNSS na omrežjih SIGNAL in 0. red; rdeče: ni možnosti, rumeno: mogoče, vendar storitev trenutno ni vključena, zeleno: je mogoče.

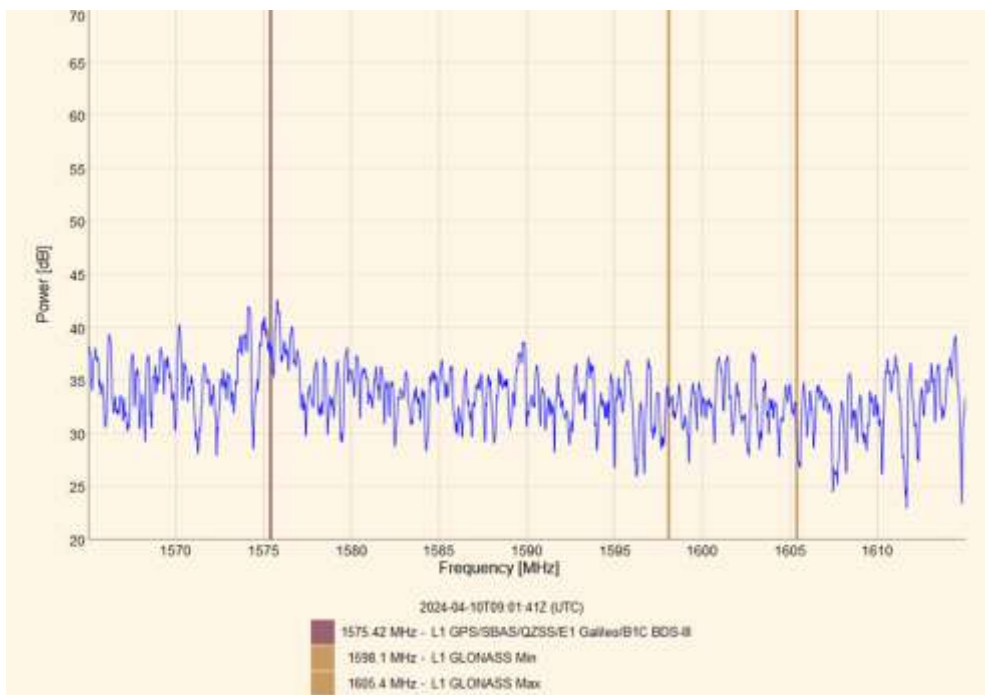
1.1.1 Spektralni analizator v sprejemnikih Trimble

Trimble Inc. ponuja različne rešitve spremljanja motenj signalov, med njimi sprejemniki delujejo tudi v načinu spektralnih analizatorjev, ki omogočajo grafičen vpogled v obliko signala. Uporabnikom nudijo vpogled v kakovost signala v realnem času. Mogoče je tudi naknaden vpogled, če beleženje omogočimo v binarnem formatu T04.

Od različice 5.37 ima spektralni analizator sprejemnikov Trimble Alloy več izboljšav: podprto je hitrejše vzorčenje, in sicer do 5 Hz; izboljšano je skaliranje prikaza na osi y (moč v dB); hitra Fourierova transformacija (ang. *Fast Fourier Transformation* – FFT) lahko bolje zazna več zunanjih impulznih motenj z zmanjšanim šumom, ne da bi bilo treba signal predhodno filtrirati.

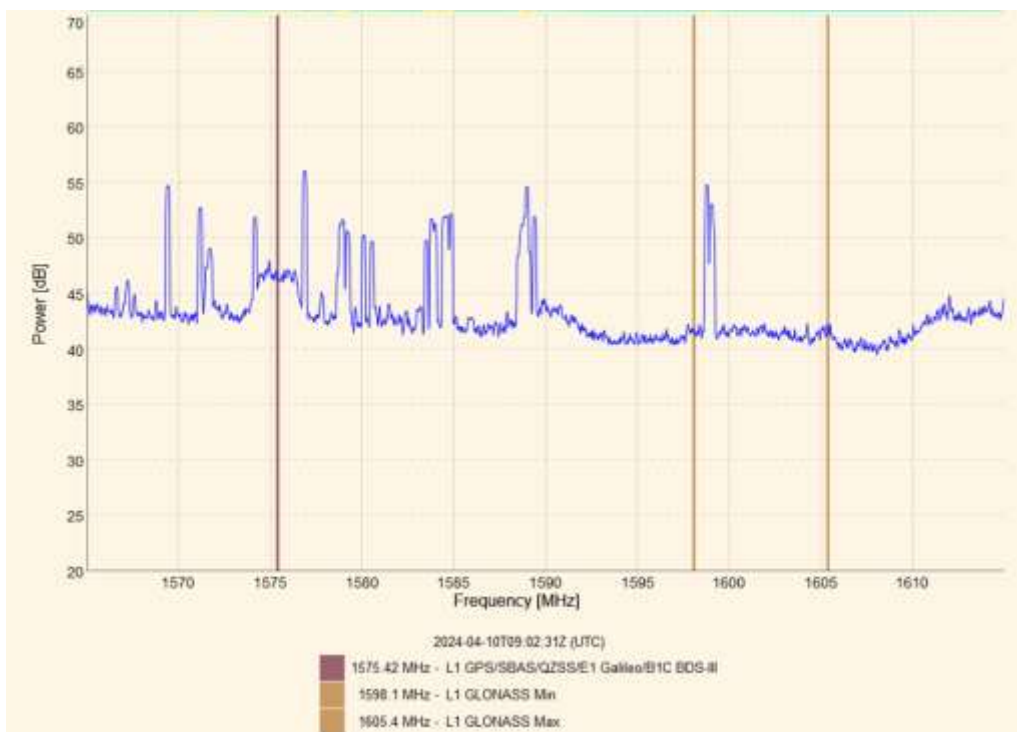
V sprejemnikih Trimble so na voljo trije načini filtriranja, in sicer:

- brez uporabe sit (ang. *No Filtering*): v tem načinu spektralni analizator na zaslon posreduje surove vzorčene podatke brez uporabe sit. To je uporabno, ko želimo natančno analizirati celoten frekvenčni spekter, vključno z morebitnim šumom, harmoniki in drugimi komponentami signala. Uporaba možnosti “No Filtering” je primerna, kadar želimo imeti popoln pregled signalov, ne da bi jih omejevali s siti ali z drugimi obdelavami (Slika 22).



Slika 22: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy brez uporabe sit.

- b) Način *Max hold*: ko sprejemnik deluje v tem načinu, prikazuje najvišje vrednosti s posameznega intervala, tako da se prikaz vrši trajno, oziroma do ponovnega zagona risanja spektra. To je uporabno pri ugotavljanju prisotnosti hipnih motilnih signalov, ki se navadno pojavljajo v obliki kratkih impulzov (Slika 23).

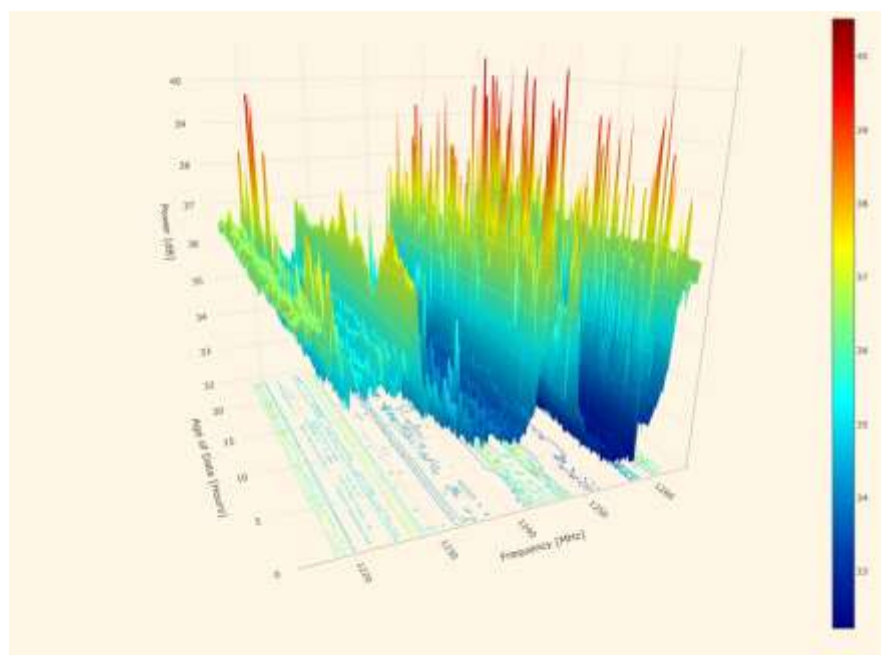


Slika 23: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy, način "Max hold".

- c) Filtrirana izbrana datoteka (ang. *Filtered Select File*) je privzeti način prikaza. Za filtriranje signalov s FFT se uporablja video sito (nizkoprepustno sito po detektorju moči). Če uporabimo možnost »Ponastavi sito« (ang. *Reset Filter*), se vrednost tekočega povprečja za vsako točko spektra ponastavi na začetno vrednost in proces steče od začetka. Najprej opazimo veliko varianco signala, ki se s časom skoraj povsem izniči. Spekter lahko spremljamo v realnem času (Slika 24). Lahko hranimo tudi podatke za nazaj; datoteke so organizirane po dnevih in frekvenčnih pasovih. Grafični izrisi se lahko shranjujejo tudi za določeno obdobje v dnevnih datotekah (Slika 25). Spektri so določeni posebej za posamezne signale oziroma frekvenčna območja (Preglednica 2).



Slika 24: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy, način "Filtered".



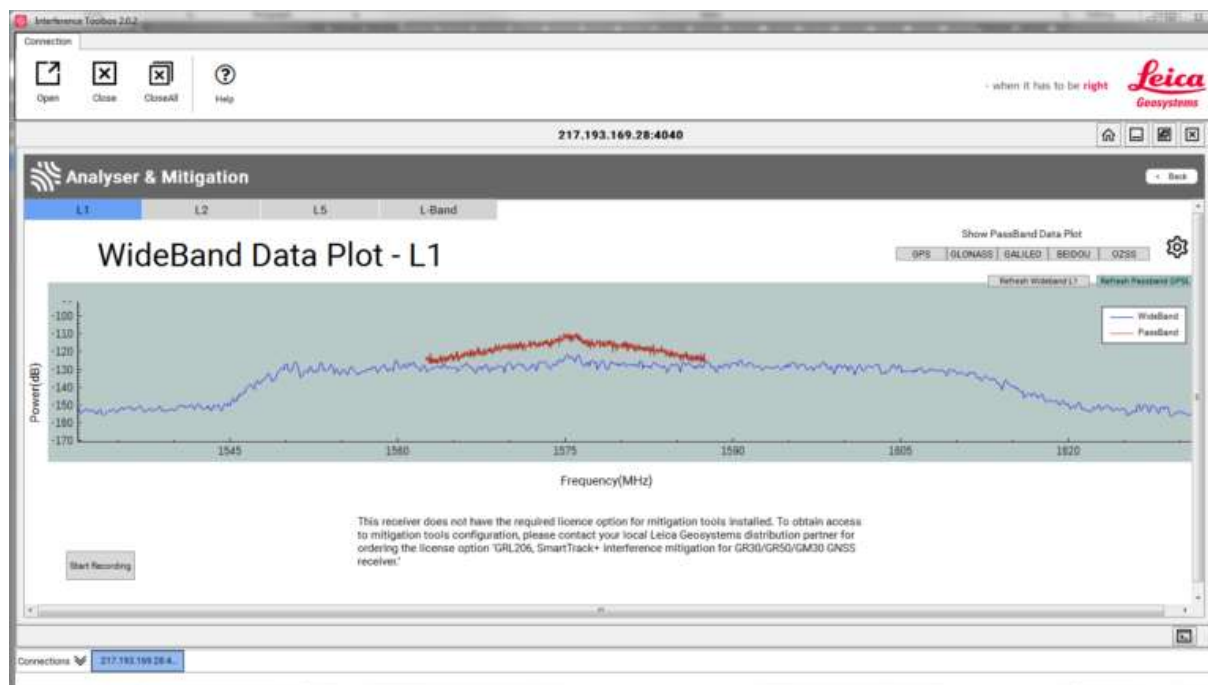
Slika 25: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy Spekter za celoten dan (Trimble Alloy).

Preglednica 2: Lastnosti prikaza motenj na posameznih frekvencah [32].

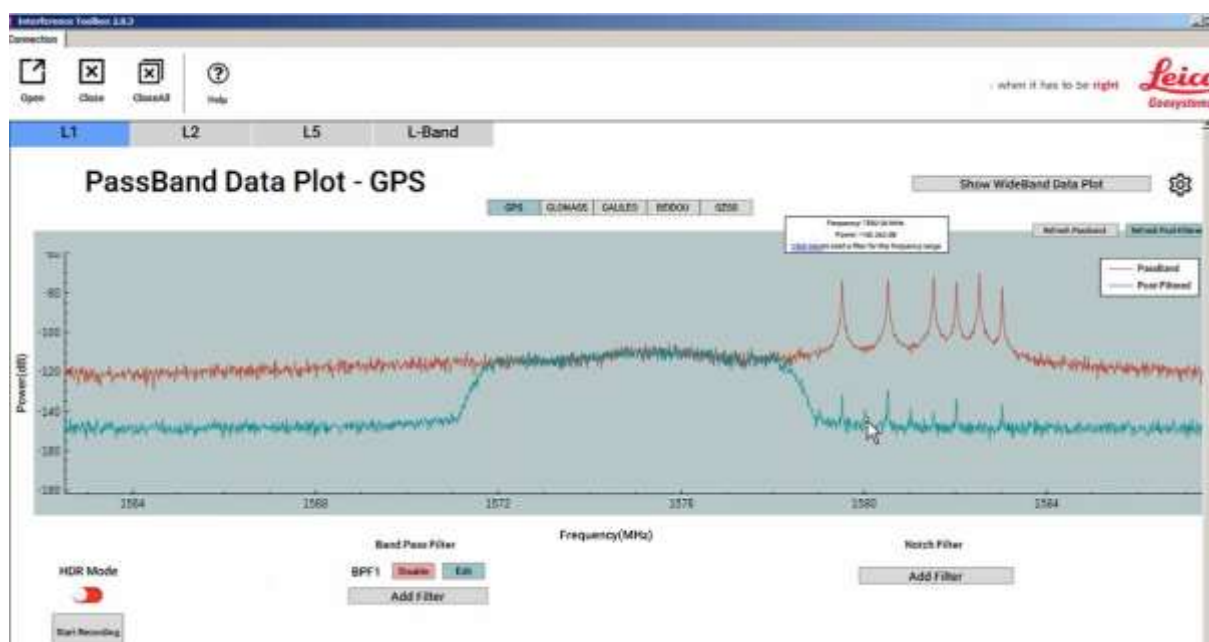
Band	Start	Stop	BSW	Center	Signals
L1	1.5650 GHz	1.6150 GHz	50.0000 MHz	1.5900 GHz	L1 GPS SBAS/QZSS/E1 Galileo (1575.42 MHz) L1 GLONASS Min (1598.1 MHz) L1 GLONASS Max (1605.4 MHz)
L2	1.2150 GHz	1.2650 GHz	50.0000 MHz	1.2400 GHz	L2 GPS/QZSS (1227.6 MHz) L2 GLONASS Min (1242.9 MHz) L2 GLONASS Max (1248.6 MHz)
L5	1.1650 GHz	1.2150 GHz	50.0000 MHz	1.1900 GHz	L5 GPS/QZSS SBAS/IRNSS E5A Galileo (1176.45 MHz) E5B Galileo/B2 BeiDou-II (1207.6 MHz) E5 AltBOC Galileo (1191.795 MHz) G3 GLONASS CDMA (1202.025 MHz)
E6	1.2550 GHz	1.3050 GHz	50.0000 MHz	1.2800 GHz	E6 Galileo/LEX QZSS (1278.75 MHz) B3 BeiDou-II (1268.52 MHz)
B1	1.5250 GHz	1.5750 GHz	50.0000 MHz	1.5500 GHz	B1 BeiDou-II (1561.098 MHz)
S1	2.4780 GHz	2.5280 GHz	50.0000 MHz	2.5030 GHz	IRNSS S BAND (2492.028 MHz)
MSS	1.525 GHz	1559 MHz	50.0000 KHz		MSS - The MSS spectrum start/stop are changed depending on the MSS downlink that the receiver is set to track. The receiver can receive MSS signals anywhere in the 1525 - 1559 MHz MSS band; only a 50 KHz spectrum is shown around the desired signal.

1.1.2 Spektralni analizator v sprejemnikih Leica Geosystems

Proizvajalec Leica Geosystems nudi grafično orodje *Leica RefWorx Interference Toolbox* za hitro in preprosto določitev, ali je v signalnem pasu GNSS prisoten moteči signal. Izboljšana tehnologija *Leica Smart Track+*, predstavljena leta 2018, omogoča nenehno spremljanje radio-frekvenčnega (RF) spektra znotraj in okoli pasov signalov GNSS. Vključujejo jo sprejemniki GR20, GR30 in višje različice (GR50). Rešitev je zasnovana tako, da samodejno zazna in opozori na morebitne moteče signale. V kolikor imajo sprejemniki odprto možnost spremljanja RF-spektra, lahko informacije shranjujejo tudi za naknadno obdelavo (Slika 26, Slika 27).



Slika 26: Leicino orodje *Interference ToolBox*; slika prikazuje spekter signalov GPS na območju L1 brez prisotnih motenj in brez uporabljenih sit.



Slika 27: Leicino orodje *Interference ToolBox*; signal. Uporabljeno sito (modro) za odstranitev motečih signalov nad 1580 MHz.

Ker imajo motnje lahko znano nosilno frekvenco in pasovno širino ali spremenljivo nepredvidljivo obnašanje, mora sprejemnik GNSS ponujati različne metode za ublažitev motenj, da lahko onesposobi različne vrste motečih signalov. Poleg spektralne analize frekvenčne moči orodje omogoča postopno izločevanje motenj, in sicer:

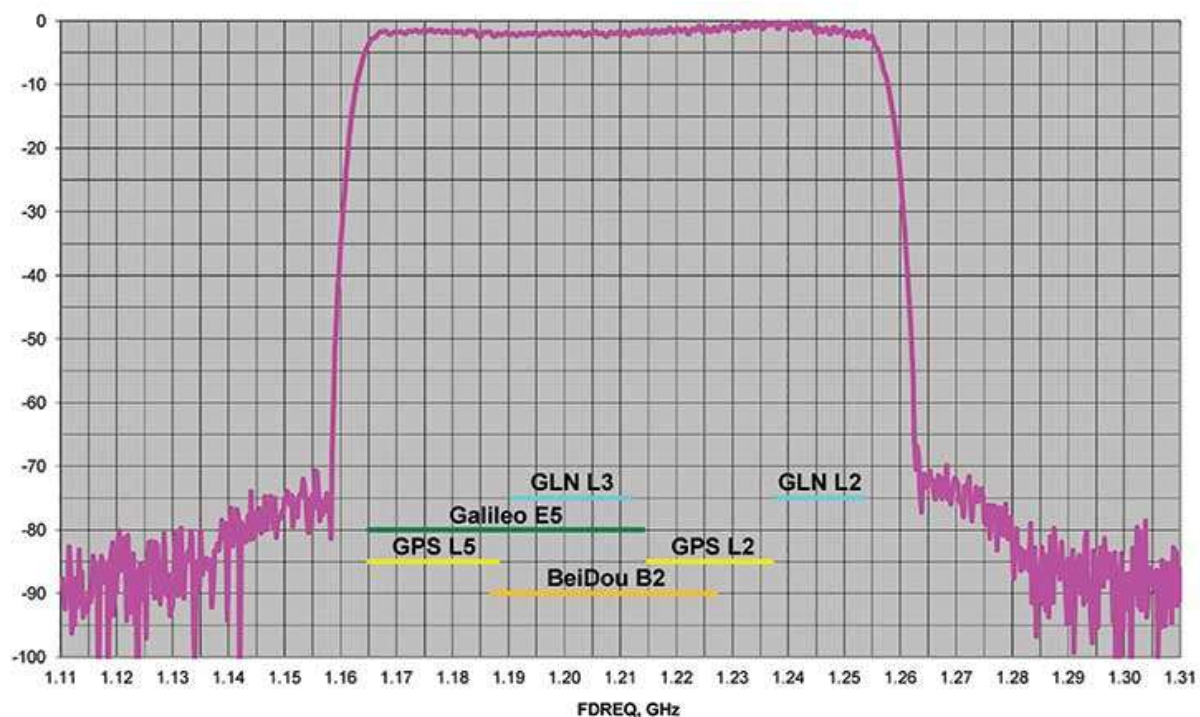
- a) z visokim dinamičnim razponom (ang. *High dynamic range* – HDR), ki izvaja širokopasovno ublažitev,
- b) s pasovno prepustnimi siti (ang. *Band-pass filter*) in
- c) s prilagodljivimi ozkimi pasovno zapornimi siti (ang. *Adaptive notch filter*).

1.2 Pregled možnosti ocene motenj z geodetskimi sprejemniki (Naloga 1.2)

V tem delu študije smo se omejili na nabor sprejemnikov treh proizvajalcev, to so Trimble Inc. (Sunnyvale, ZDA), Javad GNSS Inc. (San Jose, ZDA) in Leica Geosystems AG (Heerbrugg, Švica), ki jih v Sloveniji geodetski izvajalci najpogosteje uporabljajo za terensko izmero in niso nameščeni na stalnih postajah omrežja SIGNAL ali 0. red.

1.2.1 Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Javad Inc.

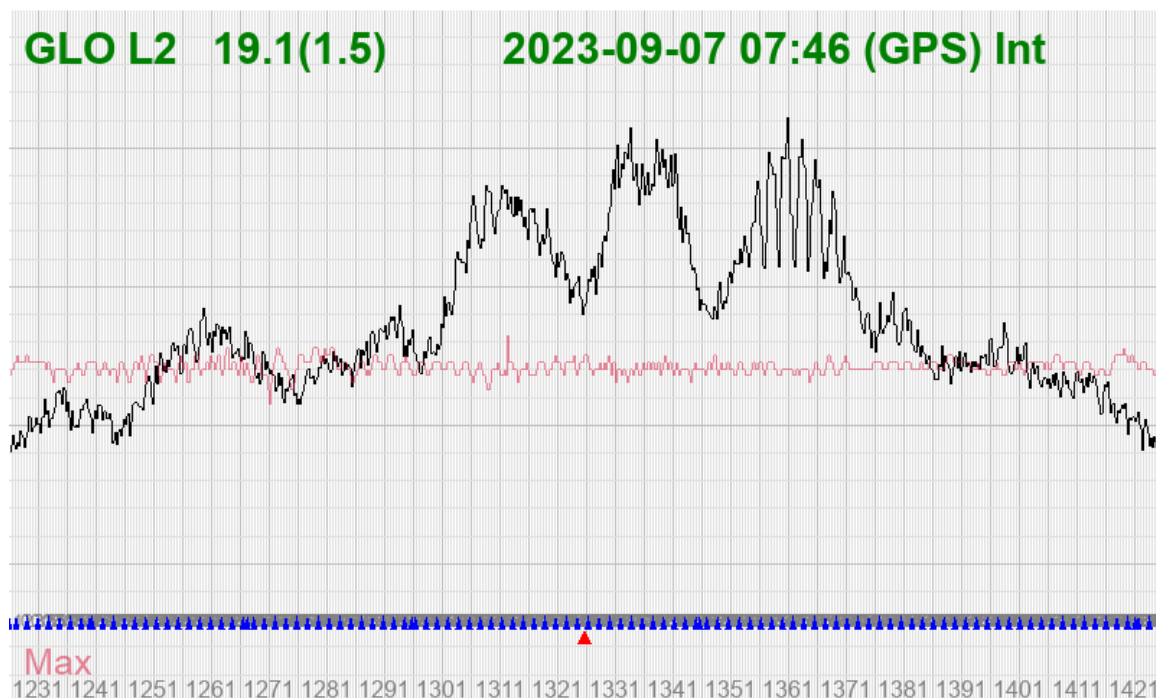
Prvi proizvajalec sprejemnikov GNSS, ki je že v letu 2012 omogočil širšemu krogu geodetskih uporabnikov možnost spremljanja spektra signalov GNSS, je bil Javad GNSS Inc., ki je predstavil sprejemnike Javad Triumph-VS, Javad Triumph-LS in Javad Triumph-LSA. Sprejemniki omogočajo grafično in numerično spremljanje kakovosti signalov in določitev motenj v realnem času; za to imajo namenjenih več kot 100 kanalov. Sprejemniki proizvajalca Javad vsebujejo sito, imenovano J-Shield, ki onemogoči sprejem motečih signalov, ki so blizu frekvenčnih območij signalov GNSS (Slika 28). Gre za oster rob 10 dB/kHz, ki zagotavlja do 100 dB zaščite.



Slika 28: Screenshot v sprejemnikih Javad Inc, J-Shield [33].

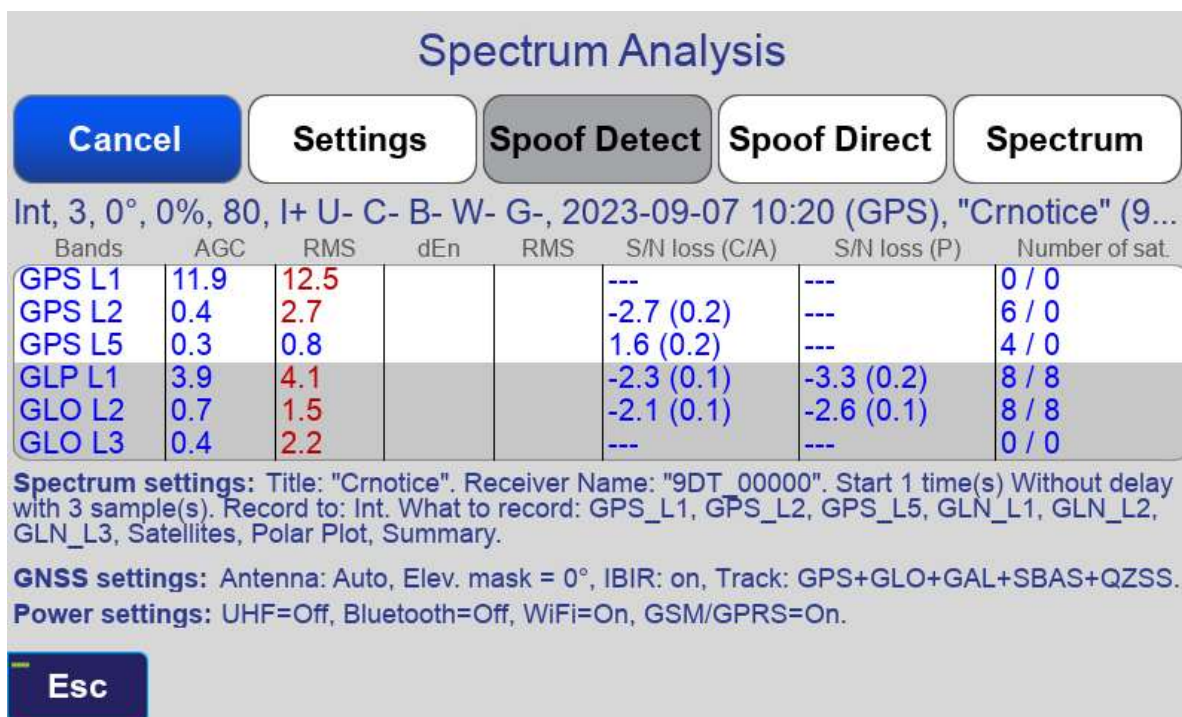
Sprejemniki Javad Triumph so bili prvi na tržišču sprejemnikov GNSS za geodetsko rabo, ki so omogočali spremljanje spektrov signalov GNSS (Slika 29) v realnem času ter vpogled v numerične vrednosti ojačevanja signalov.

43



Slika 29: Spektralni analizator v sprejemniku Javad Triumph-LS – grafična predstavitev.

Poleg spremljanja spektra se v sprejemniku Javad Triumph beleži tudi avtomatska kontrola ojačenja (AGC), ki je dodaten kazalnik neženih zunanjih signalov (Slika 30).



Slika 30: Spektralni analizator v sprejemniku Javad Triumph-LS – numerični izpis avtomatske kontrole ojačenja (AGC) signalov.

1.2.2 Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Leica Geosystems

44

Proizvajalec Leica Geosystems AG (Heerbrugg, Švica) omogoča celostno spremljanje motenj na stalnih postajah. Serija sprejemnikov Leica GR/GM s sistemom RefWorkx 4.20 ublaži motnje signala, da lahko stalne postaje delujejo neprekinjeno tudi v zahtevnih radio-frekvenčnih okoljih. Pri sprejemnikih, ki jih uporabljamo za terensko izmero GNSS, pa lahko o pojavu motenj sklepamo le na osnovi vrednosti SNR (Slika 31).



Slika 31: Spremljanje vrednosti SNR v realnem času (sprejemnik Leica GS18T).

Čeprav nimamo direktnega vpogleda v signale, ki so obdelani z vgrajenimi siti, proizvajalec zagotavlja zanesljivo sledenje signalom GNSS z vgrajenimi siti.

1.3 Pregled zaznave motenj z drugimi sprejemniki (Naloga 1.3)

Od leta 2018 se čedalje bolj pogosto za določanje položaja in navigacijo uporabljajo nizko-cenovni sprejemniki GNSS. Sprejemniki proizvajalca u-blox (Švica) in Septentrio (Leuven, Belgija) omogočajo vpogled v spekter opazovanj, če to v programu (za u-blox se uporablja program u-center, za Septentrio pa Mosaic RX Toolbox) ustrezno nastavimo.

1.3.1 Spremljanje spektra v sprejemniku u-blox ZED-F9P

Za izvajanje spremljanja spektra in ustrezno nastavitvev lahko uporabimo programsko opremo u-center. Ta programska oprema omogoča uporabniku, da spreminja različne nastavitve sprejemnika, vključno s spremljanjem spektra (Slika 34). Natančna navodila za izvedbo spremljanja spektra in nastavitvev v programski opremi u-center se lahko razlikujejo glede na različico programske opreme in sprejemnika.

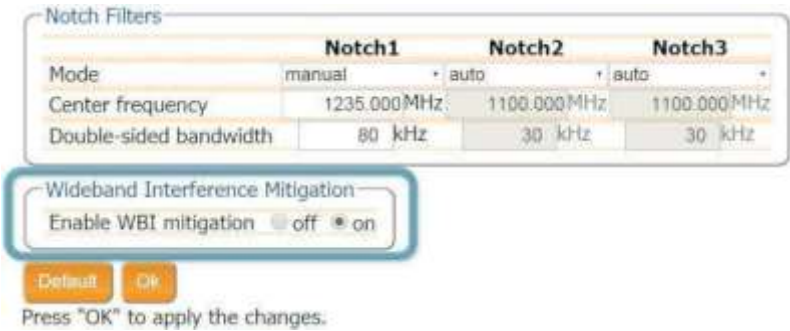


Slika 34: Spremljanje spektra signalov GNSS v realnem času s sprejemnikom ZED-F9P, program u-center.

1.3.2 Spremljanje spektra v sprejemniku Septentrio Mosaic x5

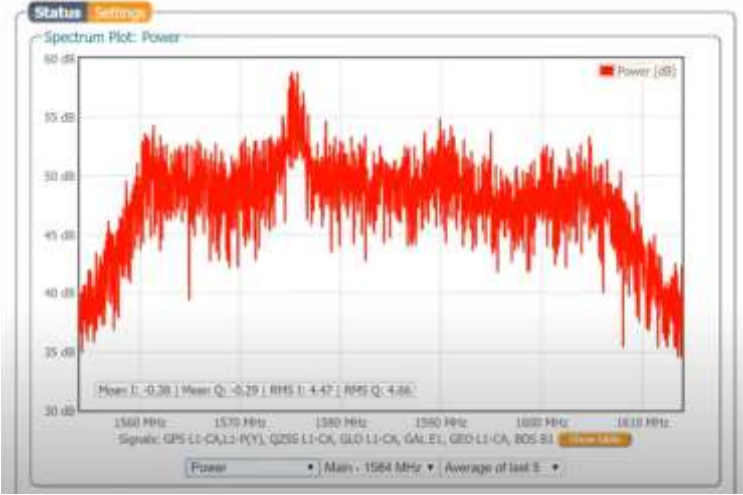
Sprejemnik Septentrio Mosaic x5 je po navedbah proizvajalca opremljen z algoritmi za prepoznavanje motenj signala in lažnih sporočil, čeprav metode podrobno niso znane. Septentrio sprejemniki GNSS imajo napredno tehnologijo odkrivanja motenj AIM+ (ang. *Advanced Interference Monitoring and Mitigation*). Izris spektrov signalov omogoča spremljanje motenj. Nekateri sprejemniki imajo možnost, da je v grafičnem okolju takoj razvidno, ali so prisotne motnje ter lažni signali. Tehnologija AIM+ zaznava in nevtralizira motnje, kar krajša čas izpada signalov. Sprejemnik ščiti pred preprostimi ozkopasovnimi in kompleksnejšimi širokopasovnimi motnjami, vključno z namernim motenjem signalov in lažnimi signali. Spletni vmesnik sprejemnika omogoča analizo motenj s spektralno analizo, da glede na obliko spektra določimo vrsto motenj in njihov morebitni izvor.

Ozkopasovne motnje GNSS/GPS lahko povzročajo elektronske naprave in vplivajo le na majhen del frekvenčnega spektra GNSS. Za ublažitev učinkov ozkopasovnih motenj lahko v samodejnem ali ročnem načinu nastavimo tri ozka pasovno-zaporna sita (ang. *Notch filters*). Ta ozka sita učinkovito odstranijo ozek del radio-frekvenčnega spektra okoli motečega signala. Pas L2, ki je odprt za uporabo radioamaterjem, je še zlasti občutljiv na tovrstne motnje. Učinke širokopasovnih motenj, tako namernih kot nenamernih, je mogoče ublažiti z vklopom sistema za ublažitev širokopasovnega sistema za zmanjšanje motenj (ang. *Wideband Interference –WBI*). Sistem WBI prav tako učinkoviteje kot tradicionalno uporabljene metode zmanjšuje učinke impulznih motenj.



Slika 35: Prilagodljiv sistem za zmanjšanje širokopasovnih motenj; možnost uporabe ali izključitve sit v sprejemnikih Septentrio.

Z motnjami neobremenjeni signal ima vrh okoli 1575,42 MHz, kjer je skoncentrirana večina energije (Slika 36). V sprejemniku lahko spremljamo spektre različnih signalov, ki se nahajajo na različnih frekvenčnih območjih (Slika 37).

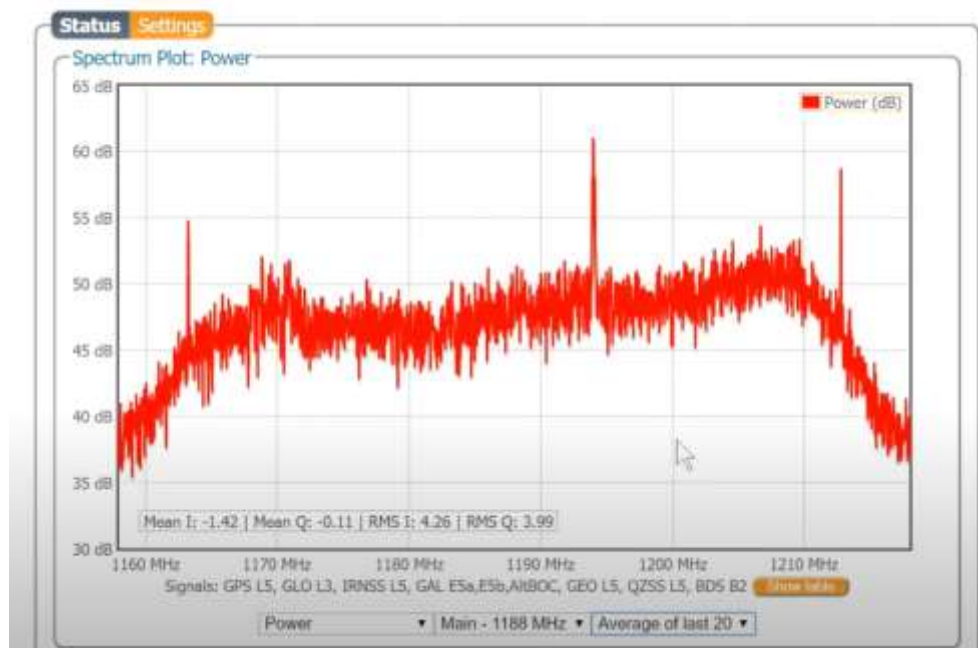


Slika 36: Spekter signalov na L1, ki ni obremenjen z motnjami. Prilagodljiv sistem za zmanjšanje širokopasovnih motenj; možnost uporabe ali izključitve sit – izris.



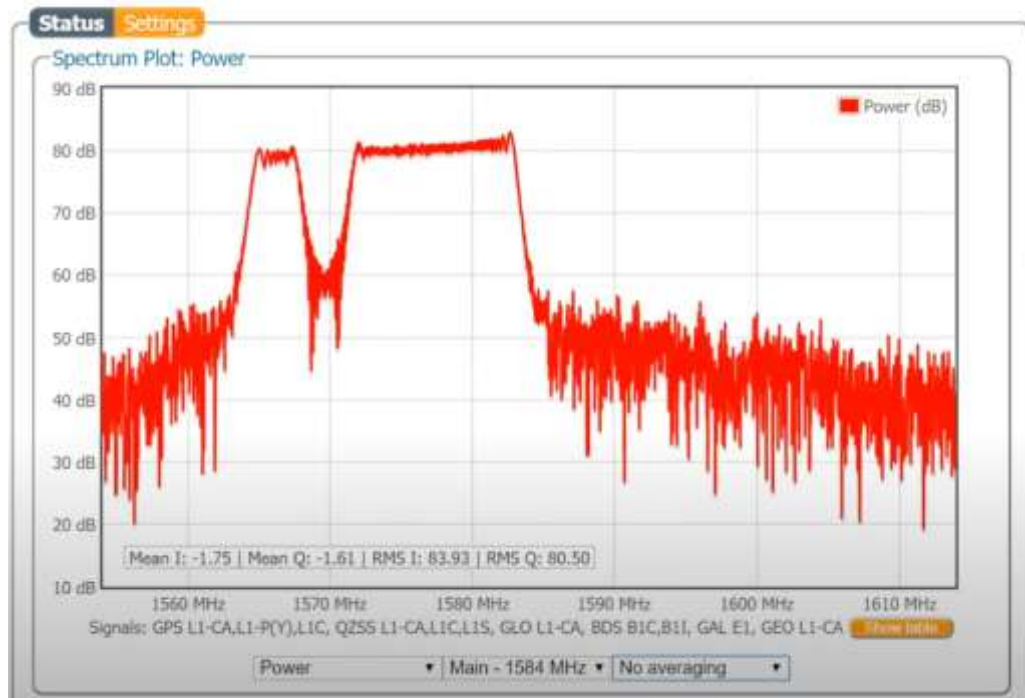
Slika 37: Izbor signalov, kjer nas zanima spekter signalov.

Na osnovi oblike spektra lahko opredelimo tudi način motnje signalov GNSS, kot je primer motenj signalov v bližini letališč (Slika 38) ali pa namernih motenj s preletnim signalom (ang. *chirp jammer*) (Slika 39) [34].



Slika 38: Spekter signalov ob prisotnosti naprav v bližini letališč.

48



Slika 39: Spekter signalov ob prisotnosti motilnika s preletnim signalom (ang. *Chirp jammer*).

Težava pri spremljanju spektrov s sprejemniki Septentrio je v tem, da moramo na terenu imeti dostop do interneta, saj izvajamo spektralno analizo lahko le v aplikaciji, ki dela v oblaku in po nam znanem vedenju ni nameščena v sprejemniku.

2 Razvoj metodologije ugotavljanja motenj in nadzora kakovosti opazovanj GNSS

Glavne naloge drugega vsebinskega sklopa so:

- Naloga 2.1: Izdelava obrazca za vodenje meta-podatkov o scenarijih testiranj
- Naloga 2.2: Opredelitev metodologije ocene kakovosti opazovanj GNSS
- Naloga 2.3: Opredelitev načrta arhiviranja podatkov s poimenovanjem datotek RINEX
- Naloga 2.4: Predlog poročila rezultatov testiranja motilnikov v laboratoriju in na terenu
- Naloga 2.5: Načrt izvedbe testov
- Naloga 2.6: Izbor testnih območij in opreme za testiranje

V tem poglavju predstavljamo koncepte, na osnovi katerih bomo zasnovali vpliv nenamernih in namernih motenj na kakovost sprejema signalov in nadaljnjo določitev položaja. Pri tem je pomembno, da ustrezno pripravimo načrt za terensko delo in uporabimo ustrezno metodologijo za oceno kakovosti opazovanj GNSS ter arhiviranje podatkov.

Pri predhodni pripravi se bomo omejili na bistvene postavke izvedbe testov meritev in jih sistematično opisali v obrazcu, ki se nanaša na predhodno pripravo terenskih meritev. Po končani izmeri bomo podrobno izdelali terenski obrazec, ki bo skladen z arhiviranimi meritvami (datoteke RINEX iz sprejemnikov). Poročilo rezultatov testiranj je ključno pri razumevanju nadaljnjih raziskav konceptov. Iz laboratorijskih meritev in meritev na terenu bomo pridobili informacije predvsem o frekvenčnem spektru delovanja posameznih motilnikov.

Načrti izvedbe testov in izbor testnih območij ter opreme za testiranje bodo ključni za uspešno izvedbo nalog v tem sklopu. Izbor testnih območij in lokacij testiranj bomo naredili v skladu z informacijami, ki smo jih ali jih bomo še pridobili od geodetskih izvajalcev, in se navezujejo na težave v določanju položaja.

2.1 Izdelava obrazca za vodenje meta-podatkov o scenarijih testiranj

Predhodno planiranje izmere je ključnega pomena, zato smo od ideje izdelave obrazca terenskih meritev prešli dodatno k ideji izdelave obrazca, ki bo vzpostavljen pred samo izmero (Slika 40). Na osnovi tega bo lažje izvesti terenske meritve, še posebej v primeru večjega števila nalog in operaterjev na terenu. S tem bomo zagotovili boljšo organizacijo, natančnost in učinkovitost izvajanja terenskih dejavnosti.

Obrazec predhodne priprave na terensko izmero (Slika 40.a) bo med drugim vseboval:

- a) lokacijo, datum in uro meritev,
- b) namen dela in prisotne operaterje na terenu,
- c) kontaktno osebo državne ali druge službe, kjer izvajamo izmero in
- d) predlog uporabljenega instrumentarija z opisom lastnosti,
- e) način izvedbe izmere GNSS, in sicer:
 - statična, kinematična izmera ali njuna kombinacija,
 - izmera v realnem času z navezavo na omrežje (uporaba mrežnih protokolov), ali naknadna obdelava meritev.

Care4SIGNAL – Ocena tveganja motenj signalov GNSS v slovenskem državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL

PREDHODNA PRIPRAVA NA TERENSKO IZMERO

Datum sestanka pred terenom	
Delovišče	
Datum in ura prihoda na teren	
Kontaktna oseba z AKOS-a	
Namen	
Prisotni na terenu	
Uporabljeni motilniki	
Uporabljeni sprejemniki GNSS in tipi anten	
Uporabljeni spektralni analizatorji	

Plan scenarijev meritev

Številka scenarija	Postavitev sprejemnikov GNSS (statično, kinematično)	Uporabljeni motilniki/spektralni analizatorji	Opis
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			

Care4SIGNAL – Ocena tveganja motenj signalov GNSS v slovenskem državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL

TERENSKI ZAPISNIK

Delovišče	
Datum	
Ura začetka izmere (lokalni čas)	
Ura konca izmere (lokalni čas)	
Namen	
Prisotni na terenu	
Uporabljeni motilniki	
Uporabljeni sprejemniki GNSS	
Uporabljeni spektralni analizatorji	

Opis scenarijev meritev

Zaporedna številka	Pričetek	Konec	Opis

Priloge

Terenska slika celotnega delovišča

Terenska slika (podrobneje) - motilniki

Terenska slika (podrobneje) – spektralni analizator

Terenska slika (podrobneje) – sprejemniki GNSS

Slike/skenogrami zapisov s terena

(a)
(b)

Slika 40: Obrazec planiranja izmere (a) in obrazec, ki ga bomo v celoti izpolnili po terenskem delu (b).

Terenski zapisnik bo v celoti izdelan po opravljenih meritvah, in bo vključeval tudi:

- slike s terena za vso mersko opremo, ki jo bomo uporabili in
- slike ali skenogrami zapisov s terena.

2.2 Opredelitev metodologije ocene kakovosti opazovanj GNSS

Metodologija ocene kakovosti opazovanj GNSS bo temeljila na več merskih veličinah ter različnih konceptih ugotavljanja motenj v signalih GNSS, odvisno od zmožnosti sprejemnikov GNSS. Kot metriko kakovosti signalov bomo uporabili:

- časovno spremljanje spremembe koordinat stalne postaje glede na referenčne vrednosti,
- časovno spremljanje signala glede na njegovo razmerje signal-šum (SNR) oziroma razmerje med nosilnikom in šumom (C/N0),
- časovno spremljanje spektrov signalov GNSS na različnih frekvenčnih območjih.

Zgornje metrike bomo uporabili tako v realnem času kot tudi v naknadni obdelavi arhiviranih opazovanj; v sprejemnikih bo treba ustrezno nastaviti možnost istočasnega shranjevanja surovih opazovanj in rezultatov spektralne analize.

Predhodno bomo izbrali območje izmere, kjer bodo lokalni vplivi na izvedbo opazovanj GNSS, to je prisotnost ovir sprejema signala ali možnosti odboja opazovanj od objektov kot tudi od vodnih površin, čim manjši.

2.2.1 Naknadna obdelava opazovanj in meritev

Naknadna obdelava opazovanj iz datotek RINEX lahko poteka na osnovi:

- a) enournih (ali krajših) datotek opazovanj,
- b) dnevnih datotek opazovanj.

Iz obdelave opazovanj GNSS predvsem krajšega časovnega intervala se lahko motnje ugotavljajo na dva načina:

- a) iz sprememb koordinat točk v omrežju,
- b) iz grafičnega pregleda vrednosti *SNR* za vsak posamezen satelit in primerjavo vrednosti s predvidenimi,
- c) iz pregleda vidnosti satelitov, od katerih smo sprejeli opazovanja, in z oceno, ali je bilo v danem trenutku mogoče sprejemati signale s teh satelitov.

Zaznavanje motenj na osnovi izračuna koordinat je sicer manj zanesljivo, vendar gre že za ustaljen postopek obdelave opazovanj GNSS v omrežju. Zaznavanje motenj na osnovi pregleda in ocene faktorja *SNR* pa je precej bolj kompleksno in v primeru lažnih signalov tudi ne tako zanesljivo. V situacijah namernih motenj z lažnimi signali je pod drobnogled potrebno vzeti celotno zbirko datotek RINEX (tako opazovanja kot navigacijska sporočila) in iz teh presoditi, ali so opazovanja v datotekah RINEX pristna. To bi bilo treba narediti na osnovi predhodne priprave vidnosti satelitov GNSS (iz almanaha izračunani približni višinski koti in azimuti) in jih primerjati z dejansko pridobljenimi opazovanji. Ker je postopek zelo kompleksen, bomo v tem delovnem sklopu večinoma izpopolnjevali konceptualni model naknadne obdelave opazovanj za zaznavanje motenj.

51

V danem projektu bomo za izbrani niz opazovanj (dnevna datoteka določene stalne postaje) GNSS pokazali smiselnost zaznavanja motenj na osnovi:

- a. dnevnega spektra signalov GNSS;
- b. spremljanja sprememb vrednost *SNR*;
- c. spremljanja sprememb koordinat točk (za krajše in daljše izseke).

Na osnovi testa se bomo lahko odločili o optimalni izbiri postopka, ki bi ga v prihodnosti bilo smiselno uporabiti v omrežjih SIGNAL in 0. red.

2.3 Opredelitev načrta arhiviranja podatkov s poimenovanjem datotek

Opazovanja izmer s sprejemniki GNSS bomo shranjevali v:

- a) binarnem formatu zapisa opazovanj in/ali
- b) v datotekah RINEX.

Binarni zapisi (npr. T04 format sprejemnikov Trimble Inc., *.UBX format sprejemnikov u-blox, *.SBF sprejemnikov Septentrio Mosaic) vsebujejo tudi informacije o signalih, ki jih nadaljnja pretvorba v format RINEX ne vključuje več. Po drugi strani pa so datoteke z opazovanji formata RINEX (tj. *.yyO) bolj enostaven vir za pridobitev vrednosti *SNR* za posamezne satelite. Če te vrednosti povezujemo z vrednostmi, odvisnimi od višinskega kota, so ključne tudi navigacijske datoteke.

Poimenovanje datotek RINEX bo sledilo poimenovanju, ki ga opredeljujejo različice formata od 3 naprej, in sicer:

nnnnMRCCC_S_YYYYDDDHMM_PPU_FFU_CT.fmt[.cmp]

Preglednica 3: Arhiviranje opazovanj - Poimenovanje datotek RINEX

znak	opis
nnnn	4 znaki za ime točke
M	številka stebra (načina postavitve – (ang. Monument – M). Trenutno se uporablja samo (0)
R	Številka sprejemnika. Trenutno se uporablja samo (0).
CCC	ISO-kratica države
S	vir podatkov: “R” = sprejemnik (ang. <i>receiver</i>); “S” = pretok podatkov (ang. <i>stream</i>); “U” = neznano (ang. <i>unknown</i>)
YYYY	4-mestno število za leto prve epohe podatkov v datoteki
DDD	3-mestno število za dan v letu (ang. <i>Day-of-Year</i> – DOY), vključno z vodilnimi ničlami; gre za prvi trenutek (epoho) podatkov v datoteki
HH	2-mestno število za ure (vključno z vodilno ničlo) prve epohe podatkov v datoteki (čas GPS)
MM	2-mestno število za minute (vključno z vodilno ničlo) prve epohe podatkov v datoteki (čas GPS)
PP	2-mestno število za obdobje datoteke (vključno z začetno ničlo)
U	Enote periode (ang. <i>Units of period</i>) “M” = min; “H” = hour; “D” = day; “Y” = years; “U” = unspecified
FF	2-mestni indikator intervala registracije opazovanj (vključno z vodilno ničlo) “C” = 100Hz; “Z” = Hz; “S” = sec; “M” = min; “H” = hour; “D” = day; “U” = unspecified
C	konstelacija (ang. <i>Constellation indicator</i>) “M” = mixed; “G” = GPS; “E” = Galileo; “R” = GLONASS; “C” = BeiDou; “J” = QZSS; % ni mogoče v Sloveniji “I” = IRNSS; % ni mogoče pridobiti v Sloveniji “S” = SBAS
T	indikator tipa podatkov v datoteki. “O” = opazovanja (ang. <i>observations</i>); “N” = navigacijska datoteka (ang. <i>navigation</i>); “M” = meteorološki podatki (ang. <i>meteo</i>)
fmt	indikator formata datoteke. “rnx” = RINEX; “crx” = Hatanaka - stisnjen RINEX
cmp	[opcijsko] Metoda komprimiranja podatkov “zip”, “gz”

Primer:

Za točko FGG3, ki se nahaja v Sloveniji, smo s sprejemnikom pridobili opazovanja 1. aprila 2024 (92. dan v letu) z začetkom ob 9:00 (GPS-čas), in sicer z intervalom registracije 30 s za 12 ur, tako da smo sprejemali signale vseh globalnih navigacijskih sistemov. Datoteka z opazovanj je dana v stisnjenem formatu RINEX in dodatno stisnjena v format ZIP.

FGG300SLO_R_20240920900_12H_30S_MO.crx.zip

Poimenovanja točk bodo uporabljena tako, da bo iz prvih treh ali štirih znakov že razvidno, na kateri lokaciji smo izvajali opazovanja, npr. CRN = Črnotiče, MALI = Malija, zadnji znak pa bo številka točke. Na mestu z oznako 'R' bomo v naših primerih pisali daljša imena sprejemnikov GNSS, saj bodo na istih lokacijah uporabljeni različni sprejemniki GNSS (Slika 41).



Slika 41: Oznake makrolokacij, kjer bomo izvajali meritve motenj signalov GNSS, bomo naredili kar na karti, kjer so vidne lokacije stalnih postaj GNSS SIGNAL in 0. red.

Posnetek motenj v realnem času bomo shranjevali v datotekah z enakim poimenovanjem kot datoteke RINEX, npr.:

FGG300SLO_R_202409200900_15MIN_1s.* (* je npr. mp4)

Povsem enako bo potekalo shranjevanje frekvenčnega spektra GNSS opazovanj, pridobljenega s spektralnimi analizatorji, pri čimer vrednost C v formatu zapisa označuje osrednjo frekvenco opazovanja in širino spektra, kjer velja:

Preglednica 4: Dopolnitev zapisa za arhiviranje sprejetega spektra radijskih spektralnih analizatorjev

C	Frekvenčni pas (ang. <i>Frequency band</i>) “F” = full: 1076 MHz – 1606 MHz; “1” = L1, E1, B1: Center – 1575.42 MHz, BW – 25 MHz “2” = L2: Center – 1227.60 MHz, BW – 21 MHz “3” = L5, B2a: Center – 1176.45 MHz, BW – 21 MHz “4” = G1: Center – 1601.99 MHz, BW – 8 MHz “5” = G2: Center – 1248.06 MHz, BW – 6 MHz “6” = G3: Center – 1202.03 MHz, BW – 21 MHz “7” = E5, B2, L5, G3: Center – 1191.80 MHz, BW – 41 MHz “8” = E6, B3: Center – 1278.75 MHz, BW – 41 MHz “9” = Poljubno, razvidno iz podatkov
---	---

Spekter bo zapisan v obliki datoteke .csv z dvema stolpcema, pri čimer bo prvi stolpec frekvenca v Hz, drugi stolpec pa moč v dBm. V glavi .csv datoteke bodo zapisane nastavitve spektralnega analizatorja, tj. model spektralnega analizatorja, širina med-frekvenčnega sita, širina video sita, vhodno slabljenje, uporaba predojačevalnika, uporabljen tip detektorja, čas enega preleta in število točk (preverjanje veljavnosti zapisa).

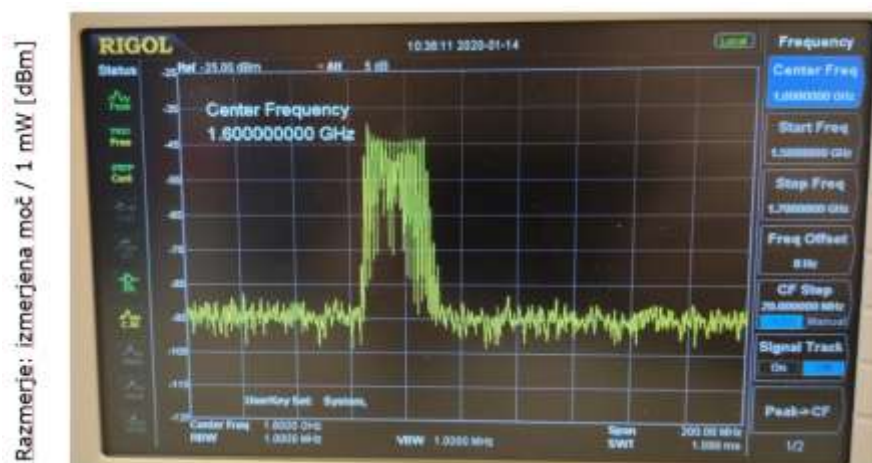


Slika 42: Primer prenosnega spektralnega analizatorja Rigol.

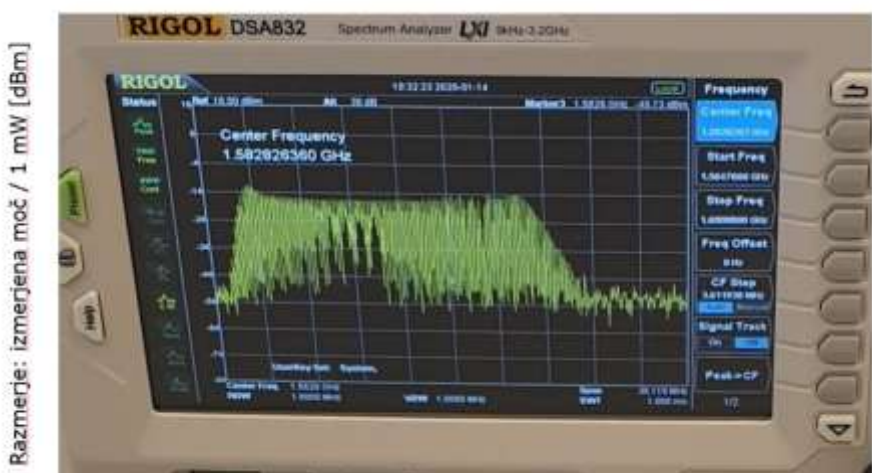
2.4 Predlog poročila rezultatov testiranja motilnikov v laboratoriju in na terenu

Motnje GNSS lahko uvrstimo med kibernetske varnostne pojave in jih lahko vzporejamo z bolj znanimi varnostnimi grožnjami, ki prizadenejo računalniške sisteme. Zaščita pred računalniškimi napadi je precej podprta z ukrepi za blažitev teh groženj. Osrednji del teh prizadevanj je razvoj resnično globalnega standarda za poročanje o zaznanih pojavih motenj, ki neposredno podpira tudi standarde za testiranje sprejemnikov. Ob zaznanih pojavih je zato eden od ukrepov izdelava podatkovnih zbirk za poročanje, ki naj bi neposredno podpirali standarde za testiranje sprejemnikov in pomagali razviti standarde preskušanja, ki bi na pregleden način ocenjevali delovanje sprejemnika v mejnih pogojih, ki še omogočajo uporabo GNSS, in v pogojih, ki je ne omogoča več [35].

Cilj aktivnosti DS2-4 je torej podati predloge za scenarije testiranja motilnikov z radijskimi frekvenčnimi spektralnimi analizatorji, in sicer tako v laboratoriju kot na terenu v času, ko bomo izvajali motenje sprejemnikov GNSS. Zabeleženi podatki bodo osnova za kasnejša sklicevanja operaterjev na dogodke. Zabeležene postopke meritev s posamezno napravo bo mogoče ponoviti, kar je bilo opravljeno na terenu seveda z zavedanjem, da so bile meritve opravljene v trenutnih satelitskih konstelacijah.



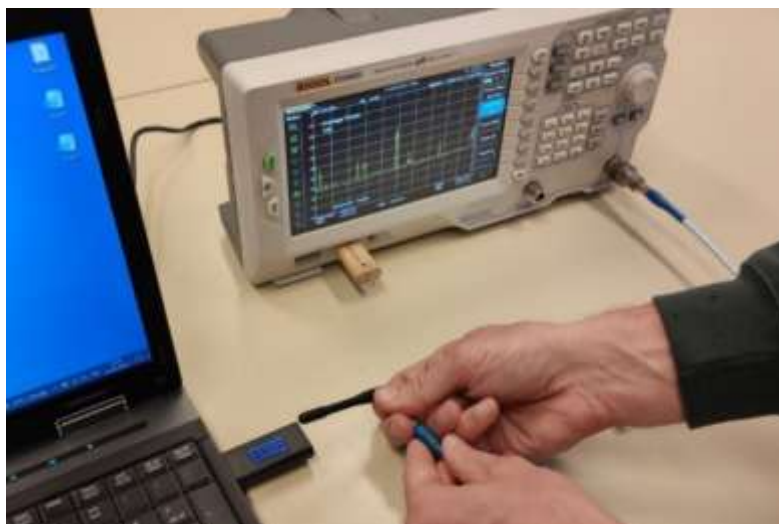
Slika 43: Prikaz trenutnih vrednosti signala motilnika z oznako Rušička na spektralnem analizatorju.



Slika 44: Prikaz trenutnih vrednosti signala motilnika z oznako Rušička na spektralnem analizatorju s spremenjeno centralno frekvenco, z večjo frekvenčno širino (span), s ovišano referenčno vrednostjo (Ref) in večjim slabljenjem (Att).

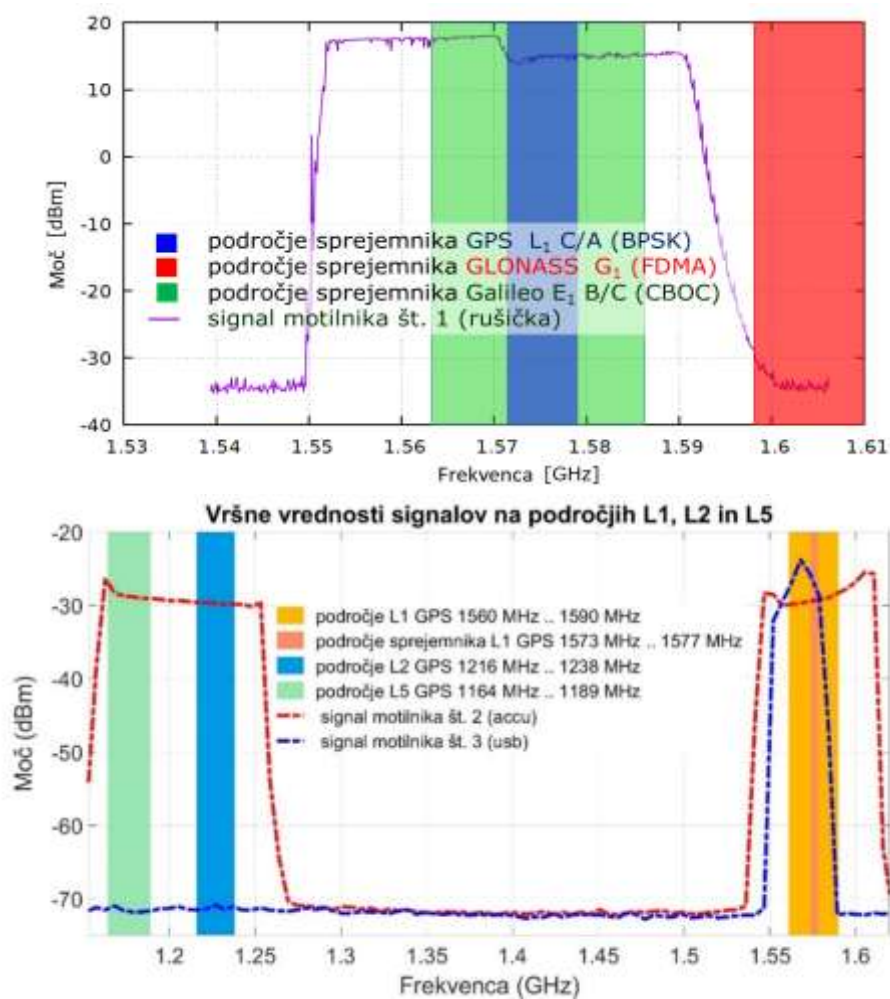
Za najbolj osnovni in za okolico popolnoma nezaznaven preizkus motilnikov beležimo signale motilnikov v nezašumljenem okolju laboratorija. Motilnike na spektralni analizator priključimo preko koaksialnega kabla in slabilnikov ter opazujemo signale na frekvenčnih področjih GNSS. Najprej pri izbranem zunanjem slabilniku in dodatnem slabljenju spektralnega analizatorja (Att) opazujemo trenutne vrednosti signalov (Slika 43). Pomembne nastavitve je po močnostni osi upoštevajoč Att predvsem referenčna vrednost (Ref), na katero je normirana skala. Po frekvenčni osi pa so pomembne:

- osrednja frekvenca (CF),
- začetna in končna frekvenca,
- nastavitev pasovne širine medfrekvenčnega sita (ang. *Resolution Bandwidth* – RBW),
- nastavitev nizkoprepustnega sita prikaza (ang. *Video Filter Bandwidth* – VBW) ter
- čas frekvenčnega preleta (SWT) (glej Slika 43, Slika 44).



Slika 45: Pripomočki za meritev moči motilnika z oznako usb na področjih L1, L2 in L5: spektralni analizator, kabel in paličasta antena.

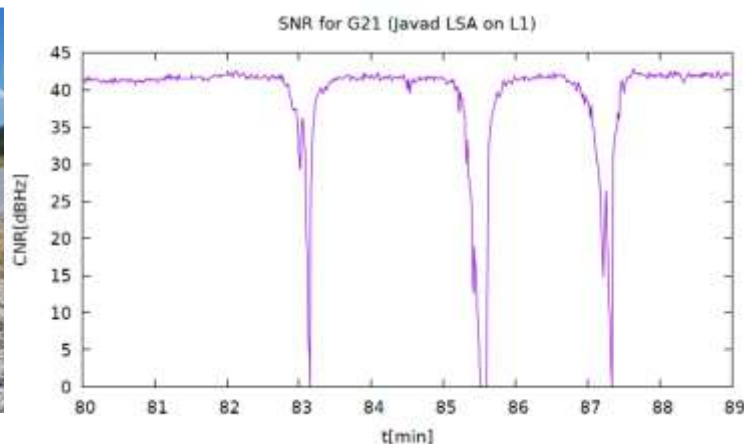
Pri izbrani razločljivosti spektralnega analizatorja lahko beležimo vršne moči in jih primerjamo s področji, v katerih sprejemniki GNSS dejansko delujejo (Slika 46).



Slika 46: Vršne vrednosti signalov pri nastavitvi Max hold na frekvenčnih področjih GNSS (zgoraj) motilnika št. 1 (Rušička) na področju L1, (spodaj) motilnikov št. 2 (accu) in št. 3 (usb) na področjih L1, L2 in L5.

Med terenskimi meritvami bomo, kot doslej, opazovali in beležili vplive vklopa (lastnih) motilnikov in vplive v času meritev še neznanih virov motenj.

Doslej smo pogosto opazovali vplive motenj na kakovost signalov, ki jih na področju GNSS sprejema sprejemnik. Kakovost sprejetih signalov ponazarja razmerje C/N0 oz. CNR med močjo nosilnega signala satelita in gostoto šuma, ki na področju sprejema nastaja v okolici sprejemnika (glej poglavje C 4.2).



Slika 47: (levo) V vozilu nameščeni motilnik povzroča kinematične motnje mirujočim obcestnim sprejemnikom, (desno) Značilni presihci povprečij CNR vseh trenutno zaznanih satelitov, posneti z geodetskim sprejemnikom Javad Triumph LSA pod vplivom motenj na področju L1, ki jih je povzročal motilnik v mimovozečem vozilu.

57

V naravnih okoljih pričakujemo omejeno ponovljivost opaženih vplivov glede na precej nadzorovan vnos nekontroliranih vplivov okolja v laboratoriju, saj na rezultate poleg nenehne spremenljivosti konstelacije satelitov in učinkov odbojev od okoliških objektov lahko nekontrolirano vplivajo tudi motnje neznanega izvora, naravnega ali umetnega. Informacijsko vrednost rezultatov s terenov močno izboljša dobra opredelitev dogodka (opis v poglavju 2.4.1) in ustaljenost poročanja o bistvenih ter zaželenih pogojih opravljanje meritev z razpoložljivo opremo (opisano v poglavju 2.4.2).

2.4.1 Opredelitev dogodka

Predlagamo poročanje o pojavih motenj v omrežju SIGNAL. Da bi lahko primerjali rezultate in statistične podatke, dobljene iz različnih omrežij za spremljanje motenj, je pomembno imeti skupno opredelitev, kaj je motenjski dogodek. Čeprav so merila za dogodek dobro opredeljena, na koncu občutljivost sistema za zaznavanje določa, kdaj je dogodek zaznan. V praksi obstajata dve definiciji pojava motenj, tip a in tip b, ki ju pogosto opredeljuje vrsta uporabljene opreme.

- Definicija dogodka **tipa a** je namenjena opremi za zaznavanje motenj, ki opredeljuje zaznan dogodek na podlagi spremljanja **moči sprejetega signala ali spremljanja AGC**. Če se vrednost AGC zmanjša, na primer za 5 dB, in to stanje traja vsaj pet sekund, se šteje, da je prišlo do pojava motnje.
- Definicija dogodka **tipa b** je namenjena opremi za zaznavanje motenj, ki opredeljuje zaznan dogodek na podlagi merjenja **razmerja med nosilnim signalom in šumom**

(C/N0), izmerjenega z notranjimi sprejemniki GNSS. Če je povprečni C/N0 za satelite, uporabljene pri izračunu položaja, na primer 10 dB manjši od pričakovanega C/N0 in če se to stanje nadaljuje vsaj pet sekund, potem se šteje, da je prišlo do pojava motenj.

2.4.2 Poročanje o meritvah

2.4.2.1 Laboratorij

Laboratorijski preizkus motilnikov: v poročilih preizkušanja motilnikov naj bodo poleg popisa uporabljene merilne opreme navedene tudi:

- a) vsaj časovna vrsta razmerja C/N0 oz. tudi časovna vrsta vrednosti AGC, če jo instrument premore,
- b) graf s spektralnega analizatorja s posebej zabeleženimi nastavitvami:
 - centralna frekvenca (CF),
 - izbrano frekvenčno področje (span),
 - razločljivost frekvenčnega področja (RBW),
 - nastavitev nizkoprepustnega sita (VBW),
 - referenčno razmerje moči (Ref),
 - slabljenje spektralnega analizatorja (Att) in
 - čas frekvenčnega preleta (SWT).

Če oprema dopušča, je zaželeno tudi časovna vrsta ene periode motilnega signala.

58

2.4.2.2 Teren

Poročila o namerno povzročenih in opaženih pojavih med terenskimi meritvami naj obvezno vsebujejo [35]:

- a) **ozn** .. enolična oznaka dogodka, ki uporabniku potencialno omogoča, da identificira tudi sistem, ki je prispevalo k dogodku,
- b) **vrsta opreme** .. oznaka opreme, ki je odkrila in prispevala informacije o dogodku,
- c) **opredelitev dogodka** .. (glej poglavje 2.4.1) izbrati je treba eno od dveh priloženih opredelitev dogodkov,
- d) **frekvenčno področje** .. frekvenčno področje GNSS, v katerem so zaznane motnje,
- e) **območje** .. krajevno čim bolj opredeljeno območje, v katerem je bil zaznan dogodek motnje,
- f) **datum** .. datum (glede na UTC), ko je bil dogodek zaznan.

Poleg doslej naštetih obveznih podatkov je zaželeno tudi beležiti:

- *čas začetka* ... časovni žig UTC, ko je bil zaznan začetek dogodka,
- *trajanje* ... trajanje dogodka, če ustreza izbrani opredelitvi dogodka,
- *GNSS Fix Lost?* ... če je sprejemnik GNSS, vgrajen v sistem za spremljanje, med dogodkom izgubil določitev položaja; Da/Ne?,
- *spekter* .. frekvenčni spekter zaznanega dogodka. Poroča se lahko grafično ali tabelarično, vektor frekvence in moči (enakih dolžin) z nastavitvami, glej (Slika 46),

- *ali so na voljo neobdelani podatki?* ... oznaka, ki označuje, ali so neobdelani podatki (v fazi/kvadraturni fazi (I/Q)) na voljo v lokalni podatkovni zbirki omrežja, ki prispeva podatke, do katerih lahko uporabniki po potrebi dostopajo; Da/Ne?,
- *vrsta antene* ... vrsta antene, ki jo uporablja strojna oprema nadzornega omrežja, ki prispeva signale,
- *šumna vrednost* ... referenčna šumna vrednost senzorja, ki spremlja in beleži pogoje GNSS v omrežju,
- *delta moč* ... največja razlika moči (v dB) nad nivojem šuma sistema na nadzorni postaji, ki je sporočila dogodek,
- *osnovna vrednost C/N0* .. povprečno razmerje med nosilcem in šumom (C/N0) za satelite, ki jih nadzorni senzor uporablja v rešitvi za določanje položaja, eno minuto pred zaznavo motenj,
- *delta C/N0* ... največje zmanjšanje (v dB) C/N0 med dogodkom glede na C/N0 pred dogodkom, izmerjeno za vse satelite, ki jih nadzorni senzor uporablja v rešitvi za določanje položaja, sprejem katerih satelitov je bil moten,
- GDOP med meritvijo, zaznamek ali obstaja sum tudi potvarjanja in, če je možno ugotoviti, tudi lokacija ali smer, od kod izvirajo motnje, ter opis, kako motnje vplivajo na uporabnost opreme GNSS [35].

2.5 Načrt izvedbe testov

V delovnem sklopu 3 bo ključno, da že predhodno približno opredelimo območja izvedbe testov in nabor terenske opreme. Tako je že v tem sklopu treba narediti tehten premislek o načrtu izvedbe testov. V vseh primerih terenske izmere bomo meritve spektra izvajali vsaj z enim geodetskim in enim nizko-cenovnim sprejemnikom GNSS iz naslednjega nabora:

- geodetski sprejemnik Trimble R12i,
- geodetski sprejemnik Javad Triumph-LSA,
- nizko-cenovni sprejemnik u-blox ZED-F9P ter
- nizko-cenovni sprejemnik Septentrio Mosaic.

Prednost sprejemnika Trimble R12i je v možnosti, da motnje določimo ločeno po posameznih frekvenčnih območjih signalov GNSS, medtem ko nizko-cenovni sprejemnik poda bolj pregledno sliko spektrov, vendar le za frekvenčni območjih L1 in L2 ali L1 in L5 (sprejemniki u-blox so zaenkrat dvofrekvenčni). Motnje v urbanem okolju bomo spremljali na lokaciji točke FGG3, ki se nahaja na strehi *Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2 v Ljubljani*, ki ima nameščen enak sprejemnik kot na določenih točkah omrežja SIGNAL. Na točki nameščen sprejemnik Trimble Alloy omogoča shranjevanje grafičnih datotek izmere spektrov tudi za nazaj.

Po potrebi bo poleg spektralnih analizatorjev, vgrajenih v geodetske in nizko-cenovne sprejemnike GNSS, na voljo radijski spektralni analizator, ki je za dano problematiko univerzalni inštrument za opazovanje spektra. Na spektralni analizator se preko kakovostnega koaksialnega kabla priključi sprejemna antena s krožno polarizacijo (L2 + L5 ali L1), ki se jo namesti v bližino referenčnega (geodetskega) sprejemnika. Vzorčenje spektra vrši prenosni računalnik z namensko programsko opremo. Načrt izvedbe testov bo potekal sistematično po dogovoru z udeleženci terenskih meritev in službo AKOS ter bo opredeljen in ustrezno opisan v elaboratu izmere za vsako terensko meritev posebej (obrazec 1 in 2 - Slika 40).

2.6 Izbor območij in opreme za testiranje

Načrtujemo izvedbo testov v treh za motnje značilnih okoljih, in sicer:

- a) na območjih, kjer predvidevamo da ni prisotnih večjih motenj (vezano na vsakodnevno geodetsko izmero z GNSS); tu bomo posebej pregledali kakovost izvedbe meritev v za GNSS idealnih in slabših pogojih izmere, predvsem zaradi prisotnosti vegetacije in prisotnosti virov odboje signalov GNSS;
- b) na območjih, kjer zaenkrat le predpostavljamo, da so prisotne nenamerne motnje; iz preteklih izkušenj geodetskih strokovnjakov, ki poznajo problematične lokacije s slabšo kakovostjo določitve koordinat, je trenutni nabor lokacij ugotavljanja motenj signalov vezan na:
 - geodetsko točko na Maliji (in morda še kje),
 - območje okoli radarjev (npr. Letališče Jožeta Pučnika, Letališče Sečovelje ali Luka Koper);
- c) na območju z namerno povzročenimi motnjami; gre za območje v Črnotičah, kjer so nam do sedaj z Agencije za komunikacijska omrežja in storitve RS (AKOS) vedno ob ustrezni prošnji odobrili uporabo motilnikov.

Izmed naštetih okolij bomo za točko c) uskladili scenarije geodetskih meritev z meritvami z motilniki. Vsakokrat, ko bomo izvajali namerno motenje signalov GNSS, bodo aktivnosti potekale v skladu z dogovorom s pristojno službo agencije AKOS. Nabor motilnikov, ki jih bomo uporabljali za namerne motnje, je podan v preglednici (Preglednica 5), ki jo bomo sproti ob uporabi novega motilnika dopolnjevali

Preglednica 5: Seznam motilnikov, s katerimi bodo (so) izvedene motnje

Ime motilnika	Oznaka	Območje motenj	Slika
rušička	VG5007	L1	
accu	1AN0943	L1, L2, L5	
usb	YB-1610200048311	L2	
Motilnik lastne izdelave	RF-source-6GHz	Poljubno (vse)	
Simulator motilnikov	Keysight N5182B	Poljubno (vse)	

Tekom namernih motenj bomo poleg spektralnih meritev izvajali tudi sprejem opazovanj z geodetskimi sprejemniki GNSS. V preglednici podajamo nabor sprejemnikov GNSS, s katerimi razpolagamo, in sicer:

Preglednica 6: Seznam sprejemnikov GNSS, ki bodo vključeni v raziskavo namernih motenj

Sprejemnik	Opomba
Leica GS15	možnost sprejema signalov GPS, GLONASS in Galileo
Leica GS18	možnost sprejema signalov GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou
Javad Triumph-LSA	možnost sprejema signalov GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou
Trimble R12i	možnost sprejema signalov GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou
u-blox ZED-F9P	dvo-frekvenčni več-konstelacijski sprejemnik L1, L2
u-blox M10	dvo-frekvenčni več-konstelacijski sprejemnik L1, L5
Septentrio Mosaic	več-frekvenčni več-konstelacijski sprejemnik
Xiaomi Mi8	L1/L5 frekvenčni fazni čip v telefonu
Xiaomi 13T	L1/L5 frekvenčni fazni čip v telefonu
Samsung S20	L1/L5 frekvenčni fazni čip v telefonu

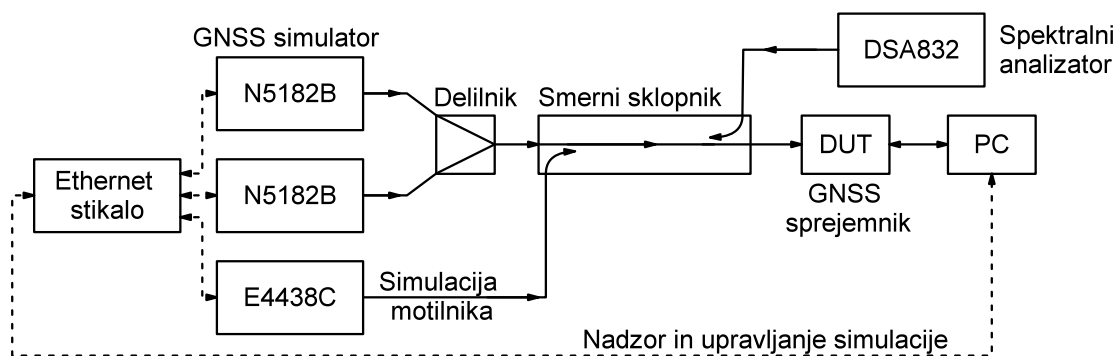
Seznam uporabljenih motilnikov in geodetskih sprejemnikov GNSS se bo med različnimi testiranjmi spreminjal, odvisen bo predvsem od razpoložljivosti opreme.

3 Testiranje predlagane metodologije nadzora kakovosti meritev v omrežju SIGNAL in na strani uporabnikov

3.1 Testiranje motilnikov v laboratorijskem okolju brez prisotnosti drugih morebitnih elektromagnetnih motenj

Testiranje sistemov GNSS v realnem okolju prinaša obilico merilnih pogreškov. Atmosferske zakonitosti, geografska razgibanost, razširjanje po večpotju in upad izhodne moči oddaje med drugim vplivajo na kakovost sprejema signala ter na pridobivanje točne geolokacije. Poleg tega se konstelacija satelitov neprestano spreminja, s čimer je težko zagotavljati ponovljive rezultate meritev.

Namen laboratorijskega testiranja je vzpostaviti orodje, ki omogoča izvajanje ponovljivih testov tako z vidika zagotavljanja GNSS-konstelacije kot vpliva različnih motilnikov na delovanje sprejemnikov. Laboratorijski testi omogočajo hitrejšo validacijo delovanja in odkrivanje oblike motenj, ki povzročijo znatno degradacijo določanja položaja GNSS-sprejemnika.



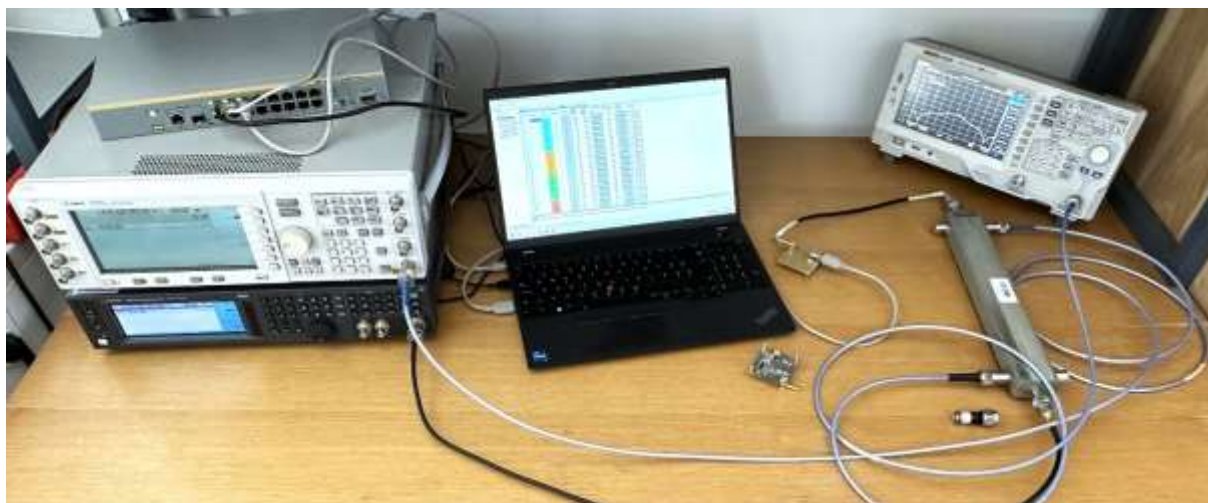
Slika 48: Merilna postavitvev GNSS-simulacije v laboratorijskem okolju.

Slika 48 prikazuje merilno postavitvev za simulacijo GNSS-sistemov ter motilnih signalov. Visokofrekvenčna izvora N5182B s pripadajočo programsko opremo ustvarjata dvo-frekvenčni signal GNSS vseh štirih glavnih sistemov (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). Predvajata statičen ali dinamičen scenarij po v naprej določeni konstelaciji satelitov (resnične vrednosti glede na dvovrstične podatke almanaha (ang. *Two Line Elements* – TLE). Scenarij lahko od iste točke predvajata znova in znova povsem enako, saj je simulacija signalov izračunana v naprej. Tako lahko isto meritev izvedeta večkrat.

Signal nato vstopi v smerni sklopnik, kjer se mu doda motilni signal generatorja E4438C. Generator omogoča poljubno simulacijo motilnega signala do največje pasovne širine 80 MHz. Smerni sklopnik zagotavlja dodajanje motilnega signala v merilno postavitvev brez vpliva na simulator GNSS, saj signal v nasprotno smer ne potuje. Del signala se nato odcepi za prikaz na spektralnem analizatorju, kjer se v živo preverja spekter motilnega signala. Smerni sklopnik signal zapusti na drugem koncu in je neposredno peljan v želeni sprejemnik GNSS. Temu je odstranjena antena, signal pa je pripeljan neposredno na njegov vhod. Moči vseh simuliranih signalov so ustrezno majhne, povsem enake kot pri sprejemu v naravnem okolju. S tem se odstrani pogreške antene, nizko-šumnega ojačevalnika in razširjanja po večpotju (programska oprema sicer

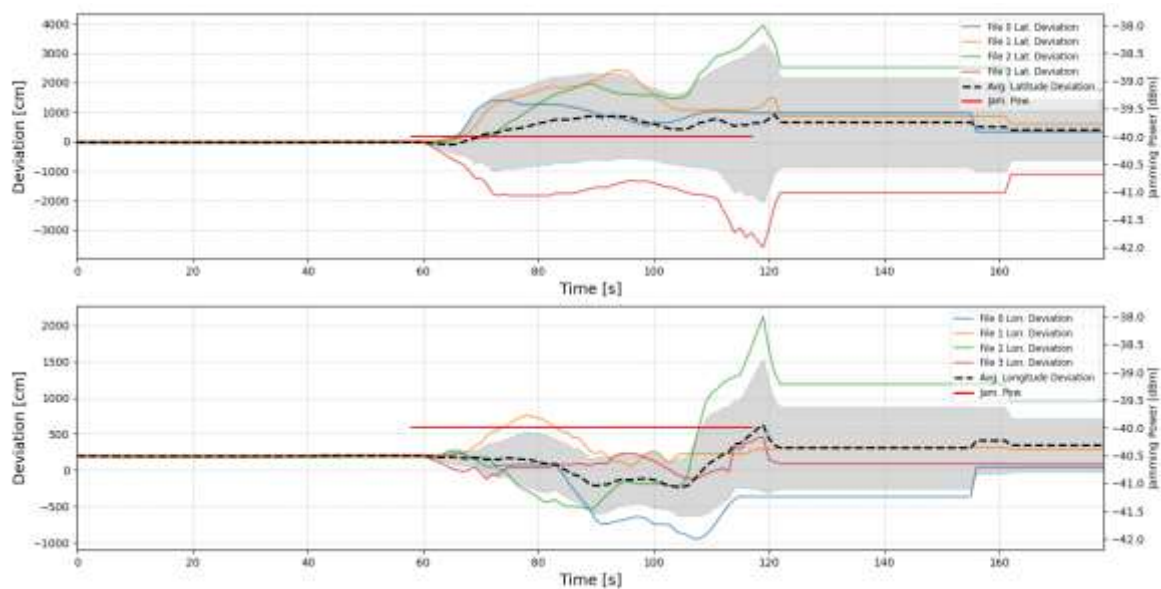
omogoča simulacijo večpotja in simulacijo pogreška antene, upad jakosti oddaje, urbane kanjone, itd. Spremenljivke se torej selijo v simulacijo).

Sprejemnik podatke pošilja programski opremi na osebni računalnik, ki jih sprti obdeluje, nadzoruje simulacijo in upravlja z motilnikom.

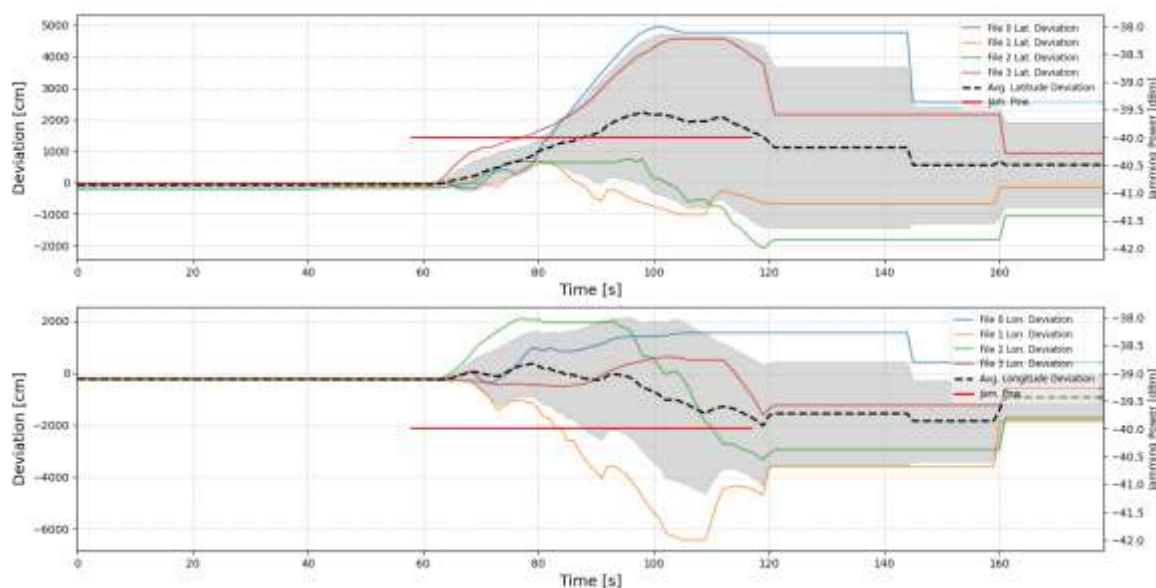


Slika 49: Fotografija testne merilne postavitve v laboratoriju.

Končni cilj vzpostavitve okolja je preizkušanje sprejemnikov v nadzorovanem okolju in izdelava poročila o odzivu na različne motilnike. Delo je v teku, trenutno pa potekajo preliminarni testi z vidika ponovljivosti merilne postavitve in odziva na preproste motilne signale.



Slika 50: Deviacija položaja ob motenju z eno-frekvenčnim (CW) motilnikom - TESEO-LIV3R. **Zgoraj:** spremembe položaja proti severu, **spodaj:** spremembe položaja proti vzhodu.



Slika 51: Deviacija položaja ob motenju z eno-frekvenčnim (CW) motilnikom - GP-01. **Zgoraj:** spremembe položaja proti severu, **spodaj:** spremembe položaja proti vzhodu.

Slika 50 in Slika 51 prikazujeta rezultate preliminarne študije s preprostimi nizkocenovnimi sprejemniki GNSS. Namen testiranja merilne postavitve je ugotoviti odzive sprejemnikov in odpraviti morebitne napake v programski opre. Grafa prikazujeta odstopanje položaja iz simulacijsko določene geografske točke (amplituda vektorja od referenčne točke do izračunanega položaja v prostoru – geografska širina in dolžina). Namenska programska oprema ponastavi vse parametre sprejemnika GNSS, da ta začne delovati iz stanja hladnega zagona (izbris almanaha, satelitov, kanalov). Nato počaka, da se sprejemnik uspešno vklene, čemur doda 60 s premirja (brez motilnega signala). Sledi poljubno dolg in na poljuben način moten sprejem GNSS (v testnem primeru 60 s CW signala z različno močjo). Ob odstranitvi motilnega signala še nadaljnjih 60 s beleži odstopanje lokacije.

Ugotovitve so zanimive z vidika, da kljub predvajanju povsem enake konstelacije GNSS in enako močnega motilnega signala odziv sprejemnika ni konstanten. Sivo območje označuje standardni odklon deviacije skozi več zaporednih meritev. Trenutno potekajo testi z več kot 100 zaporednimi meritvami z namenom preverjanja, ali vrednost standardnega odklona doseže 0 (statistično povsem naključno obnašanje sprejemnika) ali pa ta sledi določeni zakonitosti. Ugotovitve so ključne za nadaljnje teste in zaupanje v merilne rezultate.

3.2 Testiranje sprejemnikov GNSS na terenu

V okviru aktivnosti DS3-2 smo naredili več terenskih izmer z različnimi sprejemniki GNSS. Najprej v okolici neprekinjeno delujoče postaje (točka FGG3 na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo), nato pa tudi v drugih okoljih z nenamernimi kot tudi z namerno povzročenimi motnjami (Preglednica 7). Testirali smo odziv geodetskih in nizko-cenovnih sprejemnikov s ciljem ugotavljanja ranljivosti ter odpornosti delovanja v oteženih razmerah za GNSS. Tekom izmere smo z nekaterimi geodetskimi in nizko-cenovnimi sprejemniki beležili spektre signalov GNSS, v določenih terenskih izmerah pa smo meritve istočasno izvajali tudi s profesionalnimi spektralnimi analizatorji. Z naknadno obdelavo registriranih opazovanj GNSS smo njihovo kakovost delovanja v oteženih razmerah vrednotili predvsem glede na pojavnost nenadnih skokov signalov ter izgube signalov, v zelo oteženih izmerah z namernimi motnjami pa tudi glede na faktorje DOP in spremembe vrednosti C/N0. Predvsem pri namernih motnjah je bilo ključno ugotoviti, kako ranljivi so sprejemniki na povzročene motnje oziroma narediti primerjavo vplivov motenj na sprejemnike različnih kakovosti.

V testih smo uporabili različne naprave za spremljanje spektrov signalov GNSS kot tudi različne naprave za povzročanje motenj signalov GNSS. Zaradi praktične uporabe in najboljšega vpogleda v spektralno dogajanje smo se večinoma omejili na izmero z:

- geodetskim sprejemnikom Trimble R12i in
- nizkocenovnimi sprejemniki u-blox ZED-F9P (L1 in L2 ter L1 in L5) ter NEO-F10N (L1 in L5).

S sprejemnikom Trimble R12i smo pridobili vpogled v spektralno dogajanje širšega območja frekvenc signalov L1, L2, L5, E6 in B1. Posamezne slike spektrov, ki bodo prikazane v nadaljevanju za posamezno lokacijo izmere, vključujejo prikaze, ki so označeni kot L1, L2, L5, E6 in B1, in sicer:

- **L1:** prikaz na območju 1565 MHz – 1615 MHz → na prikazih je z vertikalno črto označeno osredinjeno območje za frekvence L1, E1, B1C in BDSIII (1575,42 MHz) ter GLONASS G1 območje: 1598,0625 MHz – 1609,3125 MHz,
- **L2:** prikaz na območju 1215 MHz – 1265 MHz → na prikazih je z vertikalno črto označena frekvenca L2 (1227,60 MHz) enako kot E5a, dodano je označeno območje GLONASS G2: 1242,9375 MHz – 1248,625 MHz,
- **L5:** prikaz na območju 1165 MHz – 1215 MHz → vključuje L5/E5a/B2a, BDS-III (1176,45 MHz); Galileo E5 AltBOC: 1191,795 MHz; G3 GLONASS (1202,025 MHz) in Galileo E5b/BeiDou B2I, B2B in BDS-III (1207,14 MHz) ,
- **E6:** prikaz na območju 1255 MHz – 1305 MHz → vključuje oznake na osredinjeni frekvenci signala BeiDou B3I BeiDou-II (1268,52 MHz) ter E6 (1278,75 MHz) in
- **B1:** prikaz na območju 1525 MHz do 1575 MHz → vertikalna oznaka za frekvenco B1I BeiDou II (1561,098 MHz).

Na ordinatni osi je nanešena moč signalov v razponu od 20 dB do 70 dB. Osredinjene frekvence signalov GNSS so označene z navpičnimi črtami.

S sprejemnikom u-blox ZED-F9P smo spektre beležili na področjih:

- RF1: 1519,46 MHz – 1647,46 MHz, osredinjeno območje 1583,46 MHz (signali L1, E1, G1, B1C, BDS-III, B1);
- RF2: 1160,01 MHz – 1288,01 MHz, osredinjeno območje 1224,01 MHz

(signali L2, G2, G3, E5a, E5b, E5 AltBOC, E6, B2I, B2b);
RF2: 1127,47 MHz – 1255,47 MHz, osredinjeno območje 1191,47 MHz
(signali L5, G2, G3, E5a, E5b, E5 AltBOC, B2I, B2a, B2b).

S sprejemnikom u-blox NEO-F10N smo spektre beležili na območju;

- RF1: 1519,46 MHz – 1647,46 MHz, osredinjeno območje 1583,46 MHz
(signali L1, E1, G1, B1C, BDS-III, B1);
- RF2: 1127,47 MHz – 1255,47 MHz, osredinjeno območje 1191,47 MHz
(signali L2, L5, G2, G3, E5a, E5b, E5 AltBOC, B2I, B2b).

V obeh primerih nizkocenovnih sprejemnikov je na ordinatni osi v osnovni nastavitvi predvidena moč signalov od 0 do 60 dB.

Za izbrane geodetske lokacije točk, kjer je v preteklosti že prišlo do težav določitve položaja s sumom na nenamerne motnje (predvsem zaradi bližine radijskih oddajnikov in anten), smo ali nameravamo izvesti izmero spektrov signalov in statične meritve GNSS. Pri teh smo z naknadno obdelavo opazovanj določili deviacije v koordinatah in preverili, ali so nenamerne motnje razvidne iz časovne vrste opazovanj C/N0 in faktorjev DOP. V primeru velikih razlik/težav smo na posameznih frekvencah signalov GNSS skušali vzpostaviti povezavo, ali na spektru zaznane motnje bistveno vplivajo na pojavnost skokov signalov (ang. *cycle slips*) oziroma na izgube sprejema signalov.

Preglednica 7: Lokacije meritev spektrov signalov in meritev s sprejemniki GNSS, ki so jih predlagali sodelavci z GURS-a. Sivo: ni bilo meritev.

Ime in oznaka točke	Koordinate	Opomba	Datum izmere
Malija (180)	45.50378568° N 13.64338889° E	nenamerne motnje (bližina več oddajnih anten), priporočilo GURS	26/04/2024 09/05/2024
Livade (točka 0.reda)	45.52348600° N 13.68407100° E	nenamerne motnje, priporočilo GURS	26/04/2024 29/04/2024 30/04/2024
Črnotiče	45.56389548° N 13.89417121° E	namerne motnje	15/05/2024
Pasja Ravan	46.09263913° N 14.22322347° E	nenamerne motnje, priporočilo GURS	november 2024
Postojna 2	45.77137870° N 14.20138529° E	nenamerne motnje (v bližini ovira), priporočilo GURS	-ni bilo izmere-
Grmada pri Ribnici	45.81294104° N 14.69534714° E	nenamerne motnje, v bližini oddajnik, priporočilo GURS	-ni bilo izmere-
Boč	46.28345473° N 15.59243084° E	nenamerne motnje, oddajniki v daljavi, priporočilo GURS	-ni bilo izmere-
Rogla	46.45237144° N 15.33168322° E	nenamerne motnje, priporočilo GURS	-ni bilo izmere-

3.2.1 Nenamerne motnje – testno območje: stalna postaja FGG3

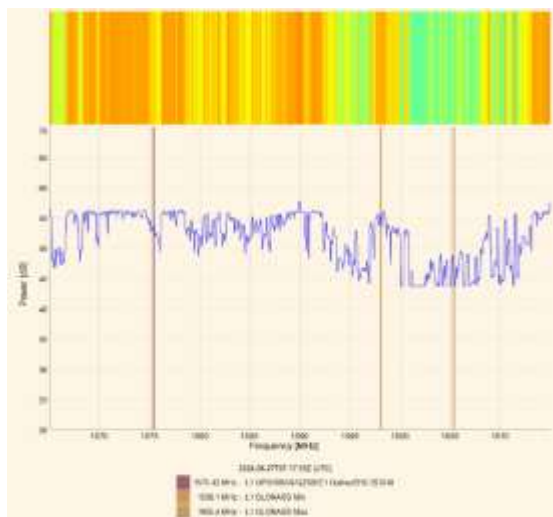
Nenamerne motnje signalov GNSS na stalni postaji FGG3 na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani lahko spremljamo kadarkoli (neprekinjeno delovanje postaje). Zaradi obsežnosti podatkov v nadaljevanju predstavljamo le bistvene izsledke, ki jih prikazujemo za dva zaporedna dneva izmere, in sicer za 27. 6. 2024 in 28. 6. 2024.



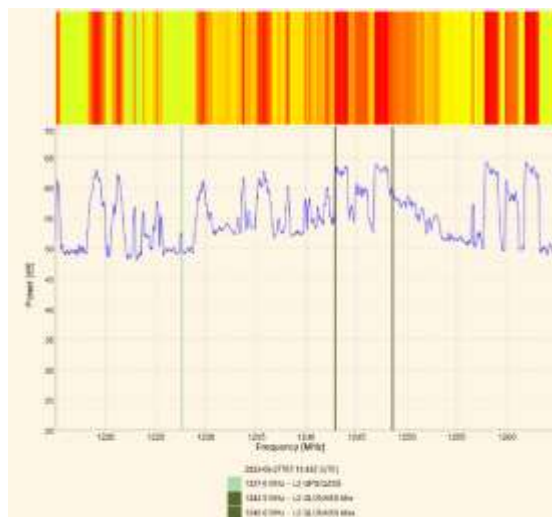
Slika 52: Stalna postaja na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, točka FGG3 ter dodatno izmera spektrov s sprejemnikom u-blox ZED-F9P.

28. junija 2024 smo v neposredni bližini stalne postaje FGG3 opravili enourne meritve s sprejemnikom u-blox ZED-F9P (Slika 52). Istočasno izmero smo naredili z namenom primerjave izmerjenih spektrov signalov GNSS z geodetskim (Trimble Alloy) in nizko-cenovnim sprejemnikom (u-blox ZED-F9P) ter primerjave kakovosti opazovanj v pojavnosti skokov signalov GNSS za meritve posameznega sprejemnika. Na točki FGG3 se v arhiv opazovanj GNSS shranjujejo tudi dnevne datoteke spektrov signalov, od koder je razvidno, da so na tej lokaciji motnje v širšem frekvenčnem območju od 1,1 GHz do 1,7 GHz občasno močno prisotne, posebej pa so obremenjujoče na celotnem frekvenčnih območjih G1 in G2 signalov satelitov GLONASS ter na frekvenčnem območju L5 (primer izmere na dan 28. 6 2024, Slika 53).

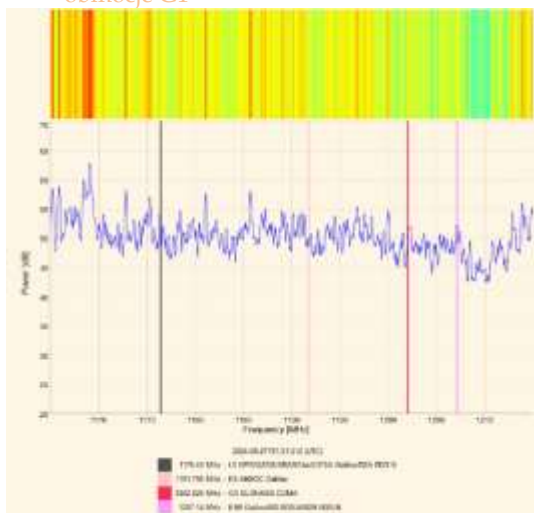
Izmero spektrov signalov v realnem času smo naredili v dveh zaporednih dneh, 27. in 28. junija 2024 v trajanju ene ure. S slik (Slika 53, Slika 54, Slika 55) je očitno, da so bile na dan 27. junij 2024 motnje močno prisotne, medtem ko naslednji dan, 28. 6. 2024 precej manj. Če gledamo osredinjena območja signalov GNSS, pa je očitno, da so motnje na območje signalov GLONASS G2 prisotne v obeh dnevih.



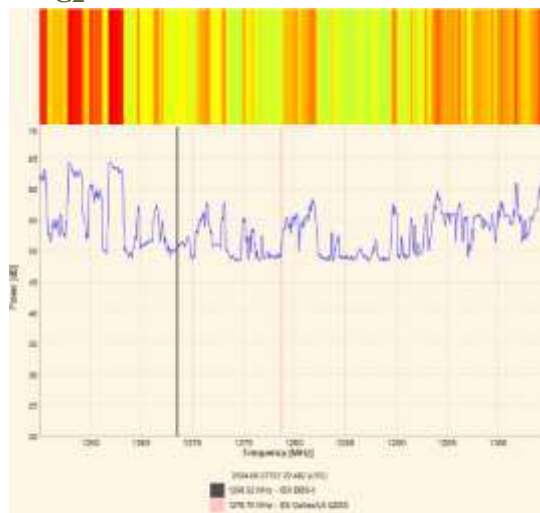
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



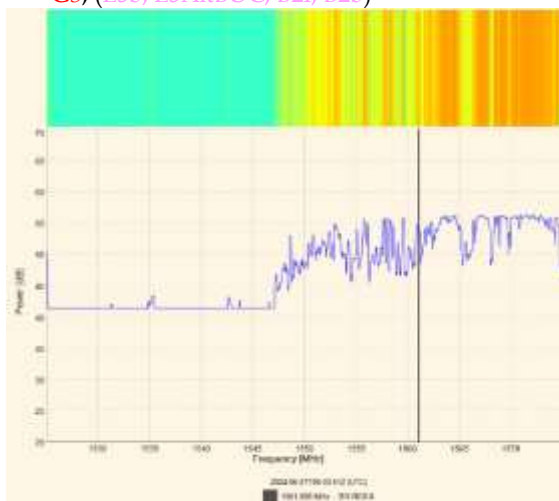
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b)

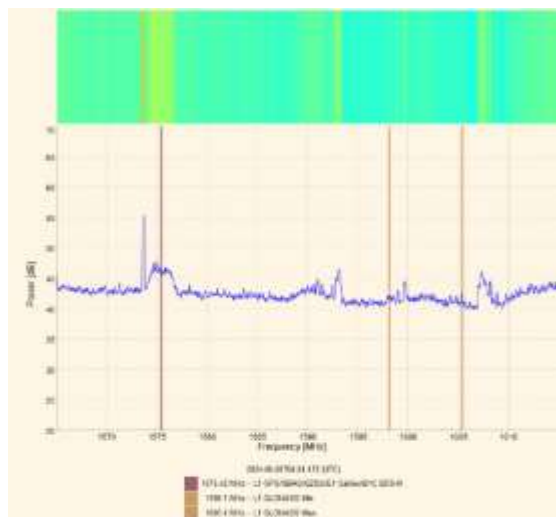


(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6

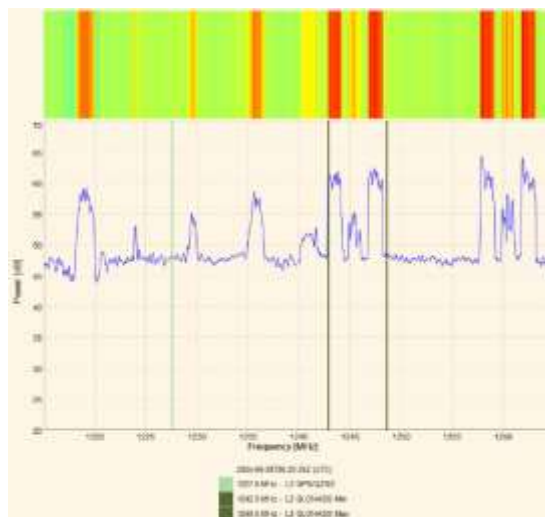


(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

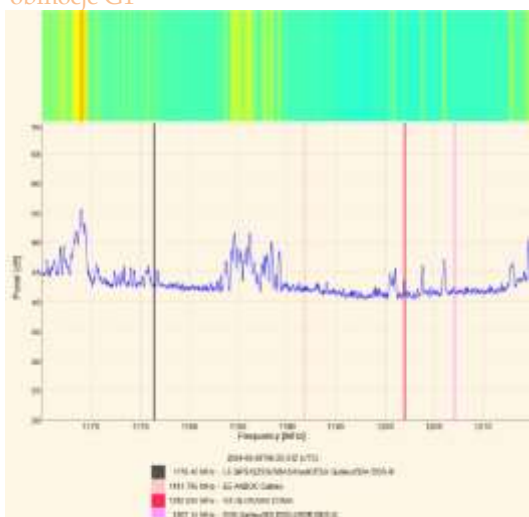
Slika 53: FGG3, 27/04/2024, 07:15 UTC do 08:25 - spektralne meritve s Trimble Alloy na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.



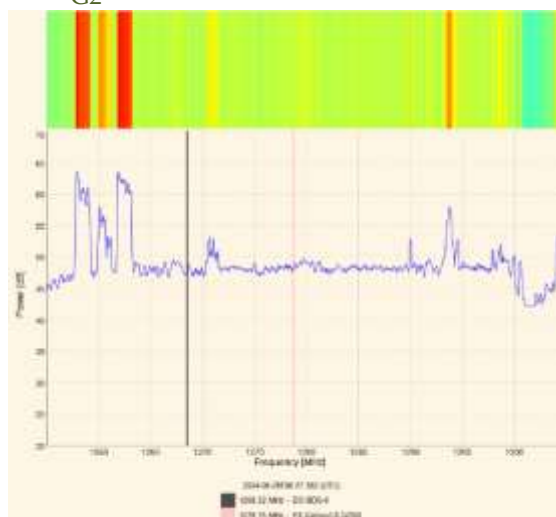
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



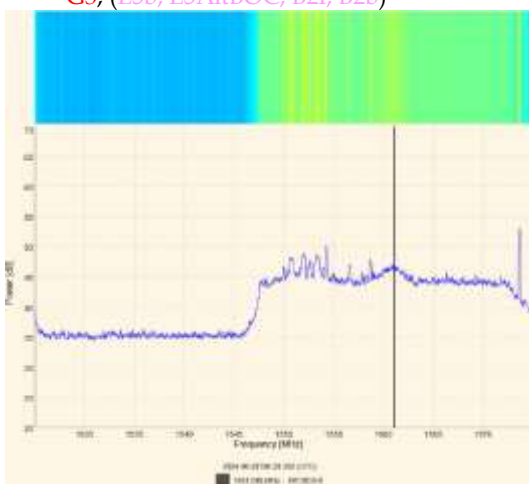
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b)



(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6

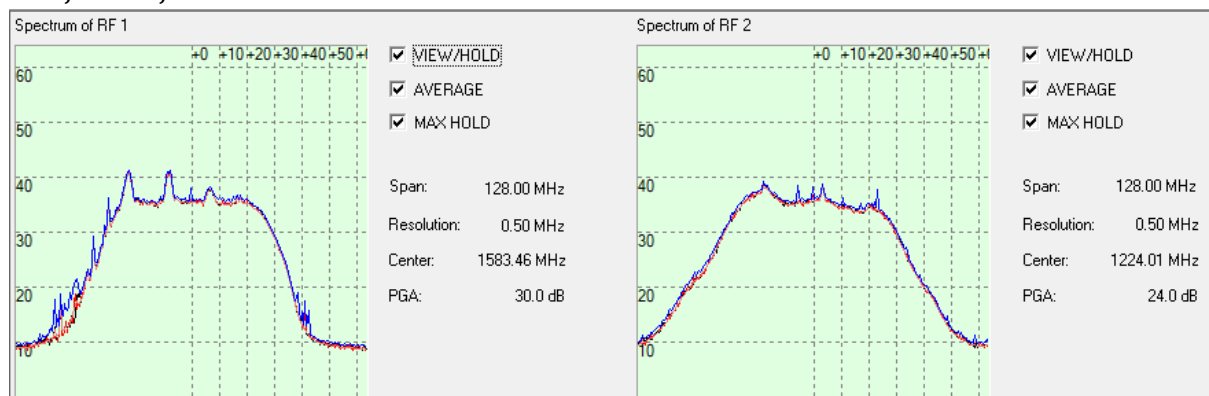


(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

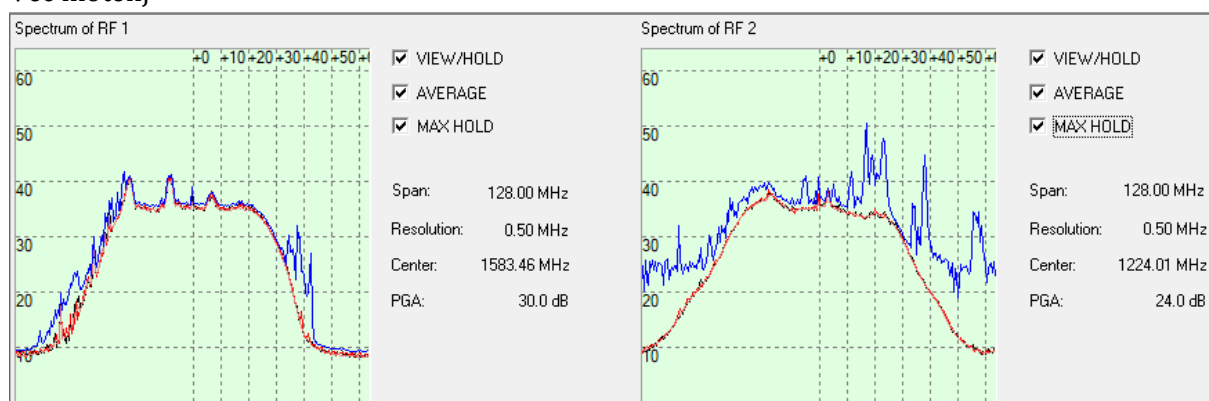
Slika 54: FGG3, 28/04/2024, 06:28 UTC - 07:40 UTC - spektralne meritve s Trimble Alloy na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.

3.2.1.1 Spekter, določen s sprejemnikom u-blox ZED-F9P sprejemnikom

Manj motenj



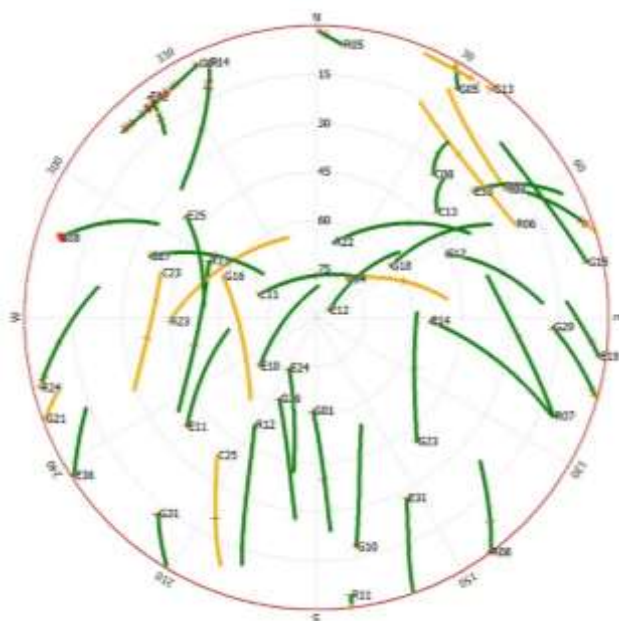
Več motenj



70

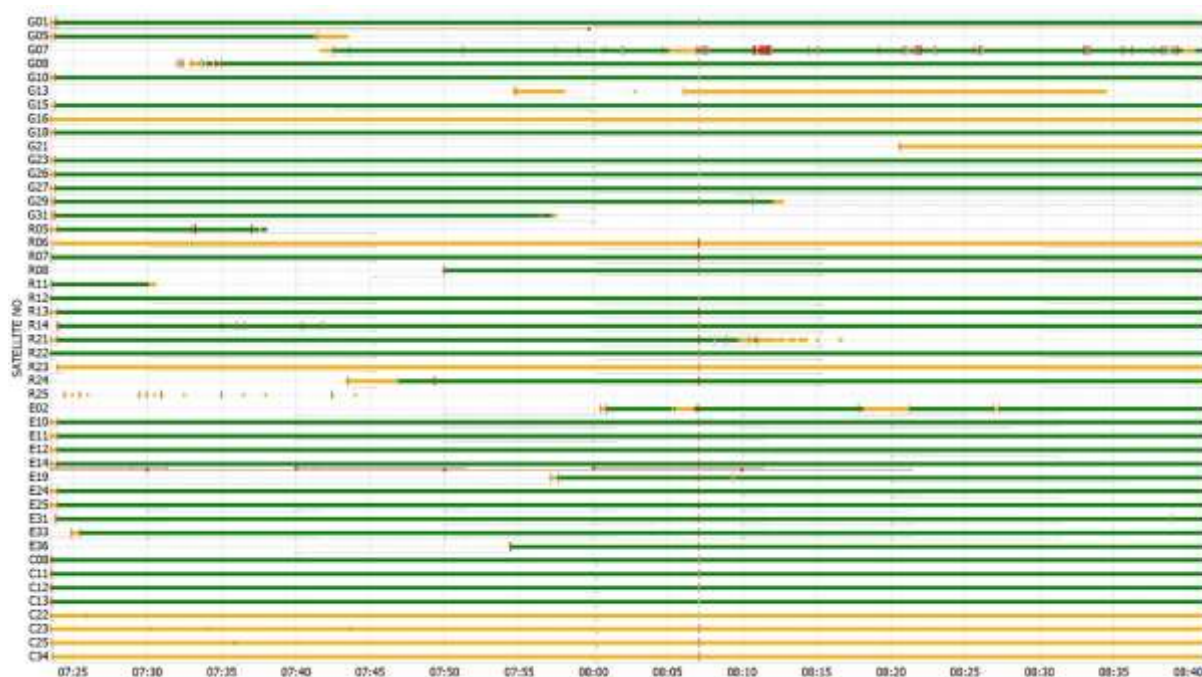
Slika 55: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz. Zgoraj: trenutek z manj motnjami (07:42:52 UTC), spodaj: prisotne motnje 08:10:19 UTC).

3.2.1.2 Prisotnost izgube signala ali nenadnih skokov signala

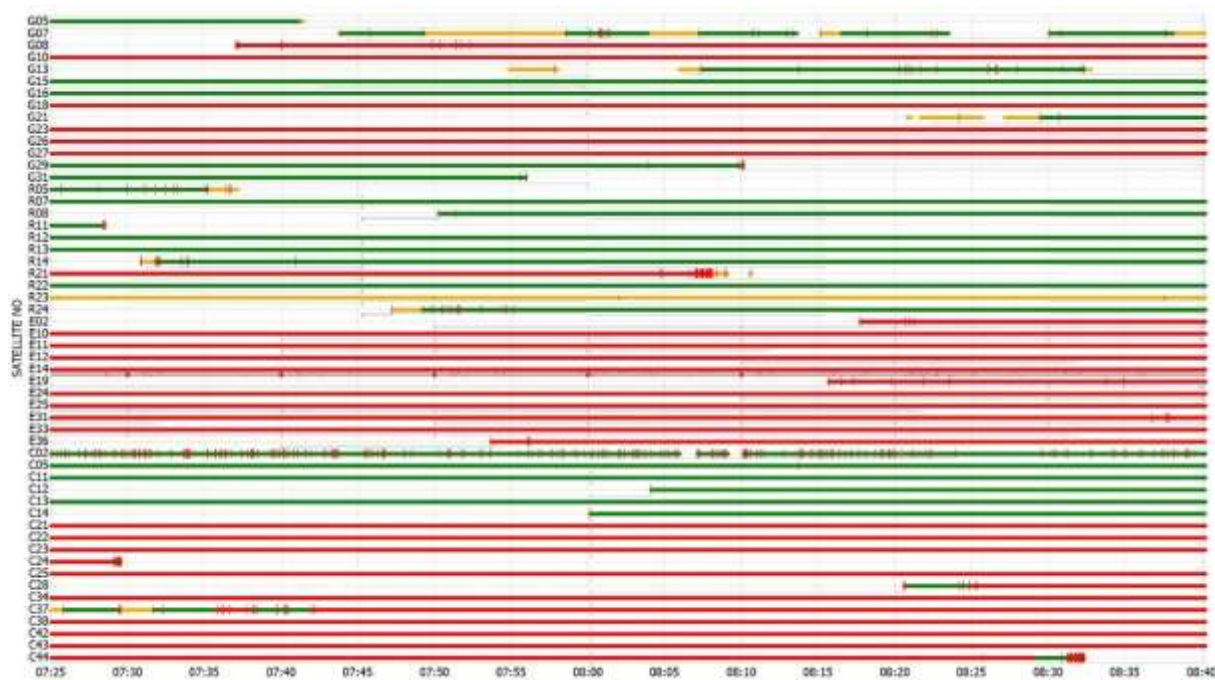


Slika 56: FGG3, 28/06/2024, 07:30 – 08:30 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij.

3.2.1.3 Prisotnost izgube signala ali nenadnih skokov signala

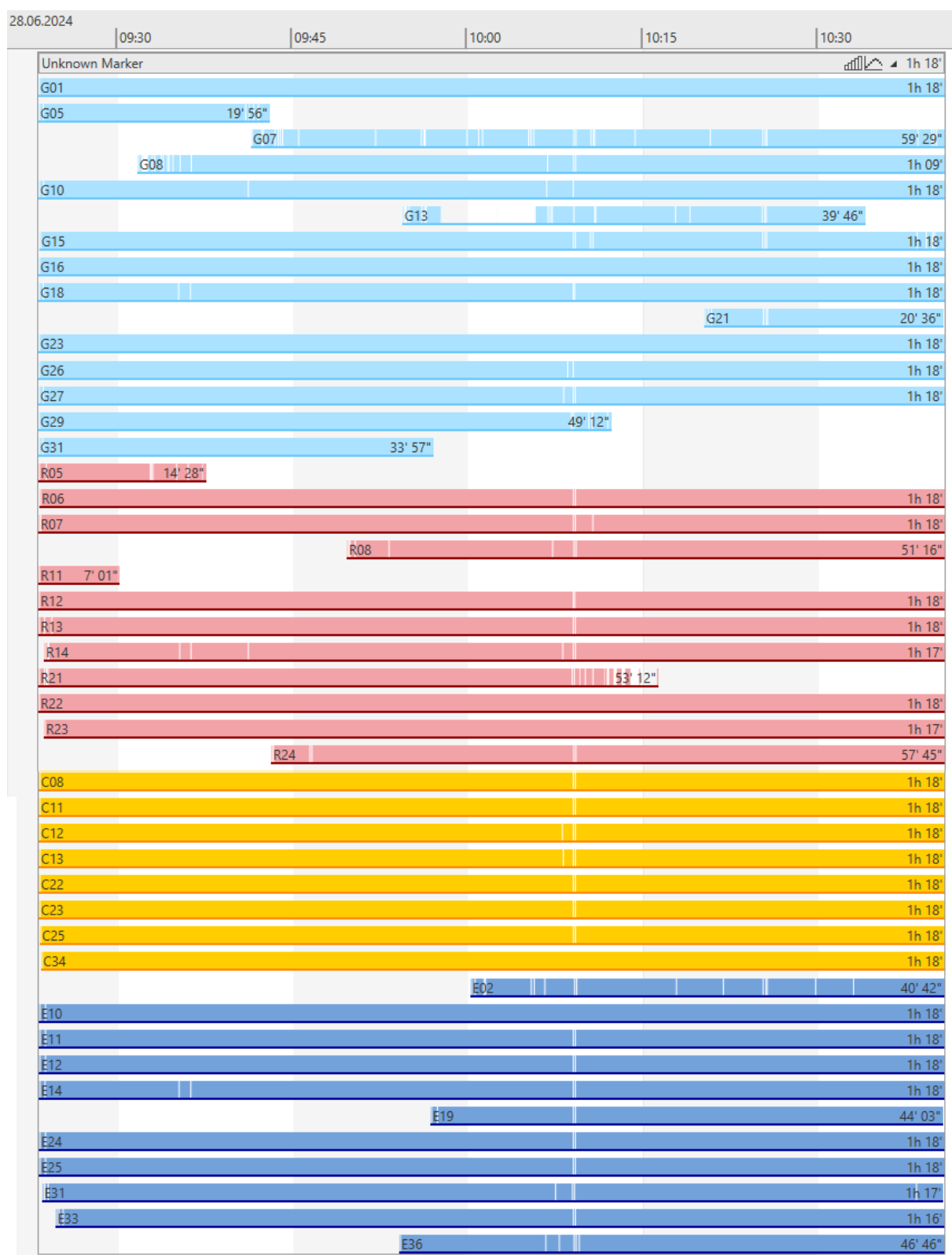


Slika 57: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami za skoke signalov (rdeče črtice); sprejemnik ZED-F9P.

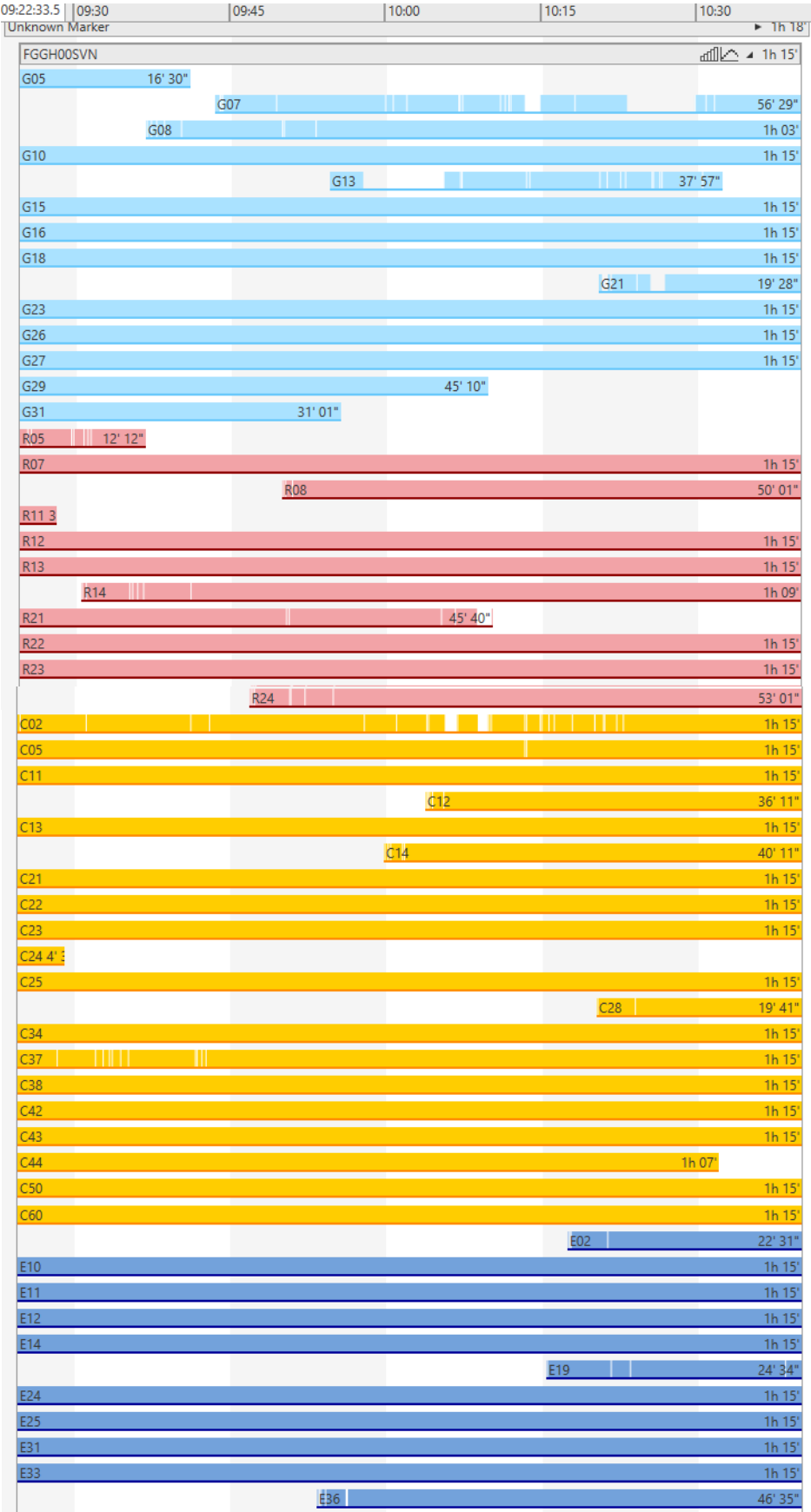


Slika 58: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami za skoke signalov (rdeče črtice); sprejemnik Trimble R12i.

Z zgornjih slik je razvidno, da so opazovanja GNSS iz različnih sprejemnikov (Trimble Alloy in u-blox ZED-F9P) s skoki signala obremenjena različno. Tudi prekinitve opazovanj zaradi zunanjih motenj (lahko je prisoten odboj signala od objektov ali motnje signalov) so za različne sprejemnike drugačne (Slika 59, Slika 60).



Slika 59: FGG3, 28/06/2024, 07:25 do 08:40 UTC (na sliki lokalni čas); izris prekinjenih opazovanj GNSS (sprejemnik ZED-F9P).



Slika 60: FGG3, 28/06/2024, 07:25 do 08:40 UTC (na sliki lokalni čas); izris prekinjenih opazovanj GNSS (sprejemnik ZED-F9P).

3.2.2 Nenamerne motnje – testno območje na geodetski točki Malija (izmera 26. 4. 2024)

Izmero na geodetski točki prvega št. 180 (Malija) smo naredili 26. aprila 2024, in sicer s sprejemnikoma Trimble R12i in u-blox ZED-F9P. S sprejemnikom u-blox smo spektralne meritve signalov dodatno izvedli še 9. maja 2024. Cilj izmere na točki je bil preveriti kakovost signalov GNSS na posameznih frekvenčnih območjih glede na to, da se v neposredni bližini stebra nahaja precej oddajnih anten, ki bi lahko bile izvor motenj signalov (Slika 61).



(a)



(b)

Slika 61: Geodetska točka 180 Malija; (a) pogled proti severu; (b) pogled proti jugo-vzhodu.

TERENSKI ZAPISNIK GNSS – ugotavljanje motenj signalov GNSS Care4SIGNAL – izdelan po izmeri

Delovišče	Malija
Datum	26. 4. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	9:00
Ura konca izmere (lokalni čas)	14:00
Namen	Izmera spektrov signalov Preizkus sprejemnikov v RTK-načinu
Prisotni na terenu	Albin Mencin Veton Hamza Polona Pavlovčič Prešeren
Uporabljeni motilniki	/
Uporabljeni sprejemniki GNSS	Trimble R12i (za spekter) Leica GS18 Ublox ZED-F9P
Uporabljeni spektralni analizatorji	/

Podroben opis meritev

1. Izmera spektrov – daljši čas (Trimble R12i, ublox ZED-F9P)
2. Statična izmera GNSS (Leica GS18)
3. Preizkus sprejemnikov po standardu ISO 17123-8
4. Nadaljevanje izmere – Livade

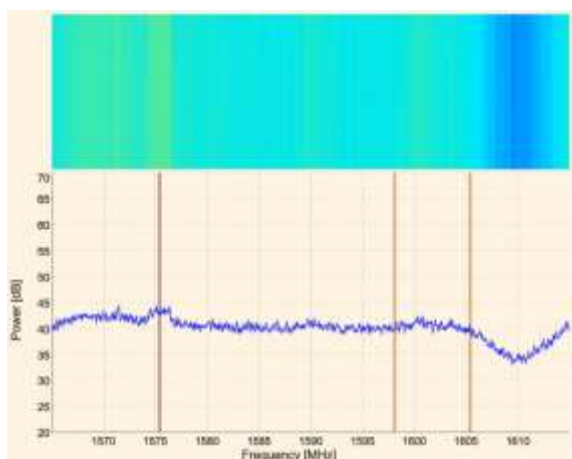
Priloge:



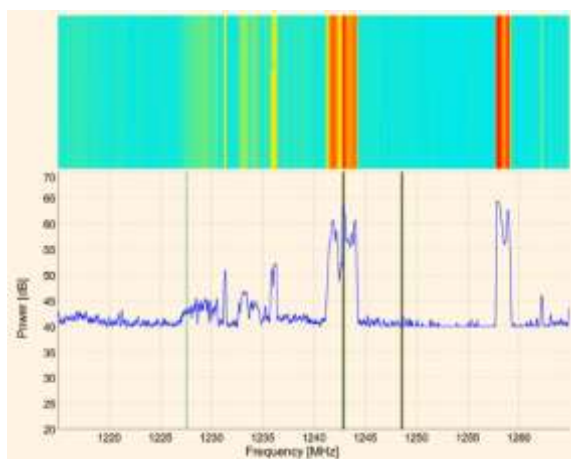
Slika 62: Terenski zapisnik izmere z dne 26/04/2024

Slika 62 podaja terenski zapisnik izmere. S sprejemnikom Trimble R12i smo izvajali meritve v neposredni bližini stebra, medtem ko smo sprejemnik u-blox ZED-F9P s kalibrirano anteno namestili na steber. Tu smo istočasno izvajali tudi preizkus delovanja sprejemnikov (geodetski Leica GS18T in u-blox ZED-F9P) v načinu RTK po standardu ISO17123-8.

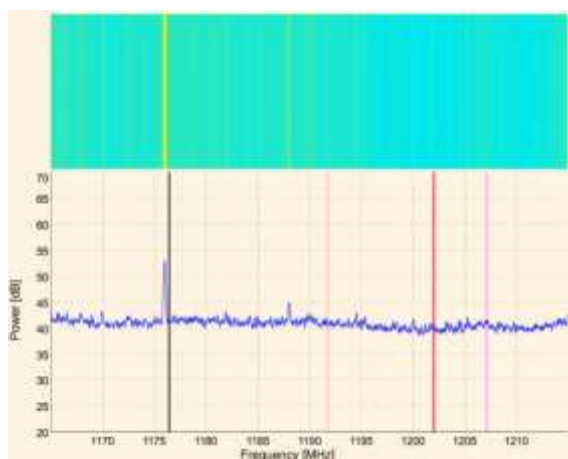
3.2.2.1 Spekter, določen s sprejemnikom Trimble R12i



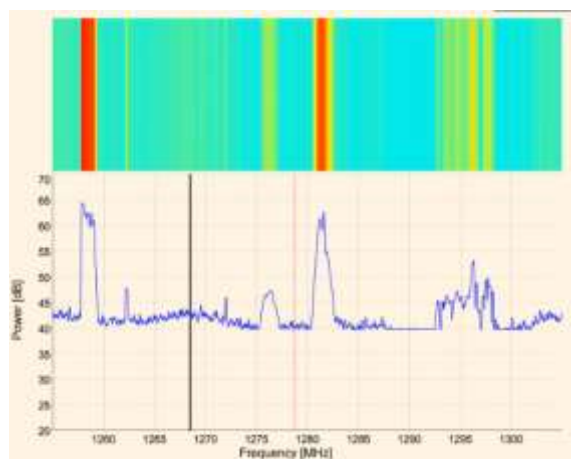
(f) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



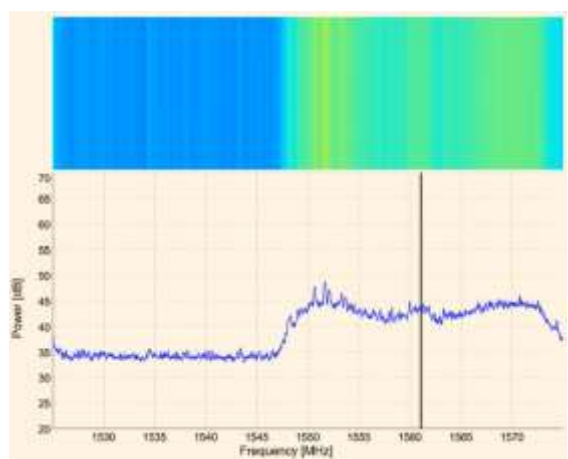
(g) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



(h) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b)



(i) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6



(j) izris B1 z označeno frekvenco B1

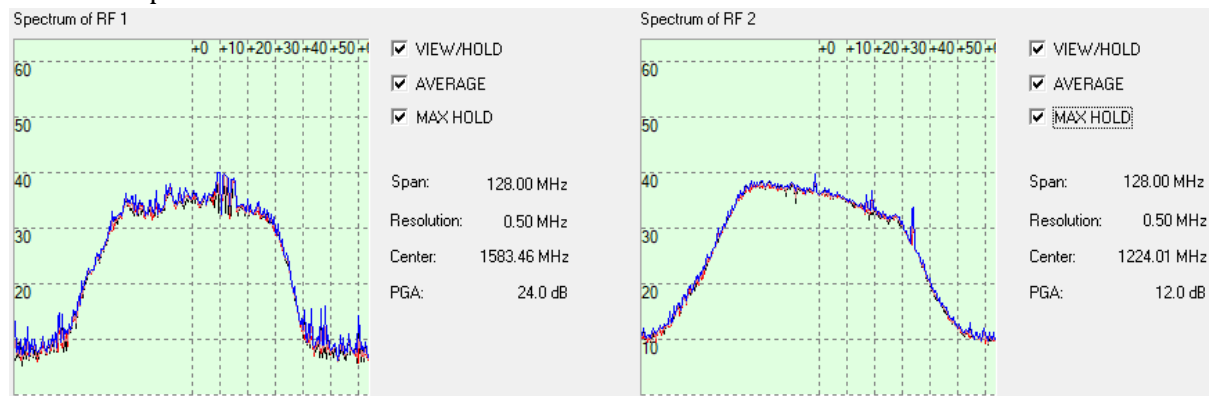
Slika 63: Malija, 26/04/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.

Z zgornjih grafov (Slika 63) je razvidno, da so v okolici točke Malija prisotne motnje, in sicer so precej izrazite v frekvenčnem območju od 1240 do 1245 MHz (območje signala GLONASS G2) ter

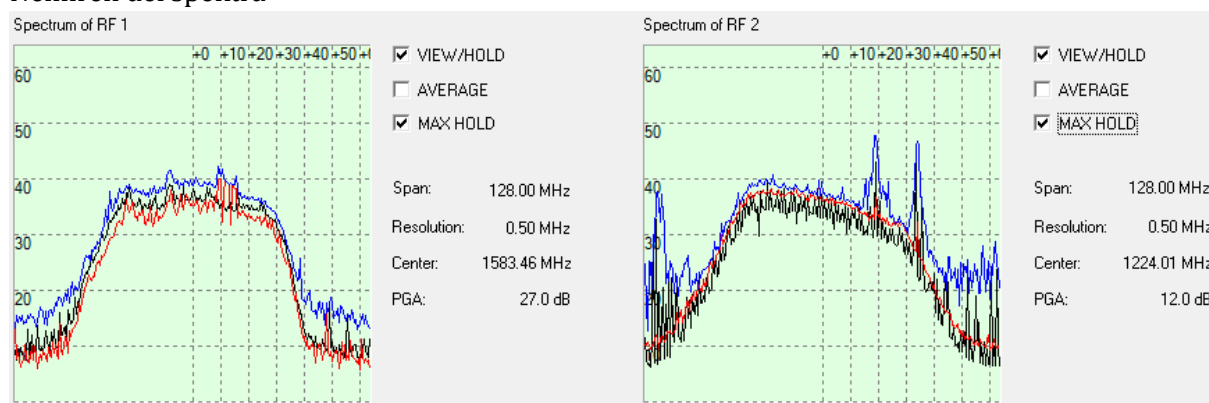
okoli 1175 MHz (blizu L5). Motnje so zaznane tudi v drugih frekvenčnih območjih, vendar ne sovpadajo s frekvencami signalov satelitov GNSS.

3.2.2.2 *Spekter, določen s sprejemnikom u-blox ZED-F9P*

Miren del spektra



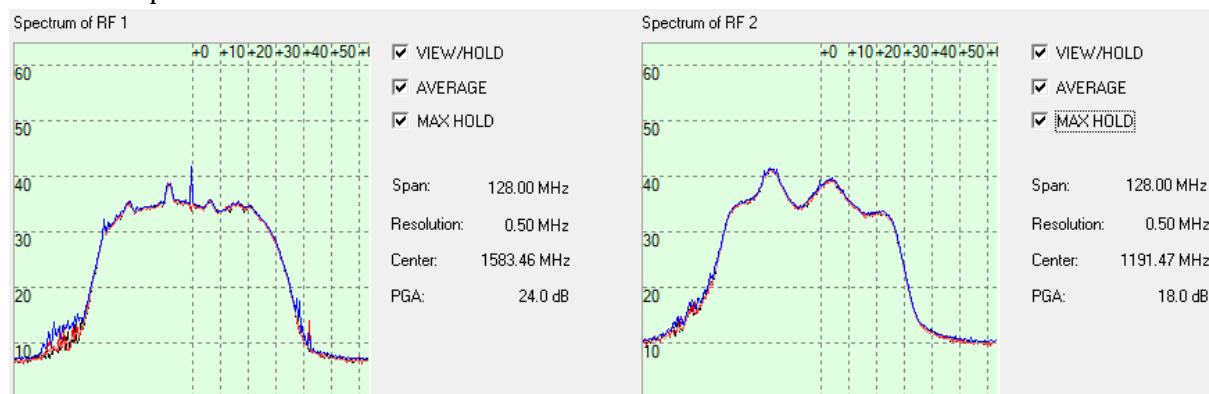
Nemiren del spektra



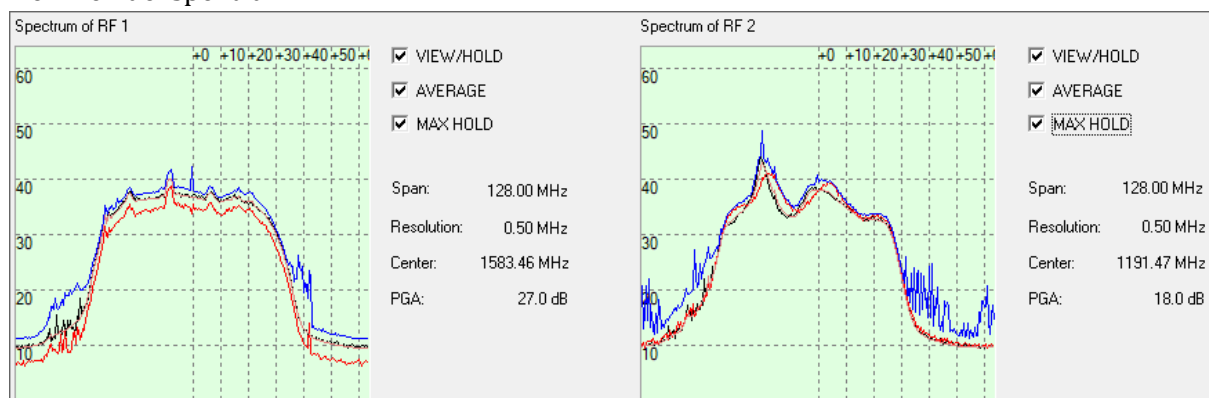
Slika 64: Malija, 26/04/2024 - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P. Levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz. Zgoraj: meritve v mirnem delu (06:29:38 UTC), spodaj: meritve v trenutku motenj (06:30:08 UTC).

Spektralne meritve signalov GNSS so časovno različno obremenjene. Na dani točki Malija se večje motnje pojavljajo občasno, vendar periodično v časovnih intervalih nekaj sekund. Časovne spremembe so bolj razvidne iz spektralnih meritev s sprejemnikom u-blox ZED-F9P glede na meritve Trimble R12i. Zgoraj (Slika 64) prikazujemo dva izseka spektralnih meritev, ki jih imamo v arhivu zabeležene za celoten čas izmere (datoteka *.ubx). Na sliki levo so prikazane spektralne meritve v območju 1523 MHz do 1640 MHz z osredinjeno frekvenco 1583,46 MHz ter v območju 1154 MHz do 1284 MHz z osredinjeno frekvenco 1224,01 MHz (desni prikazi). Zgornji sliki prikazujeta spektralne meritve v trenutku z manj motnjami, spodnji pa spektralne meritve v trenutku z motnjami. S prikazov je vidno, da so motnje v prikazu z osredinjeno frekvenco 1583,46 MHz precej manj izrazite kot motnje, prikazane desno, kjer je osredinjena frekvenca 1224,01 MHz (L2, L5, G2, G3, E5a, E5b, E5 AltBOC, E6, B2I, B2b).

Miren del spektra



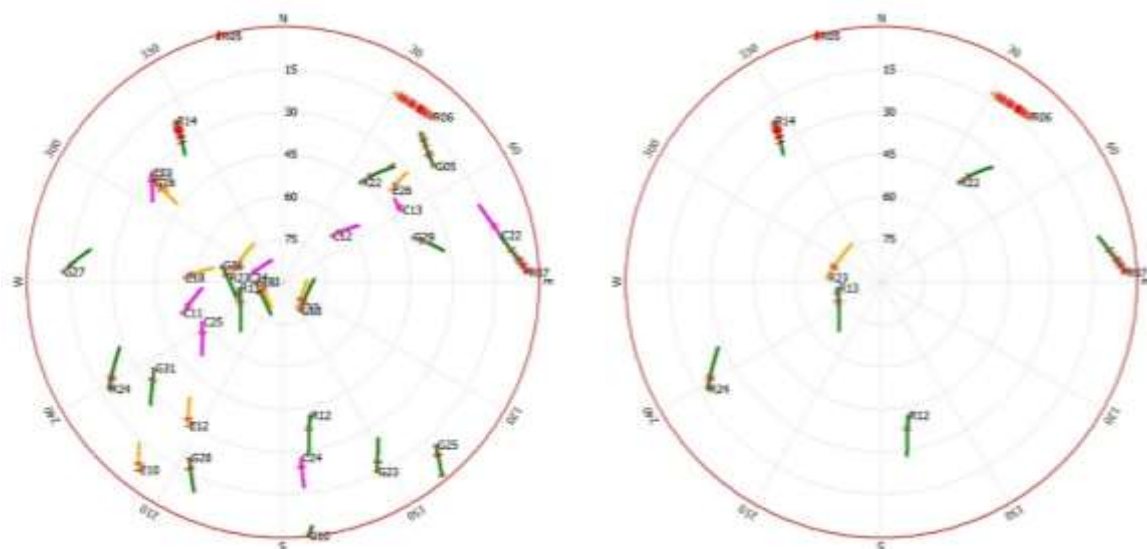
Nemiren del spektra



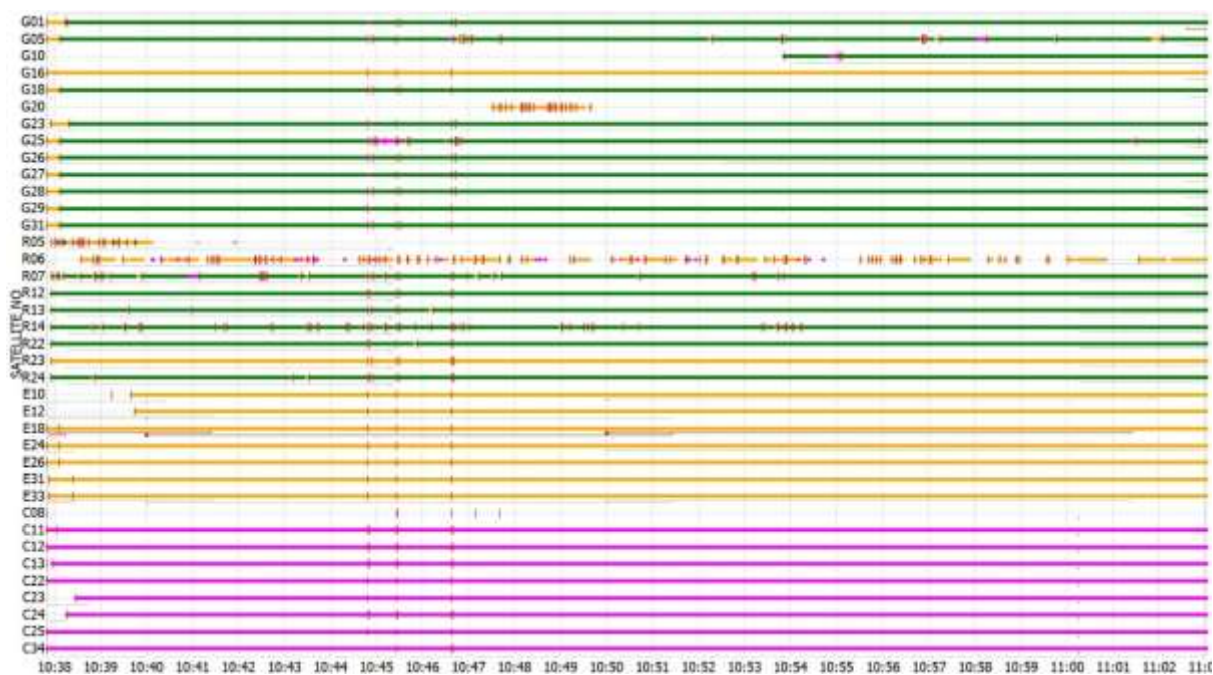
78 **Slika 65:** Malija, 09/05/2024 - spektralne meritve z u-blox NEO-F10N. Levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz. Zgoraj: meritve v mirnem delu (14:27:30 UTC), spodaj: meritve v trenutku motenj (15:35:30 UTC).

Spektralne meritve signalov GNSS so časovno različno obremenjene. Na dani točki se motnje pojavljajo občasno, vendar periodično, zaporedno v časovnem intervalu nekaj sekund. Časovne spremembe so bolj razvidne iz spektralnih meritev s sprejemnikom u-blox ZED-F9P ter NEO-F10N. Zgoraj (Slika 64) prikazujemo dva izseka spektralnih meritev, ki jih imamo v arhivu zabeležene za celoten čas izmere (datoteka *.ubx). Na sliki prikazujemo spektralne meritve v območju 1523 MHz do 1640 MHz z osredinjeno frekvenco 1583,46 MHz (levi prikazi) ter v območju 1154 MHz do 1284 MHz z osredinjeno frekvenco 1224,01 MHz (desni prikazi). Zgornji sliki prikazujeta spektralne meritve v trenutku z manj motnjami, spodnji pa spektralne meritve v trenutku z motnjami. S prikazov je vidno, da so motnje v prikazu z osredinjeno frekvenco 1583,46 MHz precej manj izrazite kot motnje, prikazane desno, kjer je osredinjena frekvenca 1191,47 MHz (L2, L5, G2, G3, E5a, E5b, E5 AltBOC, B2I, B2b).

3.2.2.3 Prisotnost izgube signala ali nenadnih skokov signala

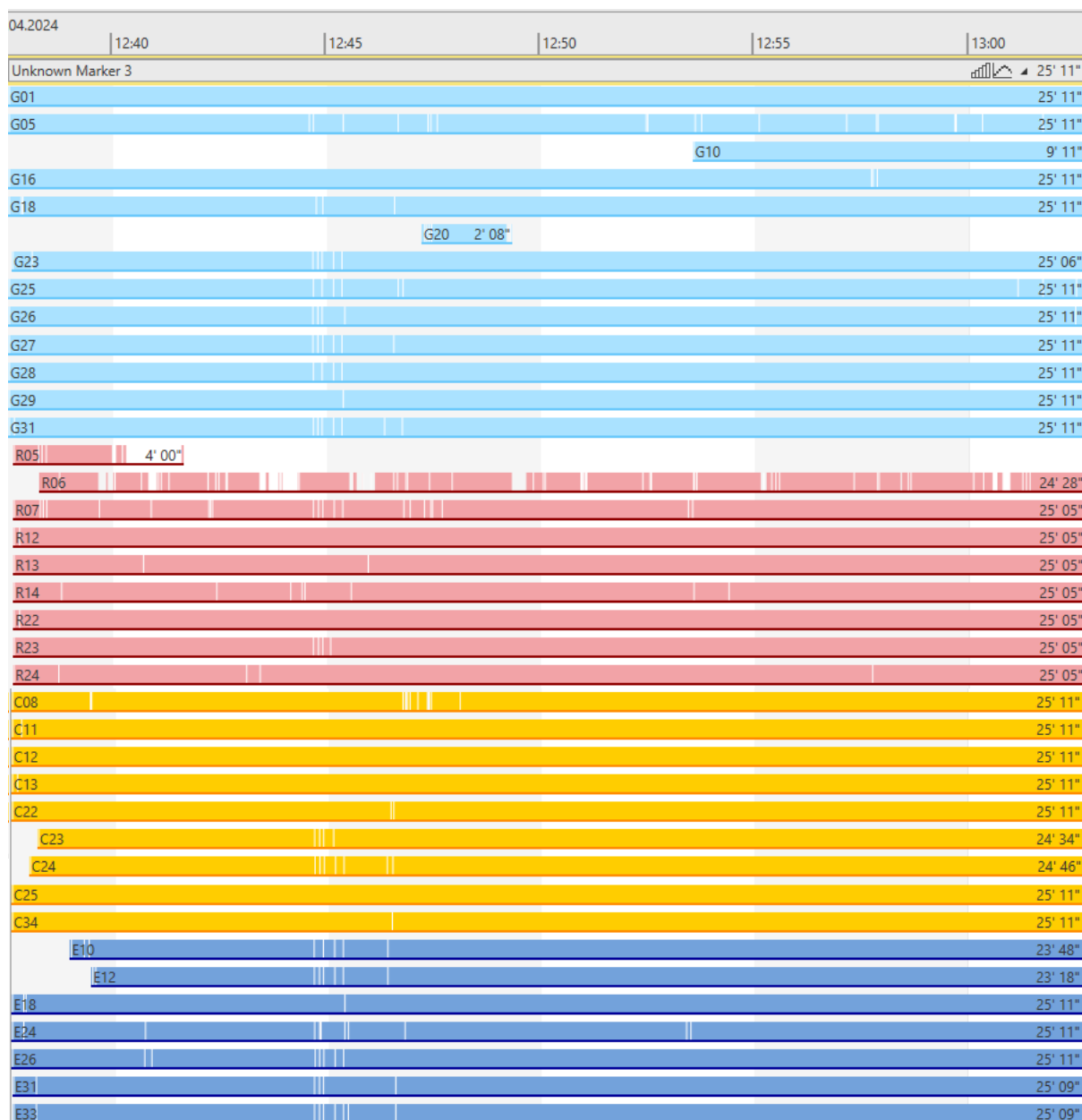


Slika 66: Malija, 26/04/2024. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij (levo); signali satelitov GLONASS, ki so zelo obremenjeni s skoki.



Slika 67: Malija, 26/04/2024 od 10:38 do 11:03 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami skokov signalov (rdeče črtice).

S slik (Slika 67, Slika 68) je očitno, da so zaporedno v določenih časovnih intervalih signali vseh satelitov obremenjeni s skoki signalov GNSS. Signali satelitov G20 ter GLONASS R06 in R14 pa so s skoki signalov obremenjeni ves čas. To je morda v povezavi s spektralnimi meritvami (Slika 63 b, Slika 64), kjer je razvidno, da je v frekvenčnem območju signalov GLONASS G2 precej izrazitih motenj.



Slika 68: Malija, 26/04/2024, od 10:38 do 11:03 UTC (na izrisu je označen lokalni čas); izris vidnih satelitov vseh konstelacij – vidne so prekinitve signalov, ki sovpadajo s skoki signalov na prejšnji sliki (Slika 67).

Če opazovanja GNSS (že v obliki RINEX) uvozimo v geodetske programe obdelave opazovanj (primer Leica Infinity, Slika 68), lahko potrdimo prejšnje ugotovitve. Motnje povzročijo nenadne skoke ali celo izgubo signalov v zaporednih časovnih intervalih pri satelitih vseh konstelacij (velja za izmero na točki Malija), fazna opazovanja satelitov GLONASS pa so obremenjena z izgubami v precej več trenutkih kot fazna opazovanja satelitov drugih konstelacij.

3.2.2.4 Preizkus sprejemnikov po standardu ISO17123-8 na točki Malija

26. aprila 2024 smo na točki Malija naredili tudi preizkus delovanja geodetskega sprejemnika Leica GS18T ter nizko-cenovnega sprejemnika u-blox ZED-F9P v RTK-načinu po standardu ISO17123-8. RTK-metodo smo naredili z navezavo na stalno postajo v Kopru (SIGNAL), ki je od delovišča oddaljena ca. 8 km. Za določitev posamezne koordinate smo na točki izvajali 15-sekuundne meritve (Slika 69).



Slika 69: Malija 26/04/2024, izvedba preizkusa sprejemnikov po standardu ISO17123-8.

Zanimivo je, da je kljub temu, da so očitne izgube signalov vseh satelitov, preizkus po standardu ISO17123-8 bil uspešen tako za sprejemnik Leica GS18T kot tudi za u-blox ZED-F9P. Uspeh preizkusa pripisujemo tudi dejstvu, da smo meritve na posamezni točki izvajali 15 s, medtem ko so motnje signalov, ki so privedle do izgube opazovanj GNSS, trajale krajši čas (nekaj sekund).

3.2.3 Nenamerne motnje - testno območje na novi točki 0. reda Livade (izmere: 26. 4. 2024)

Na bodoči lokaciji nove točke 0. reda Livade (Slika 70), ki je še v izgradnji, smo vnaprej naredili izmero z namenom, da ugotovimo kakovost opazovanj GNSS. Terensko izmero smo naredili večkrat ter z različnimi sprejemniki naredili spektralne meritve in pridobili opazovanja GNSS za naknadno obdelavo.



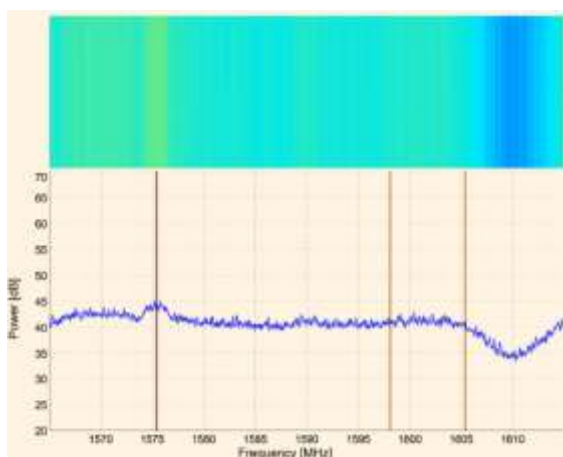
Slika 70: Livade, 26/04/2024

82

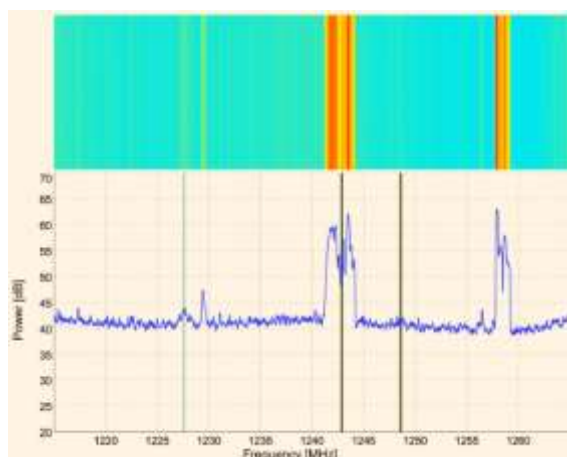
TERENSKI ZAPISNIK GNSS – ugotavljanje motenj signalov GNSS Care4SIGNAL – izdelan po izmeri	
Delovišče	Livade
Datum	26. 4. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	11:20
Ura konca izmere (lokalni čas)	12:15
Namen	Izmera spektrov signalov
Prisotni na terenu	Veton Hamza Polona Pavlovčič Prešeren
Uporabljeni motilniki	/
Uporabljeni sprejemniki GNSS	Trimble R12i Ublox ZED-F9P
Uporabljeni spektralni analizatorji	/

Slika 71: Terenski zapisnik izmere Livade, 26/04/2024.

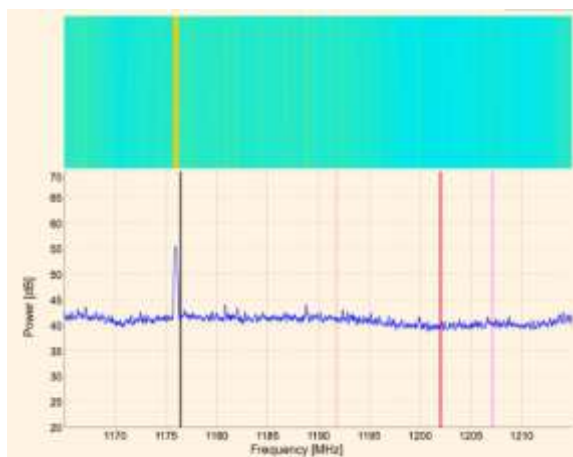
3.2.3.1 Spekter, določen s sprejemnikom Trimble R12i



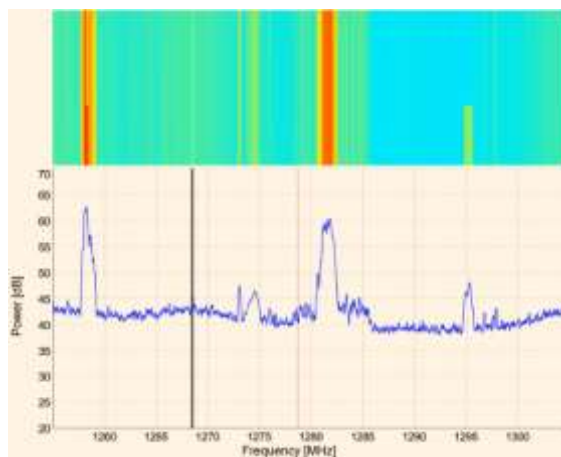
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



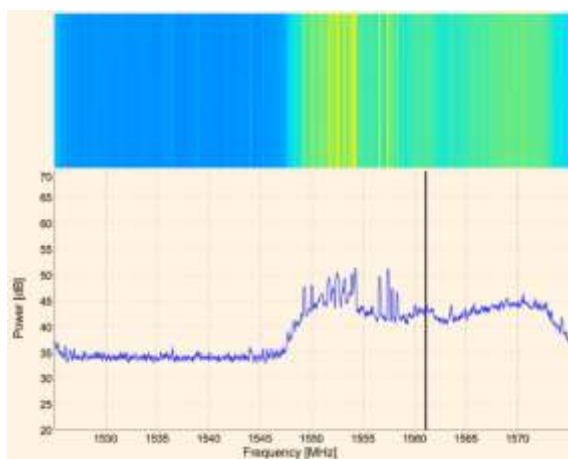
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b)



(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6



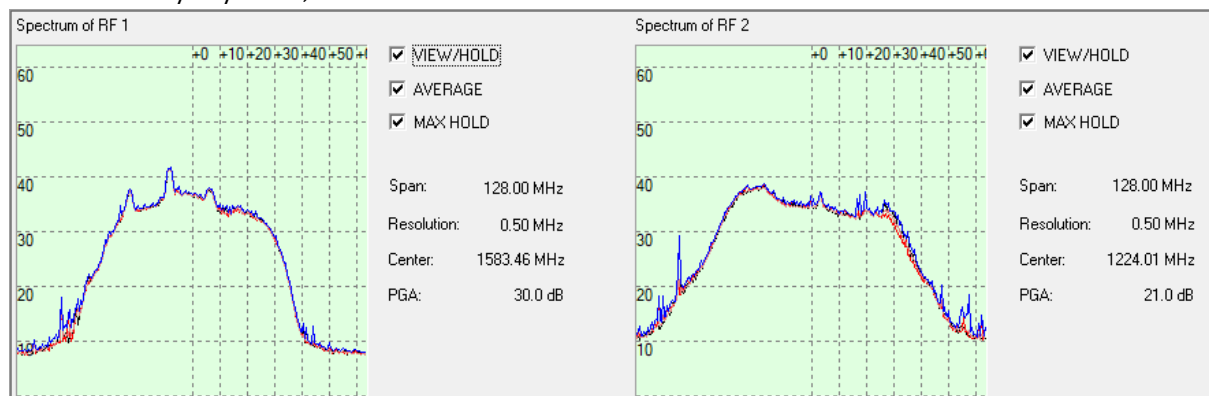
(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

Slika 72: Livade, 26/04/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.

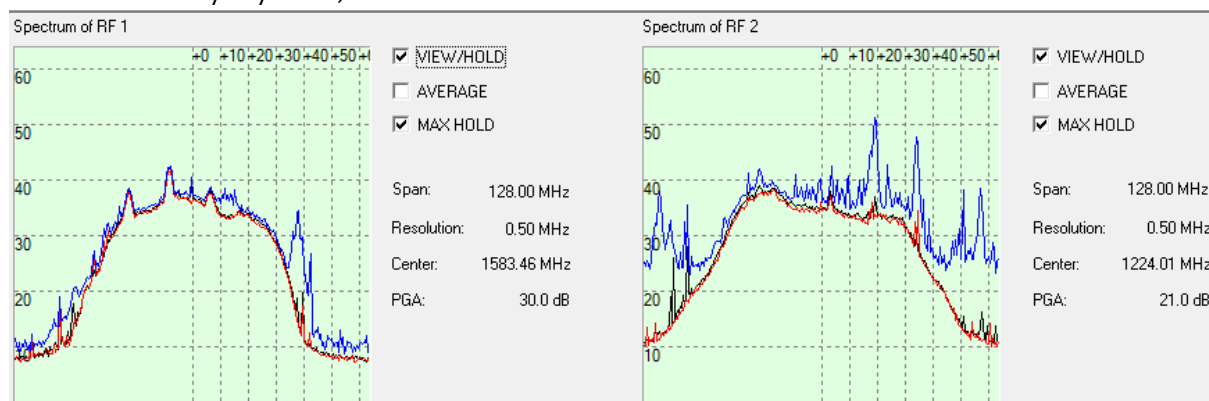
Spektralne meritve s sprejemnikom Trimble R12i so pokazale motnje v območju GLONASS G2 signalov in tik pred osredinjenim območjem signalov L5 (Slika 72). Glede na spektralne meritve je bilo pričakovati, da bodo fazna opazovanja GNSS za satelite GLONASS ter Galileo bolj obremenjena s skoki signalov (Slika 74, Slika 75).

3.2.3.2 *Spekter, določen z dvema sprejemnikoma u-blox ZED-F9P*

Miren del: 26/04/2024, 09:21:45

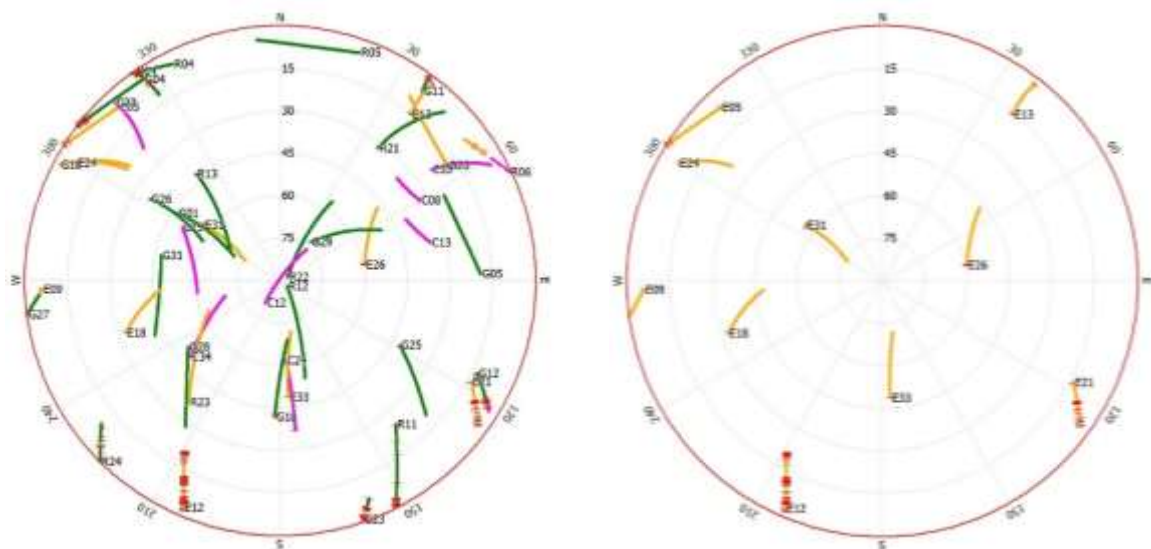


Nemiren del: 26/04/2024, 09:34:16

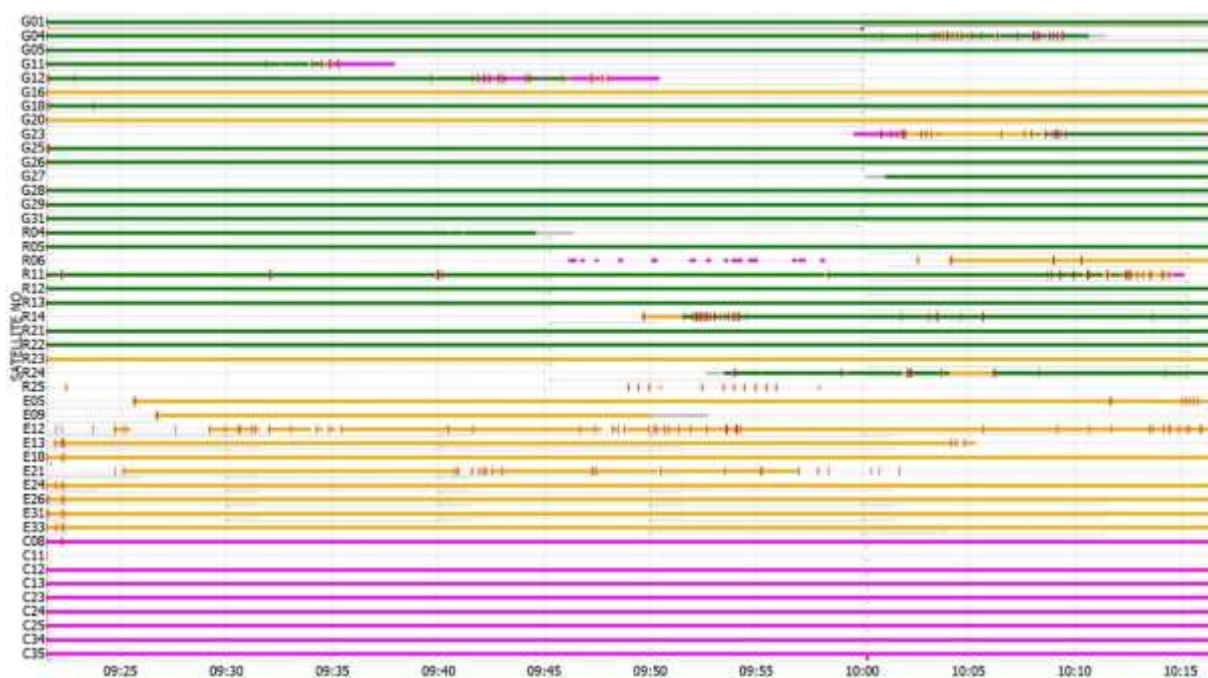


Slika 73: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz.

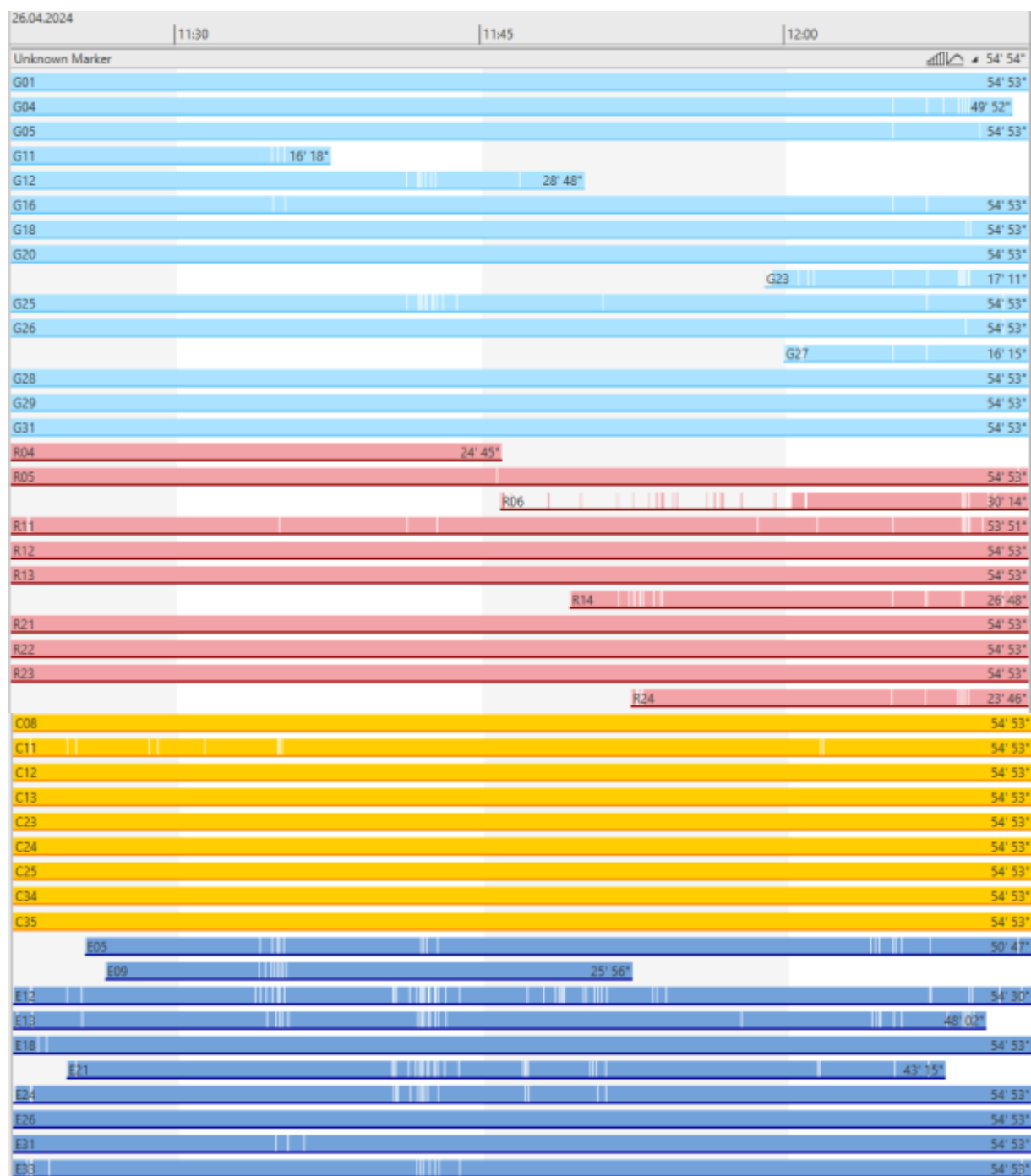
Spektralne meritve s sprejemnikom u-blox ZED-F9P so enako kot v primeru sprejemnika Trimble pokazale na motnje signalov GNSS, precej hitreje so tudi očitna večja odstopanja od spektrov signalov. Na dani točki so očitne večje motnje, ki se dogajajo občasno in trajajo nekaj sekund. Zgoraj (Slika 73) zato izrisujemo spektre signalov v trenutku mirnega (zgoraj) in zelo nemirnega (spodaj) izmere spektra. Podobna situacija se dogaja periodično na nekaj sekund.



Slika 74: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC. Levo: izris tirnic vseh satelitov z oznakami skokov signala (rdeča črtica); desno: izris tirnic satelitov Galileo.



Slika 75: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami skokov signala (rdeča črtica).



Slika 76: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij – vidne so prekinitev signalov, ki sovpadajo s skoki signalov na prejšnji sliki.

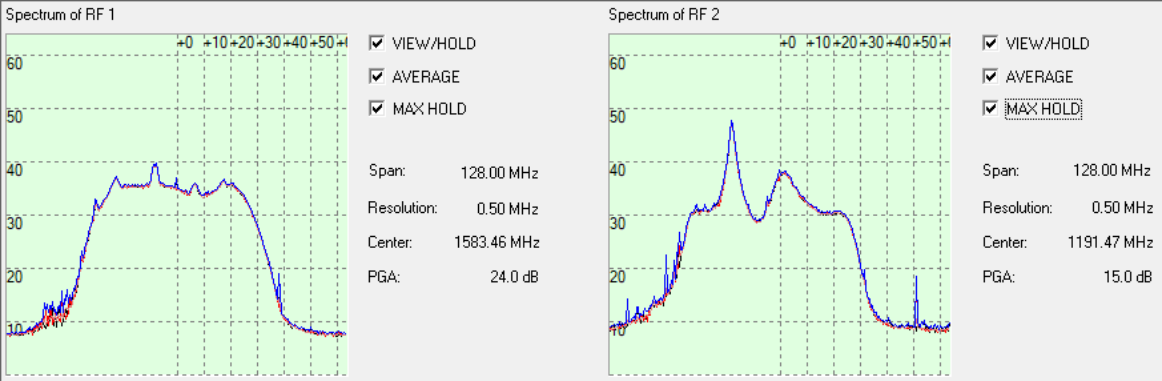
Na zgornjem prikazu (Slika 76, izris opazovanj GNSS za posamezne satelite različnih konstelacij v programskem okolju Leica Infinity) lahko potrdimo, da je precej prekinitev opazovanj satelitov GLONASS in še več Galileo, ki so bržkone posledica motenj signalov GNSS. Glede na rezultate meritev na nekaj kilometrov stran oddaljeni točki Malija pa vseeno lahko zaključimo, da so meritve na novi točki 0. reda Livade precej bolj kakovostne.

3.2.4 Nenamerne motnje - testno območje na novi točki 0. reda Livade (izmeri: 29. 4. 2024, 30. 4. 2024)

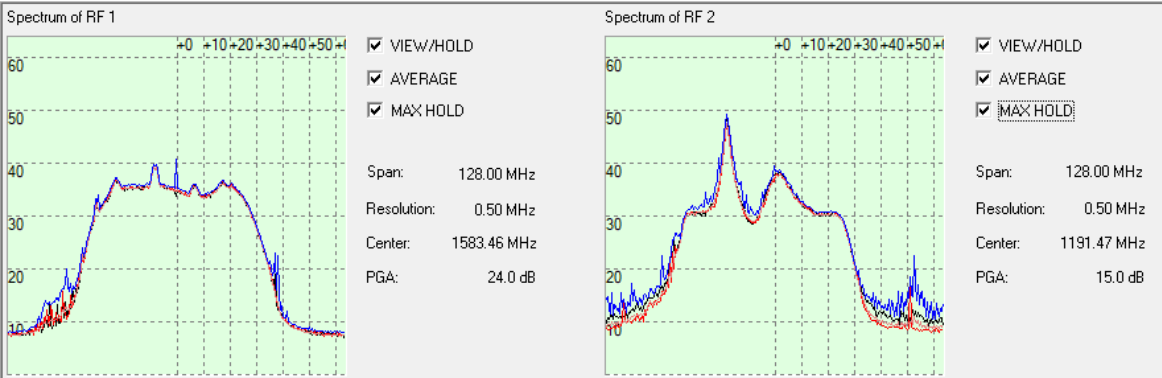
TERENSKI ZAPISNIK GNSS – ugotavljanje motenj signalov GNSS	
Care4SIGNAL – izdelan po izmeri	
Delovišče	Livade
Datum	29. 4. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	13:30
Ura konca izmere (lokalni čas)	14:00
Namen	Izmera spektrov signalov
Prisotni na terenu	Franc Dimc
Uporabljeni motilniki	/
Uporabljeni sprejemniki GNSS	Ublox
Uporabljeni spektralni analizatorji	/

Slika 77: Terenski zapisnik izmere Livade, 26/04/2024. Uporabljeni sprejemnik je ZED F9P, u-blox.

Miren del spektra 29/04/2024, 11:26:46



Nemiren del 29/04/2024: 11:27:26



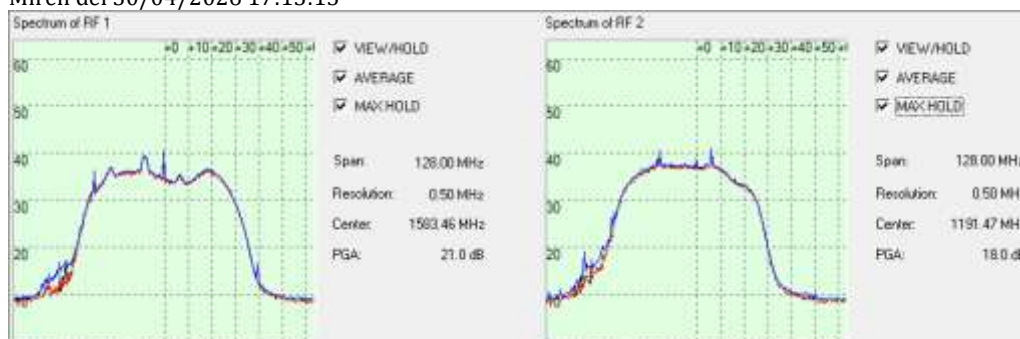
Slika 78: Livade, 29/04/2024, 11:30 do 12:00 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P (L1 in L5); levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz.

TERENSKI ZAPISNIK GNSS – ugotavljanje motenj signalov GNSS Care4SIGNAL – izdelan po izmeri

Delovišče	Livade
Datum	30. 4. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	9:15
Ura konca izmere (lokalni čas)	9:45
Namen	Izmera spektrov signalov
Prisotni na terenu	Franc Dimc
Uporabljeni motilniki	/
Uporabljeni sprejemniki GNSS	Ublox
Uporabljeni spektralni analizatorji	/

Slika 79: Terenski zapisnik izmere Livade, 30/04/2024. Uporabljeni sprejemnik je ZED F9P, u-blox.

Miren del 30/04/2026 17:15:15



88

Nemiren del, 30/04/2026 17:18:15



Slika 80: Livade, 29/04/2024, 11:59:30 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz.

Zanimivo je, da smo z enakim sprejemnikom v dveh zaporednih dnevih (29. in 30. april 2024) izmerili precej drugačne motnje signalov, sploh za osredinjeno območje 1191,47 MHz. 29. aprila 2024 so bile motnje precej bolj izrazite (levo Slika 78) kot pa meritve naslednji dan (levo Slika 80). Tudi v teh dveh dnevih pa se določene motnje pojavljajo le občasno.

Glede na to, da smo v različnih dnevih izmerili precej drugačne motnje signalov GNSS, bi bilo sploh za novo točko Livade v prihodnje smiselno izvesti ponovno izmero GNSS, in sicer istočasno z vsem razpoložljivimi sprejemniki in po možnosti tudi s profesionalnimi spektralnimi analizatorji.

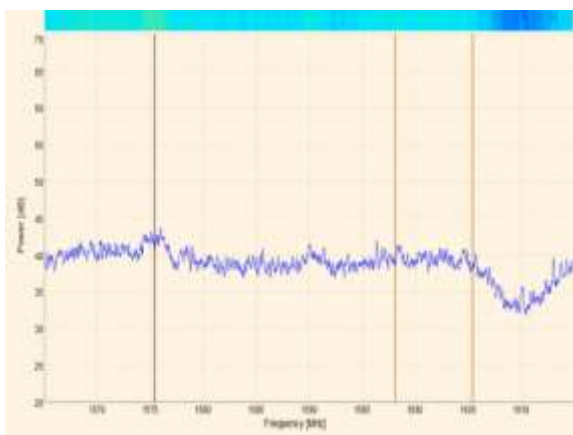
3.2.5 Nenamerne motnje - testno območje na Pasji ravni (izmera: 5. 11. 2024)

Znano je, da v okolici radarjev obstajajo motnje signalov GNSS. Zato smo raziskavo motenj v posameznem frekvenčnem območju naredili v neposredni bližini vremenskega radarja na Pasji ravni (Slika 81), ki je še v izgradnji, smo v naprej naredili izmero z namenom, da ugotovimo kakovost opazovanj GNSS. Terensko izmero smo naredili večkrat ter z različnimi sprejemniki naredili spektralne meritve in pridobili opazovanja GNSS za naknadno obdelavo.

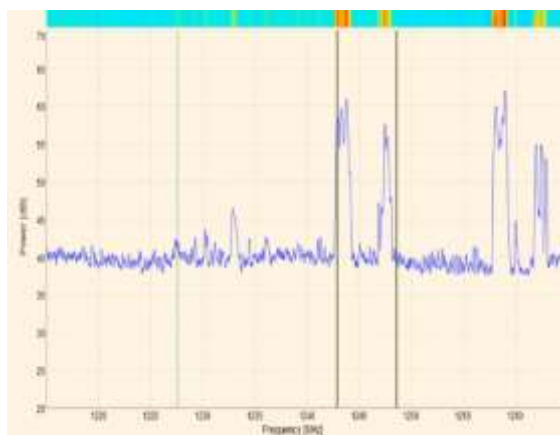


Slika 81: Pasja ravan, 5/11/2024

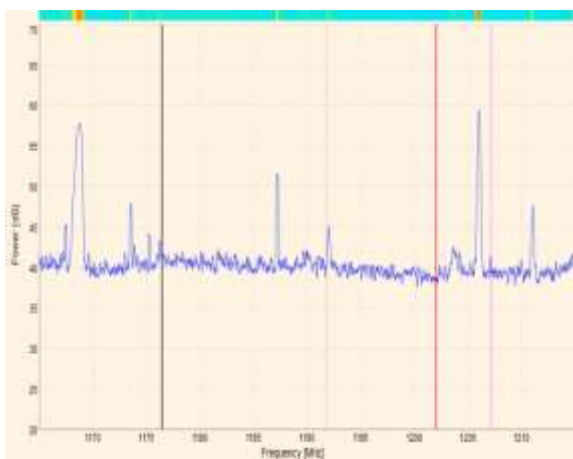
3.2.5.1 Spekter na Pasji ravni, določen s sprejemnikom Trimble R12i



(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



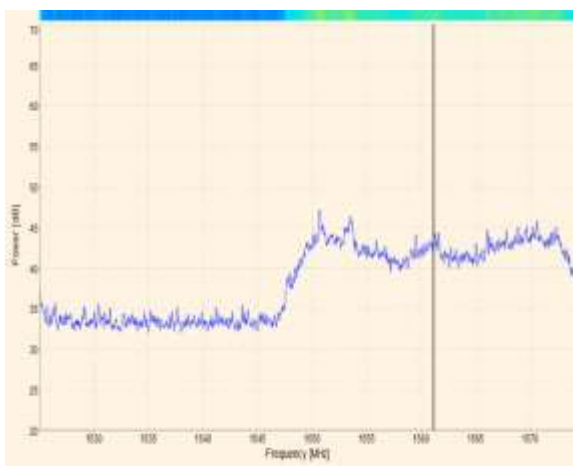
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, E5b, E5AltBOC, B2I, B2b



(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6



(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

Slika 82: Pasja ravn, 05/11/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.

Spektralne meritve s sprejemnikom Trimble R12i so pokazale motnje v območju GLONASS G2 signalov in tik pred osredinjenim območjem signalov L5 (Slika 82). Glede na spektralne meritve

je pričakovati, da bodo fazna opazovanja GNSS za satelite GLONASS ter Galileo bolj obremenjena s skoki signalov.

3.2.6 Namerne motnje – testno območje: Črnotiče (15. 5. 2024)



Slika 83: Črnotiče, 15/05/2015: izmera z geodetskimi sprejemniki (spreda) z namernimi motnjami signalov

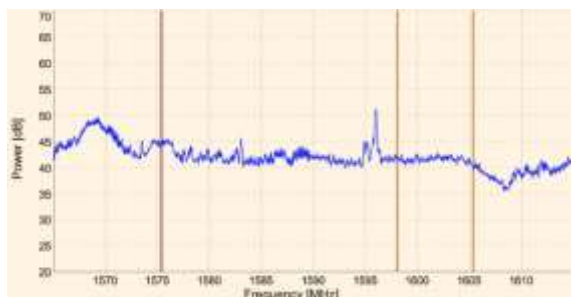
TERENSKI ZAPISNIK GNSS – ugotavljanje motenj signalov GNSS Care4SIGNAL – izdelan po izmeri	
Delovišče	Črnotiče
Datum	15. 5. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	8:00
Ura konca izmere (lokalni čas)	14:00
Namen	Namerne motenj signalov GNSS
Prisotni na terenu	Blatnik Aljaž (FE) Zmrzlak Luka (FE) Pavlovčič Prešeren Polona (FGG) Dimc Franc (FPP)
Uporabljeni motilniki	Nizko-cenovni (rušička) Profesionalni simulator (FE)
Uporabljeni sprejemniki GNSS	Sprejemniki: ublox ZED-F9P (L1, L2) Sprejemniki ublox ZED-F9P (L1, L5) Trimble R12i LeicaGS15 LeicaGS18 Javad Triumph-LSA (težave, ni arhiva opazovanj)
Uporabljeni spektralni analizatorji	/

Slika 84: Črnotiče, 15/05/2015: terenski zapisnik

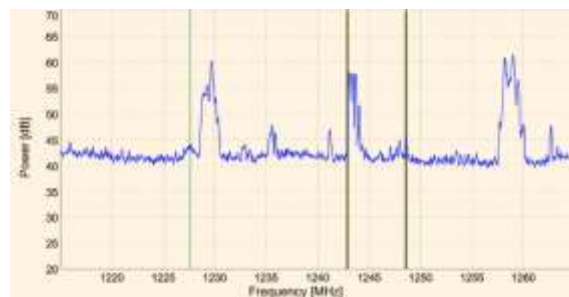
Preglednica 8: Časi motenja

Motilnik	Čas motenja
Ruščika	07:45 – 07:46 UTC 07:57 – 08:29 UTC 08:35 – 08:47 UTC
simulator Keysight	08:54 – 09:30 UTC

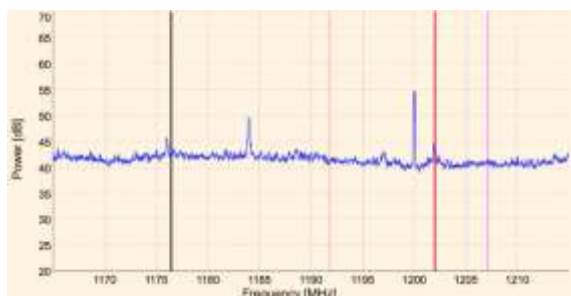
3.2.6.1 Spekter signalov (Trimble R12i), uporaba motilnika Ruščika



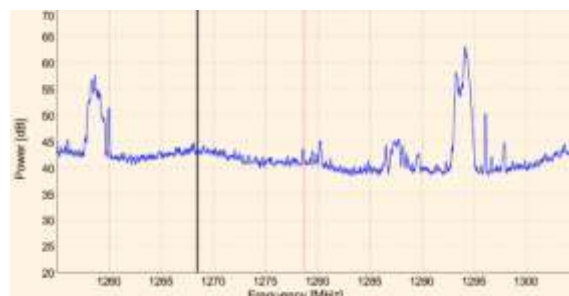
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1, Max Hold, motilnik Ruščika, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00



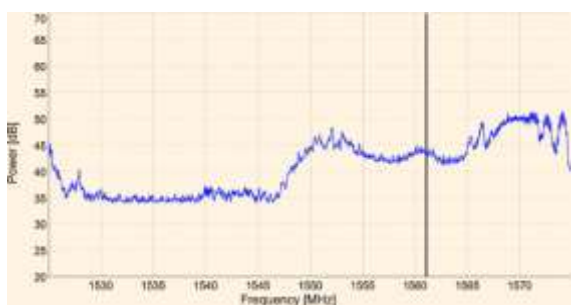
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2, Max Hold, motilnik Ruščika, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2L, B2b), Max Hold, motilnik Ruščika, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00



(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6, Max Hold, motilnik Ruščika, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00

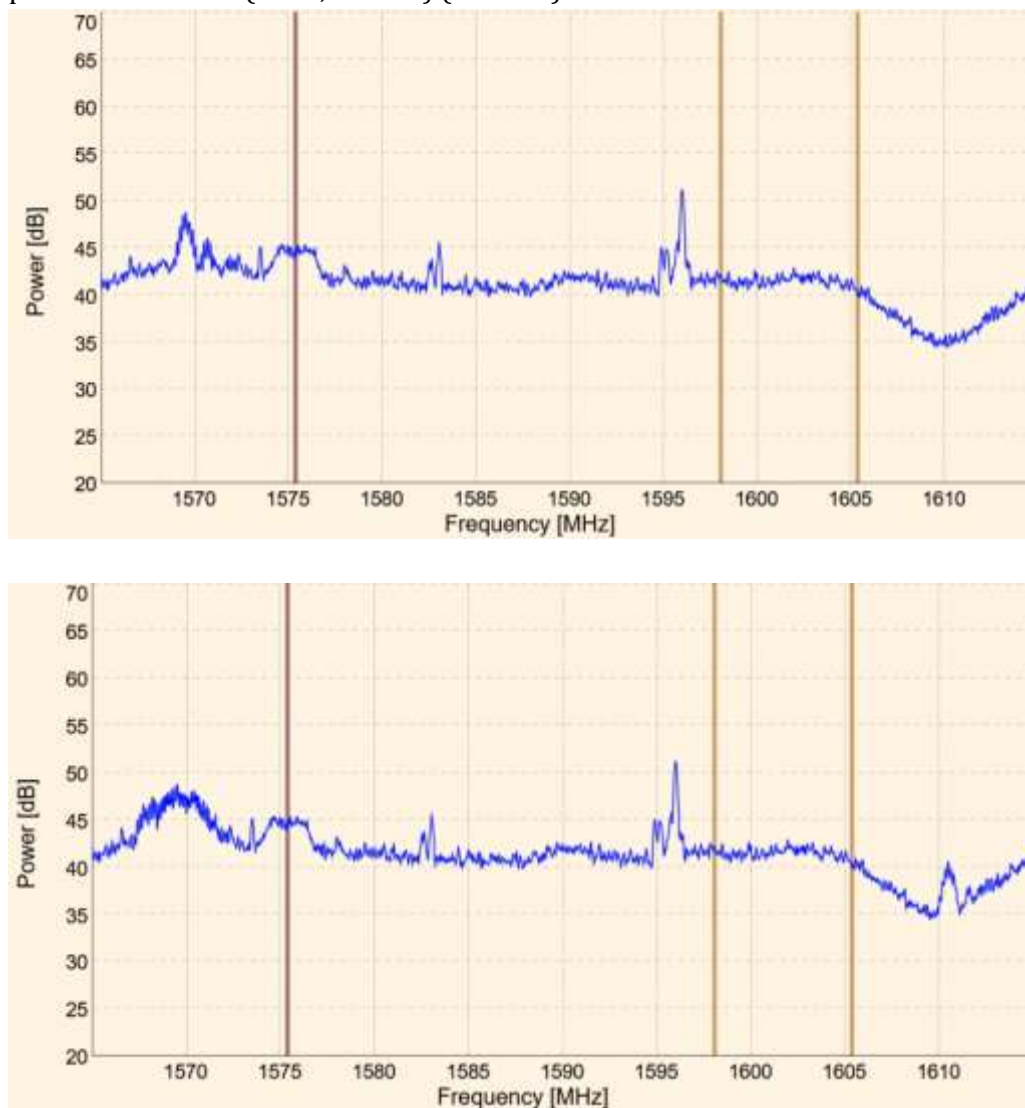


(e) izris B1 z označeno frekvenco B1, Max Hold, motilnik Ruščika, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00

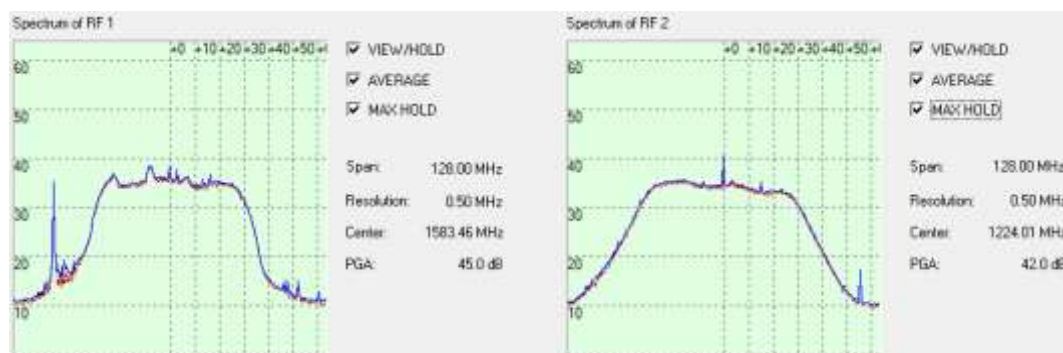
Slika 85: Črnotiče, 15/05/2024, , 09:57:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Ruščika.

Če primerjamo spektralne meritve med namernimi motnjami z geodetskim sprejemnikom Trimble R12i (Slika 85) in nizko-cenovnima sprejemnikoma u-blox ZED-F9P (Slika 93, Slika 94), lahko rečemo, da so namerne motnje z motilnikom Ruščika precej lažje zaznavne v spektrih,

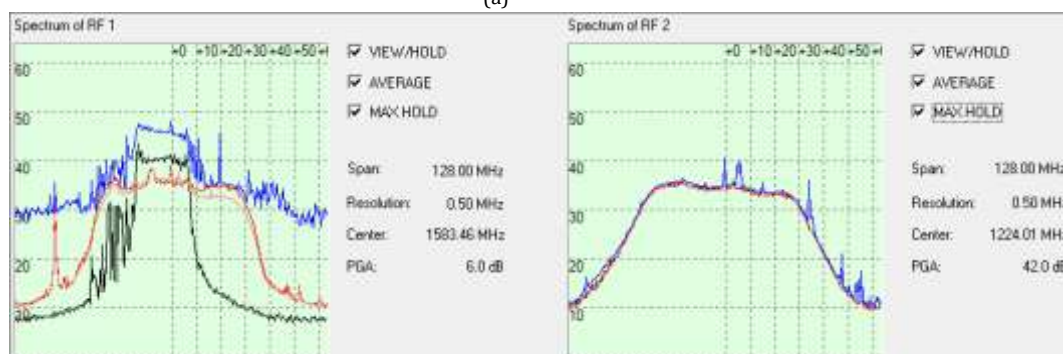
pridobljenih s sprejemniki u-blox. Precej bolj očitno je razvidno popačenje spektrov signalov na območju od 1230 MHz do 1640 MHz (primerjava levih slik zgoraj in spodaj, Slika 93 Slika 94). Na spektralnih meritvah iz sprejemnika Trimble R12i je na frekvenci L1 zaznan skok, enako na frekvenčnem območju signalov GLONASS L2, vendar iz izrisov precej težje sklepamo o pojavi motenj z motilnikom Rušička. S slike a – območje L1 (Slika 85) je zaznaven dvig grafa na območju pred frekvenco L1 (1575,42 MHz) (Slika 93).



Slika 86: Črnotiče, 15/05/2024, 09:57:00 - spektralne meritve (Max Hold) s sprejemnikom Trimble R12i pred motenjem z motilnikom Rušička (zgoraj) ter v času motenja z motilnikom Rušička (spodaj).

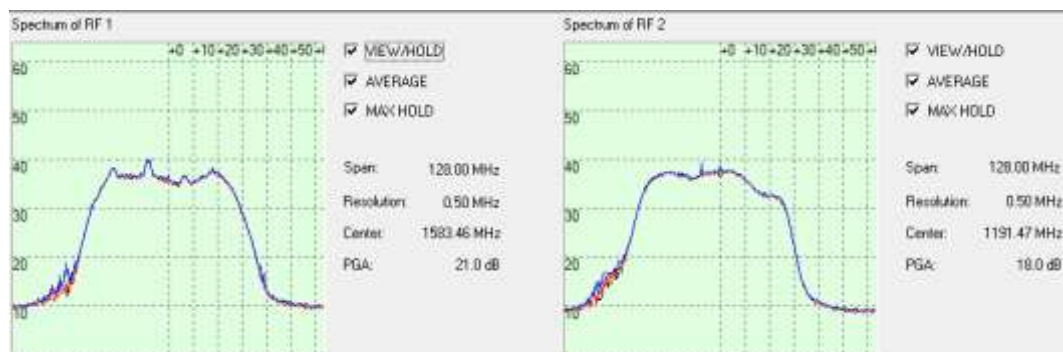


(a)

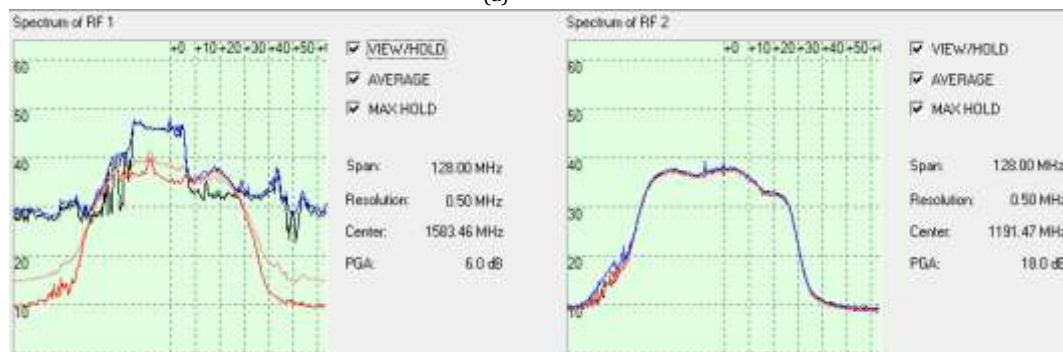


(b)

Slika 87: Sprejemnik u-blox ZED-F9P (L1, L2). Spekter GNSS na frekvenci L1 (levo) in L2 (desno), motilnik Rušička; (a) pred motnjami, 07:55:00 UTC, (b) med motnjami; 07:57:10



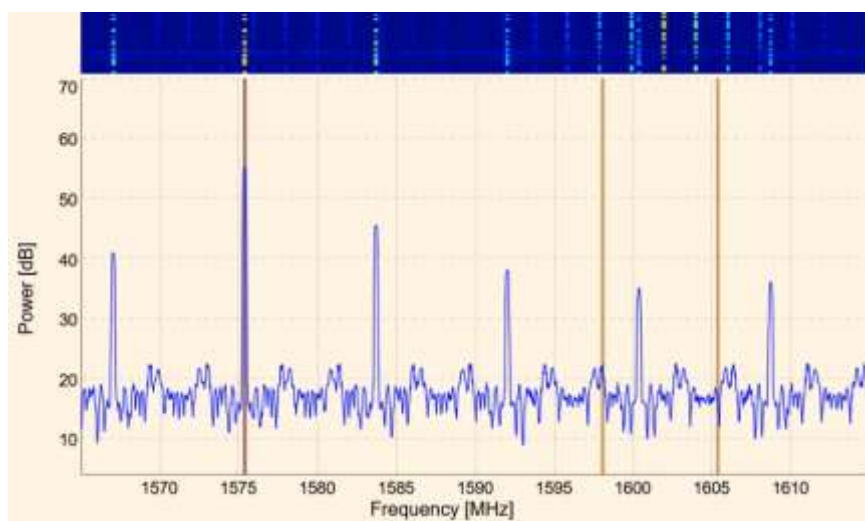
(a)



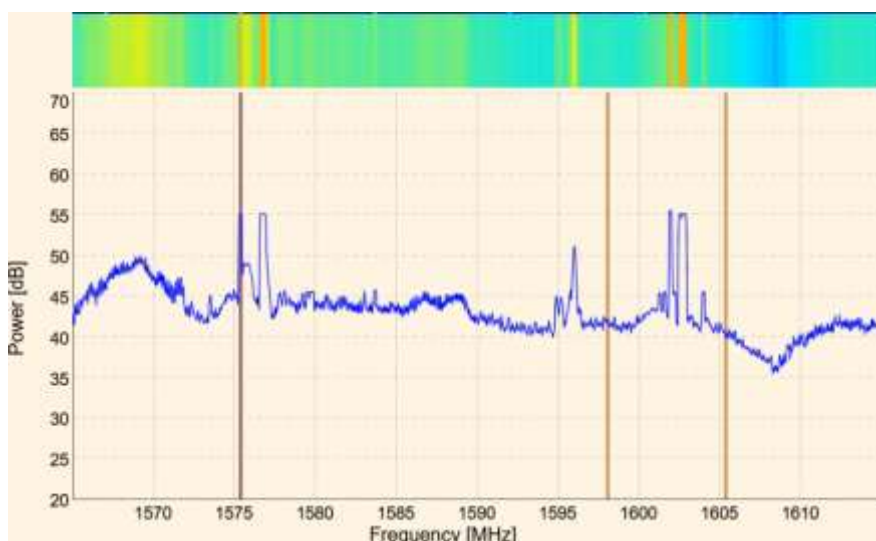
(b)

Slika 88: Sprejemnik u-blox ZED-F9P (L1, L5). Spekter GNSS na frekvenci L1 (levo) in L5 (desno), motilnik Rušička; (a) pred motnjami, 07:55:00 UTC, (b) med motnjami; 2024/05/15, 09:57:00

3.2.6.2 Spekter (Trimble R12i), profesionalni motilnik Keysight N5182B



Slika 89: Spekter GNSS na frekvenci L1, brez filtra, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 07:59:59

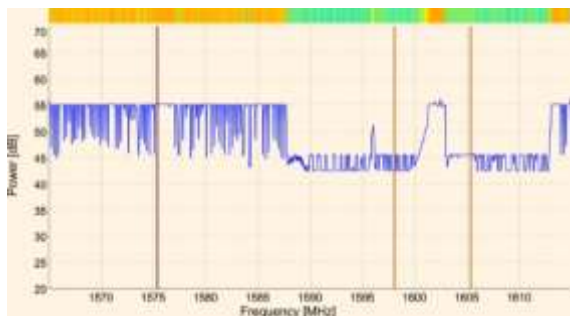


Slika 90: Spekter GNSS na frekvenci L1, Max Hold, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 08:00:00

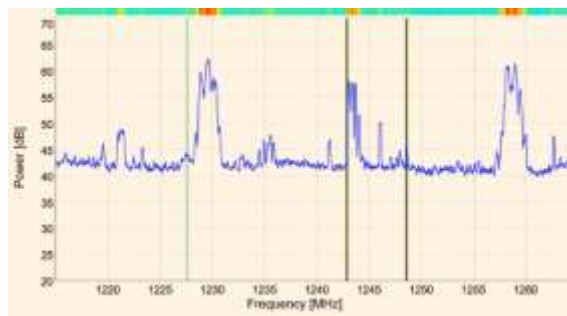
V času motenja s profesionalnim motilnikom Keysight N5182B smo s sprejemnikom Trimble R12i na frekvenčnem območju L1 zaznali precej očitno motenje, ki je bilo razpoznavno tako na nefiltriranih meritvah (Slika 89) kot tudi v meritvah v načinu *Max Hold* (Slika 90). Zaznali smo tudi občutno zmanjšanje satelitskih signalov vse do popolne izgube signalov GPS (Slika 91).



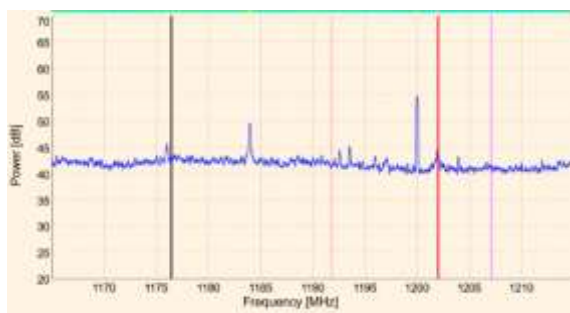
Slika 91: Črnotiče, 15/05/2024: vidni satelit v času motnje z motilnikom Keysight N5182B.



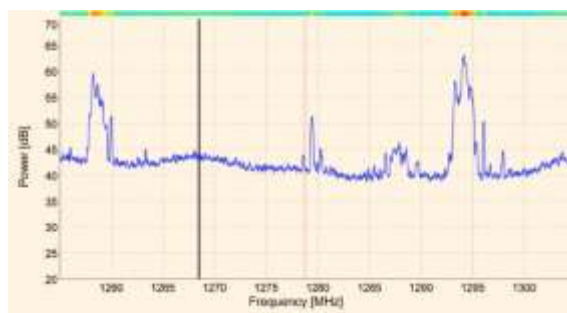
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



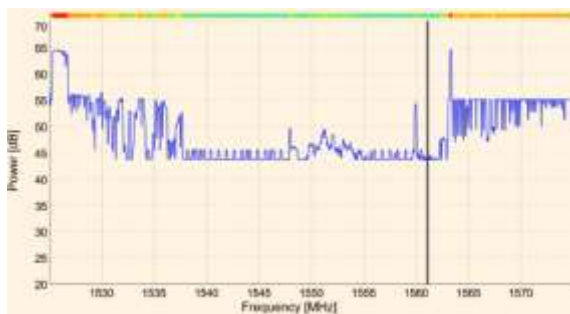
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b), Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



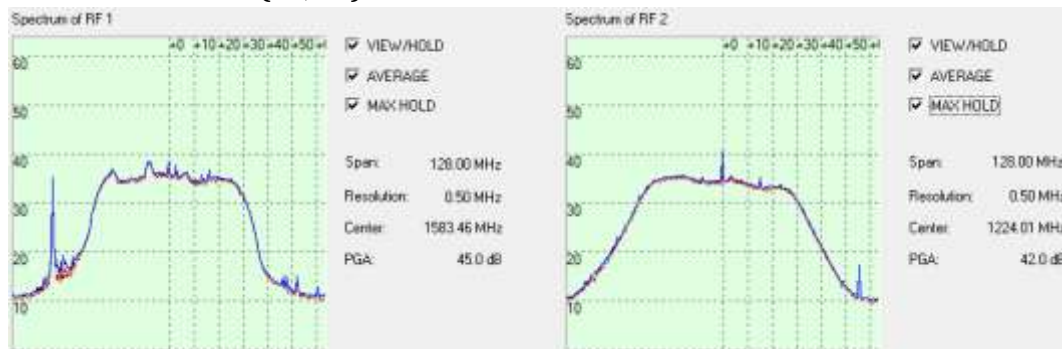
(e) izris B1 z označeno frekvenco B1, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00

Slika 92: Črnotiče, 15/05/2024, 11:25:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Keysight.

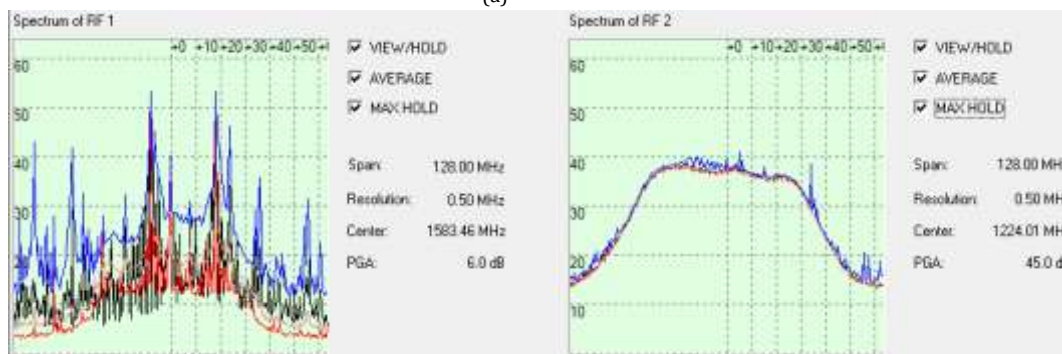
Če primerjamo izrise spektrov signalov med sprejemnikoma Trimble R12i (programje v sprejemniku) ter u-blox ZED-F9P (program u-center), so motnje, ki se jih lahko direktno opazi že med samo terensko izmero, bolj opazne pri izrisih v programu u-center. Prednost uporabe nizko-cenovnih sprejemnikov u-blox je tudi v možnosti shranjevanja spektralnih meritev v binarnem formatu *.ubx, kar lahko uporabimo v naknadni analizi opazovanj (predvajanje motenj). V sprejemniku Trimble R12i se zabeleži le grafični odtis spektrov (slika) za čas trajanja izmere, medtem ko motenj ne moremo predvajati. So pa motnje zaznane z obema vrstama sprejemnikov.

3.2.6.3 Spekter, izmerjen z u-blox, ob uporabi motilnika Keysight N5182B

→ u-blox ZED-F9P (L1, L2)



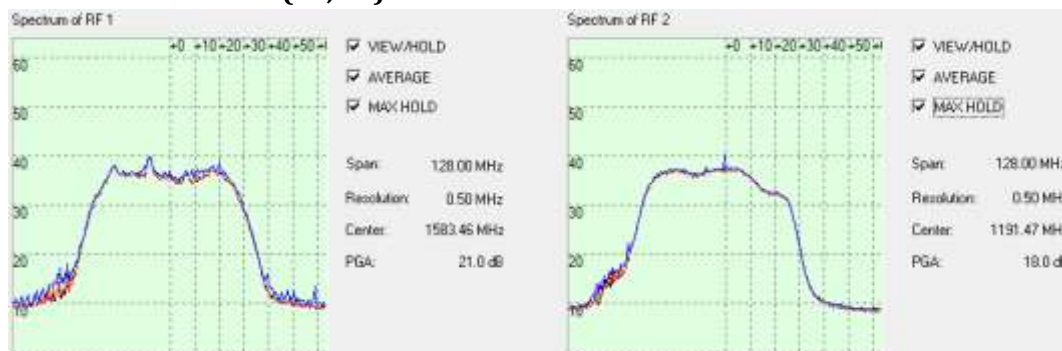
(a)



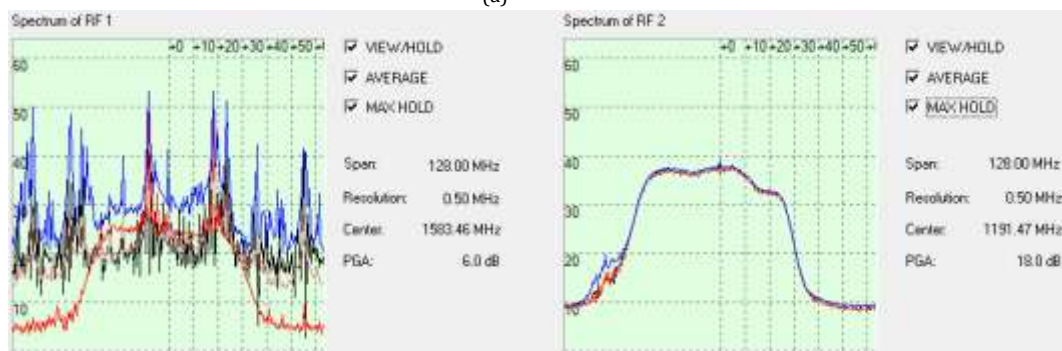
(b)

Slika 93: Spekter GNSS na območju okoli L1 (levo) in na območju L2 (desno), motilnik Keysight; (a) pred motnjami 08:50:51 UTC, (b) med motnjami; 2024/05/15, 08:55:00 UTC

→ u-blox NEO-F10N (L1, L5)



(a)



(b)

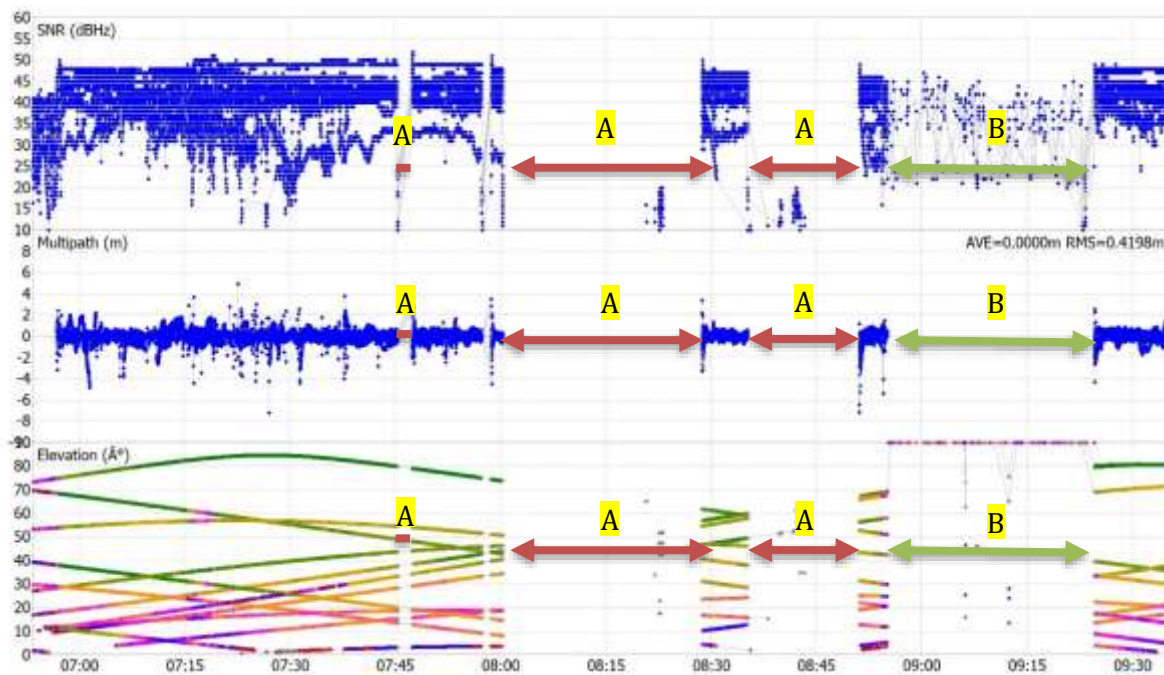
Slika 94: Spekter GNSS na frekvenci L1 (levo) in L5 (desno), motilnik Keysight; (a) pred motnjami 08:50:51 UTC, (b) med motnjami; 2024/05/15, 08:55:00 UTC

3.2.6.4 Spremljanje števila satelitov, C/N0

V nadaljevanju predstavljamo izrise za celotno izmero v Črnotičah, ko smo uporabili različne motilnike in sicer:

(A) motilnik **Rušička**, časi motenj: 7:45–7:46 UTC, 7:57–8:29 UTC in 8:35–8:47 UTC;

(B) motilnik **Keysight**: 8:54–9:30 UTC.



Slika 95: Izrisi vrednosti SNR (zgoraj), odboja signala (sredina) in višinskega kota (spodaj) za izbrane satelite v času motenj

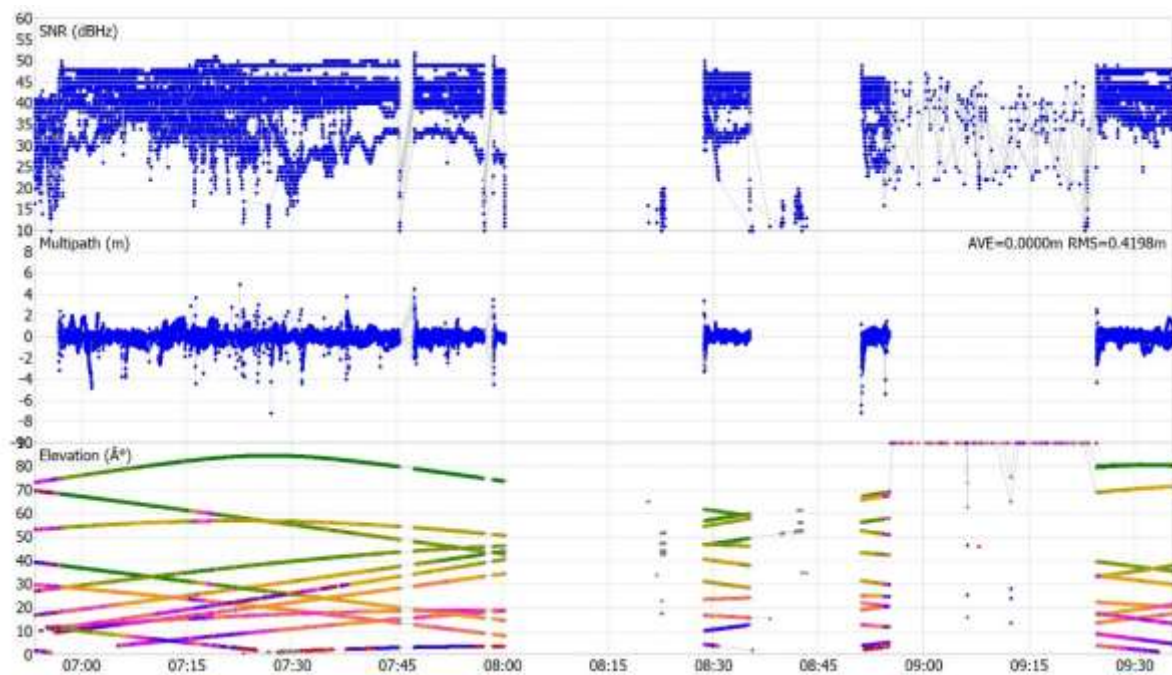
Glede na to, da sta oba motilnika delovala v frekvenčnem območju L1 (razvidno s spodnjih slik Slika 87, Slika 88, Slika 93, Slika 94), v nadaljevanju prikazujemo delovanje sprejemnikov posebej za posamezne konstelacije.

Rezultate predstavljamo za vrednosti signalov SNR vseh razpoložljivih konstelacij, ki so jih sprejemniki uspeli zabeležiti, in sicer:

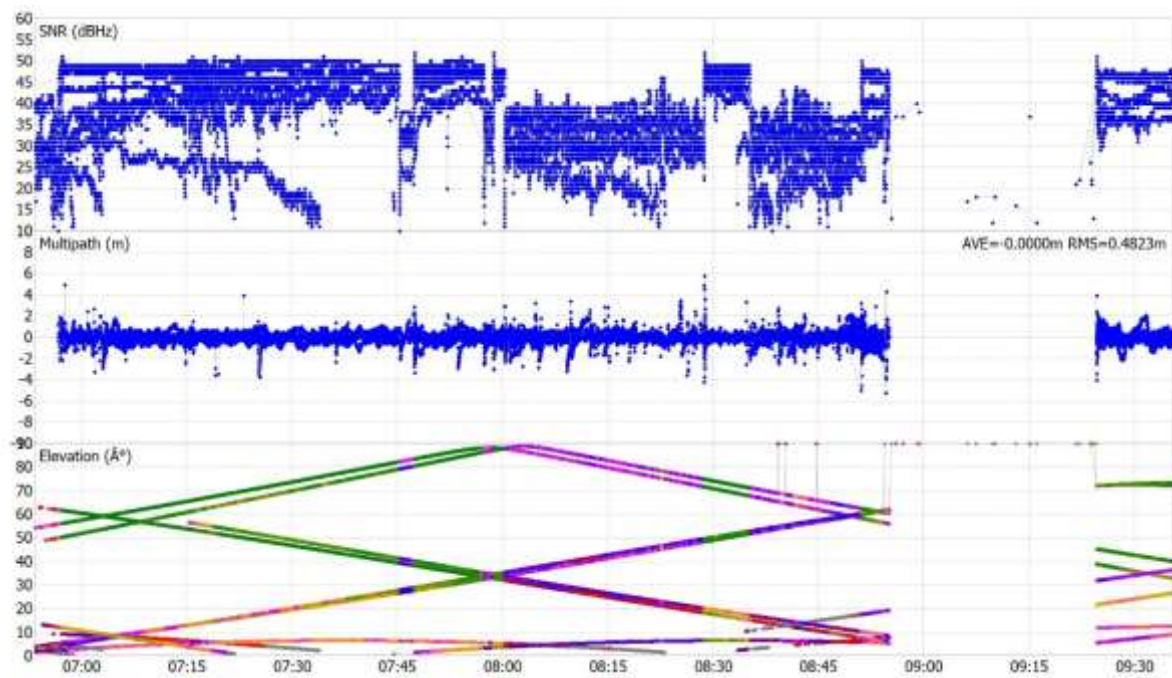
- u-blox ZED-F9P (leto izdelave 2018) je dvo-frekvenčni L1/L2 sprejemnik, ki sprejema signale vseh konstelacij (GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou);
- Leica GS15 (leto 2012) je večfrekvenčni, ki sprejema signale GPS, GLONASS in Galileo;
- Leica GS18T (leto 2019) je večfrekvenčni, ki sprejema signale vseh konstelacij;
- Trimble R12i (leto izdelave 2020) je več-frekvenčni, ki sprejema signale vseh konstelacij.

3.2.6.5 Vpliv motilnikov na sprejem signalov GNSS (u-blox ZED-F9P, L1,L2)

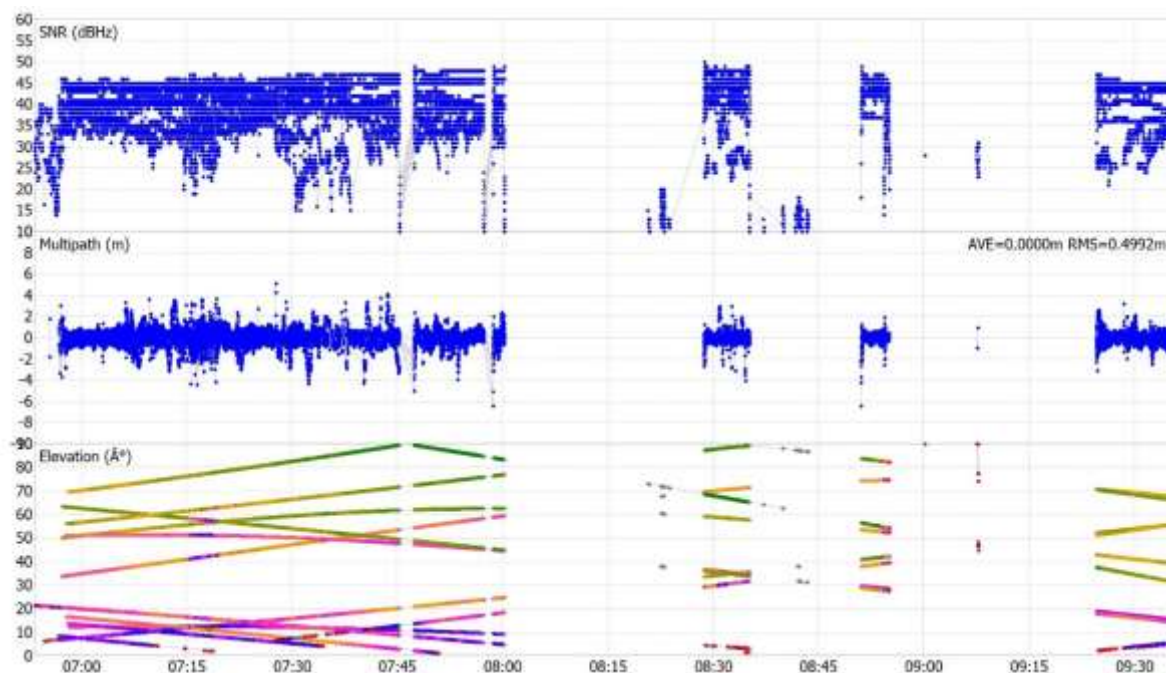
○ Vpliv na signal - frekvenčno območje



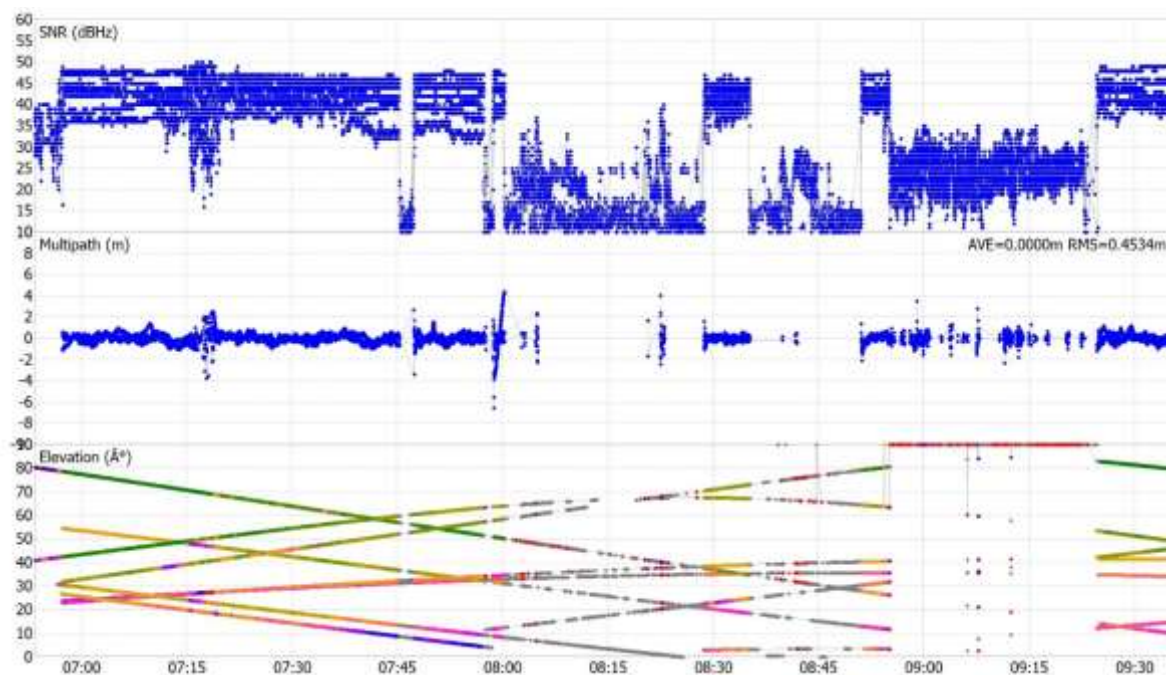
Slika 96: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS L1



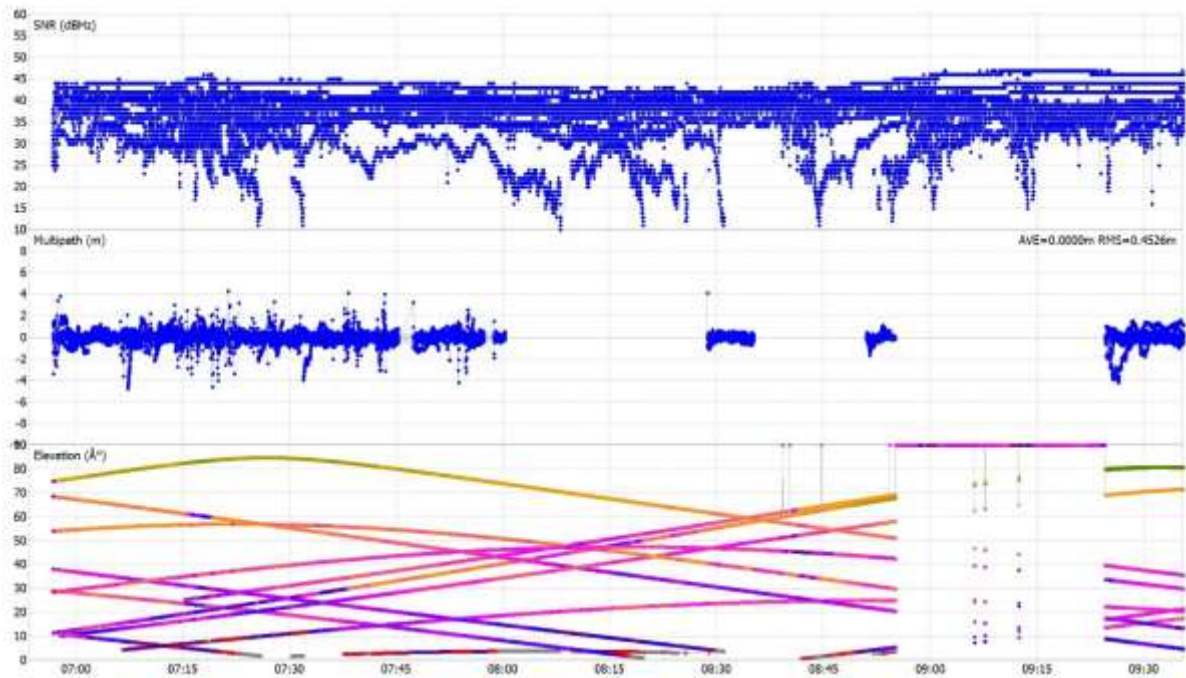
Slika 97: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



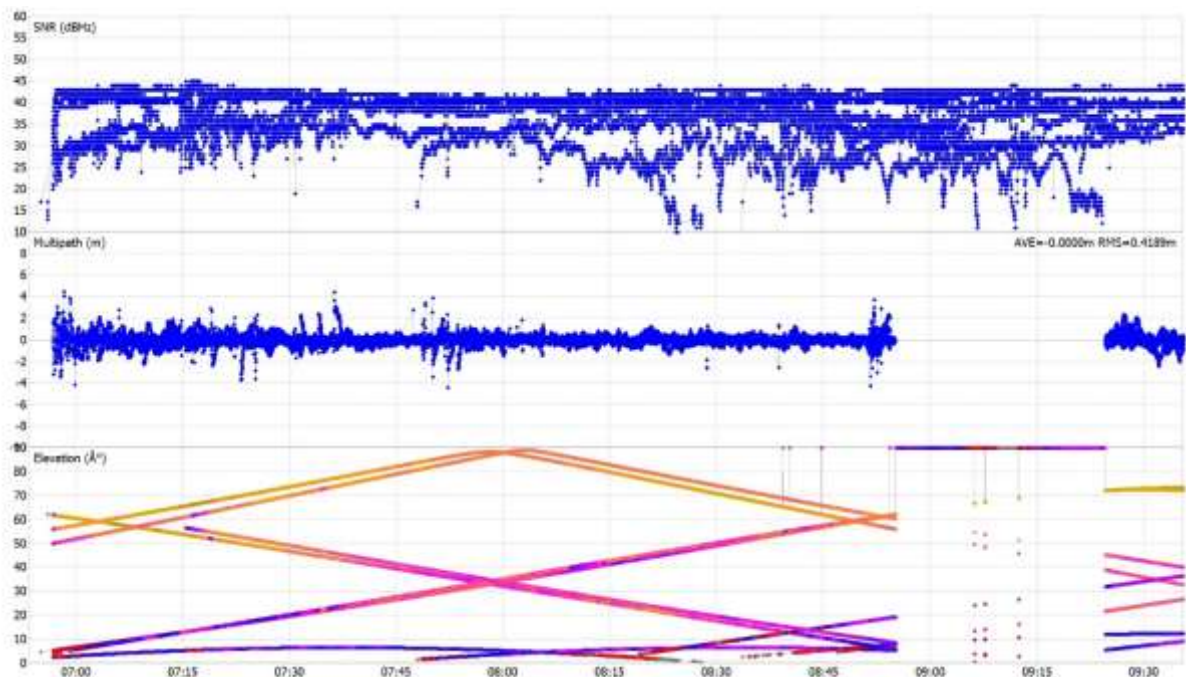
Slika 98: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



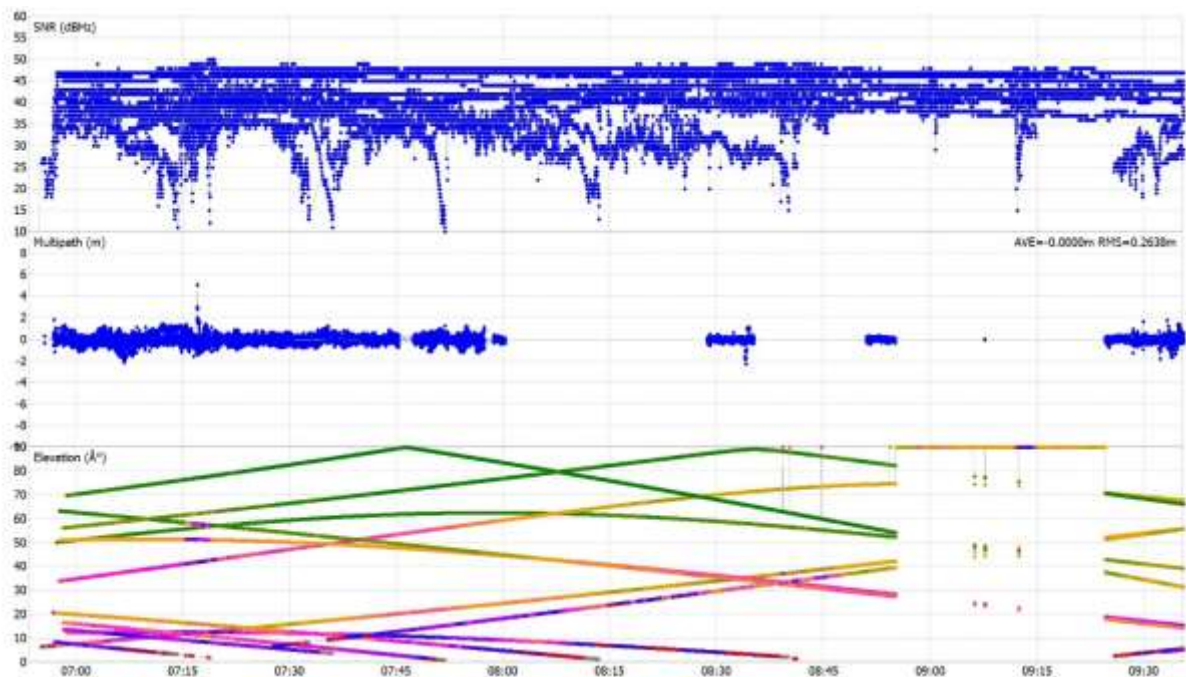
Slika 99: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1



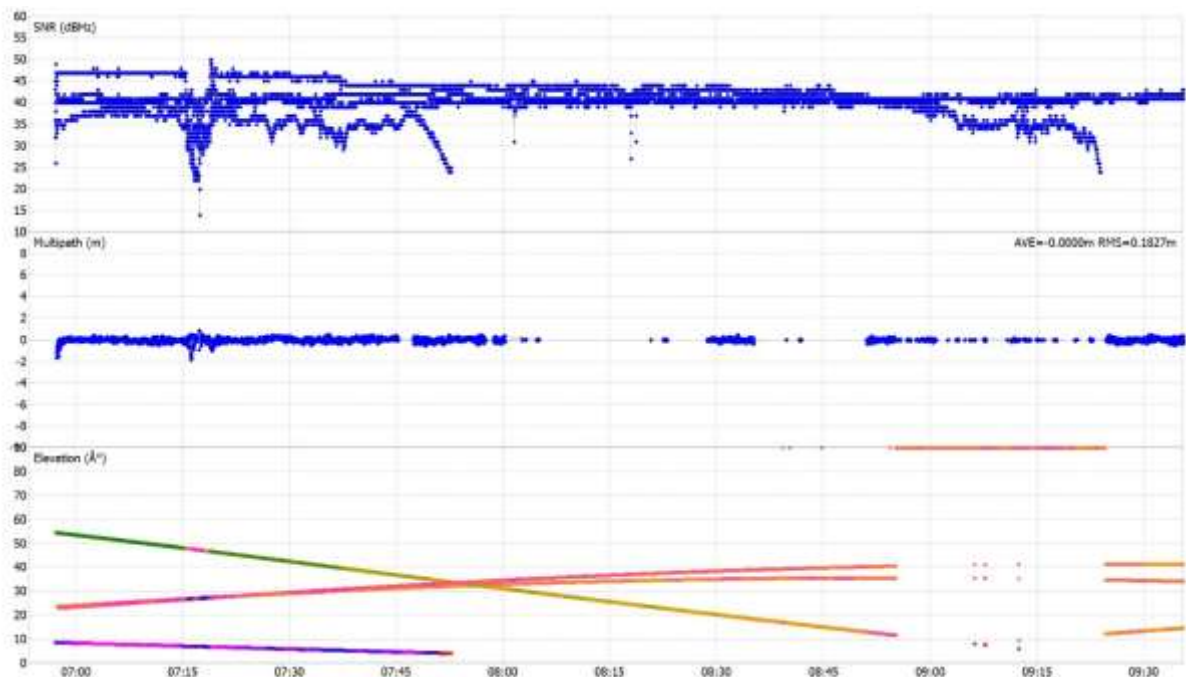
Slika 100: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2.



Slika 101: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2.



Slika 102: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b.



Slika 103: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2.

S slik (Slika 97 – Slika 99) je razvidno, da je motilnik Rušička v frekvenčnem območju L1 vplival na izgubo signalov satelitov GPS in Galileo, ne pa tudi na GLONASS in BeiDou. Motilnik Keysight je povzročil izgubo signalov GPS (vendar ne povsem), GLONASS in Galileo, ne pa tudi za BeiDou (signal B2I = 1207,14 MHz). Na frekvenčnem območju L2 (G2, E5b in B2I) do izgube sprejema signalov satelitov ni prišlo.

Preglednica 9: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami

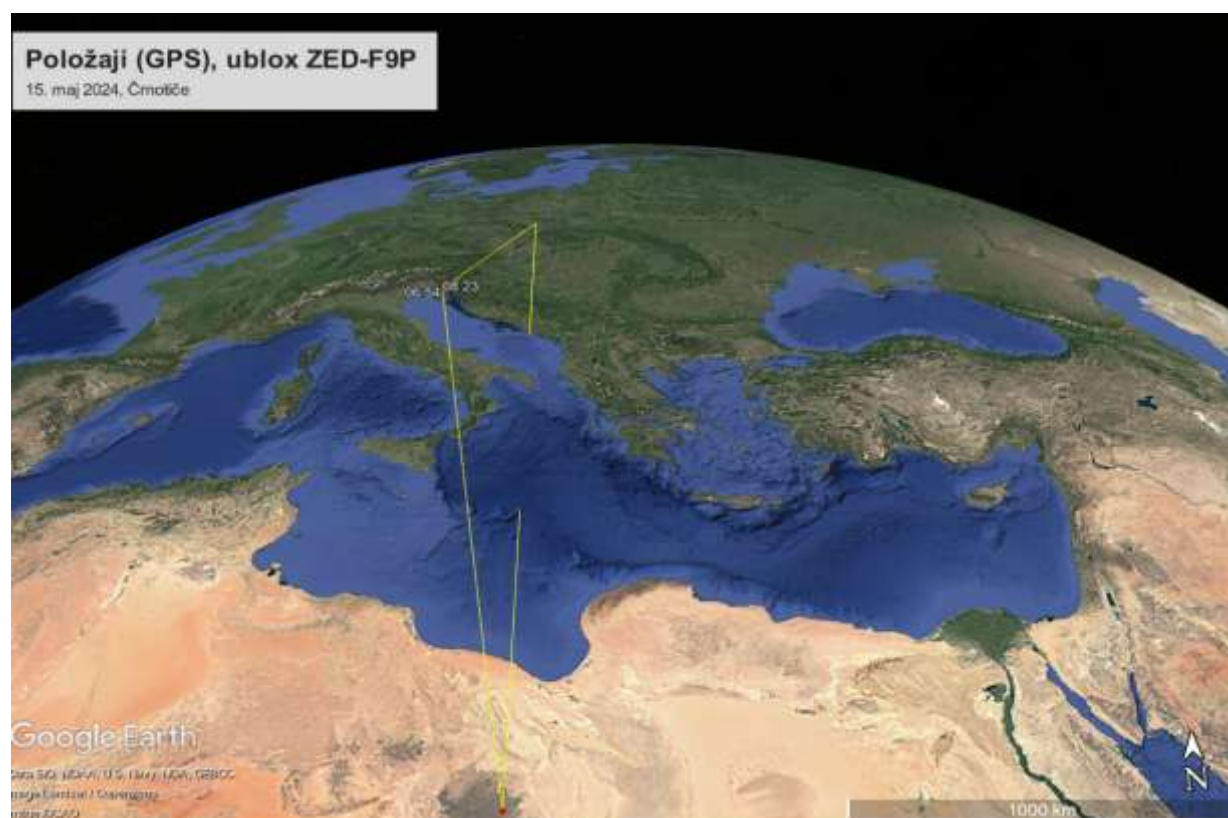
Signal	motilnik	
	Rušička	Keysight
GPS L1	ni signala	delna izguba signala
GLONASS G1	signal je prisoten, padec C/N0	ni signala
Galileo E1	ni signala	ni signala
BeiDou B1	signal je prisoten, padec C/N0	signal je prisoten, padec C/N0
GPS L2	ni posledic motenja	ni posledic motenja
GLONASS G2	ni posledic motenja	ni posledic motenja
Galileo E5b	ni posledic motenja	ni posledic motenja
BeiDou B1-2	ni posledic motenja	ni posledic motenja

Preglednica 9 vsebuje glavne ugotovitve s slik (Slika 96 – Slika 103), ki so vezane na motnje, ki smo jih povzročili z dvema motilnikoma, z nizkocenovnim Rušička in s profesionalnim motilnikom Keysight. Motnje so bile povzročene na frekvenci L1, zato vidnih izgub satelitskih signalov za sprejemnik u-blox ZED-F9P v frekvenčnem območju L2 ni očitnih.

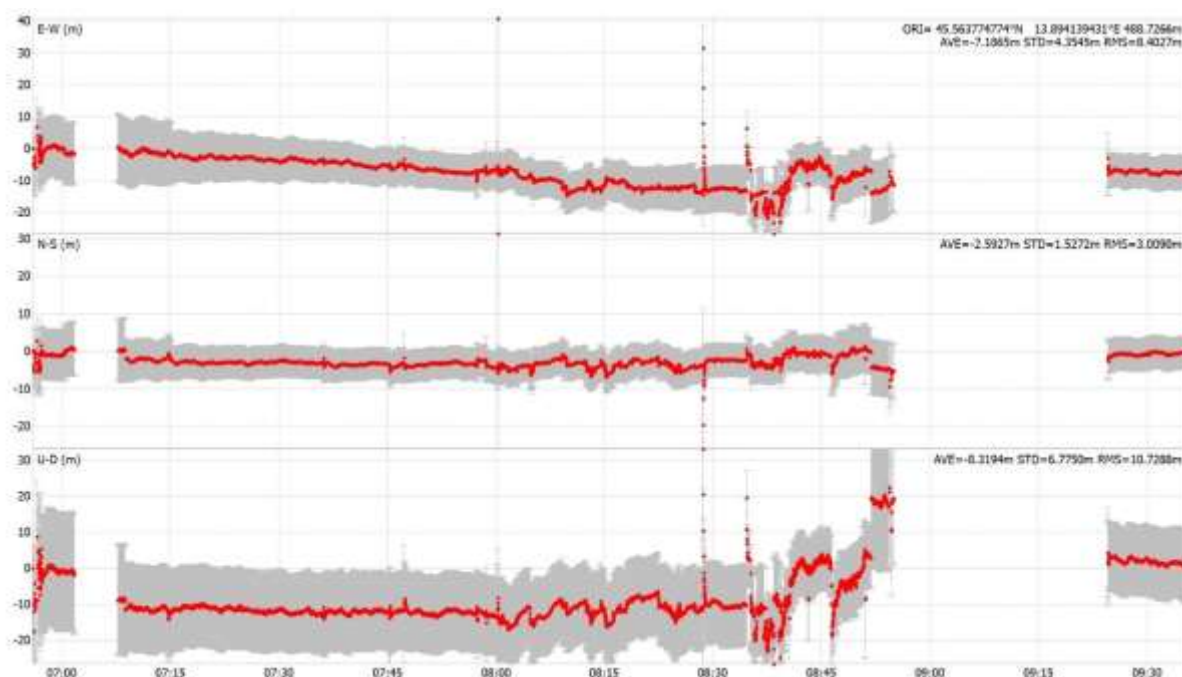
○ Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. *Single Point Positioning* – SPP)



Slika 104: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji GPS



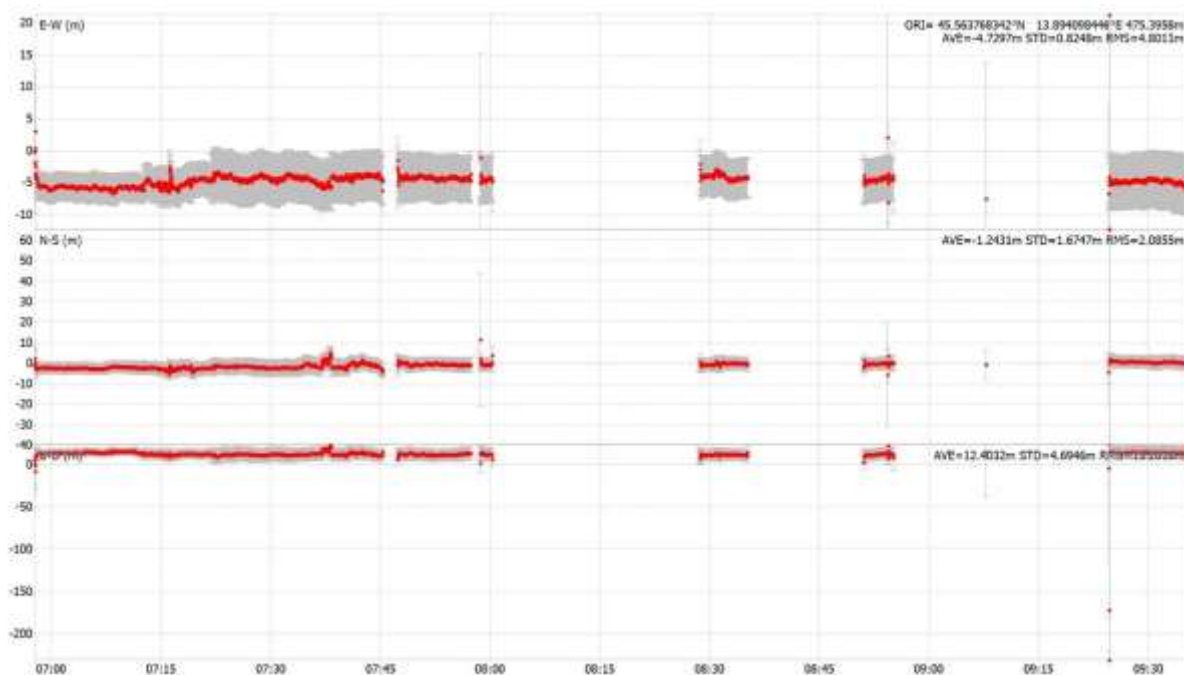
Slika 105: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji GPS, podlaga Google Earth



Slika 106: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, GLONASS



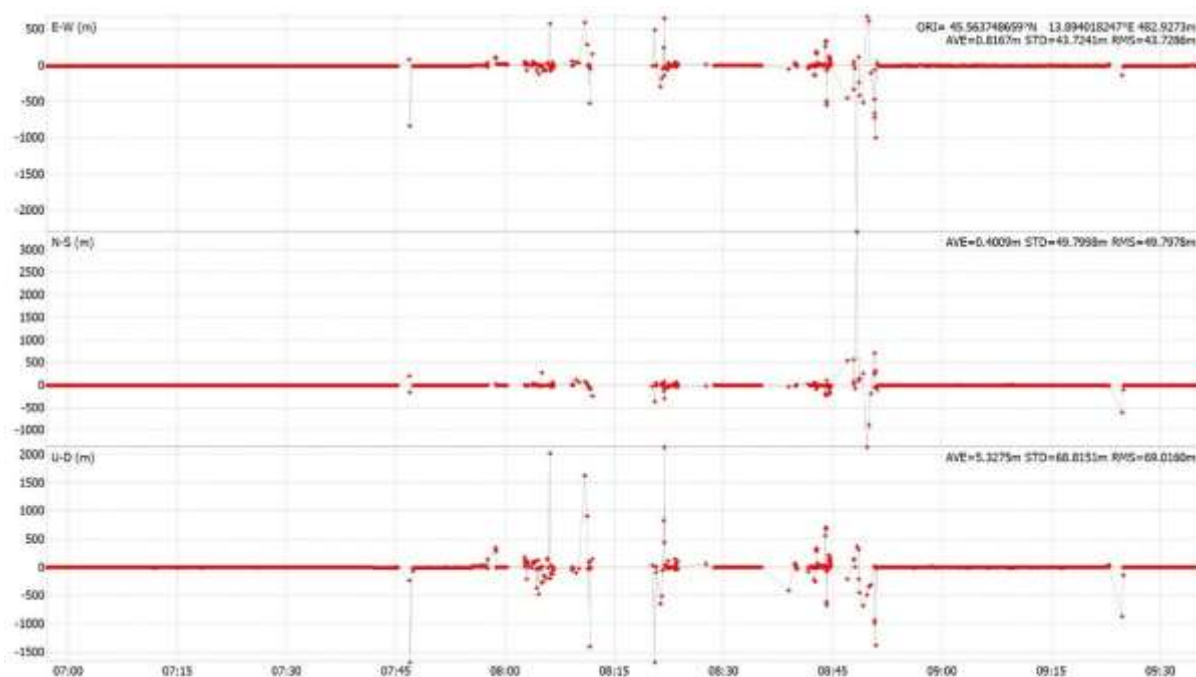
Slika 107: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, GLONASS, podlaga Google Earth



Slika 108: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, Galileo



Slika 109: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, Galileo, podlaga Google Earth



Slika 110: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, BeiDou



Slika 111: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, BeiDou, podlaga Google Earth



Slika 112: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, vse konstelacije



Slika 113: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, vsi sistemi (GPS+GLN+GAL+BDS), podlaga Google Zemlja

Preglednica 10 vsebuje glavne ugotovitve (vrednosti faktorjev RMS po komponentah) s slik (Slika 96), kjer so prikazani absolutno pridobljeni položaji (ang. *Single Point Positioning* – SPP), pridobljeni z ločenimi obdelavami po posameznih konstelacijah.

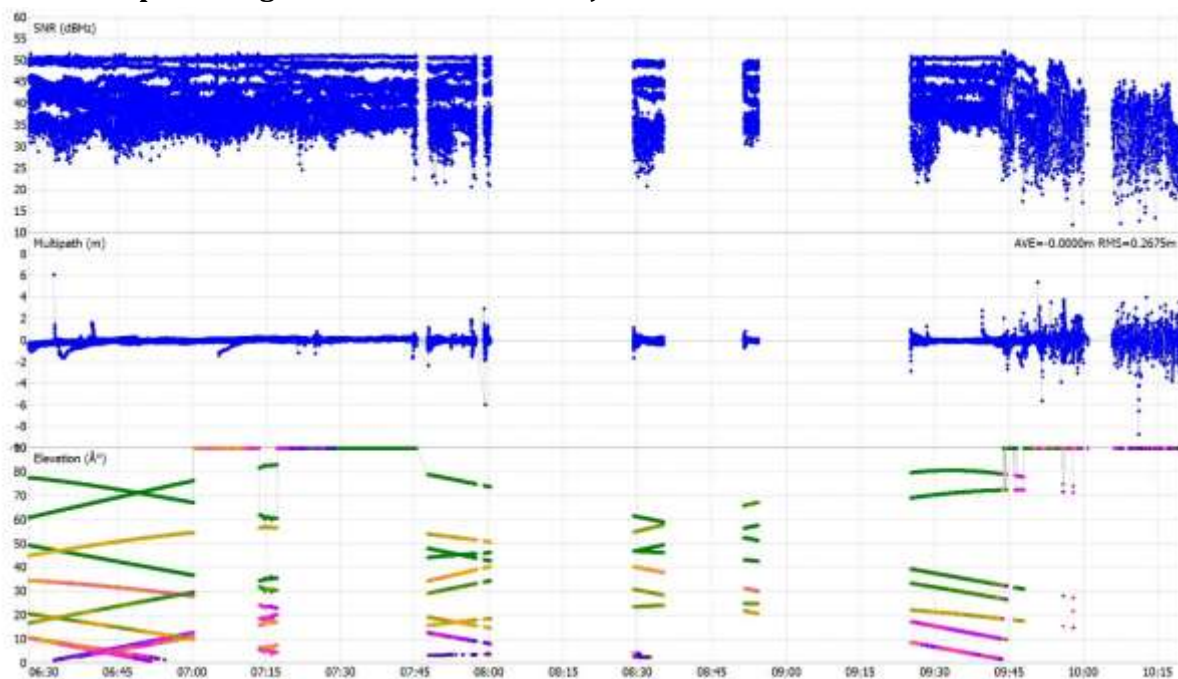
Preglednica 10: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije

RMS [m]					
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	Vse konstelacije
E-W	12 279,5941	8,4027	4,8011	43,7286	10 308,8916
N-S	58 045,2810	3,0090	2,0855	49,7978	10 730,7055
U-D	87 860,6797	10,7288	13,2618	69,0160	21 041,3918

Iz rezultatov je očitno, da sta motilnika povzročila veliko odstopanje od pravega položaja za sistem GPS (12 km za smer vzhod-zahod (E-W), 58 km za smer sever-jug (N-S) om 88 km po višini (U-D)), medtem ko je določitev položaja z GLONASS in Galileo bila v mejah točnosti določitve položaja s tehniko SPP (nekaj metrov), pri BeiDou pa so razlike 10-krat večje (ca. od 40-70 m po posamezni komponenti položaja), vendar še vedno občutno manjše kot pri GPS.

3.2.6.6 Vpliv motilnikov na sprejem signalov GNSS (Leica GS15)

○ Vpliv na signal - frekvenčno območje



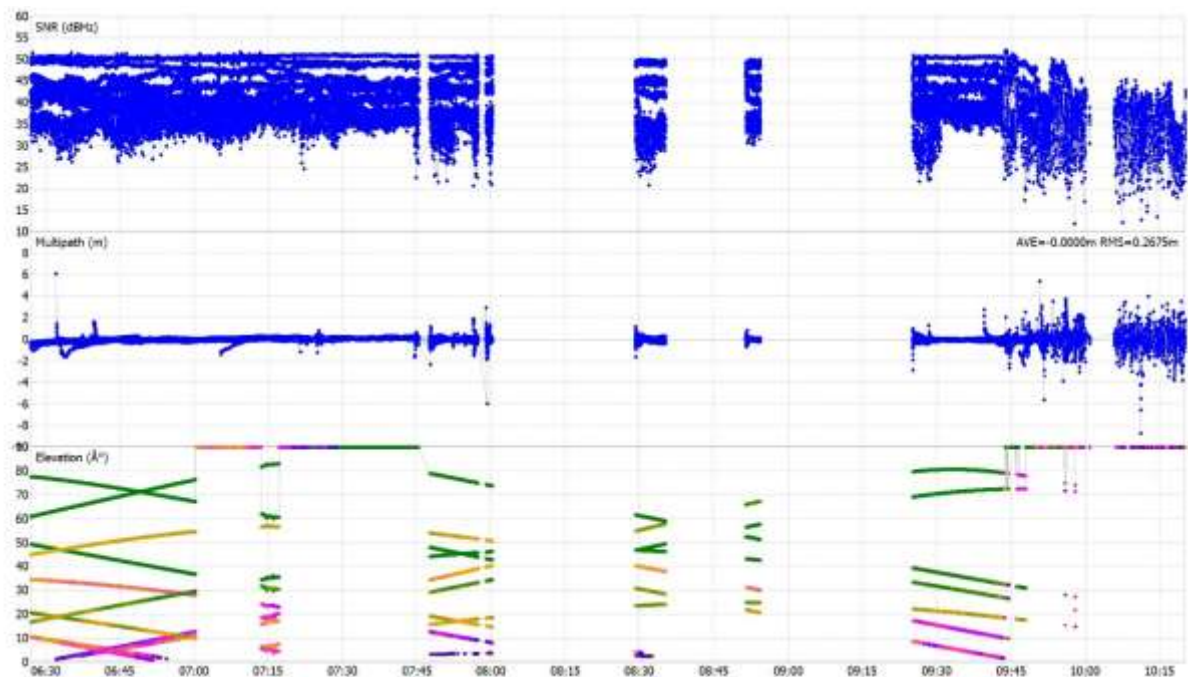
Slika 114: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1



Slika 115: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



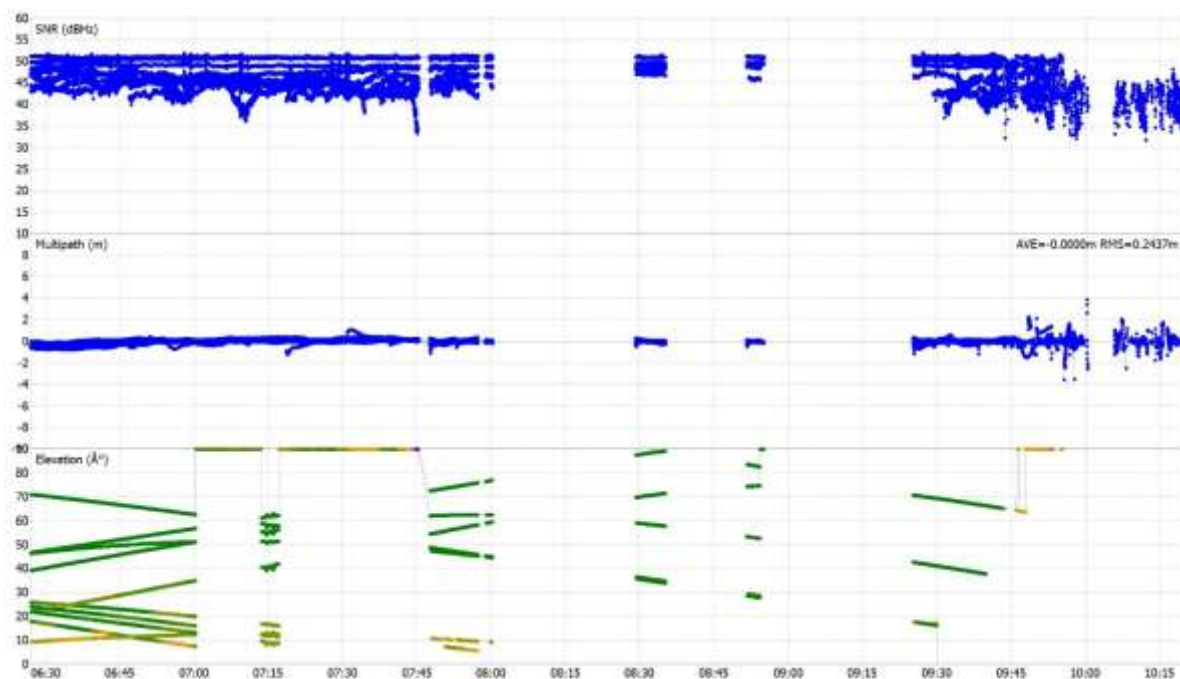
Slika 116: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



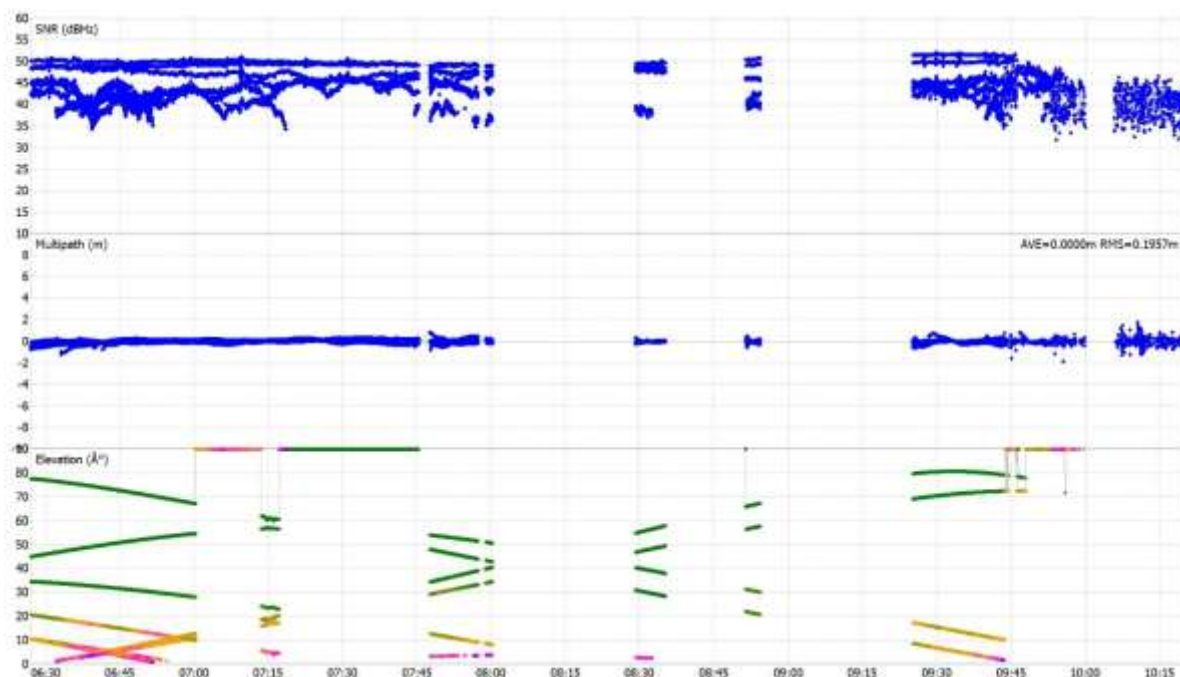
Slika 117: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2



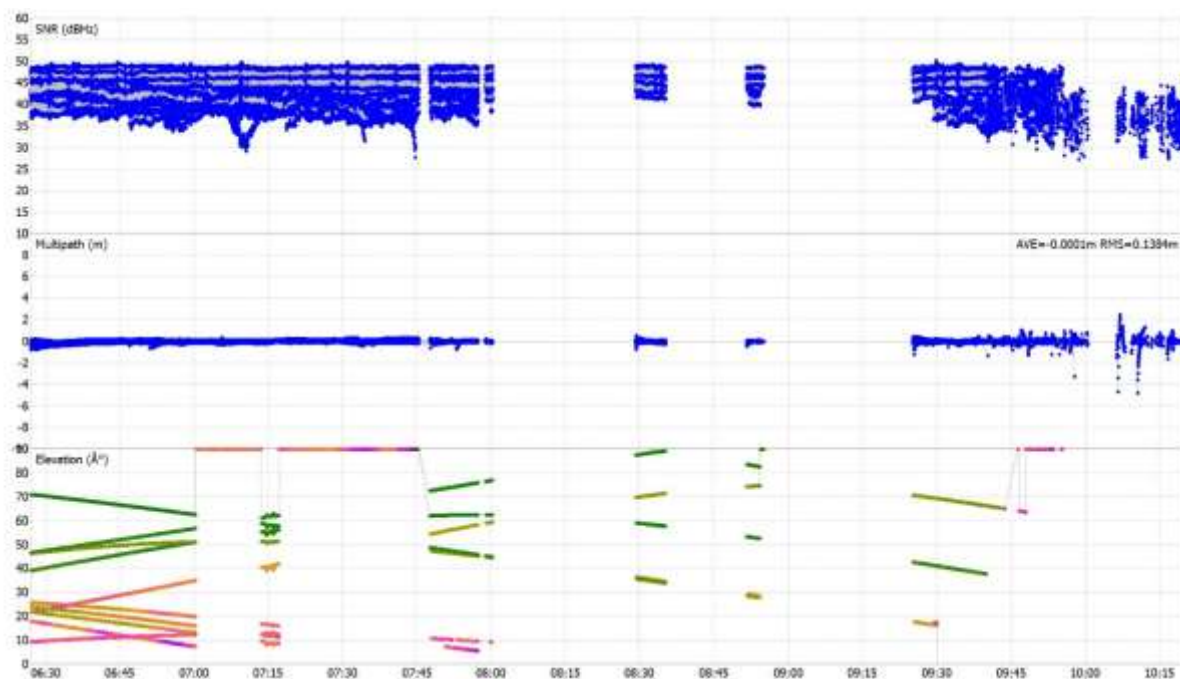
Slika 118: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2



Slika 119: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b



Slika 120: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5



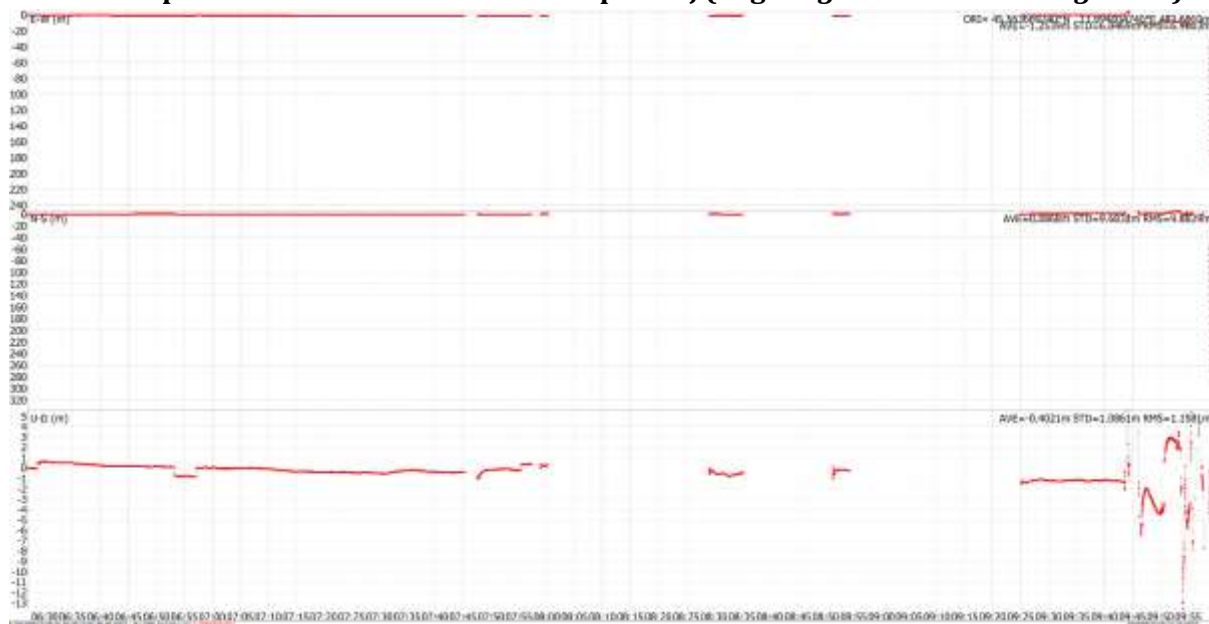
Slika 121: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a

S slik (Slika 114 – Slika 121) ter iz Preglednice 11 je razvidno, da je motilnik Rušička v vseh frekvenčnih območjih vplival na izgubo signalov satelitov GPS in Galileo za sprejemnik Leica GS15, medtem ko so ob uporabi motilnika Keysight bile prisotne le kratke prekinitve signalov najbrž v času, ko smo motilniku povečali moč.

Preglednica 11: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami

Signal	motilnik	
	Rušička	Keysight
GPS L1	ni signala	kratka prekinitve signala
GLONASS G1	ni signala	kratka prekinitve signala
Galileo E1	ni signala	kratka prekinitve signala
BeiDou B1	/	/
GPS L2	ni signala	kratka prekinitve signala
GLONASS G2	ni signala	kratka prekinitve signala
Galileo E5b	ni signala	kratka prekinitve signala
BeiDou B1-2	/	/

○ Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. *Single Point Positioning* – SPP)



Slika 122: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS



Slika 123: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS, podlaga Google Earth



Slika 124: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GLONASS



Slika 125: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GLONASS , podlaga Google Eath



Slika 126: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, Galileo



Slika 127: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, Galileo, podlaga Google Earth



Slika 128: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS + GLONASS + Galileo



Slika 129: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS + GLONASS + Galileo, podlaga Google Earth

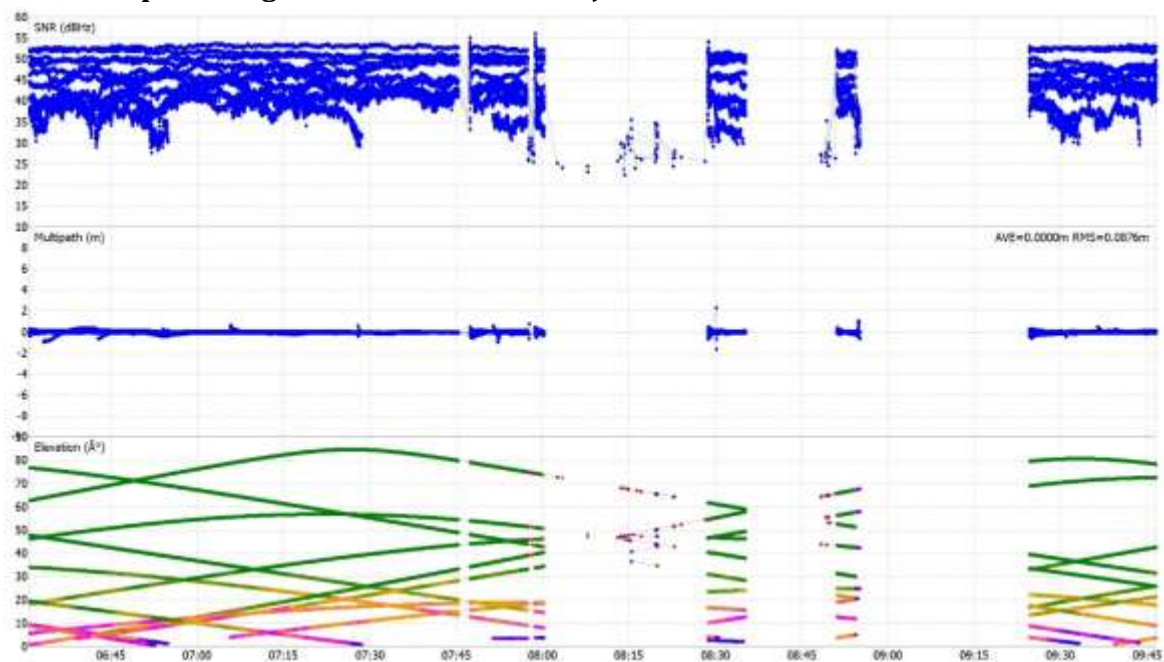
Iz rezultatov (Preglednica 12) je očitno, da sta motilnika povzročila veliko odstopanje od pravega položaja za sistem GPS (1,6 km za smer vzhod-zahod (E-W), 3,2 km za smer sever-jug (N-S) in 14 m po višini (U-D)), podobno tudi za GLONASS. Koordinate, določene le z obdelavo opazovanj Galileo, so nekoliko bolj določene, vendar faktor RMS še vedno znaša od 0,5 do 1 km. Vse večje razlike v položajih so nastale po ponovnem vzpostavljanju položaja po motnjah, povzročenih z motilnikom Keysight.

Preglednica 12: Črnotiče, 15/05/2024,, Leica GS15. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije

	RMS [m]				
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	Vse konstelacije
E-W	1 628,9701	704,8234	490,8129	/	1 851,1348
N-S	3 262,3345	1 331,7036	977,3927	/	3 713,0298
U-D	14,5231	11,2204	2,6357	/	17,6972

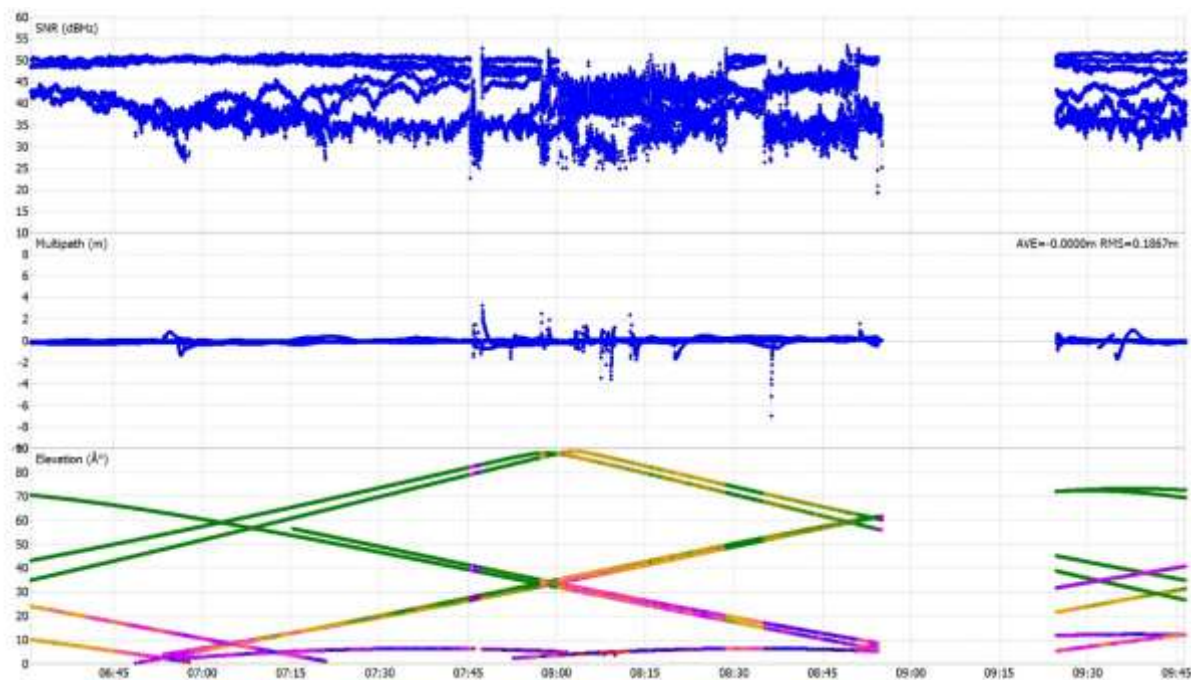
3.2.6.7 Vpliv motilnikov na sprejem signalov GNSS (Leica GS18T)

○ Vpliv na signal - frekvenčno območje

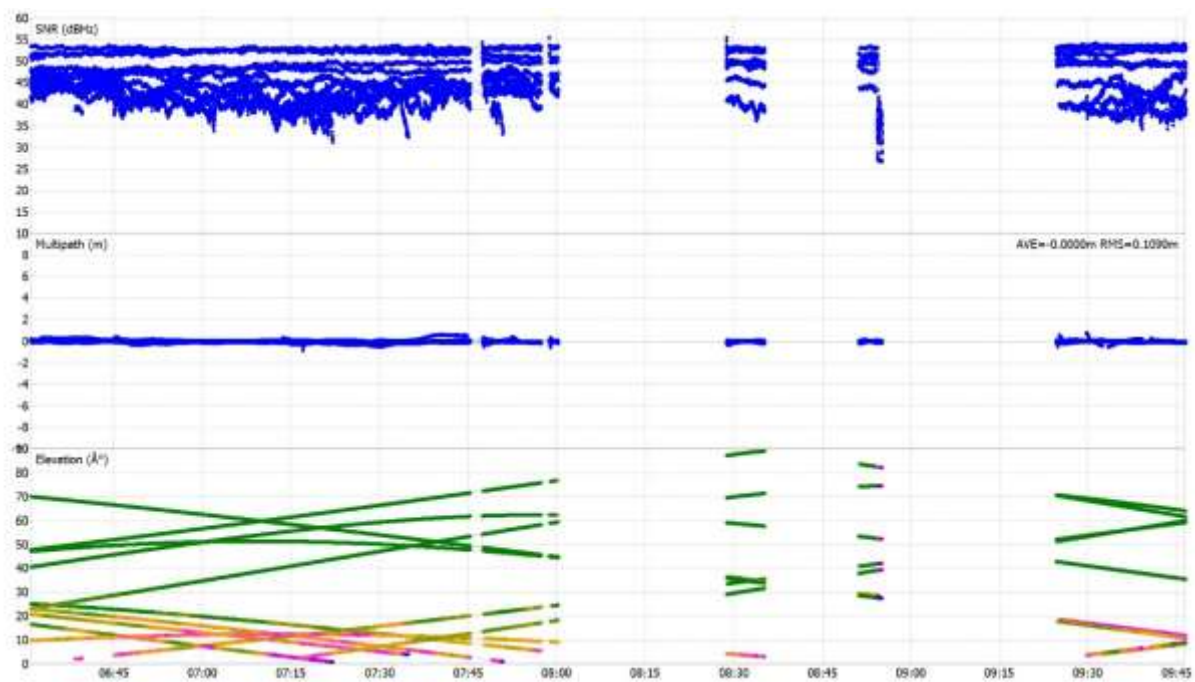


Slika 130: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1

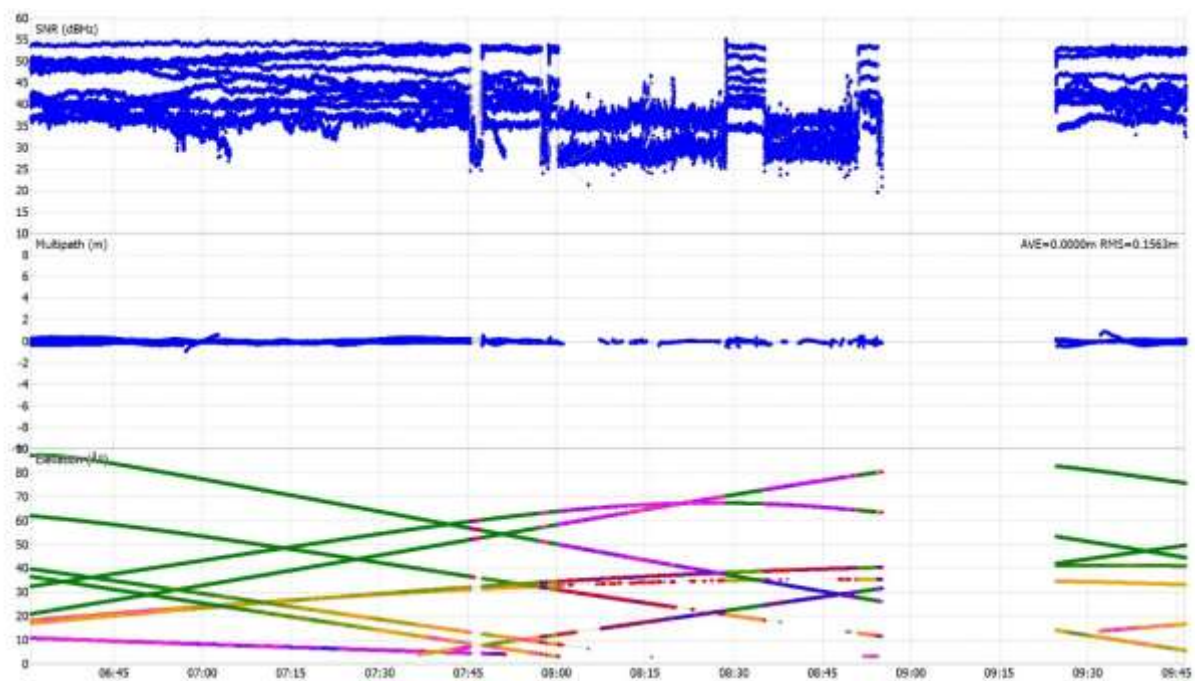
120



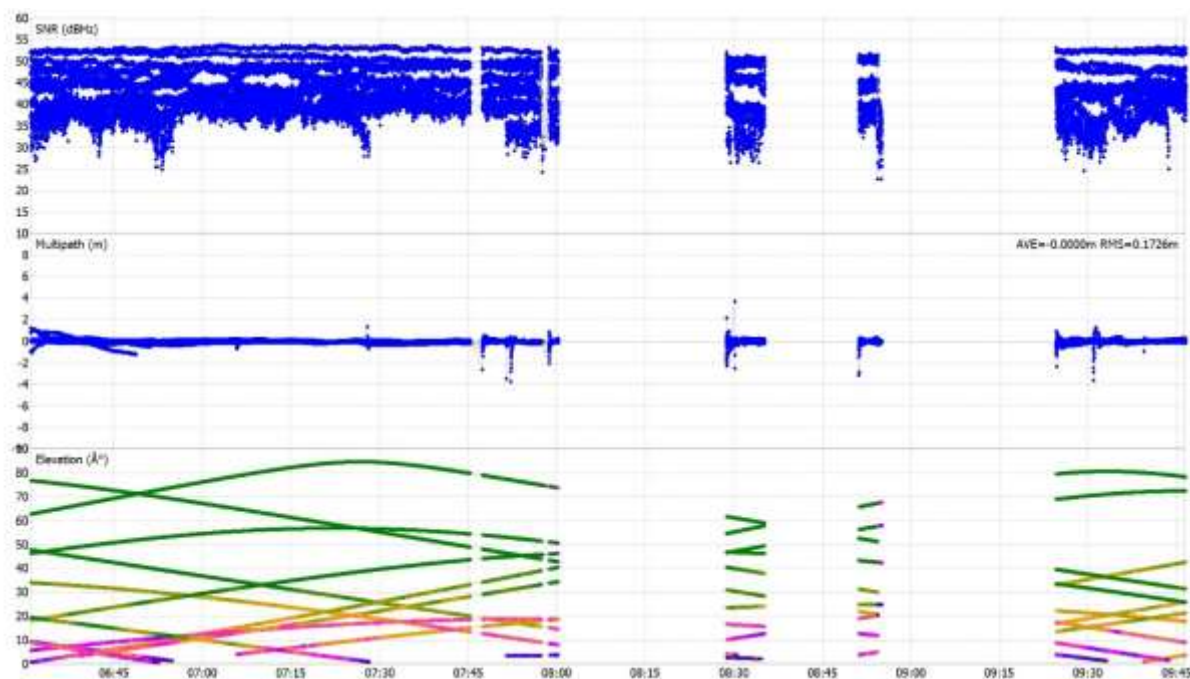
Slika 131: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



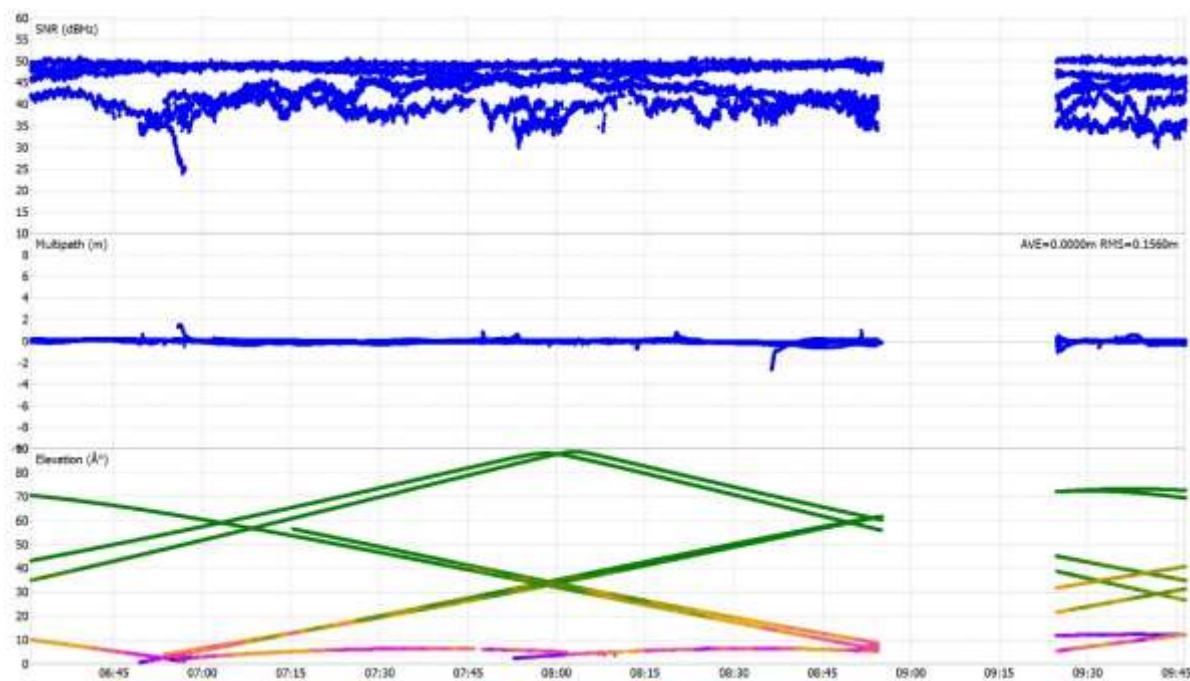
Slika 132: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



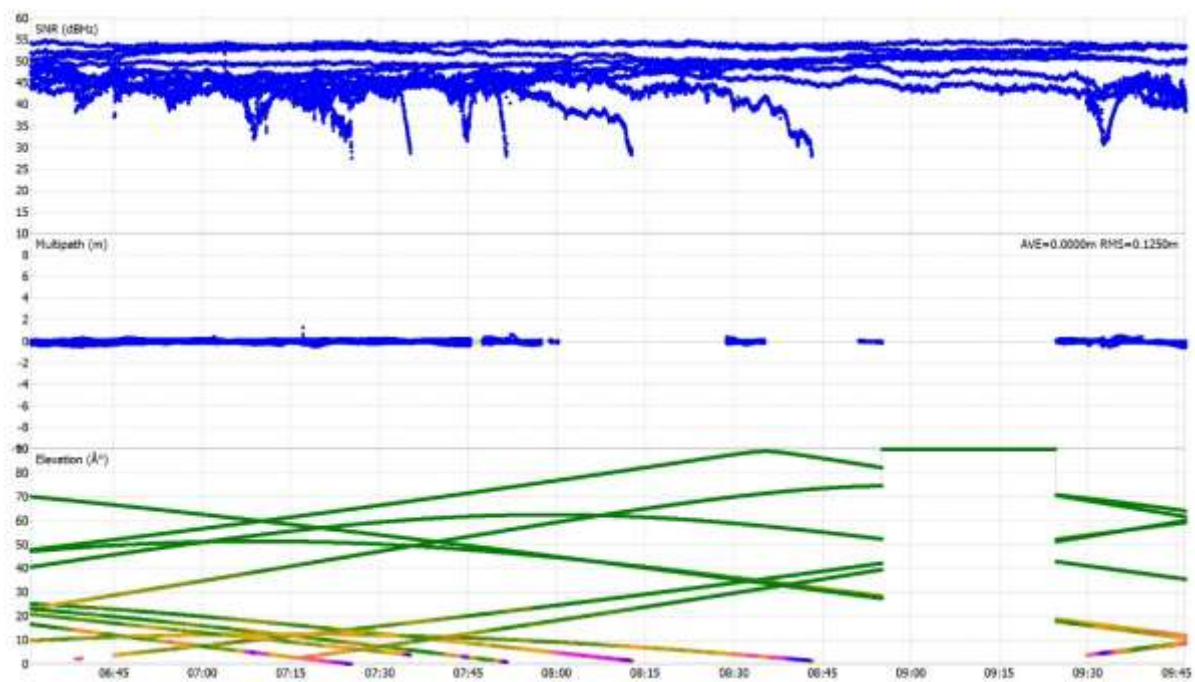
Slika 133: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1



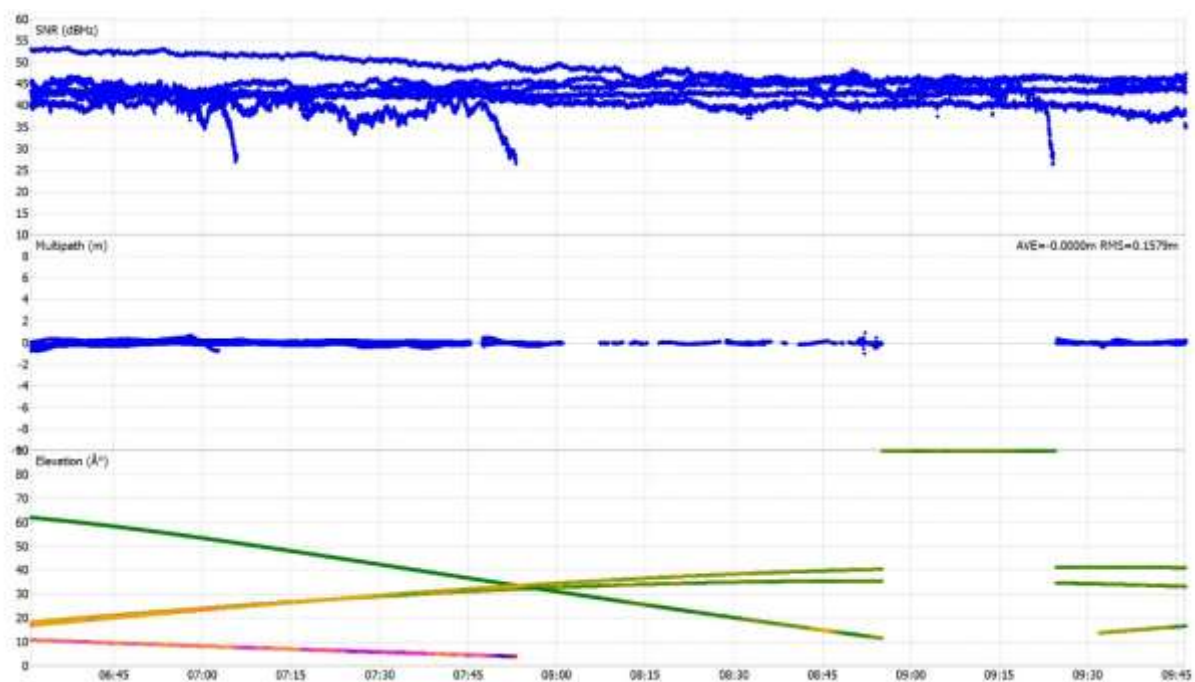
Slika 134: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2



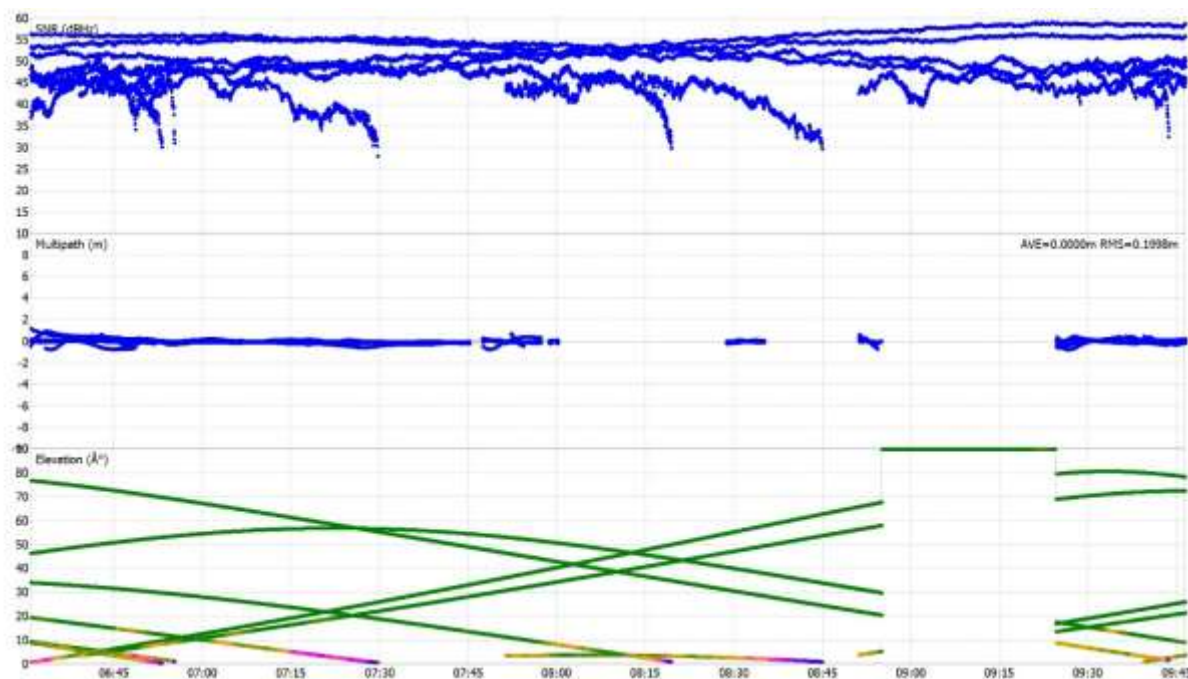
Slika 135: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2



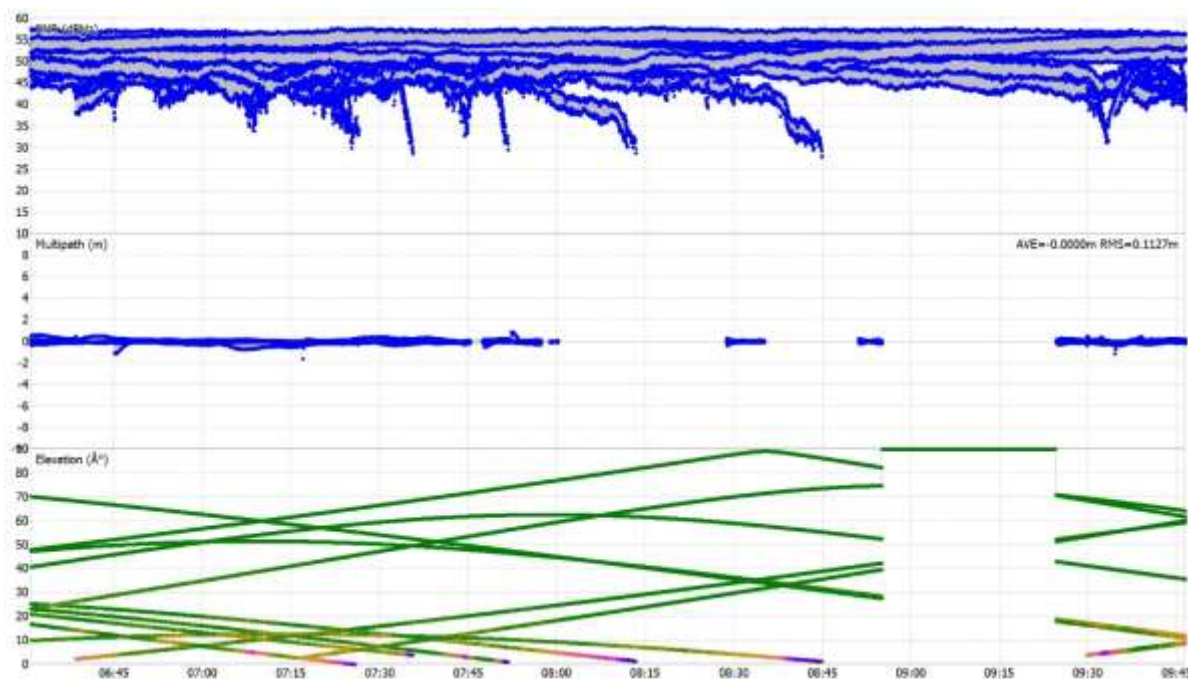
Slika 136: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b



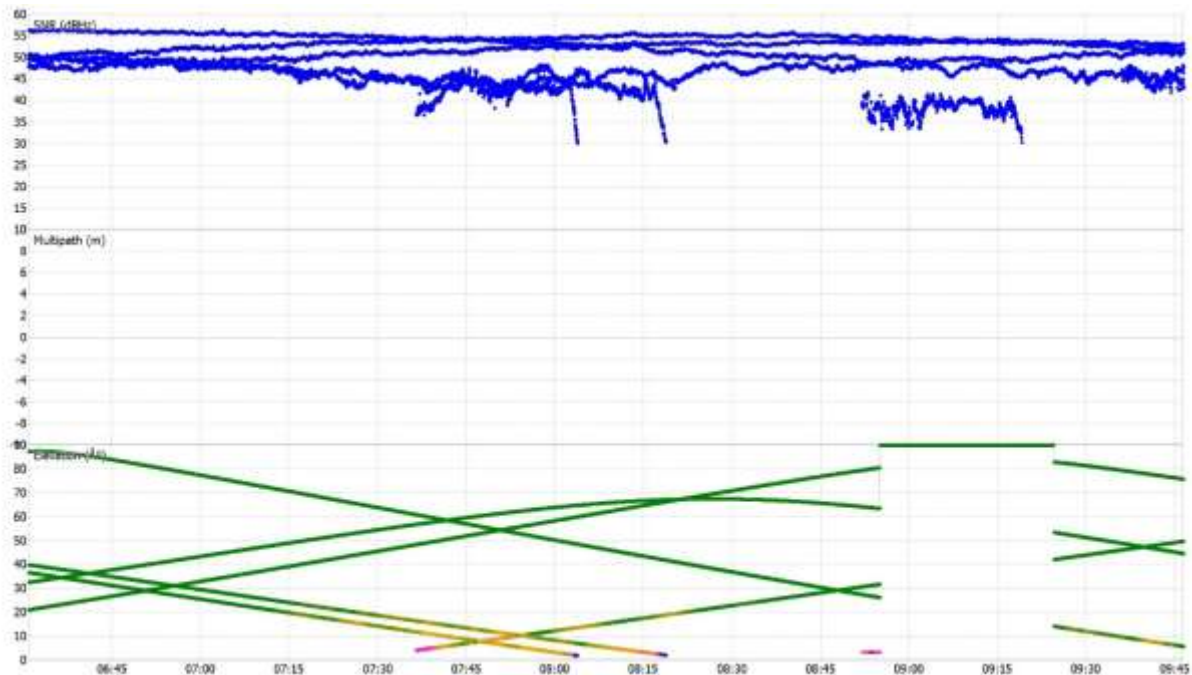
Slika 137: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2



Slika 138: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5



Slika 139: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a



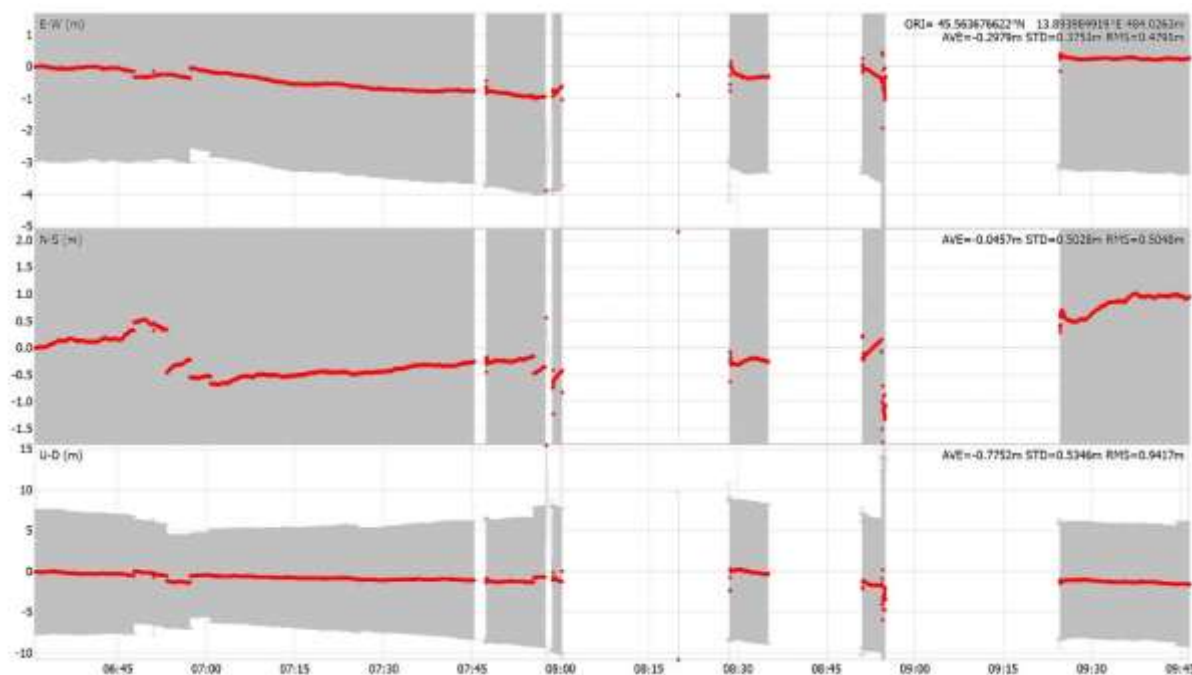
Slika 140: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a

Preglednica 13 strnjeno opisuje ugotovitve, prikazane na izrisih (Slika 130 – Slika 140) za sprejemnik Leica GS18T. Očitno je, da je pri tem sprejemniku motilnik Keysight bil bolj učinkovit, saj je v frekvenčnem območju 1575,42 MHz prišlo od izgub signalov, dodatno pa tudi za signale GPS L2 in GLONASS G2.

Preglednica 13: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami

Signal	motilnik	
	Rušička	Keysight
GPS L1	delna prekinitev signala	ni signala
GLONASS G1	padec C/N0	ni signala
Galileo E1	ni signala	ni signala
BeiDou B1	padec C/N0	ni signala
GPS L2	ni signala	ni signala
GLONASS G2	ni posledic motenja	ni signala
Galileo E5b	ni posledic motenja	ni posledic motenja
BeiDou B1-2	ni posledic motenja	ni posledic motenja
GPS L5	ni posledic motenja	ni posledic motenja
Galileo E5a	ni posledic motenja	ni posledic motenja
BeiDou 2a	ni posledic motenja	ni posledic motenja

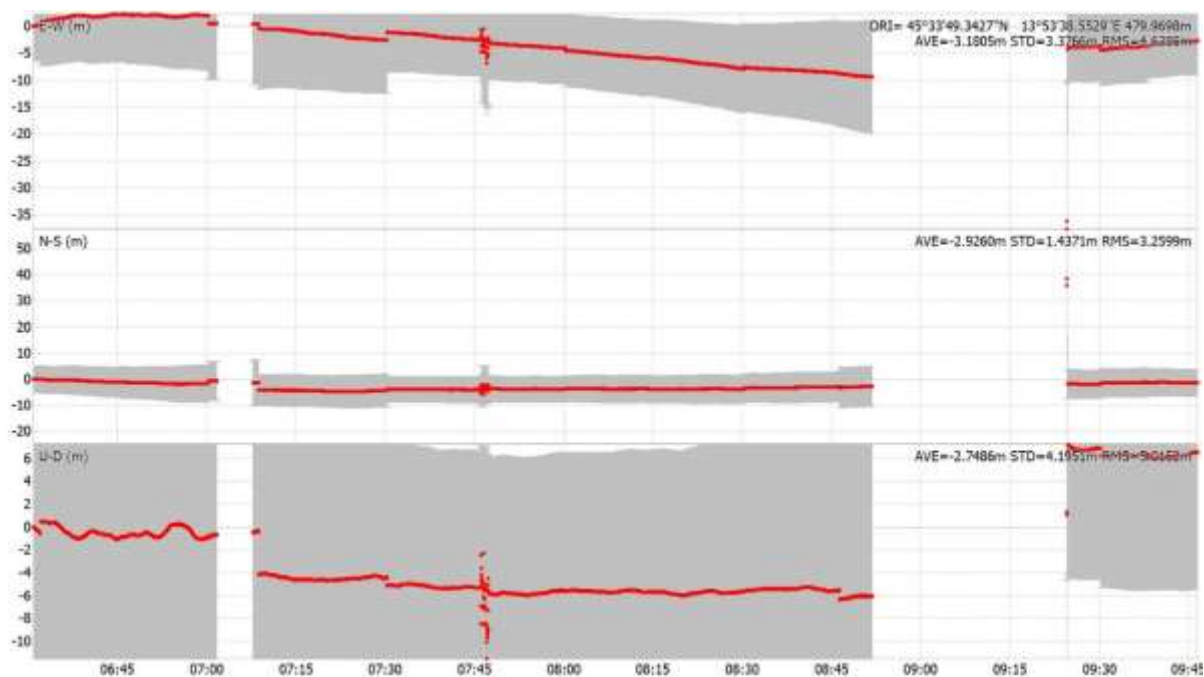
○ Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. Single Point Positioning – SPP)



Slika 141: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, GPS



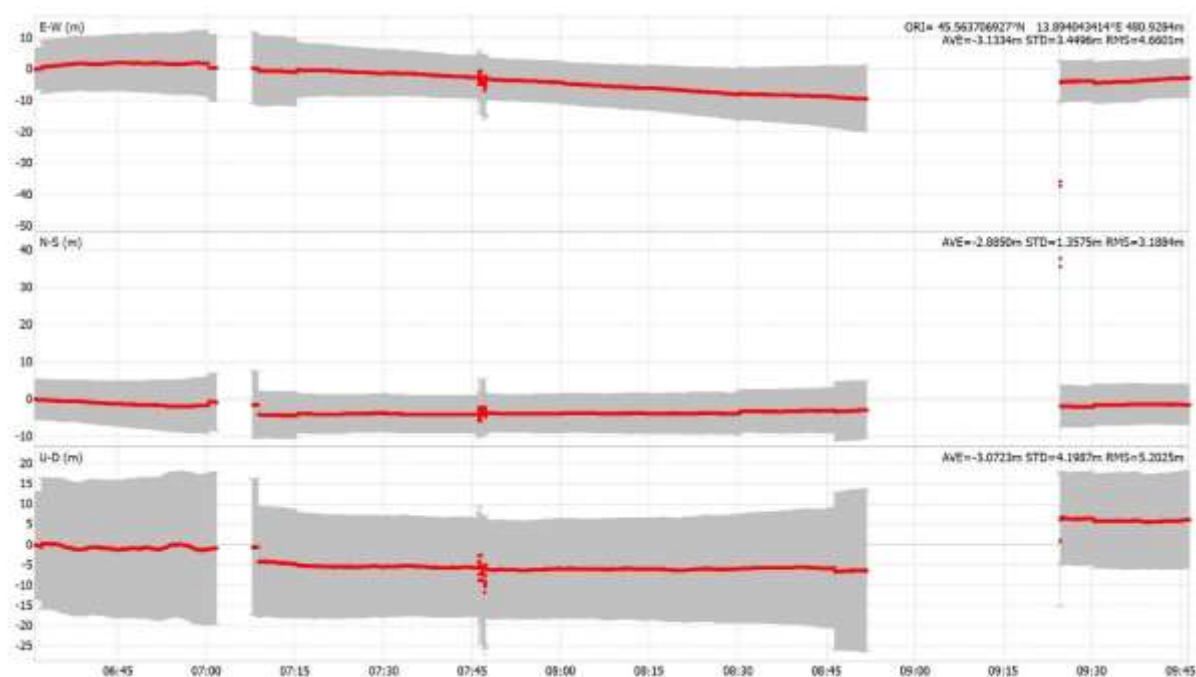
Slika 142: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, GPS. Podlaga Google Earth



Slika 143: Črnotiče, 15/05/2024 Leica GS18T, SPP-položaji, GLONASS



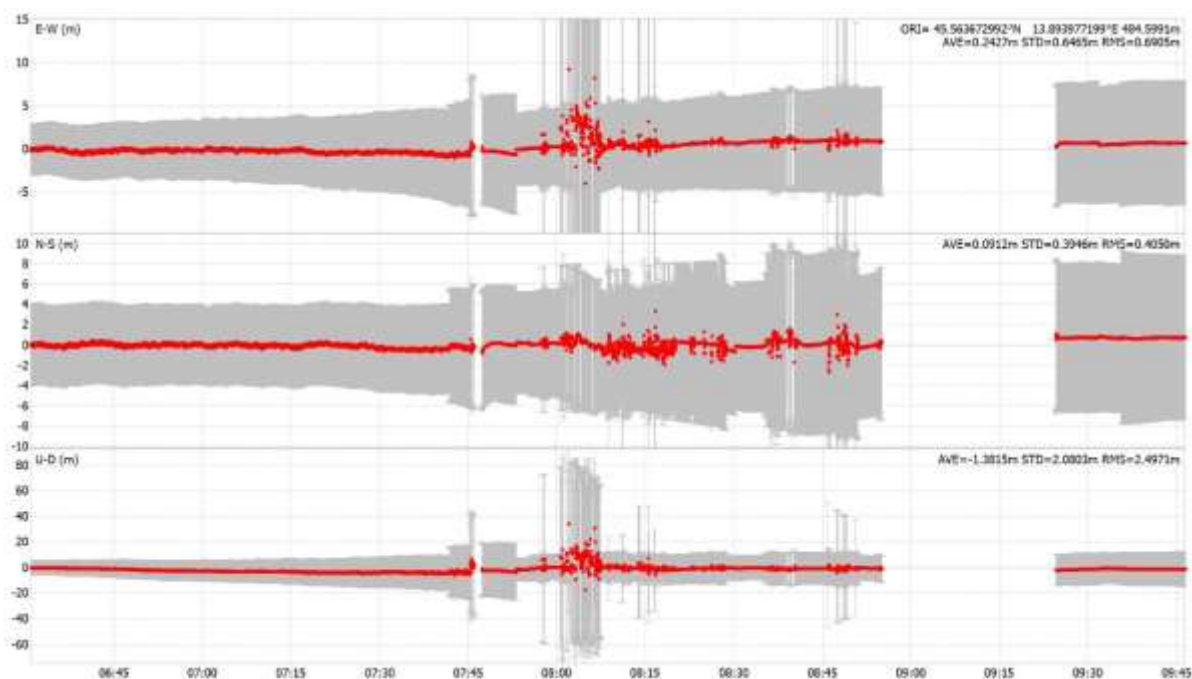
Slika 144: Črnotiče, 15/05/2024 Leica GS18T, SPP-položaji, GLONASS, podlaga Google Earth



Slika 145: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, Galileo



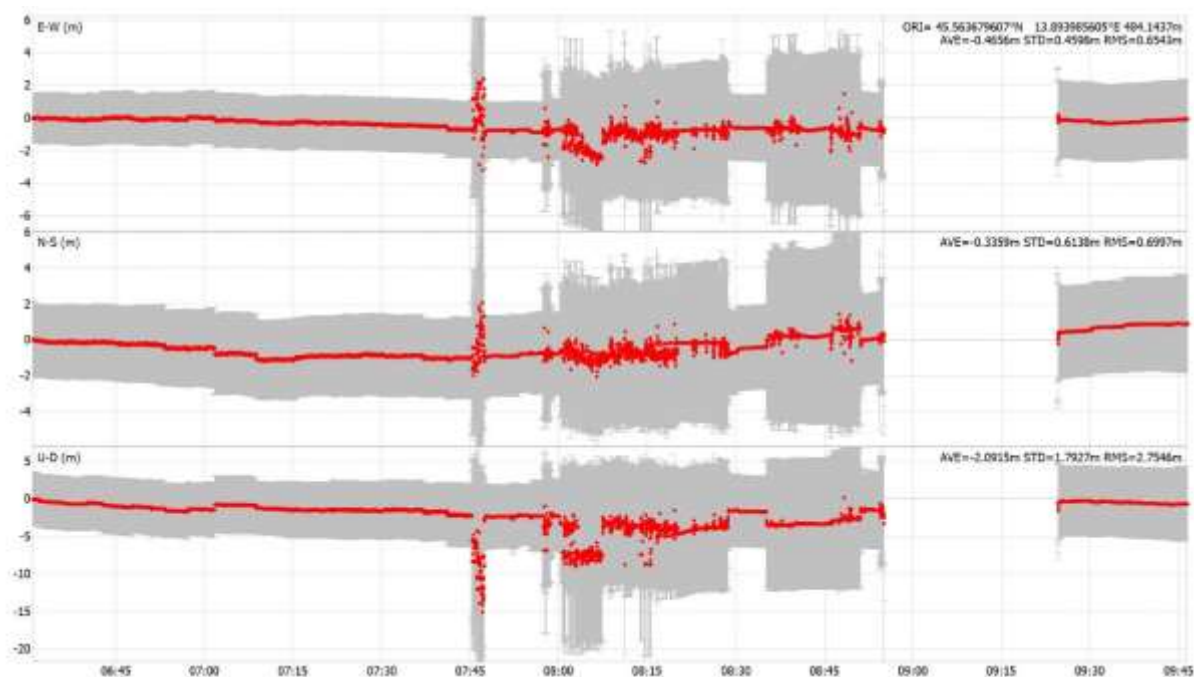
Slika 146: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, Galileo, podlaga Google Earth



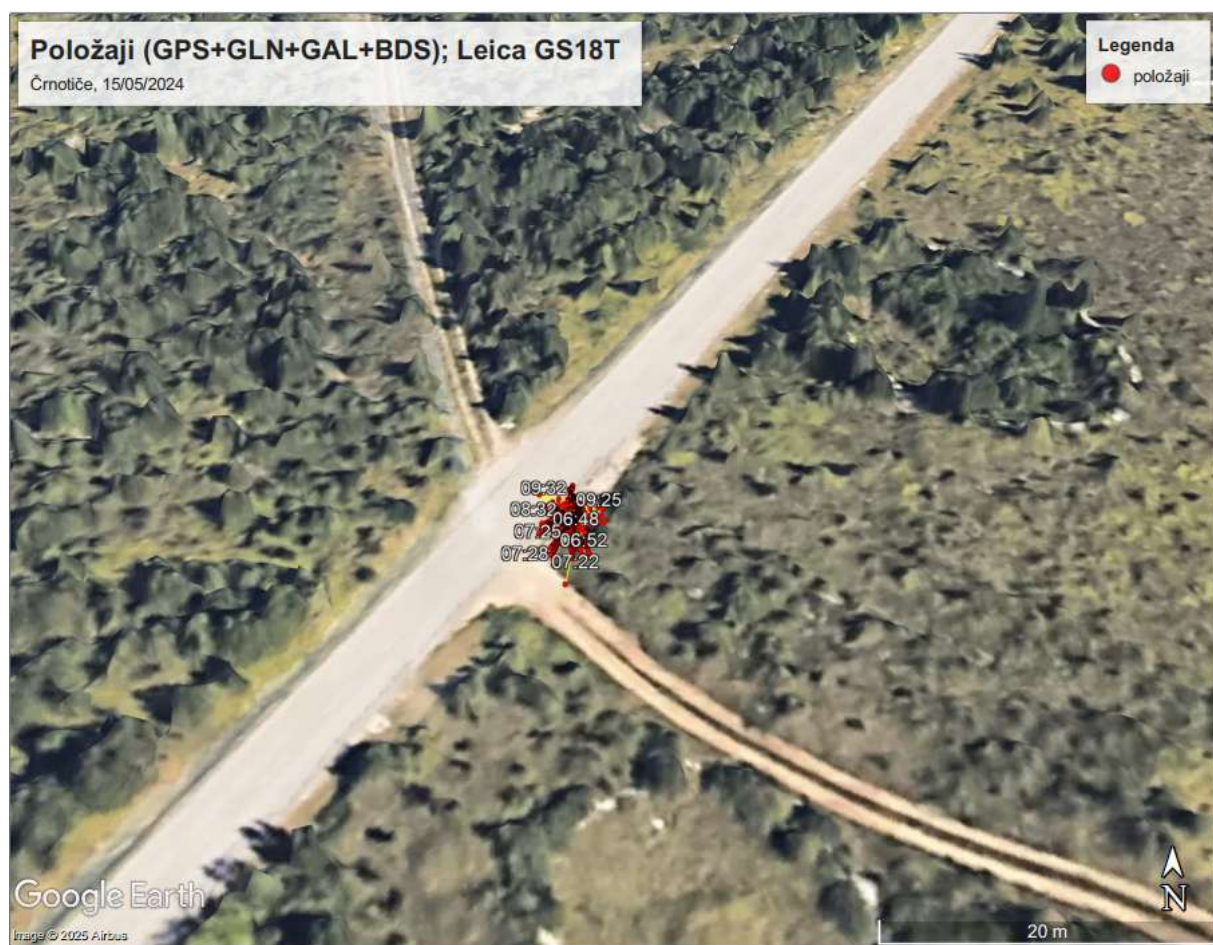
Slika 147: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, BeiDou



Slika 148: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, BeiDou, podlaga Google Earth



Slika 149: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, vse konstelacije



Slika 150: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, vse konstelacije, podlaga Google Earth

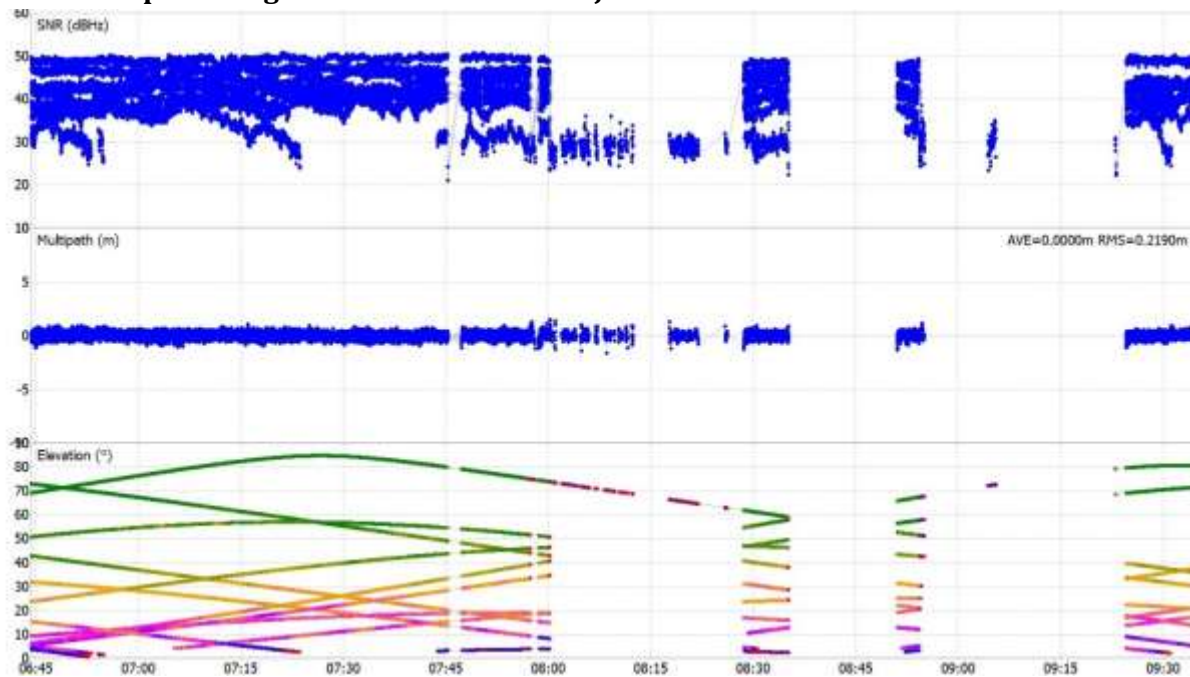
Iz rezultatov (Preglednica 14 ter slike (Slika 141- Slika 149)) je očitno, da sta motilnika povzročila precej manjše odstopanje v določitvi položaja kot sprejemnika u-blox ZED-F9P ter Leica GS15, ki so v okviru enega metra. Zaključimo lahko, da sicer sprejemnik Leica GS18T v primeru namernih motenj izgubi položaj, vendar pa so ponovno določeni položaji po motnjah takoj v mejah kakovosti določitve položaja s tehniko SPP (nekaj metrov).

Preglednica 14: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije

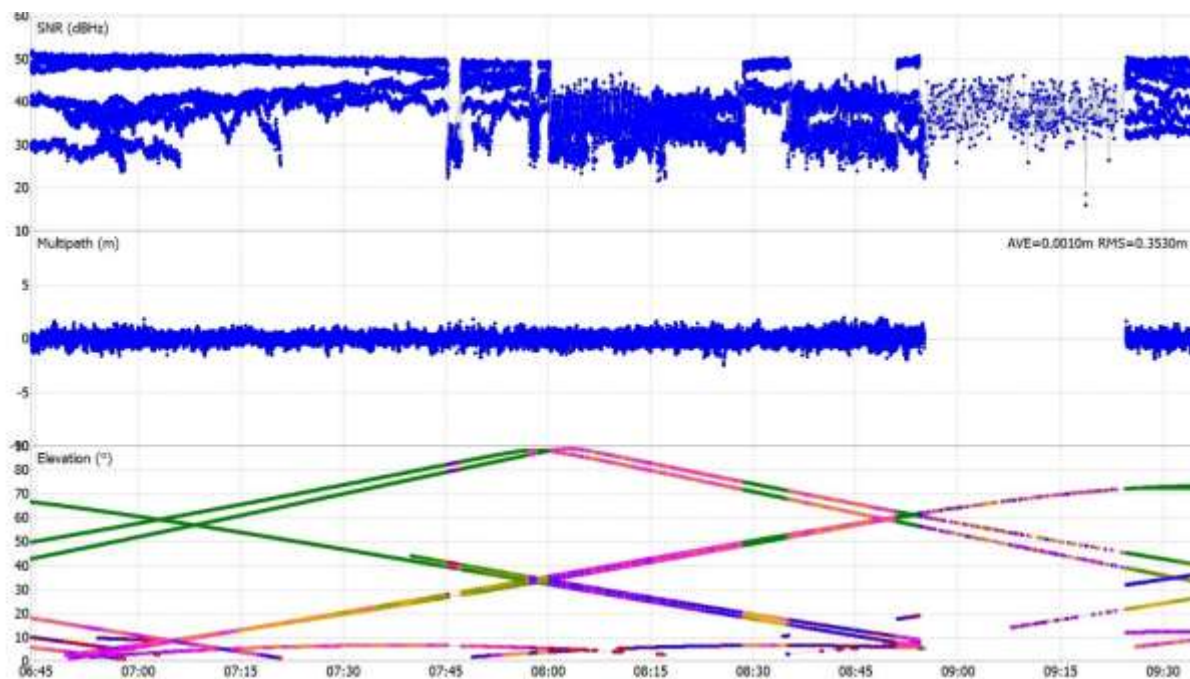
RMS [m]					
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	Vse konstelacije
E-W	0,4791	4,6385	4,6601	0,6905	0,6543
N-S	0,5048	3,2599	3,1884	0,4050	0,6997
U-D	0,9417	5,0152	5,2025	2,4971	2,7546

3.2.6.8 Vpliv motilnikov na sprejem signalov GNSS (Trimble R12i)

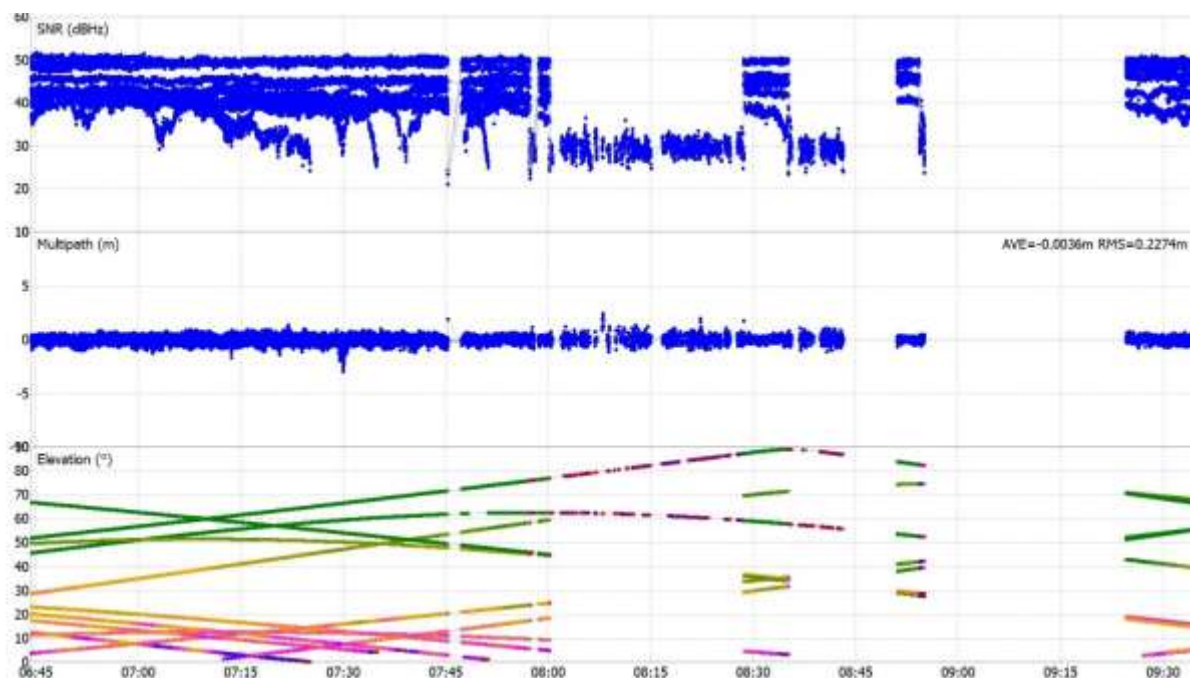
○ Vpliv na signal - frekvenčno območje



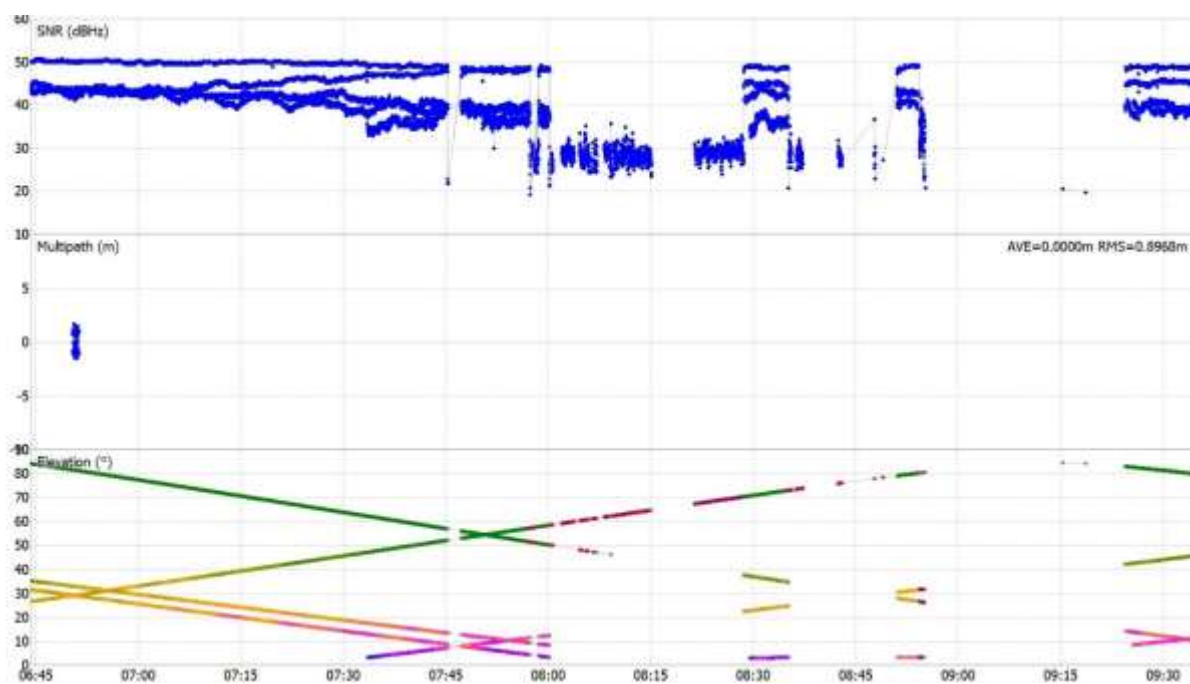
Slika 151: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1



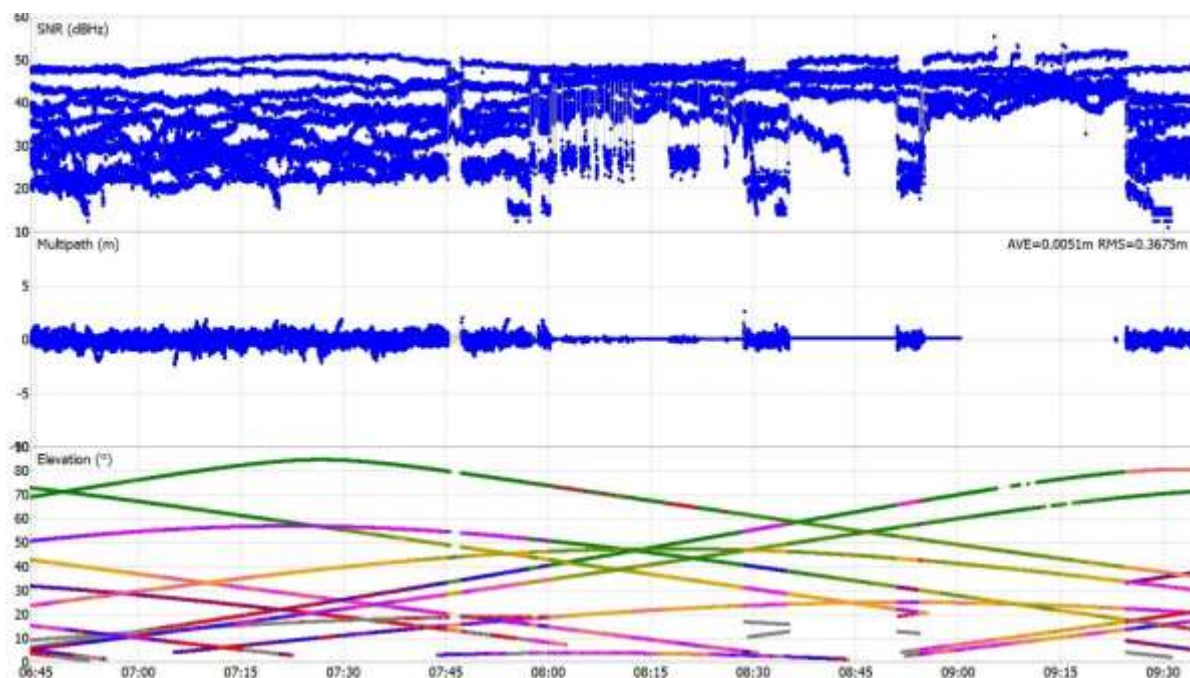
Slika 152: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



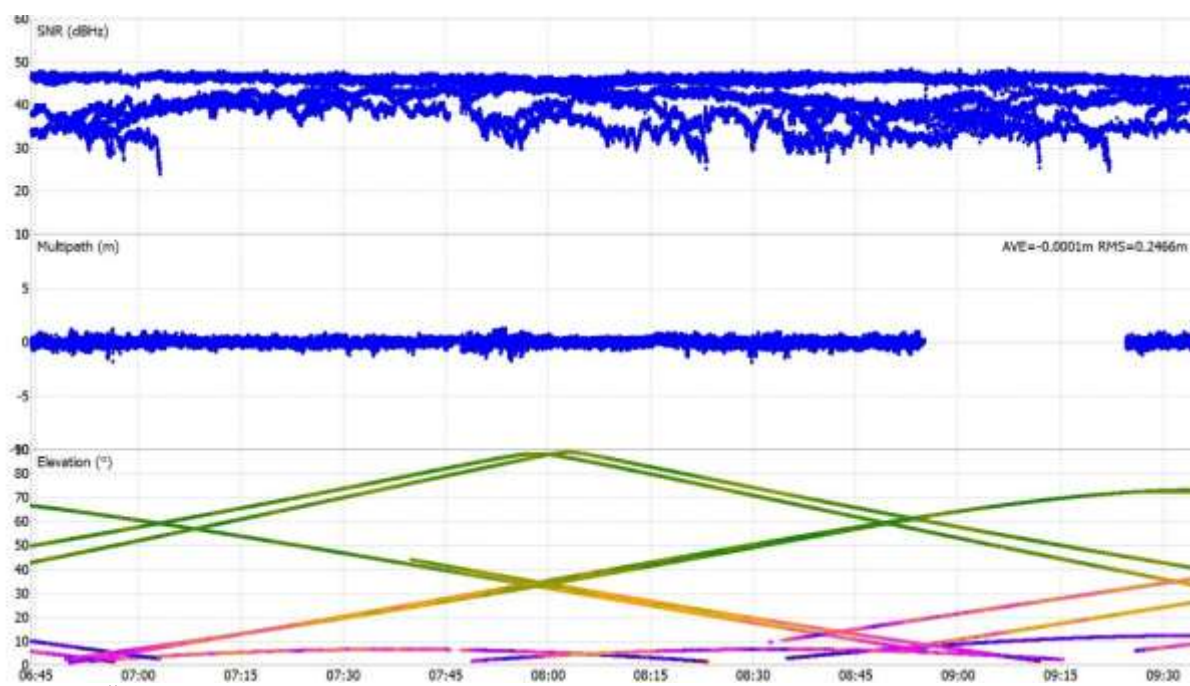
Slika 153: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



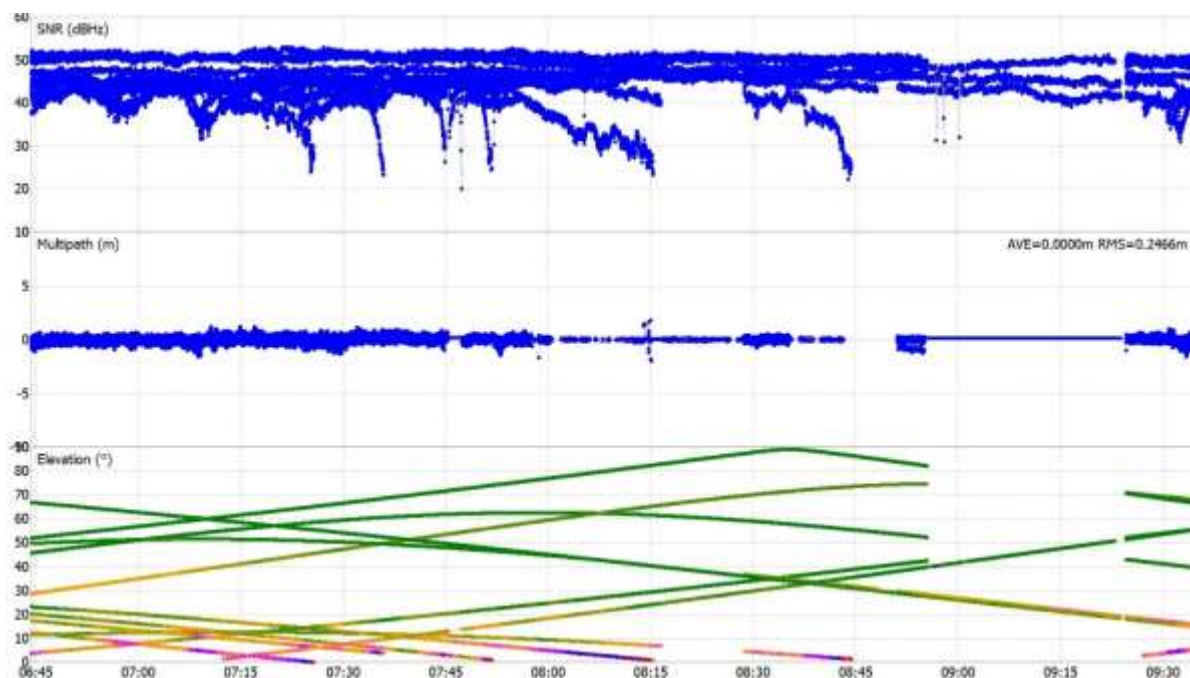
Slika 154: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B1



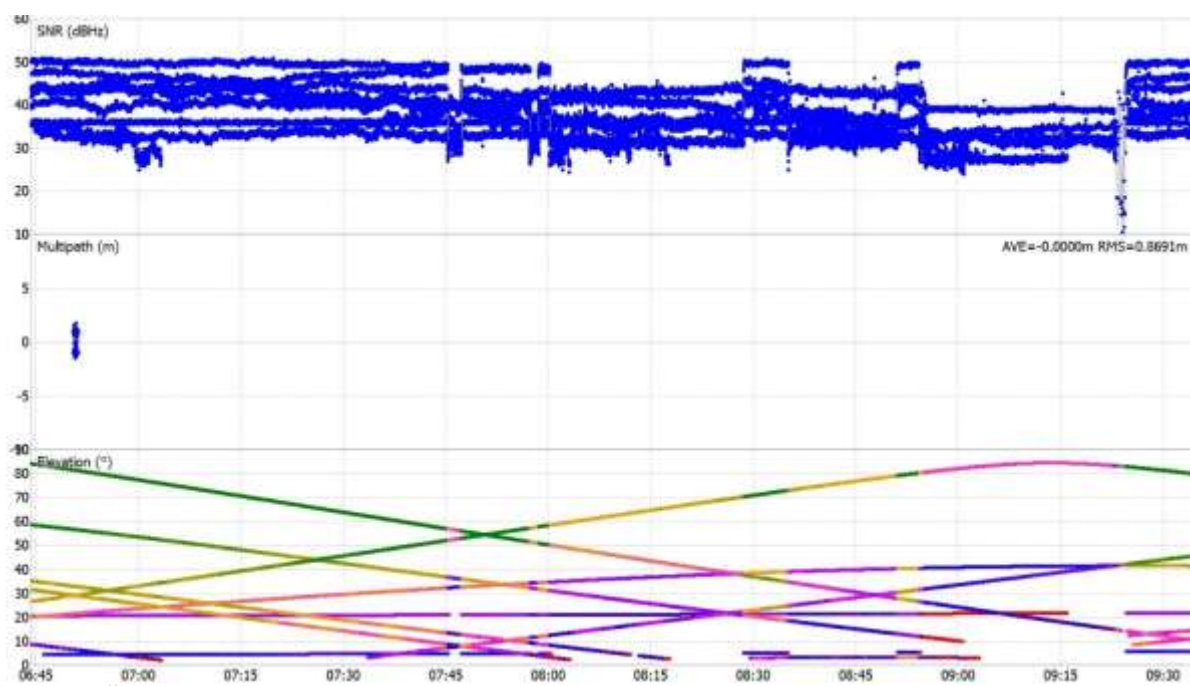
Slika 155: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2



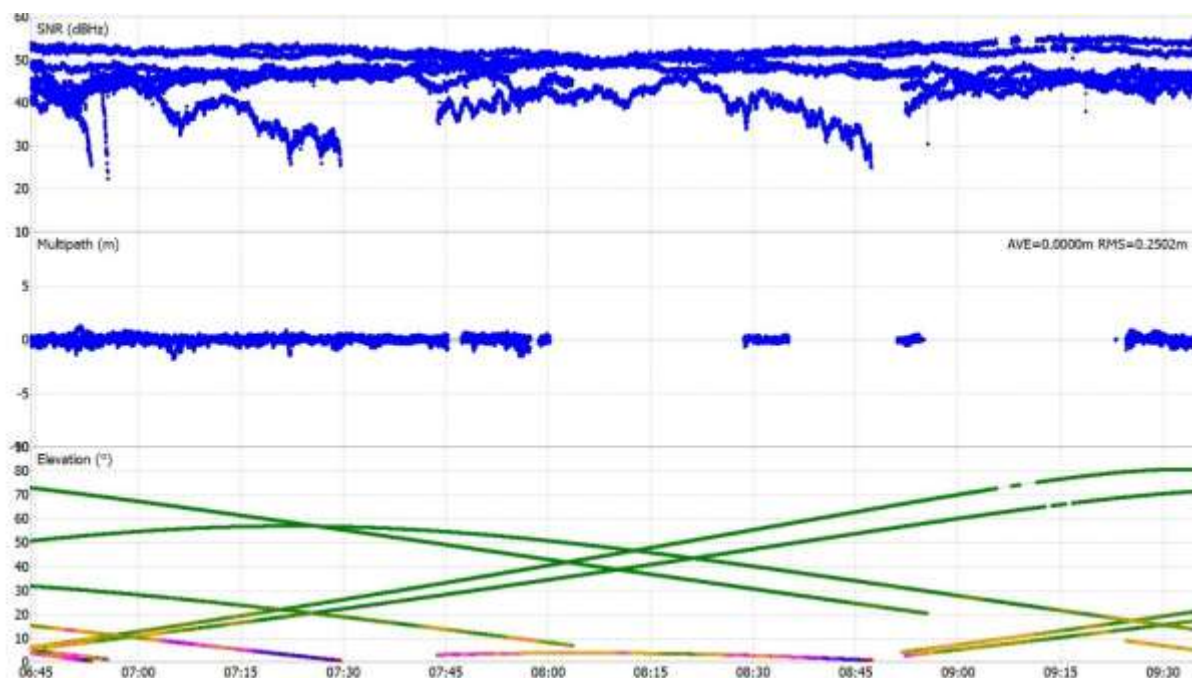
Slika 156: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2



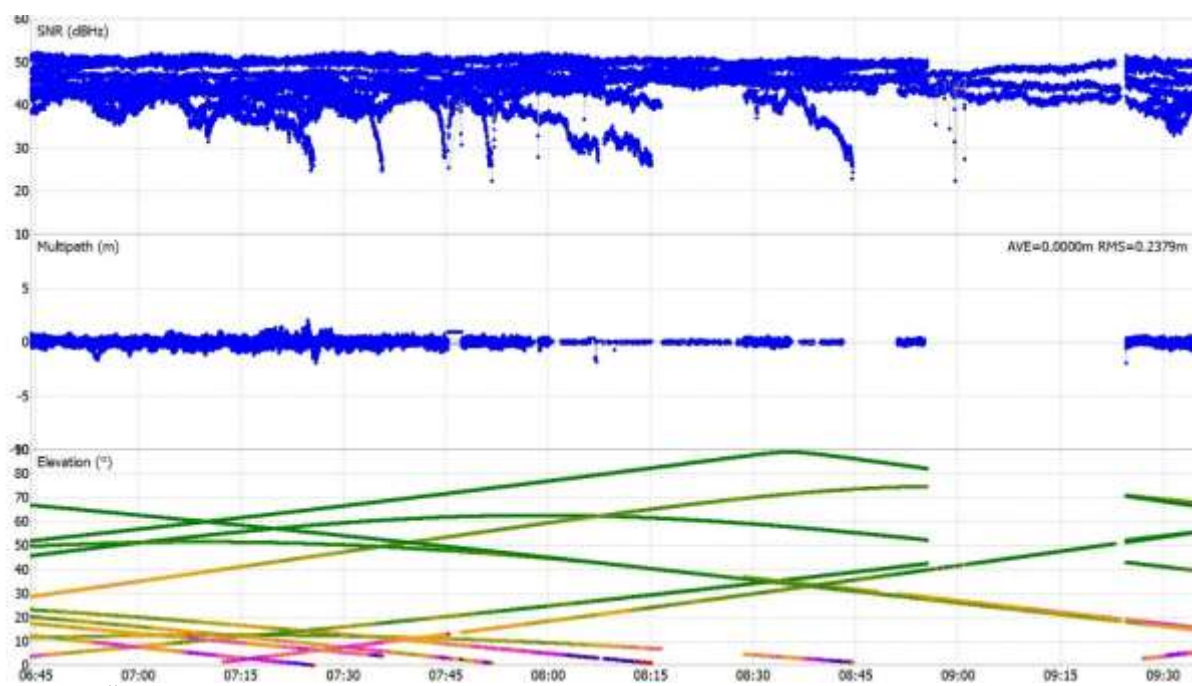
Slika 157: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b



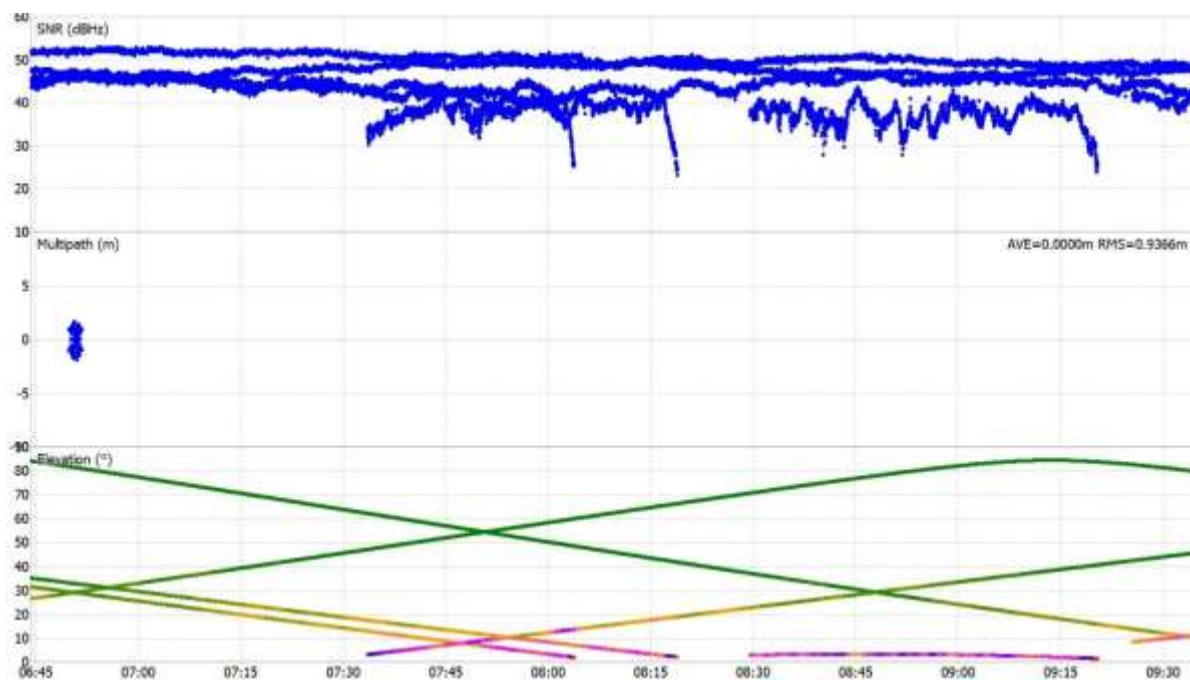
Slika 158: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2



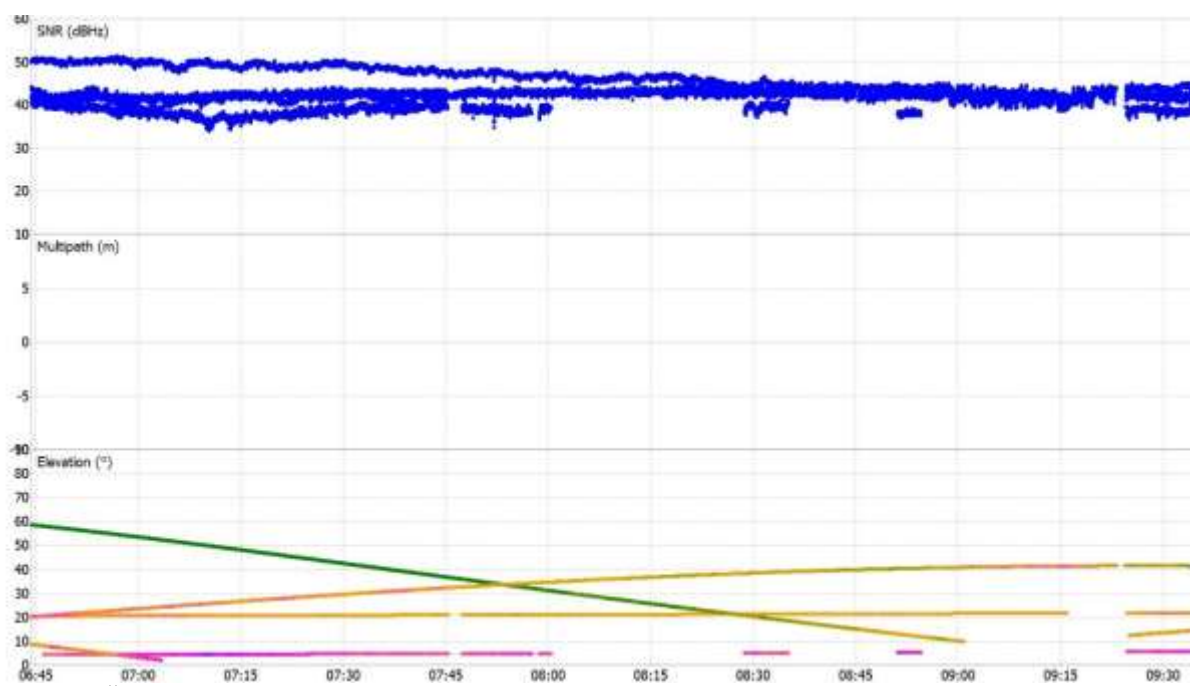
Slika 159: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5



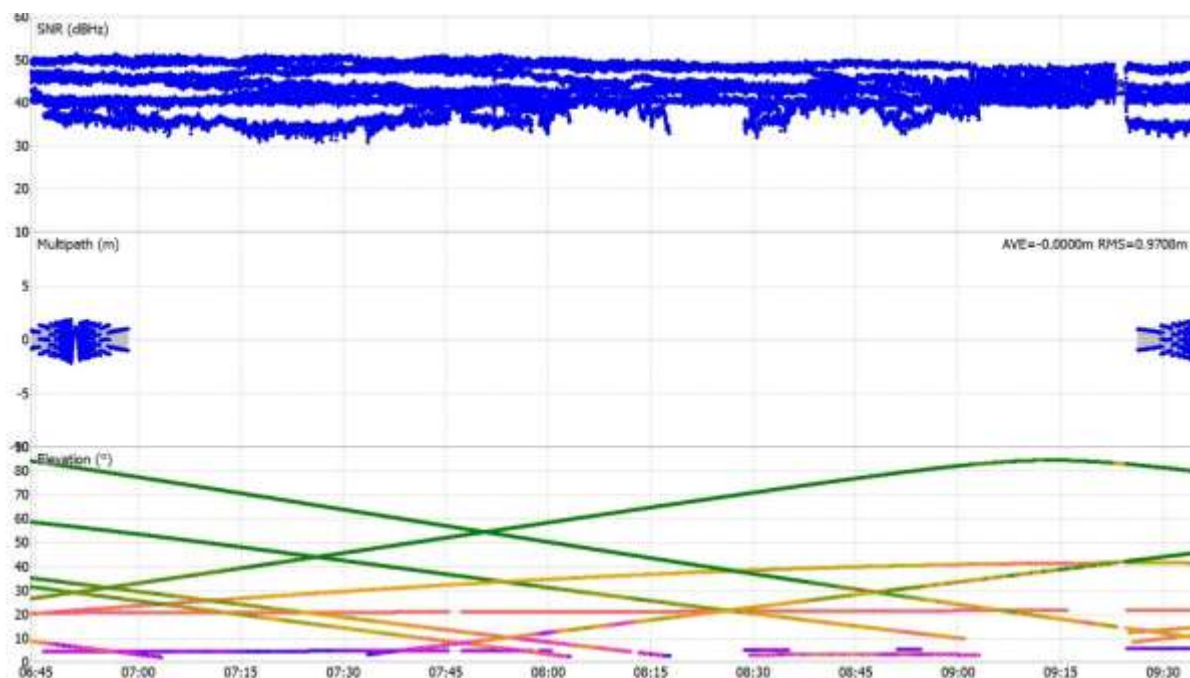
Slika 160: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a



Slika 161: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a



Slika 162: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2b



Slika 163: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B3

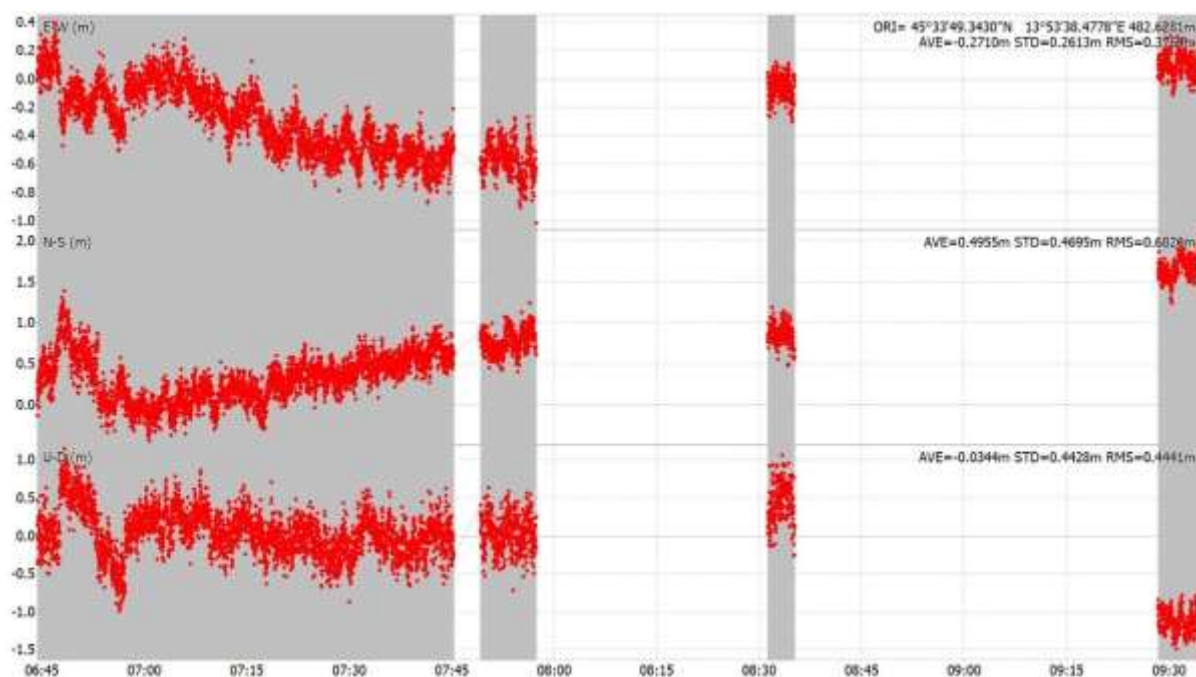
Pomembnejše ugotovitve z zgornjih prikazov (Slika 151 – Slika 163) so strnjene v Preglednici 15. Vidimo lahko, da je uporaba motilnika Rušička sprejemniku Trimble R12i povzročila le padec C/N0, medtem ko je bil motilnik Keysight tako učinkovit, da za signale GPS L1, Galileo E1, BeiDou B1 in Galileo E5b v času motenja nimamo na voljo opazovanj.

138

Preglednica 15: Trimble R12i. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami

Signal	motilnik	
	Rušička	Keysight
GPS L1	padec C/N0	ni signala
GLONASS G1	padec C/N0	padec C/N0 + delna izguba
Galileo E1	padec C/N0	ni signala
BeiDou B1	padec C/N0	ni signala
GPS L2	padec C/N0	ni posledic motenja
GLONASS G2	ni posledic motenja	ni posledic motenja
Galileo E5b	ni posledic motenja	ni signala
BeiDou B1-2	neizrazit padec C/N0	neizrazit padec C/N0
GPS L5	ni posledic motenja	ni posledic motenja
Galileo E5a	ni posledic motenja	ni posledic motenja
BeiDou 2a	ni posledic motenja	ni posledic motenja
BeiDou 2b	ni posledic motenja	ni posledic motenja
BeiDou 3	ni posledic motenja	ni posledic motenja

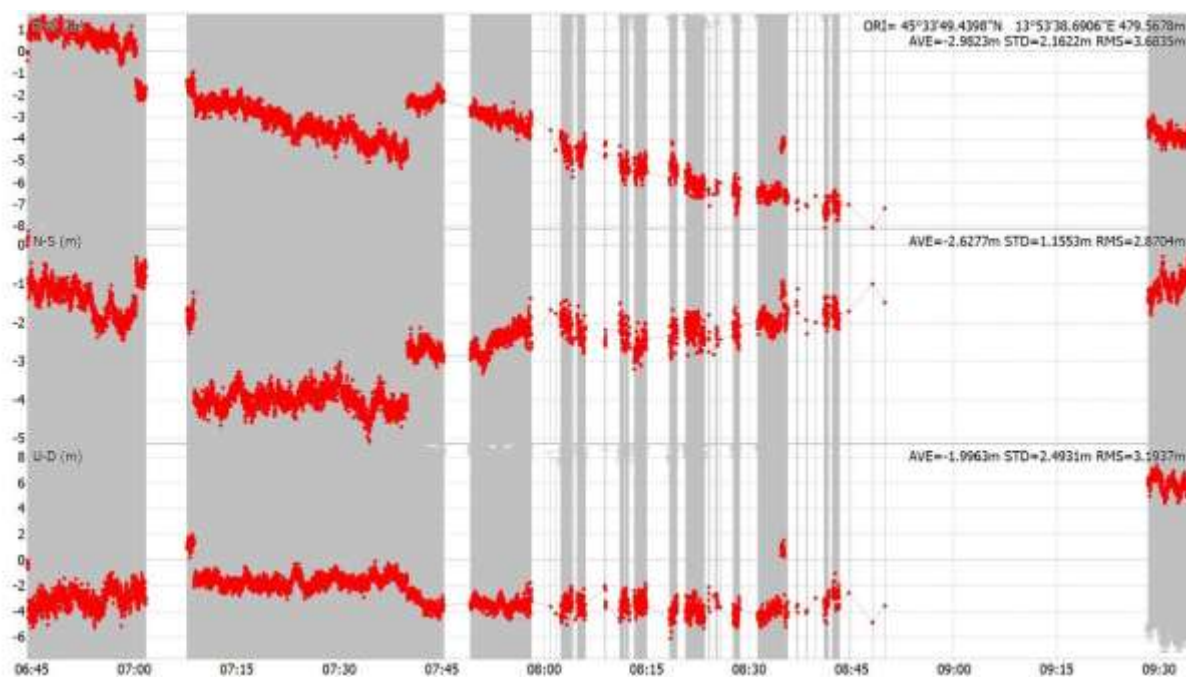
○ Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. *Single Point Positioning* – SPP)



Slika 164: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, GPS



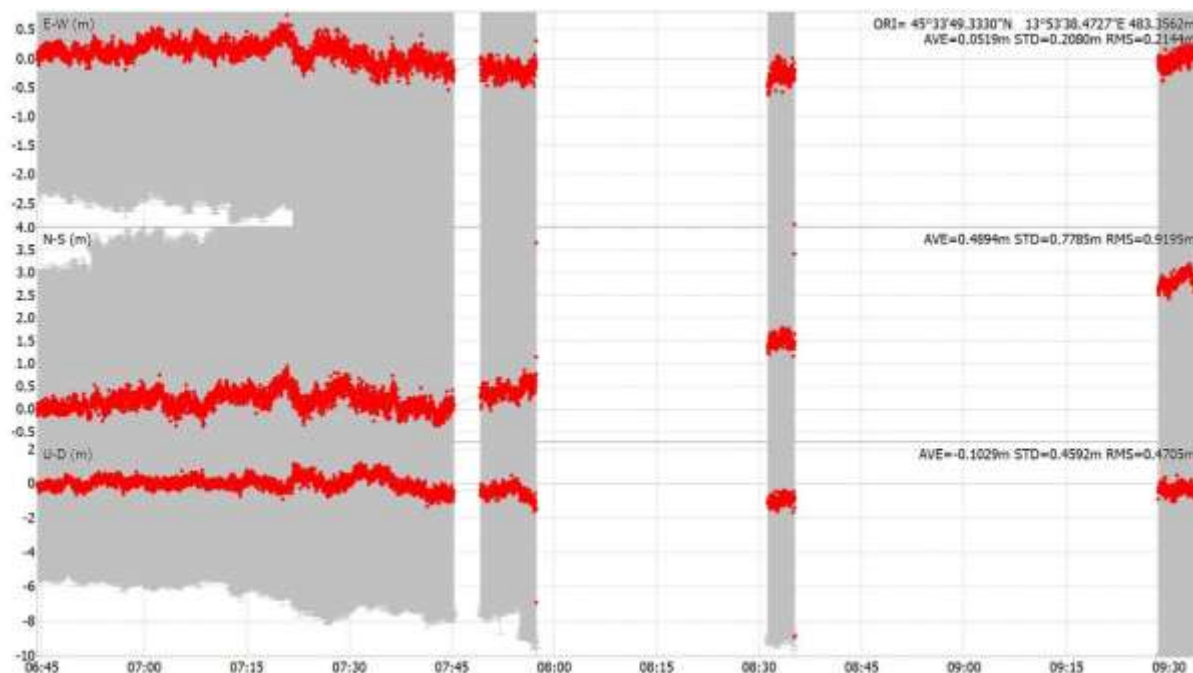
Slika 165: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, GPS, podlaga Google Earth



Slika 166: Črnotiče, 15/05/2024 Trimble R12i, SPP-položaji, GLONASS



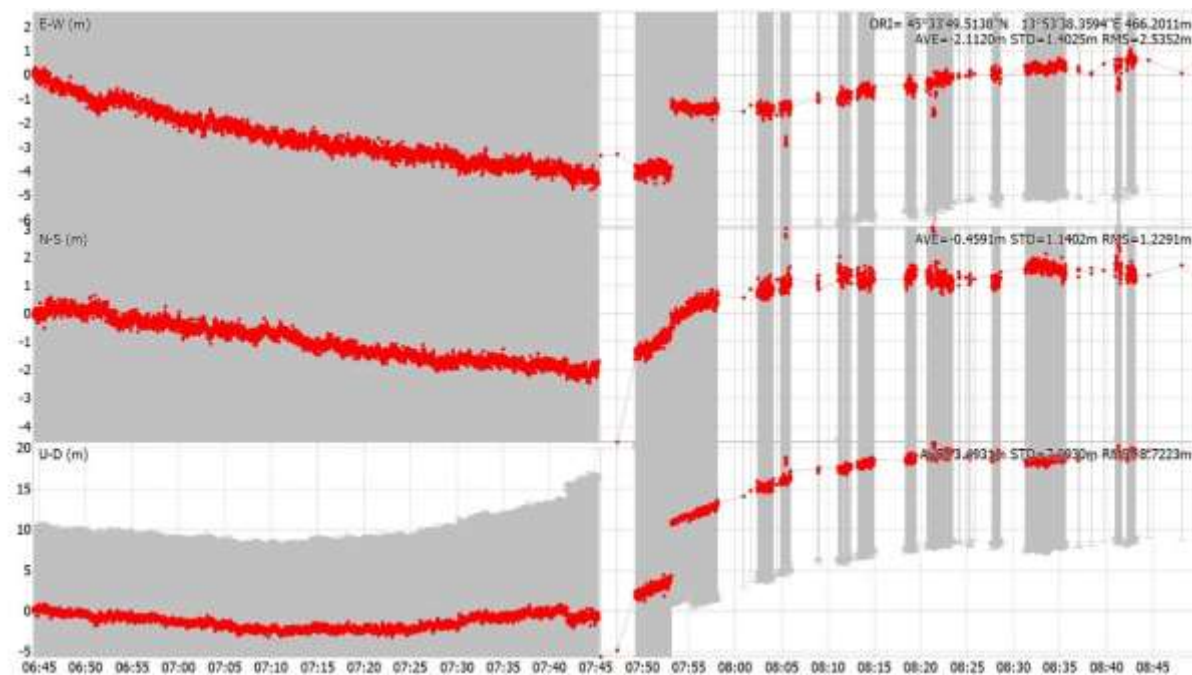
Slika 167: Črnotiče, 15/05/2024 Trimble R12i, SPP-položaji, GLONASS, podlaga Google Earth



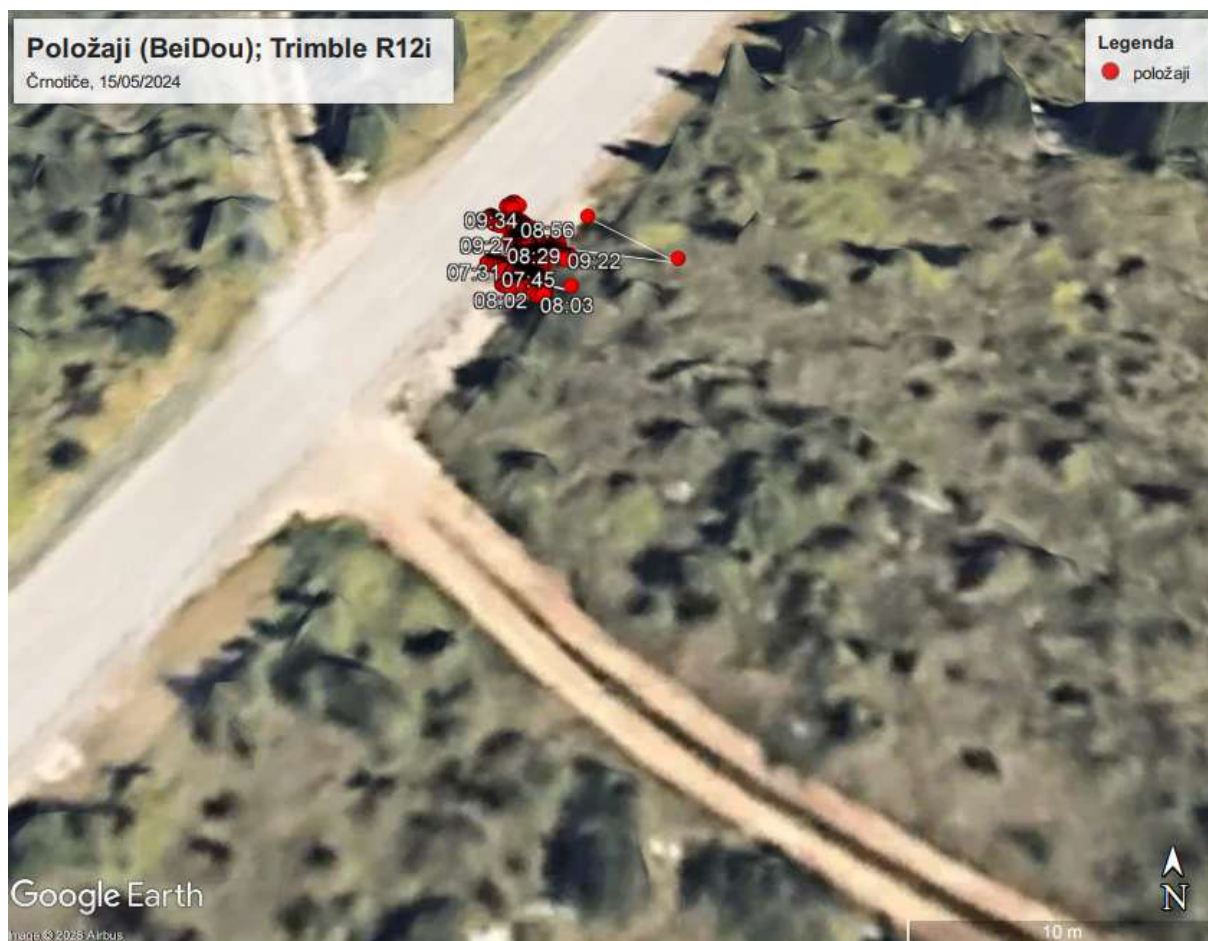
Slika 168: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, Galileo



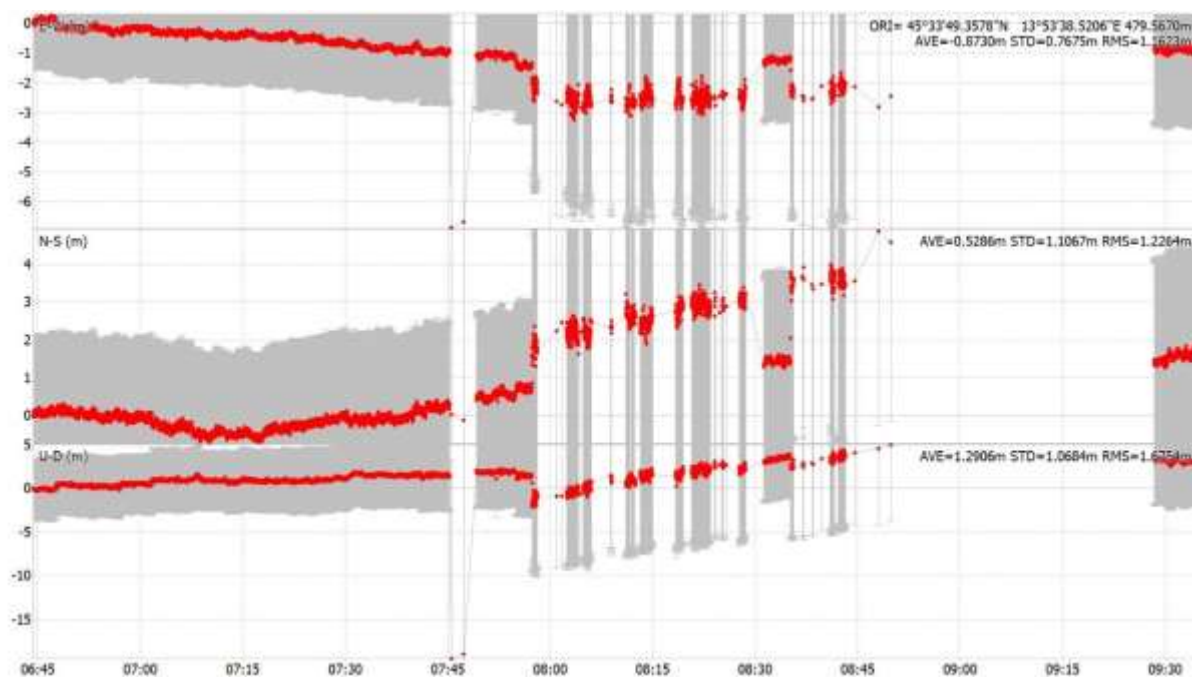
Slika 169: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, Galileo, podlga Google Earth



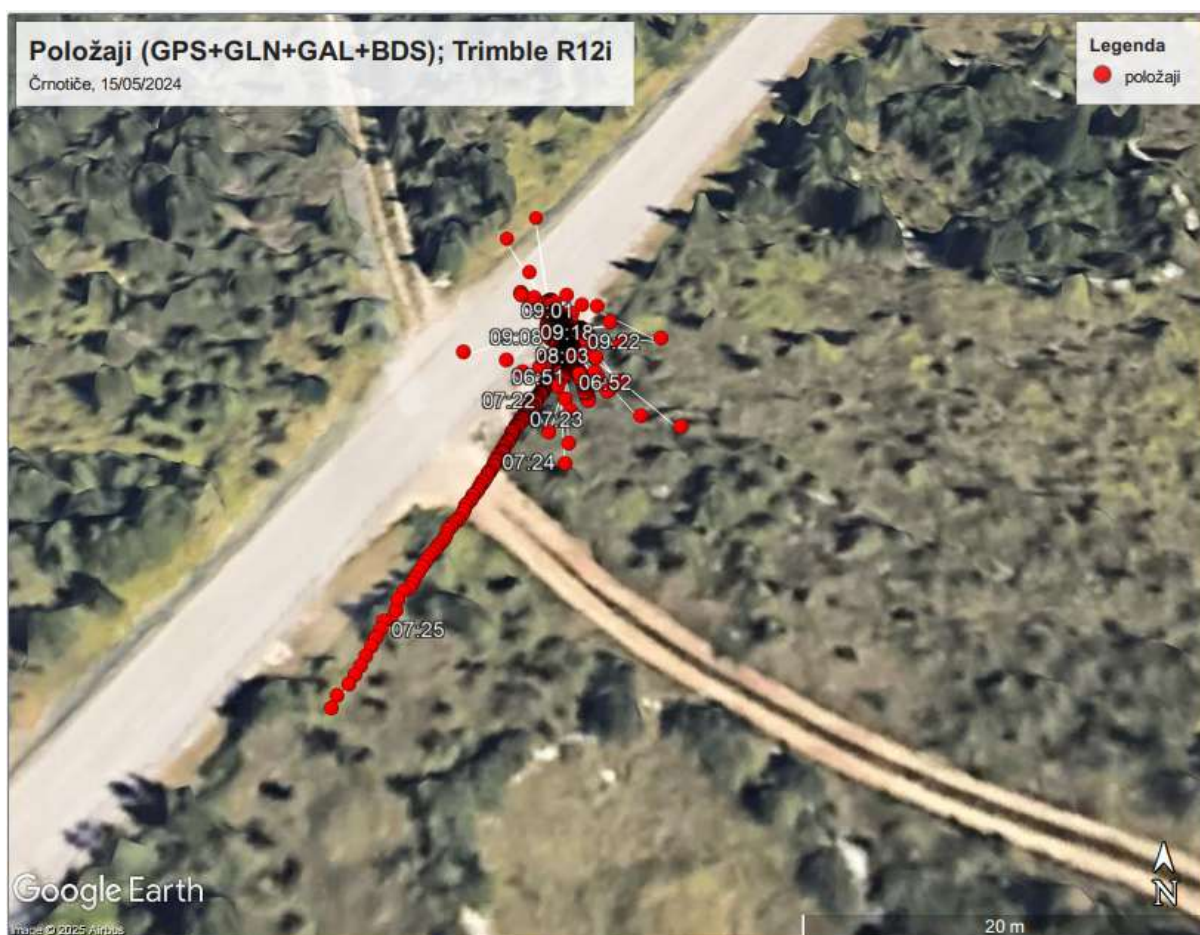
Slika 170: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, BeiDou



Slika 171: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, BeiDou, podlaga Google Earth



Slika 172: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, vse konstelacije



Slika 173: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, vse konstelacije, podlaga Google Earth

Iz rezultatov (Preglednica 16 ter slike (Slika 164 – Slika 172)) je očitno, da sta motilnika povzročila precej manjše odstopanje v določitvi položaja kot sprejemnika u-blox ZED-F9P ter Leica GS15. Sprejemnik Trimble R12i je deloval podobno kot sprejemnik Leica GS18T novejšje generacije, ki so očitno bolj učinkoviti v ponovni določitvi položaja po motnjah. Na motnje se je sprejemnik Trimble R12i odzval z izgubo signalov in posledično z nezmožnostjo določitve položaja. Nezmožnost določitve položaja je bila zelo očitna za konstelacijah GPS in Galileo.

Preglednica 16: Trimble R12i. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije

	RMS [m]				
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	Vse konstelacije
E-W	0,4791	4,6385	4,6601	0,6905	0,6543
N-S	0,5048	3,2599	3,1884	0,4050	0,6997
U-D	0,9417	5,0152	5,2025	2,4971	2,7546

3.2.6.9 Glavne ugotovitve, vezane na namerne motnje (Črnotiče, 15/05/2024)

Strnjeno lahko povzamemo rezultate, pridobljene po motnjah takole:

- nizko-cenovni sprejemnik u-blox ZED-F9P ter sprejemnik starejše letnice izdelave (Leica GS15, na trg dan v letu 2009) sta na motnje zelo občutljiva. Sicer pride do prekinitev signala, vendar potrebuje po motnjah precej več časa za ponovno vzpostavitev pravega položaja. Takoj po končanih motnjah je kakovost določitve položaja predvsem s konstelacijo GPS zelo slaba (več deset-kilometersko odstopanje položaja);
- čeprav sta motilnika delovala v frekvenčnem območju L1, je prišlo pri nekaterih sprejemnikih do izgube sprejema signalov tudi na drugih frekvencah;
- določitev absolutnega položaja s posameznimi konstelacijami (GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou) je precej različna; predvsem pri GPS je kakovost za sprejemnika u-blox ZED-F9P ter Leica GS15 izredno slaba. Očitno nepravi položaji so se pojavili po uporabi motilnika Keysight.

3.2.7 Nenamerne motnje (Luka Koper, maj – junij 2024)

Zaradi pojavov znotraj območja Luke Koper, ki so onemogočali nemoteno delovanje od GNSS signala odvisnih avtomatskih sistemov, smo se odločili, da naredimo nekaj testnih meritev na območju luke in v njeni bližnji okolici. Na prisotnost tovrstnih motenj nas je opozorila luška tehnična služba in nam povedala, da morajo na določenih področjih znotraj luke preklopiti na ročno krmiljenje kontejnerskih pretvornikov.

Odločili smo se, da bomo s pomočjo GNSS sprejemnika uBlox ZED-F9P preiskali območje, tako da bomo opazovali sledeče parametre:

- frekvenčni spekter energetskega toka v frekvenčnem pasu GNSS,
- povprečje razmerja signala in
- gostote šuma ter vrednost ojačitve na sistemu za avtomatično ojačanje signala (AGC).

Spekter smo nato analizirali. Najprej smo izračunali bazno linijo. To je povprečje točk, ki bistveno ne odstopajo od povprečja (kot mejo smo uporabili trikratnik standardne deviacije). Na ta način smo razdelili točke na motene in nemotene. Iz slednjih smo izračunali povprečje in standardno deviacijo za vsako frekvenco posebej. Ta proces je iterativen, kjer v vsakem naslednjem koraku dodamo nove točke med motene, dokler nam algoritem ne proizvede nobenih motenih točk več. Na ta način smo iz spektra izluščili tri potencialne metrike, ki bi lahko nakazovale na prisotnost motenj:

- povprečno odstopanje od bazne linije,
- največje odstopanje od bazne linije in
- število motenih točk.

145

Pri razmerju signala in gostote šuma (CNR) smo upoštevali povprečje vseh GNSS satelitov, ki so imeli višinski kot višji od 30° oziroma 50°. S tem smo dobili v principu dve različni metriki, ki pa sta tako močno korelirani, da smo v nadaljnji analizi upoštevali le eno od njih. Meja višinskega kota (elevacije) je nujna, ker je znano, da imajo sateliti z nizkim višinskim kotom (pod 10°) nizek CNR in bi kot taki motili izračun povprečja. Ni pa pomembno, kje to mejo postavimo, dokler je v nekem smiselnem okviru.

Vrednost na AGC je bila izbrana, ker mora sprejemnik pri prisotnosti motnje znižati njeno vrednost, saj bi v nasprotnem primeru prekorachil mejno vrednost, ki jo lahko analogno-digitalni pretvornik (ADC) še verodostojno vzorči, in bi zato prešel v območje nasičenja.

Kot že omenjeno, smo za zajem podatkov uporabili uBlox ZED-F9P, ki je zajemal v dveh frekvenčnih spektrih L1 in L5. Kot anteno smo uporabili sprejemniku priloženo krpičasto (angl. *patch*) anteno, ki smo jo namestili na streho avtomobila (čolna v primeru zajema na morju), s katerim smo se nato vozili po območju, ki nas je zanimalo.

Same meritve so potekale v sledečih terminih in lokacijah.

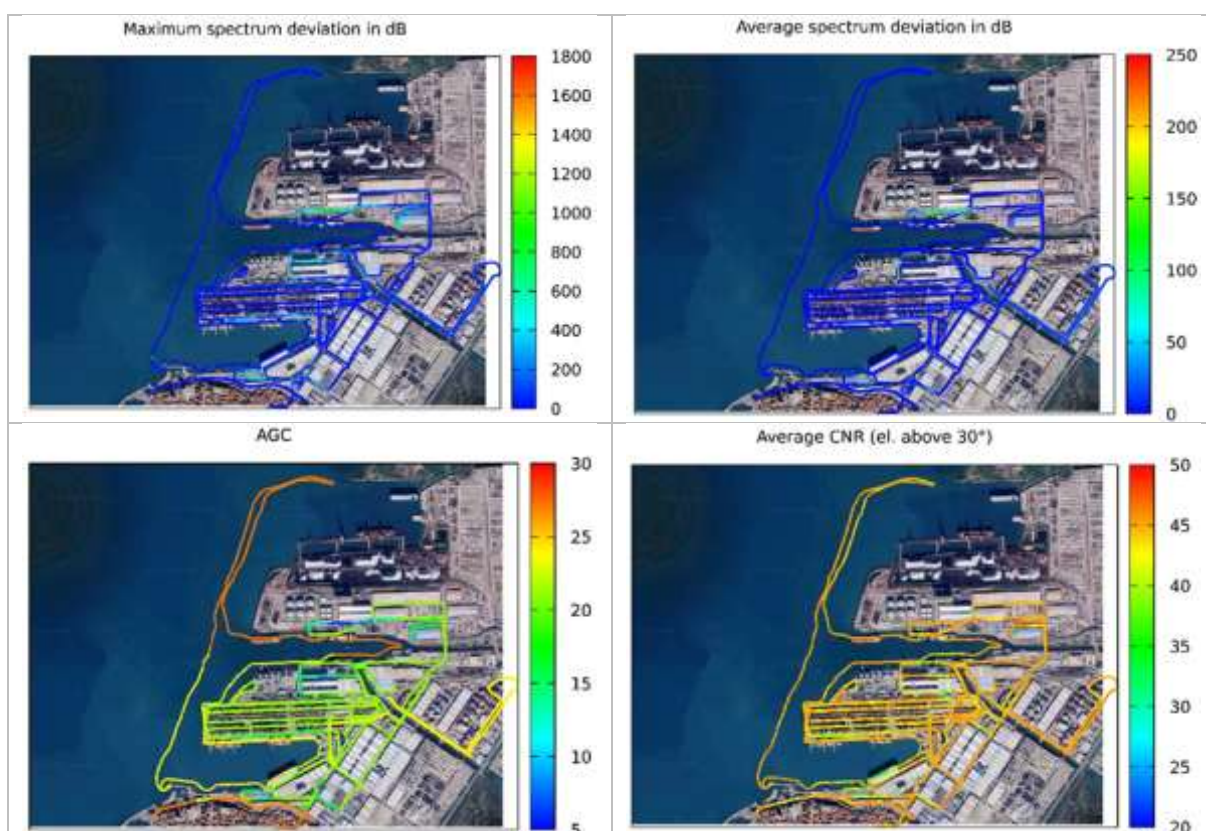
- Dne 7. maja 2024 v dopoldanskih urah smo opravili prvo sondiranje, ki je bilo osredotočeno na področja, kjer so se težave pojavljale (vzhodni del kontejnerskega terminala) in njihovo neposredno bližino. Poleg tega smo temu območju dodali še

področje okrog skladišča 15 generalnih tovorov, ker je tam nameščena večina komunikacijskih anten.

- Na podlagi rezultatov tega zajema smo se odločili, da naredimo še en zajem 27. maja v zgodnjih popoldanskih urah na območju severne koprške obvoznice, ki je v neposredni bližini dela luke, ki smo ga sondirali.
- 29. maja 2024 dopoldan smo s pomočjo Uprave Republike Slovenije za pomorstvo opravili še zajem signalov z morja.
- 14. junija 2024 dopoldan pa smo ponovili meritev na območju luke, le da smo tokrat pregledali še področje za Badaševico in južni del drugega pomola.

Kot kritični območji sta se izkazali skladišče odpadnega železa na jugovzhodnem delu drugega pomola in okolica skladišča 15 generalnih tovorov. Spektra s teh dveh območij, ki ju je izrisal program u-center (Slika 174), se precej razlikujeta, tako da gre najbrž za dva različna izvora. Točna določitev lege izvora je zelo težka zaradi močne prisotnosti visokih skladov kontejnerjev, ki zaradi svoje kovinske sestave močno odbijajo in senčijo elektromagnetne signale od satelitov in od virov motenj do sprejemnika.

Po odstranitvi motečih izvorov bo treba ponoviti zajem podatkov, da se prepričamo, ali so bile motnje znotraj kontejnerskega terminala le odsev že dveh omenjenih izvorov, ali pa so jih je povzročalo več izvorov.



Slika 174: Prikaz različnih metrik za detekcijo prisotnosti motenj GNSS signalov.

4 GNSS simulacija ponovljivih meritev za določitev tipov motenj

Signali GNSS so zasnovani tako, da po več kot 20.000 kilometrih potovanja iz vesolja dosežejo Zemljo z izjemno nizko močjo, primerljivo s toplotnim šumom (že opisano v poglavju C.1). Zaradi te šibkosti lahko že majhna količina dodatnega šuma ali blaga motnja vpliva na njihovo zaznavanje in obdelavo. Dodatno negotovost povzroča dejstvo, da signali GNSS v realnem okolju niso vedno enaki in enolično opredeljivi. Njihove lastnosti se spreminjajo glede na razporeditev satelitov na nebu, atmosferske pogoje (ionosferske in troposferske vplive) ter lokalne odboje signalov od objektov. Posledično so pogoji med posameznimi meritvami vedno vsaj nekoliko različni. Poslabšanje kakovosti signala in posledično določanja položaja je zato lahko posledica motnje, lahko pa tudi naravne variabilnosti okolja GNSS. Takšna nepredvidljivost otežuje objektivno oceno vpliva motenj na sprejemnik in onemogoča povsem ponovljivo testiranje.

V raziskavi smo zato uporabili GNSS-simulacijo, ki omogoča popolnoma nadzorovano in ponovljivo okolje. Analizirali smo odzive cenovno dostopnega GNSS-sprejemnika u-blox F9P v prisotnosti treh vrst motenj, in sicer:

- ozkopasovne motnje z neprekinjenim valovanjem (angl. Continuous Wave – CW),
- frekvenčno modulirane motnje (angl. Frequency Modulated – FM) ter
- frekvenčno skakajoče motnje

pri desetih različnih močeh. Skupno smo izvedli 1500 ponovljivih meritev v natančno določenih pogojih in zbrali obsežen nabor podatkov, ki vključujejo tako signalne indikatorje kot tudi rezultate določitve položaja med in po motnjah. S tem smo omogočili poglobljeno statistično analizo vplivov motenj, pripravili številne grafe, ki vizualno ponazarjajo odzive sprejemnika, ter vzpostavili obsežno podatkovno bazo za nadaljnje raziskave detekcije motenj in odpornosti sprejemnikov GNSS na motnje.

4.1 Metodologija pristopa k izvedbi ponovljivih meritev GNSS

Pri ocenjevanju vpliva motenj signalov GNSS na delovanje sprejemnika se soočamo z različnimi viri negotovosti, ki lahko vplivajo na rezultate meritev. V našem primeru jih lahko razdelimo na tri glavne kategorije:

- prostorsko variabilnost, ki izhaja iz različnih položajev sprejemnikov,
- časovno variabilnost, povezano s spreminjanjem signalov GNSS skozi čas,
- ter sistemski šum, ki je vedno prisoten in na katerega imamo še najmanj vpliva.

Obstajajo različni pristopi, s katerimi lahko kljub tem omejitvam pridobimo dovolj podatkov za zanesljivo analizo. V tej raziskavi smo uporabili **pristop s simulatorjem GNSS**, ki omogoča ponovljivo generacijo vedno enakih signalov. S tem smo popolnoma odpravili prostorsko variabilnost. Časovna variabilnost ostane le v tolikšni meri, kolikor natančno časovno usklajujemo potek meritve, kar pa je z računalniškim nadzorom dobro obvladljivo. Tak pristop zato zahteva najmanjše število ponovitev za doseg zanesljivih rezultatov.

Drugi pristop predvideva izvajanje meritev z več enakimi sprejemniki, ki istočasno sprejemajo signale na isti lokaciji. Vse naprave bi signal prejele iz ene skupne antene, preko razdelilnika signala. S tem bi odpravili časovno variabilnost, saj bi vsi sprejemniki prejeli signal v istem trenutku. Vendar je tak pristop v praksi težko izvedljiv in bi za zadostno statistično moč potrebovali večje število povsem enakih sprejemnikov, kar predstavlja velik logistični in finančni izziv. Poleg tega se z vsako delitvijo signala razmerje med signalom in šumom poslabša, saj se moč signala zmanjša, uporaba ojačevalnikov pa samo doda dodatni šum.

Tretji pristop temelji na zaporednem izvajanju več meritev skozi daljše časovno obdobje v realnem okolju. S tem bi lahko z večjim številom vzorcev zmanjšali vpliv šuma in naključnih variacij, vendar časovna variabilnost zaradi gibanja satelitov, atmosferskih sprememb in drugih dejavnikov ostaja prisotna. Za primerljivo stopnjo zanesljivosti kot pri simulacijskem pristopu bi bilo zato potrebno bistveno več meritev, kar pomeni tudi znatno več časa.

Med vsemi opisanimi pristopi se GNSS simulacija izkaže za najbolj učinkovit način, saj omogoča visoko stopnjo nadzora nad vhodnimi pogoji, odpravo prostorske variabilnosti in zelo dobro časovno ponovljivost, kar omogoča natančno analizo že z razmeroma majhnim številom ponovitev.

4.2 Simulacija GNSS kot orodje za ponovljive meritve

Simulator GNSS omogoča natančno določitev vhodnih parametrov, kot so datum, čas, geografski položaj sprejemnika ter uporabo modelov ionosferske ter troposferske refrakcije. Na osnovi teh podatkov in z uporabo shranjenih almanahov ustvari simulirano gibanje satelitov ter generira RF signale, ki po strukturi, modulaciji in vsebini posnemajo dejanske satelitske prenose. Uporabnik lahko določi, katere sisteme želi vključiti v končno določitev položaja, število satelitov, njihove signalne moči ter po potrebi dodatno nastavi Dopplerjev pomik, časovne zakasnitve in druge parametre.

Za izvajanje ponovljivih in časovno natančno usklajenih meritev v takšnem simulacijskem okolju smo zasnovali popolnoma avtomatiziran merilni sistem, s katerim smo lahko zanesljivo analizirali odzive sprejemnika GNSS na različne vrste motenj v strogo nadzorovanih pogojih. Sistem je moral podpirati samodejni zagon posameznih meritev, natančno upravljanje z vklopom in izklopom motenj ter neprekinjeno beleženje podatkov iz sprejemnika.

V ta namen smo vzpostavili merilno okolje (Slika 175), sestavljeno iz simulatorja za generiranje kontroliranih satelitskih signalov, laboratorijskega signalnega generatorja za ustvarjanje motilnih signalov, smernega sklopnika za združevanje obeh signalov ter u-blox F9 GNSS sprejemnika kot testne naprave. Celoten sistem je bil centralno nadzorovan z računalnikom, ki je zagotavljal natančno časovno usklajenost vseh komponent.

Pred začetkom vsake meritve je računalnik prek SCPI ukazov simulatorju poslal zahtevo za ponovni zagon simulacije iz začetnega časa, sprejemniku pa ukaz za hladen zagon (angl. cold start), s čimer smo zagotovili povsem enake začetne pogoje ob vsakem zagonu. Po tem je sledilo 180 sekund čakanja, da je sprejemnik nazaj pridobil vse signale satelitov in dosegel stabilno stanje delovanja. Nato se je pričel avtomatiziran zajem podatkov prek serijske povezave.

Meritev je potekala v treh zaporednih fazah:

- najprej 100 sekund brez prisotnosti motnje,
- nato vklop motnje (prek SCPI ukaza signalnemu generatorju), ki je trajala točno 100 sekund,
- ter nato 100-sekundna faza okrevanja po izklopu motnje.

Vrsta motnje in njena moč sta bili natančno določeni vnaprej in izvedeni brez ročnega posega.

Natančna časovna koordinacija vseh ukrepov, zlasti vklopa in izklopa motnje, je ključnega pomena za analizo odziva sprejemnika GNSS v različnih fazah. Takšno časovno sinhronizacijo in ponovljivost je mogoče doseči le s centralnim nadzorom računalnika. Ročni nadzor ali proženje dogodkov s strani uporabnika ne omogočata zadostne časovne natančnosti in zanesljivosti, ki sta potrebni za dosledno izvajanje testov in kasnejšo statistično obdelavo rezultatov. Z opisanim pristopom smo dosegli natančno upravljanje z merilnim postopkom in hkrati zmanjšali vpliv človeškega faktorja, kar je bistveno pri analizi subtilnih vplivov motenj na delovanje sprejemnikov GNSS.



Slika 175: Merilna postavitve.

4.2.1 Uporaba smernega sklopnika

Pri zasnovi merilne postavitve smo uporabili smerni sklopnik, ki je igral ključno vlogo pri varnem in učinkovitem združevanju signalov GNSS in umetno generiranih motenj. Sklopnik nam je omogočil neposreden vnos motilnega signala v RF pot med simulatorjem GNSS in sprejemnikom. Na ta način smo odpravili tveganje za nenamerno širjenje motnje v okolico, kar bi lahko vplivalo na druge GNSS naprave ali komunikacijske sisteme v bližini.

Takšen pristop nam je omogočil izvajanje ponovljivih in varnih meritev tudi pri najvišjih stopnjah motilne moči, brez skrbi glede kršenja regulativ ali motenja okolice.

4.3 Tipi motenj

Za potrebe raziskave smo izbrali tri vrste radijskih motenj, s katerimi smo želeli zajeti čim bolj raznolike tipe motilnih signalov, tako po obliki kot tudi po širini frekvenčnega območja, ki ga

pokrivajo. Namen njihove izbire je bil preučiti vpliv različnih spektralnih in časovnih lastnosti motenj na delovanje GNSS sprejemnika.

- **Kontinuiran val (angl. Continuous Wave – CW)** – ozkopasovna motnja v obliki nemoduliranega eno-frekvenčnega signala, nastavljenega na 1575,42 MHz, kar sovpada z nosilno frekvenco GPS L1. Zaradi svoje spektralne osredotočenosti ima ta motnja močan vpliv predvsem na GPS sistem, saj se energija signala skoncentrira točno v središče L1 frekvenčnega pasu.
- **Frekvenčna modulacija (angl. Frequency Modulation – FM)** – signal z odklonom 8 MHz in modulacijsko frekvenco 1 kHz, kar ustvari širokopasovno motnjo, ki v teoriji pokrije celotno območje L1 in še nekoliko več. Zaradi svoje širine vpliva tako na signale satelitov sistemov GPS kot tudi na Galileo, ki delujejo v tem spektru.
- **Frekvenčno skakanje (angl. Frequency Hopping)** – ozkopasovni signal, ki z visoko hitrostjo menja oddajno frekvenco vsakih 0,01 sekunde med 1575,42 MHz in ± 735 kHz. Zaradi teh skokov motnja pokriva več točk znotraj L1/E1 območja in lahko vpliva na signale satelitov GPS kot tudi Galileo.

4.4 Podatki

Za potrebe te raziskave smo zbrali obsežen nabor podatkov za vse tri tipe motenj:

- ozkopasovno motnjo CW,
- frekvenčno modulirano motnjo FM in
- frekvenčno skakajočo motnjo.

150

Meritve smo izvedli pri desetih različnih močeh motilnika, od -50 dBm do -95 dBm, v korakih po 5 dB. Skupno smo tako pridobili 30 različnih merilnih nastavitev (3 vrste motenj $\times$ 10 jakosti), za vsako pa izvedli 50 ponovljivih meritev. Vsaka posamezna meritev je trajala 300 sekund, v vsaki pa je bilo zajetih 1408 različnih podatkovnih stolpcev, ki so vključevale informacije o času, položaju, hitrosti, kakovosti signalov, stanju ure, zaznavi motenj in podrobnostih o posameznih satelitih. Podatke smo zbirali za sisteme GPS, Galileo in BeiDou (pri GLONASS-u ima skorajda vsak satelit svojo frekvenco, zato motnje, vezane na določeno frekvenco, niso tako učinkovite kot pri ostalih treh sistemih).

Sprejemnik je večino sporočil pošiljal s frekvenco 5 Hz. Izjema sta bili sporočili MON-RF in MON-SPAN, ki sta bili zaradi vsebine zajeti enkrat na sekundo.

- MON-RF vključuje podatke o ravni radijskega šuma, stanju avtomatskega ojačevanja (AGC) in indikatorjih prisotnosti ozkopasovnih motenj, kar omogoča oceno splošnega radijskega okolja.
- MON-SPAN pa vsebuje spektralne podatke, I/Q vrednosti RF signala ter osnovne parametre zajema spektra, kot so centralna frekvenca, pasovna širina in ločljivost, kar omogoča podrobno frekvenčno analizo prisotnih motenj.

Vsa ostala sporočila so bila zajeta s frekvenco 5 Hz in prihajajo iz različnih skupin formata UBX:

- sporočila NAV-PVT vključujejo podatke o GPS-času, trenutni lokaciji (geografska širina, dolžina in elipsoidna višina), hitrosti v treh smereh, natančnost določitve položaja in hitrosti.
- NAV-STATUS posreduje informacije o stanju GNSS-rešitve, zaznava motenja z lažnimi signali (angl. *spoofing*) in uporabi diferencialnih popravkov psevdorazdalj.
- NAV-CLOCK vsebuje podatke o zamiku notranje ure sprejemnika in oceni natančnosti časovne komponente.
- NAV-SAT posreduje seznam vidnih satelitov s šumnim razmerjem C/N_0 , azimutom, višinskim kotom (elevacijo), statusom sledenja in uporabo pri določanju položaja.
- NAV-ORB vključuje informacije o razpoložljivosti podatkov tirnice (efemeride in almanahi).
- NAV-SBAS pa spremlja popravke, poslane z geostacionarnih satelitov sistemov SBAS (angl. Satellite Based Augmentation System).
- Sporočilo RXM-MEASX vsebuje nizkonivojske podatke za vsak kanal posebej, kot so Dopplerjevi pomiki, faza nosilnega vala in zamik kode, kar omogoča poglobljeno analizo kakovosti signalov.

Tako širok in raznolik nabor indikatorjev iz različnih plasti obdelave GNSS omogoča natančno sledenje vplivu motenj na delovanje sprejemnika, tako na ravni signalov kot tudi pri končnem določanju položaja. Vse zbrane podatke smo sistematično shranili v SQL datoteke, strukturirane po vrsti motnje in moči, kar omogoča učinkovito obdelavo in nadaljnjo analizo.

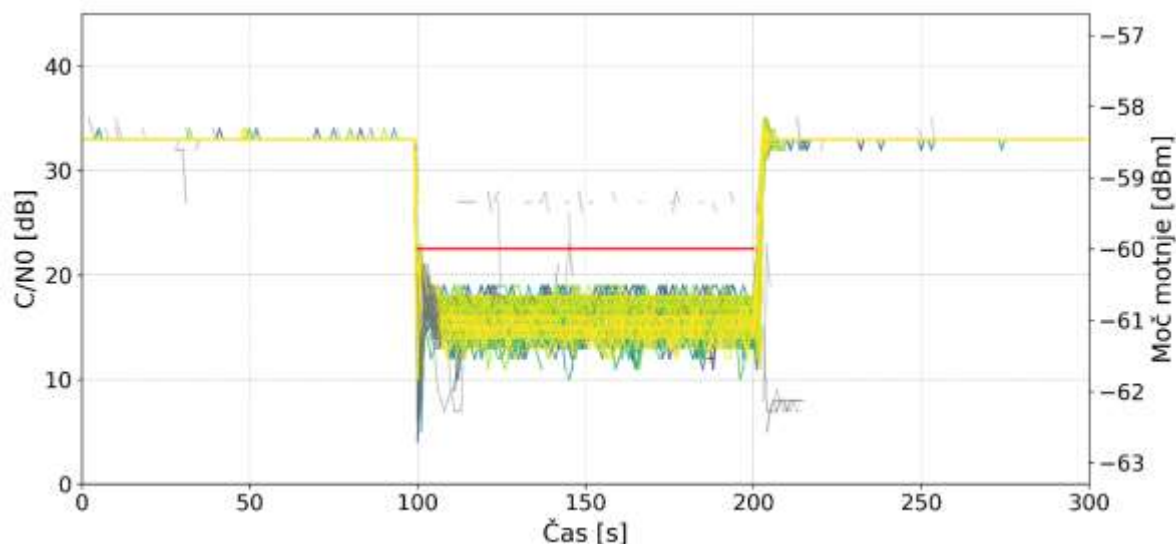
4.5 Časovni prikaz vrednosti C/N_0 za vse ponovitve

151

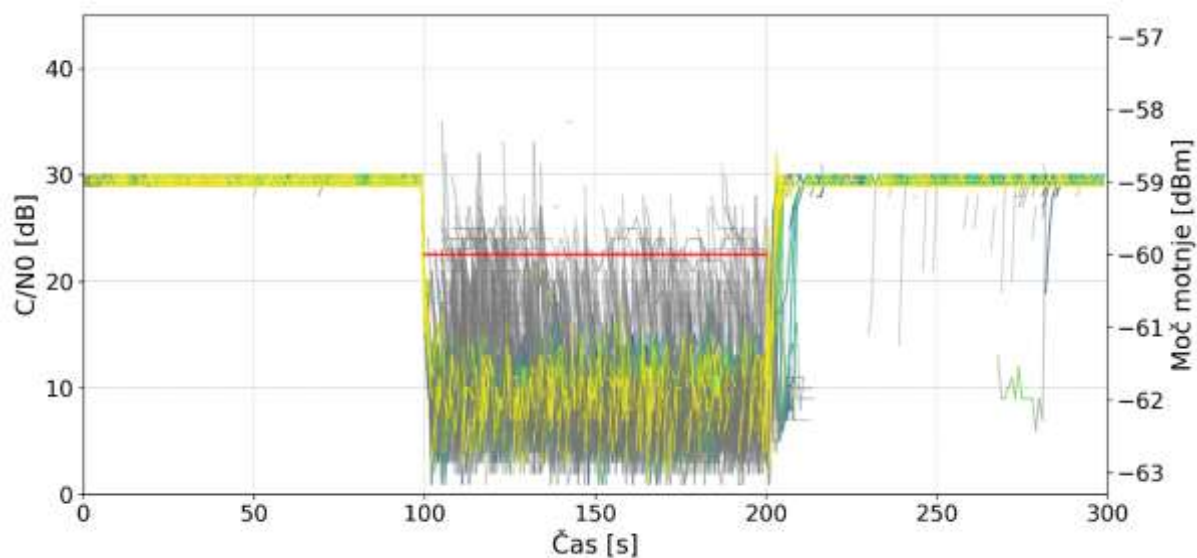
Spodnji grafi prikazujejo potek razmerja med močjo nosilca in šumom (C/N_0) za posamezne satelite določenega sistema skozi celotno trajanje meritve. Na levi y-osi so prikazane C/N_0 vrednosti v dB, na desni y-osi pa moč motnje v dBm, ki je označena z rdečo črto. Vrednosti C/N_0 so prikazane za vsak posamezen satelit posebej:

- z barvno lestvico od rumene do modre za satelite, ki so bili v danem trenutku vključeni v izračun položaja, in
- s sivo barvo za satelite, ki niso bili uporabljeni pri pozicioniranju.

Podatki so prikazani za vseh 50 ponovitev iste meritve, kar tvori zgoščen in ponovljiv vzorec, iz katerega je razvidna variabilnost odziva sprejemnika na motnjo skozi čas. V prvih 100 sekundah in zadnjih 100 sekundah meritev se lahko zdi, da je v grafu prikazanih manj satelitov, vendar gre zgolj za vizualni prikaz grafa. Ker so vrednosti C/N_0 brez prisotnosti motnje skoraj konstantne in med seboj enake, se barvne črte posameznih satelitov prekrivajo, kar ustvari vtis manjšega števila vidnih signalov.



Slika 176: Razmerje C/N_0 za satelite sistema BeiDou pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji FM z močjo -60 dBm.

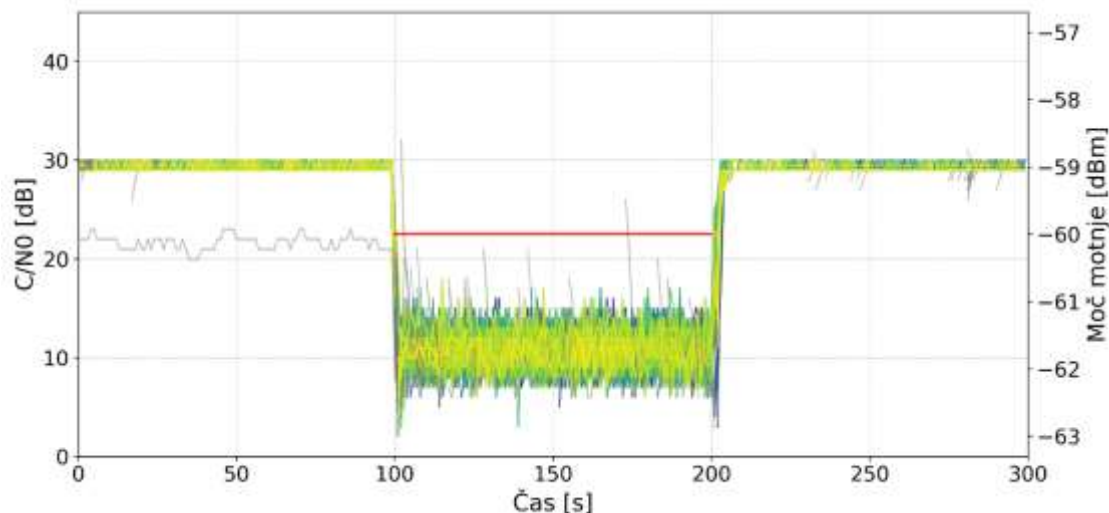


Slika 177: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji FM z močjo -60 dBm.

Primerjava izrisov za sistem BeiDou (Slika 176) in sistem Galileo (Slika 177) pri motnji FM z močjo -60 dBm jasno prikazuje razlike v odzivu posameznega navigacijskega sistema na prisotnost FM motnje, ki je centrirana na frekvenco 1575,42 MHz, torej v središču L1 pasu, in ki zato več ne posega v spekter BeiDou sistema. Pri BeiDou je ob vklopu motnje opazen hiter padec C/N_0 vrednosti ter izguba določenih satelitov, ki za nekaj sekund niso vključeni v določitev položaja. Vendar se sistem nato hitro stabilizira, C/N_0 vrednosti se nekoliko zvišajo in večina satelitov ostane v uporabi, kar kaže na dobro prilagodljivost sprejemnika na motnjo te vrste.

Nasprotno je vpliv na Galileo izrazitejši. C/N_0 vrednosti so v prisotnosti motnje znatno nižje, prisotna so izrazita nihanja, obenem pa številni sateliti niso več vključeni v določitev položaja, kar se kaže v večjem številu sivih linij. To kaže na večjo občutljivost sistema Galileo na tovrstno

širokopasovno motnjo, ki pokriva širše frekvenčno območje, vključno z večino pasu E1. Takšen rezultat je bil pričakovan, saj Galileo deluje znotraj frekvenčnega območja, kjer je naša FM motnja najintenzivnejša.

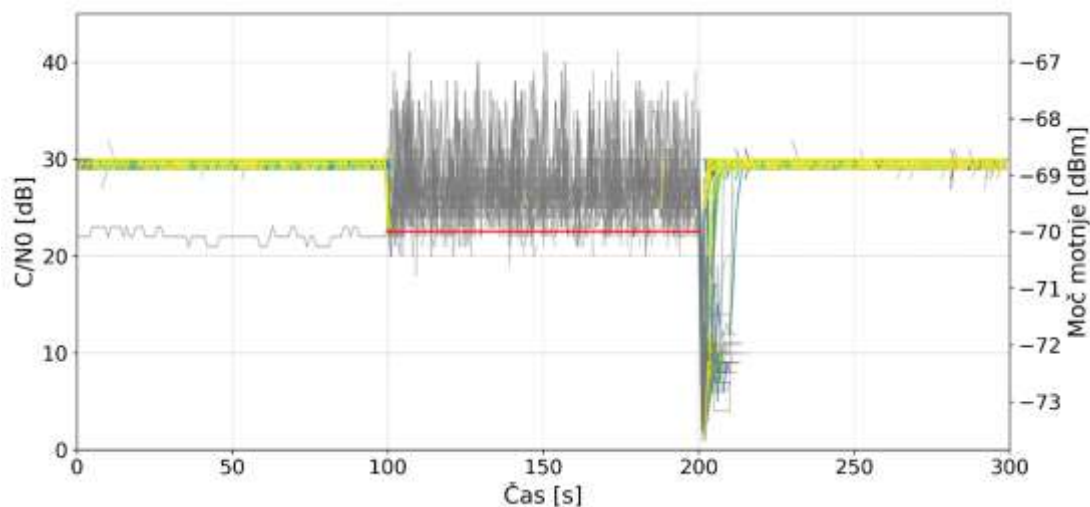


Slika 178: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in CW motnji z močjo -60 dBm.

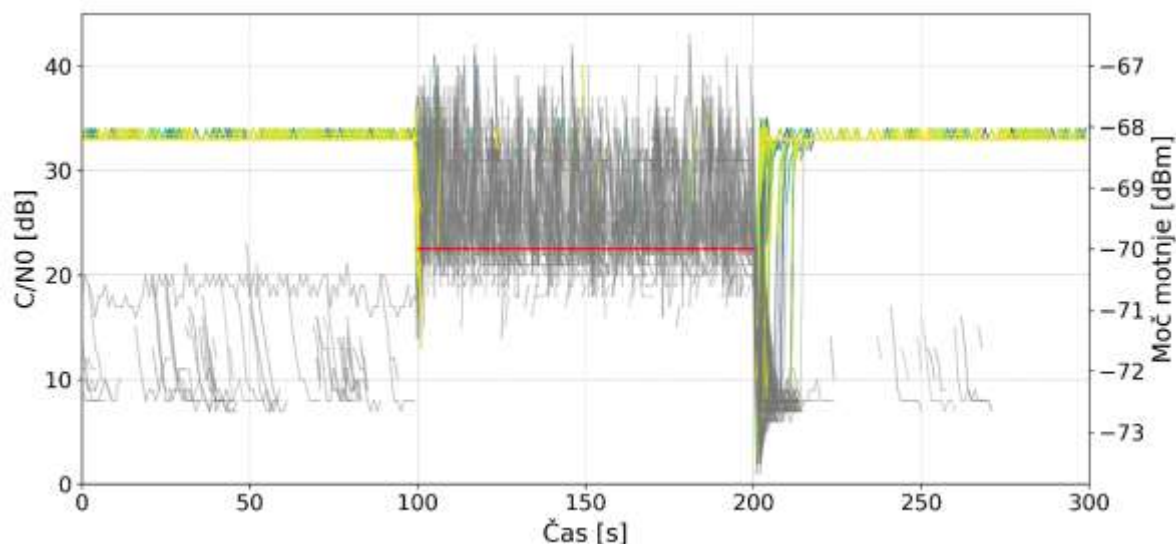
Primerjava grafov za motnjo FM (Slika 177) in motnjo CW (Slika 178) ob enaki jakosti motnje -60 dBm jasno pokaže, da ima dinamična širokopasovna motnja FM bistveno večji vpliv na Galileo sistem kot ozkopasovna motnja CW. Motnja FM povzroči večji padec vrednosti C/N_0 , večjo razpršenost meritev in pogostejšo izključitev satelitov iz rešitve, kar je razvidno iz večjega števila sivo označenih sledi.

153

Motnja CW, čeprav umeščena v središče Galileo pasu E1, povzroča manjši vpliv. Razlog za to je spektralna struktura signala Galileo E1, ki je simetrična in nima največje spektralne gostote v središču, temveč v obeh stranskih pasovih. Posledično motnja CW v središču ne prekrije večine koristnega signala. Poleg tega so sprejemniki GNSS pogosto učinkovito prilagojeni za zatiranje tovrstnih stacionarnih motenj z ozko pasovno širino, kar dodatno zmanjša njen vpliv.



Slika 179: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in fr. skakanja motnji z močjo -70 dBm.

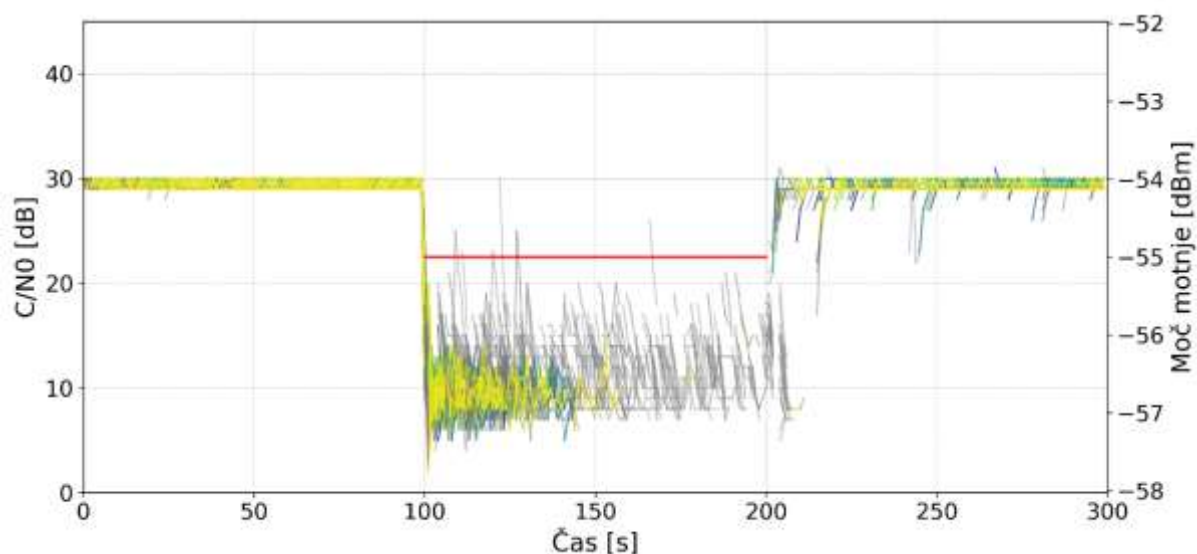


Slika 180: Razmerje C/N_0 za satelite sistema GPS pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in fr. skakanja motnji z močjo -70 dBm.

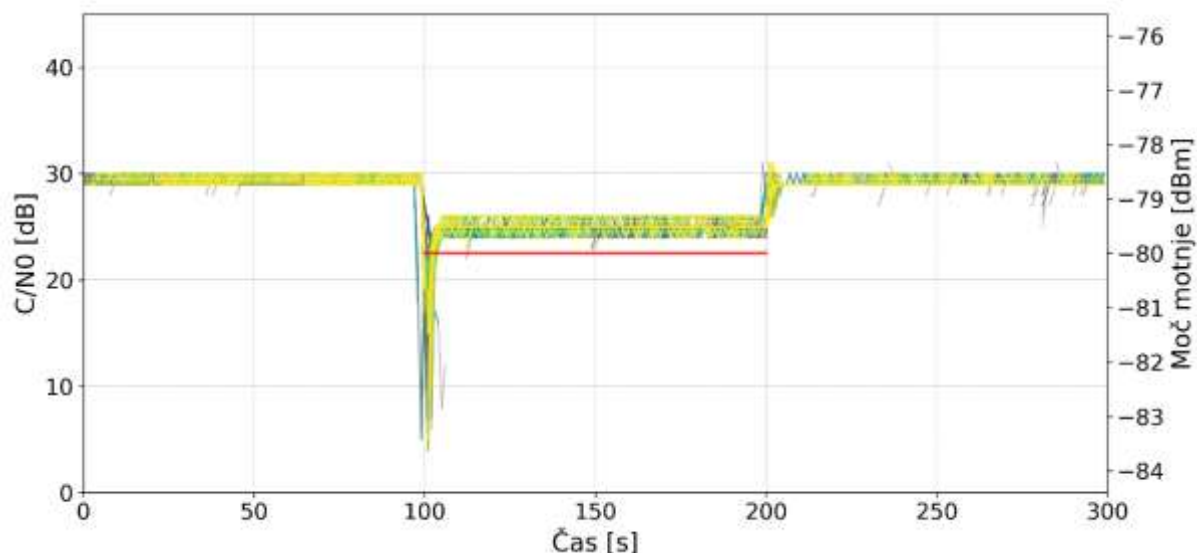
Primerjava grafov za situacijo s sateliti Galileo (Slika 179) in GPS (Slika 180), kjer je bila uporabljena frekvenčno skakajoča motnja z močjo -70 dBm, prikazuje podoben odziv sprejemnika pri obeh sistemih. V obeh primerih vrednosti C/N_0 med prisotnostjo motnje močno nihajo, kar kaže na nestabilen sprejem. Večina satelitov v tem obdobju ni več vključena v izračun položaja, kar se kaže v številnih sivih krivuljah.

154

Zanimivo pa je, da se v posameznih trenutkih pojavijo vrednosti C/N_0 , ki nenavadno presegajo moč simuliranih signalov. Čeprav točnega vzroka še ne znamo določiti, gre verjetno za posledico posebnosti v delovanju sprejemnika ob takšnem tipu motnje. Posebej opazen je tudi trenutek, ko se motnja izklopi, namesto da bi se vrednosti C/N_0 takoj stabilizirale, pride najprej do njihovega izrazitega padca, šele nato se v naslednjih 20 s postopoma vzpostavi nazaj stabilno stanje. To dodatno potrjuje, da sprejemnik po motnji potrebuje nekaj časa za okrevanje in ponovno vzpostavitev sledenja satelitom.



Slika 181: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji CW z močjo -55 dBm.



Slika 182: Razmerje C/N_0 za satelite sistema Galileo pri simulirani moči satelitskih signalov -130 dBm in motnji CW z močjo -80 dBm.

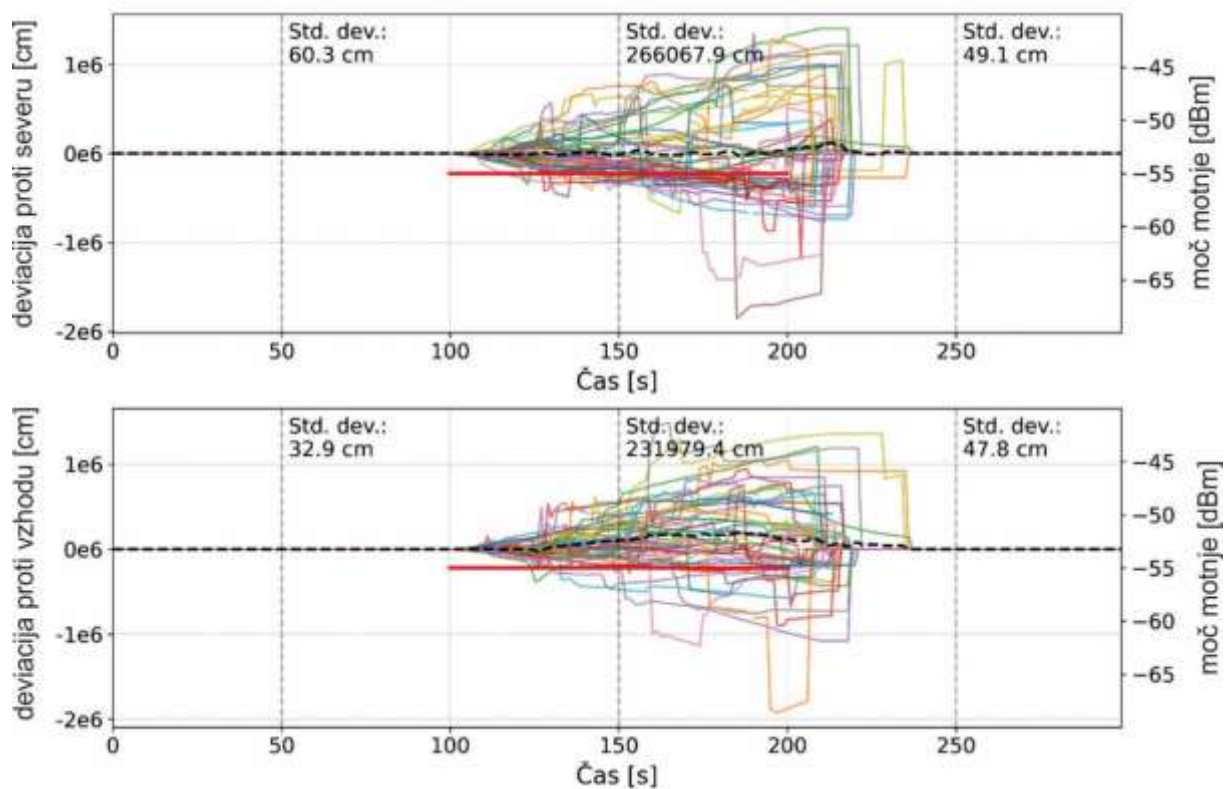
Primerjava odziva sistema Galileo na motnjo CW pri dveh različnih močeh jasno pokaže, kako jakost motnje vpliva na delovanje sprejemnika. Pri šibkejši motnji z močjo -80 dBm (Slika 182) je opazen začetni padec vrednosti C/N_0 , vendar se te hitro stabilizirajo in se povrnejo skoraj na začetne ravni. Večina satelitov ostane vključenih v izračun položaja, kar pomeni, da sprejemnik uspešno ohrani delovanje tudi ob prisotnosti motnje te jakosti.

Nasprotno pa močnejša motnja z močjo -55 dBm (Slika 181) povzroči trajno zmanjšanje vrednosti C/N_0 , izrazitejše nihanje ter postopno izgubo satelitov. To se kaže v vedno več sivih črtah, ki predstavljajo satelite izločene iz rešitve, in tudi v splošnem zmanjšanju števila prikazanih sledi, saj številni sateliti preprosto niso več zaznani ali upoštevani v določitvi položaja. Tak odziv kaže na omejitve sprejemnika pri delovanju v prisotnosti močnejših ozkopasovnih motenj ter na njegovo nezmožnost učinkovitega prilagajanja, ko motnja preseže določeno pragovno vrednost.

4.5.1 Prikaz sprememb določitve geografske širine in dolžine ob prisotnosti motnje

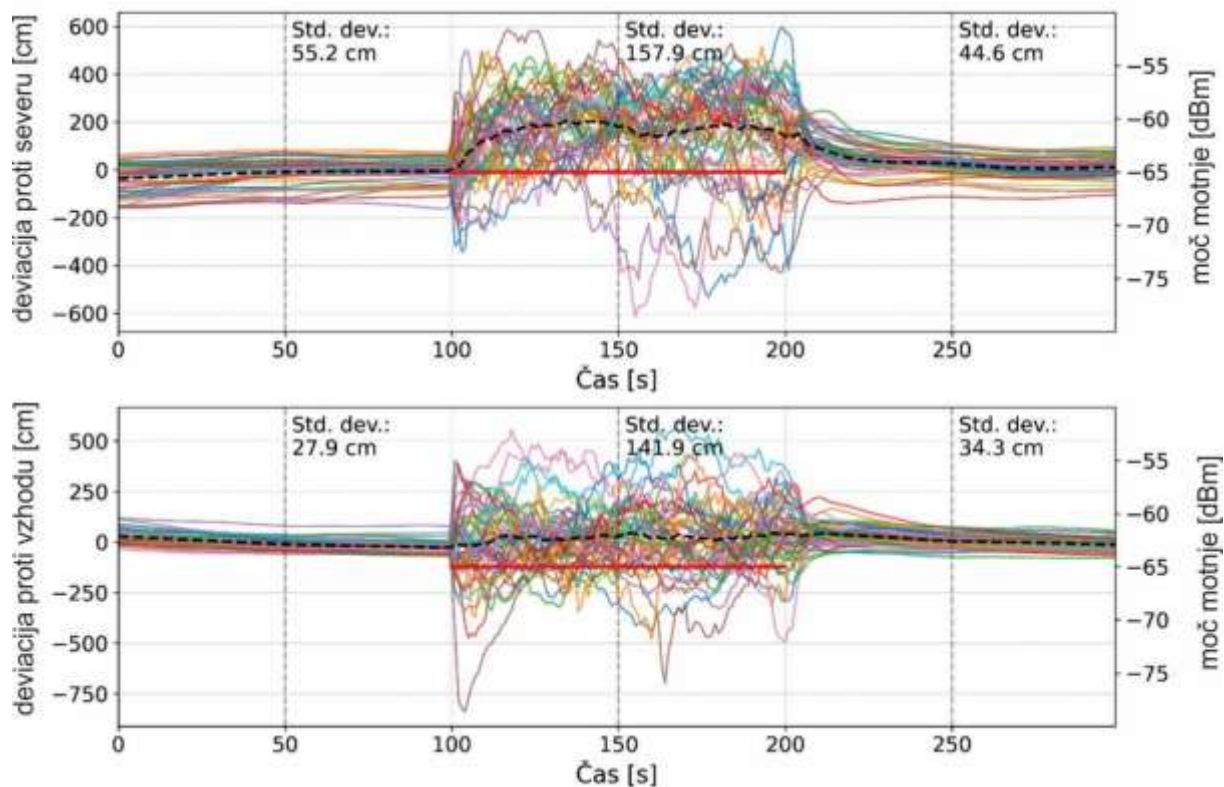
Spodnje slike prikazujejo potek odstopanj določenega položaja od prave (referenčne) vrednosti v smeri proti severu (geografska širina φ (angl. latitude)) (zgoraj) in v smeri proti vzhodu (geografska dolžina λ (angl. longitude)) (spodaj) za 50 ponovitev istega tipa meritev, kjer je vsaka ponovitev prikazana z lastno barvno krivuljo. Na levi y-osi je prikazana deviacija v centimetrih, na desni y-osi pa moč motnje v dBm, ki je v časovnem obdobju med 100 in 200 sekundami označena z rdečo črto.

Navpične črtkane črte pri časih 50 s, 150 s in 250 s označujejo meje časovnih intervalov, znotraj katerih so izračunane standardne deviacije odstopanj (označene ob vrhu vsakega grafa). Ti podatki omogočajo kvantitativno primerjavo vpliva motnje na natančnost pozicioniranja v posameznih fazah meritve (pred motnjo, med motnjo in po njej).

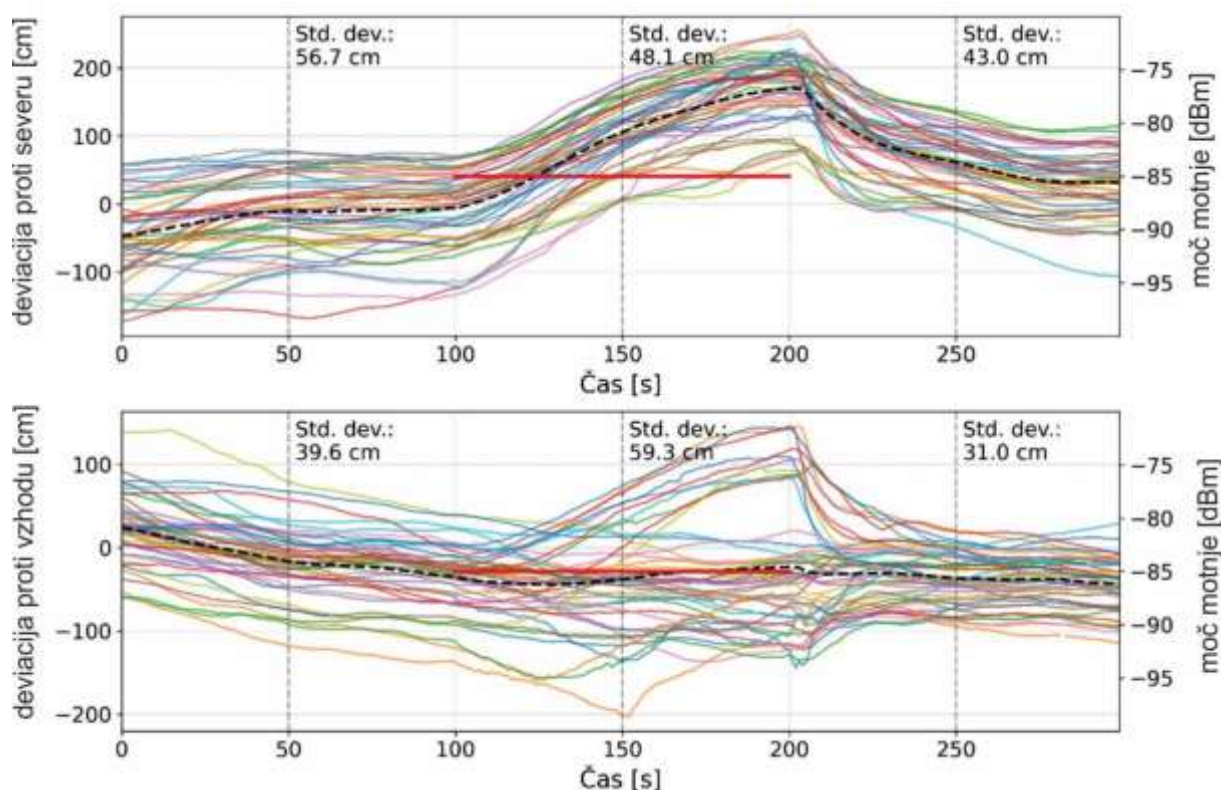


Slika 183: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti FM motnje z močjo -55 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.

156



Slika 184: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti FM motnje z močjo -65 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.



Slika 185: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, **spodaj** – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti FM motnje z močjo -85 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.

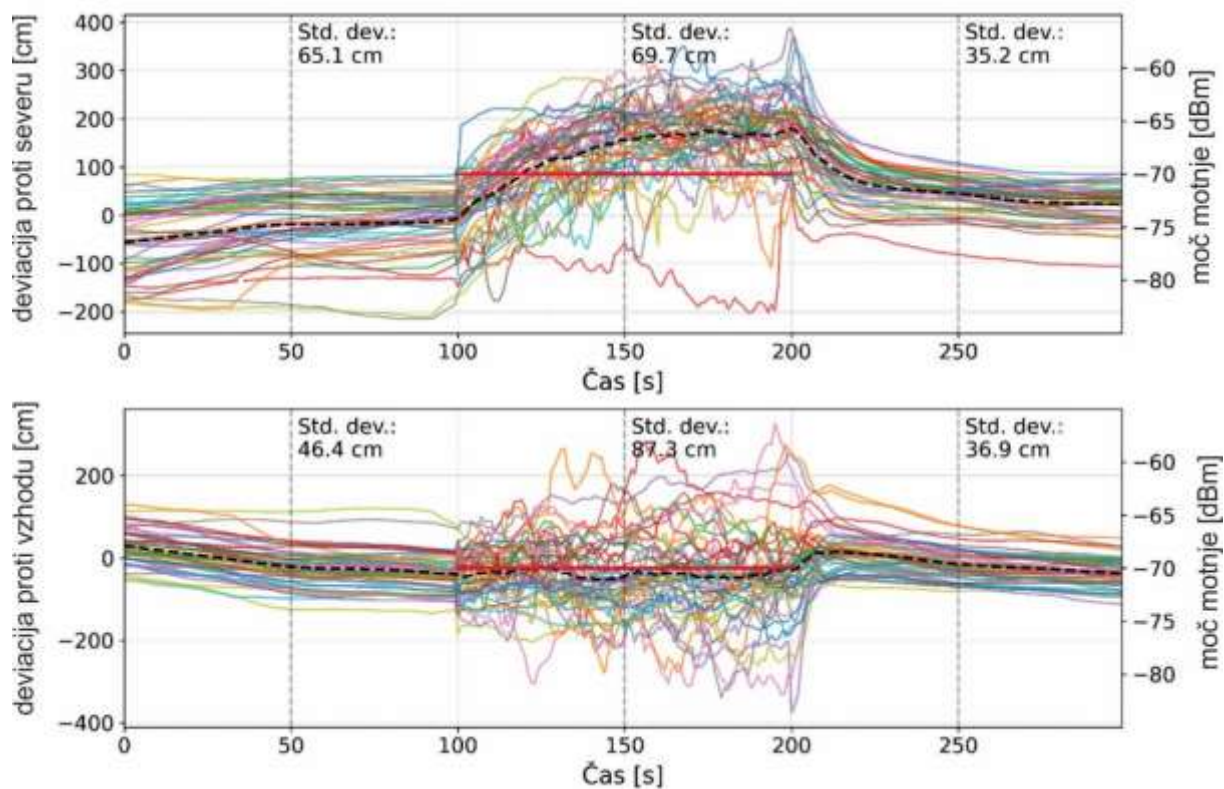
157

Primerjava treh grafov, kjer je bila uporabljena motnja FM različnih moči, jasno prikazuje odvisnost napake pozicioniranja od intenzitete motnje. Vsi grafi prikazujejo odmik določenega položaja od prave vrednosti v smeri proti severu in proti vzhodu za 50 ponovitev iste meritve.

Pri najšibkejši motnji moči -85 dBm (Slika 185) opazimo le manjše spremembe v trendu določanja položaja. Standardna deviacija ostaja skoraj nespremenjena glede na obdobje brez motnje, kar kaže, da tako šibka motnja FM nima bistvenega vpliva na določanje položaja.

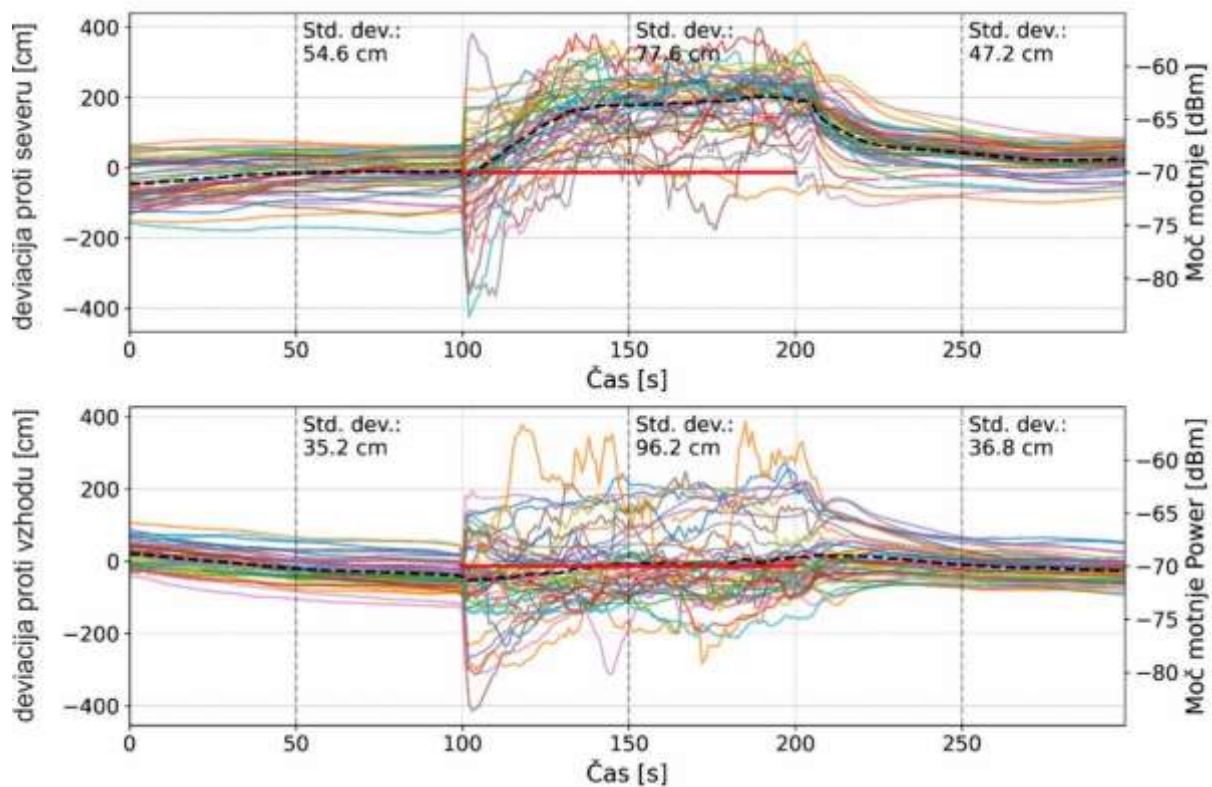
Pri motnji moči -65 dBm (Slika 184) je vpliv že precej izrazit. Odkloni v določenem položaju dosegajo ± 6 metrov, standardna deviacija pa se v obdobju motnje bistveno poveča. Vidno je tudi, da se napaka pojavi takoj ob vklopu motnje, nato pa se po njenem izklopu postopoma zmanjša, kar kaže na odzivnost in prilagoditvene mehanizme sprejemnika.

Pri najmočnejši motnji -55 dBm (Slika 183) pa opazimo izjemno velike spremembe v položaju, ki lahko dosegajo tudi več kilometrov. To pomeni popolno izgubo zanesljivosti pozicioniranja. Standardna deviacija se med motnjo drastično poveča, kar potrjuje veliko variabilnost rešitve. V nekaterih primerih sprejemnik potrebuje tudi več kot 30 sekund po izklopu motnje, da se ponovno približa pravilni lokaciji.



Slika 186: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti motnje CW z močjo -70 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.

158

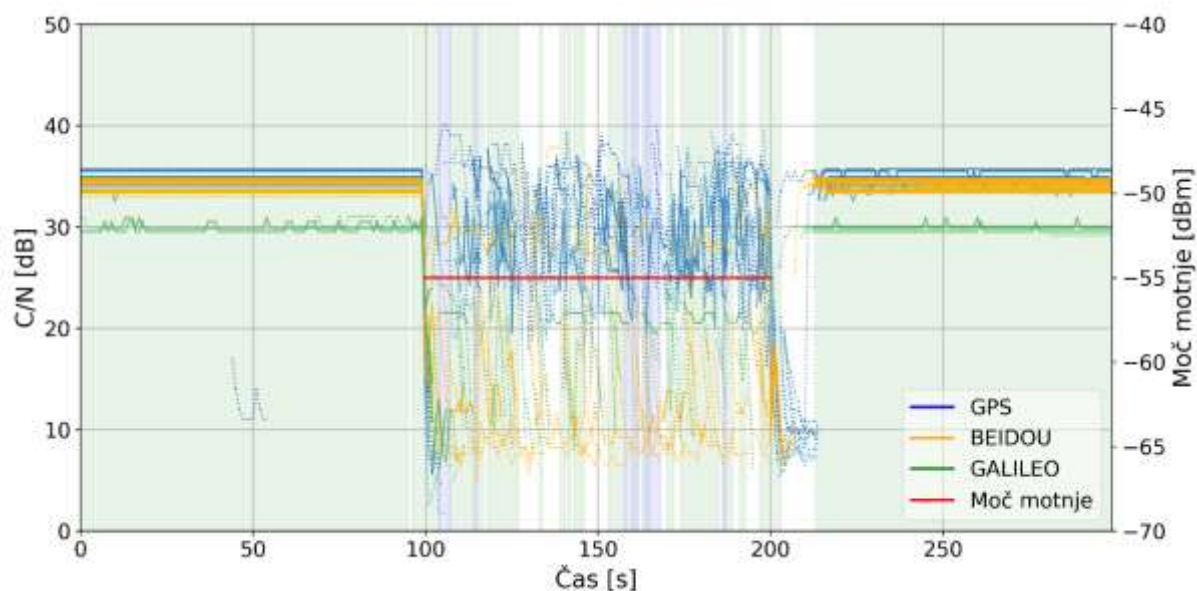


Slika 187: Zgoraj – deviacija v smeri proti severu, spodaj – deviacija v smeri proti vzhodu v prisotnosti motnje s fr. skakanjem z močjo -70 dBm, pri moči simuliranih GNSS signalov -130 dBm.

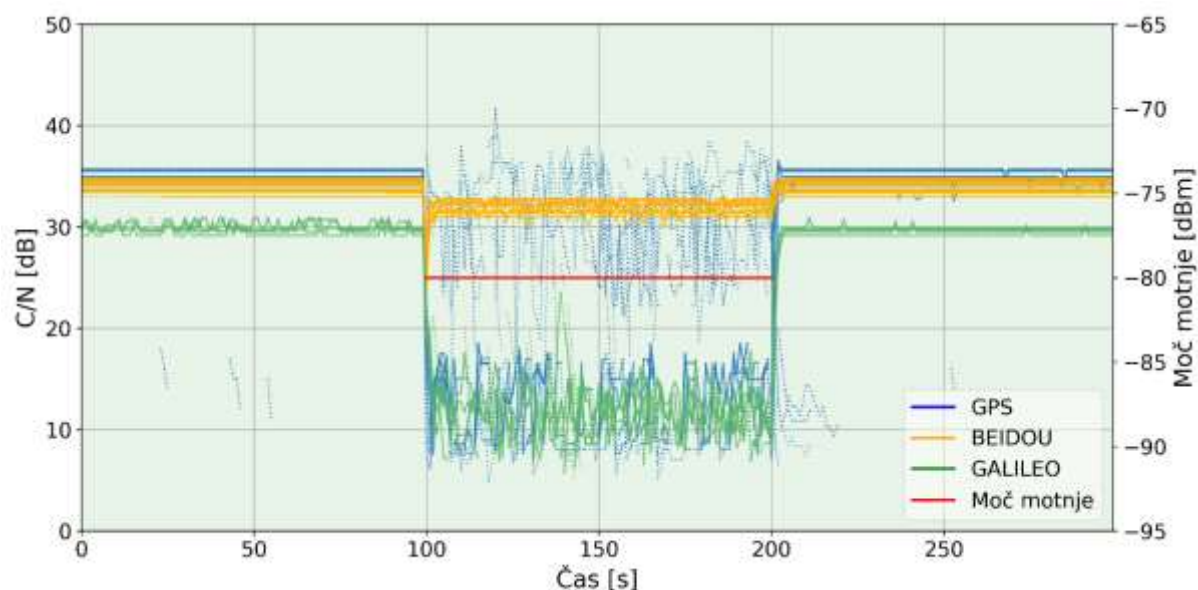
Primerjava grafov za tip motnje CW (Slika 186) in frekvenčno skakanje (Slika 187) pri enaki jakosti motnje -70 dBm pokaže zelo podobno obnašanje sprejemnika. Tako vrednosti standardne deviacije kot tudi povprečni odmik od pravega položaja so med sabo primerljive, zato lahko sklepamo, da imata oba tipa motnje pri tej moči približno enak vpliv na natančnost določanja položaja.

4.5.2 Časovni potek signalne jakosti C/N_0 za več GNSS konstelacij

Slika 188 prikazuje časovni potek signalne jakosti C/N_0 ene meritve za satelite GPS (modro), Galileo (zeleno) in BeiDou (rumeno). Polne črte predstavljajo satelite, ki so bili v danem trenutku uporabljeni za izračun položaja, medtem ko črtkane črte prikazujejo satelite, ki niso bili vključeni v rešitev. Rdeča črta označuje moč motnje, medtem ko barva ozadja prikazuje kakovost rešitve: zeleno ozadje označuje 3D rešitev, modro 2D rešitev, belo pa obdobja brez določitve položaja. Na levi y-osi so prikazane vrednosti C/N_0 v dB, na desni y-osi pa moč motnje v dBm.



Slika 188: Vrednosti C/N_0 treh sistemov GNSS ob prisotnosti motnje FM z močjo -55 dBm pri simuliranih signalih GNSS moči -130 dBm.



Slika 189: Vrednosti C/N_0 treh sistemov GNSS ob prisotnosti motnje FM z močjo -80 dBm pri simuliranih signalih GNSS moči -130 dBm.

Primerjava grafov pri motnji FM z močjo -55 dBm (Slika 188) in -80 dBm (Slika 189) jasno pokaže, kako stopnja motnje vpliva na delovanje sprejemnika GNSS. Pri močnejši motnji je opazen izrazit padec vrednosti C/N_0 za vse tri sisteme, GPS, Galileo in BeiDou. Večina satelitov ni več uporabljenih pri določitvi položaja, kar se vidi v prehodu iz polnih v črtkane črte. Sprejemnik pogosto izgublja položaj, saj se stanje nenehno preklaplja med 3D, 2D in popolno izgubo zmožnosti pozicioniranja.

Nasprotno pa pri šibkejši motnji z močjo -80 dBm kljub določenemu padcu vrednosti C/N_0 , predvsem za GPS in Galileo, večina satelitov ostaja v uporabi. Barva ozadja ostaja zelena, kar pomeni, da sprejemnik ves čas uspešno določa položaj. V obdobju motnje ni zaznani niti ene sekunde izgube zmožnosti pozicioniranja, kar kaže na večjo robustnost sprejemnika pri nižjih stopnjah motnje FM.

Zaključimo lahko, da grafični prikazi predstavljajo učinkovit in človeku razumljiv način za ponazoritev sprememb v delovanju sprejemnika GNSS v prisotnosti in odsotnosti motenj. S pomočjo grafov lahko jasno prikažemo vpliv različnih vrst motenj na signalne parametre, uporabo satelitov in končno natančnost pozicioniranja. Čeprav smo v raziskavi zbirali številne druge podatkovne parametre, smo za prikaz izbrali tri ključne tipe grafov, vrednosti C/N_0 , odstopanja v določitvi položaja ter kombinirane prikaze več sistemov, saj ti najzanesljiveje ponazarjajo odziv sprejemnika na različne motnje.

Poleg prikazanih primerov je bilo ustvarjenih še mnogo dodatnih grafov, ki so zbrani v ločeni mapi in priloženi projektu. Zaradi njihovega velikega števila jih vseh nismo uspeli vključiti v poročilo, smo pa izbrali reprezentativne primere, ki najbolje ponazarjajo obnašanje sprejemnika in učinkovitost uporabljene merilne metodologije.

4.6 Zaključki poizkusa s simulacijami

V tej raziskavi smo uspešno vzpostavili nadzorovan in ponovljiv merilni sistem, s katerim smo zbrali obsežno količino podatkov o delovanju nizkocenovnega sprejemnika GNSS (ublox ZED-F9P) v prisotnosti različnih vrst motenj in pri različnih močeh. S pomočjo simulatorja GNSS smo razvili eksperimentalno metodo, ki omogoča natančno ponovljivost pogojev, kar je ključnega pomena za zanesljivo ocenjevanje vplivov motenj. Pridobljeni podatki vključujejo širok spekter indikatorjev, od signalnih parametrov do končnih rezultatov določanja položaja, kar omogoča celovito analizo odziva sprejemnika.

Grafični prikazi jasno ponazarjajo, kako posamezne motnje vplivajo na kakovost sprejema in natančnost pozicioniranja. Zbrana podatkovna baza predstavlja izjemno bogat vir informacij, ki bi lahko v prihodnje služil kot trdno izhodišče za nadaljnje raziskave s področja detekcije motenj, robustnosti sprejemnikov in razvoja algoritmov za zaščito pred motnjami.

Predlagana metodologija omogoča primerjavo različnih sprejemnikov GNSS pod povsem enakimi pogoji, nekaj, kar je bilo do sedaj v praksi, brez simulatorja GNSS, izredno težko izvedljivo. S tem smo odprli nove možnosti za sistematično testiranje, validacijo in medsebojno primerjavo delovanja naprav GNSS na zanesljivi ravni.

5 Integracija in implementacija metodologije in izdelava priporočil nadaljnjega dela

Za učinkovito obravnavo motenj signalov GNSS je najprej treba zanesljivo zaznati njihovo prisotnost. Ključno je vedeti, kdaj se motnje pojavijo, kako dolgo trajajo, kakšna je njihova moč in kako pogosto se ponavljajo. Brez specializirane detekcije je na ta vprašanja zelo težko odgovoriti.

Sodobni geodetski sprejemniki GNSS omogočajo visoko-natančne rešitve z naprednimi tehnikami pozicioniranja, kot so diferencialni GNSS (angl. Differential GNSS – DGNSS), kinematična relativna izmera v realnem času (angl. Real Time Kinematic – RTK) ali pa absolutno določanje položaja s fazo (angl. Precise Point Positioning – PPP). Vendar se v praksi občasno zanašamo le na končni rezultat, torej izračunan položaj, ter na korekcijske podatke, ki jih bazna postaja pošilja oddaljenemu sprejemniku za izboljšanje kakovosti pozicioniranja. Ni vedno zagotovljeno, da preverimo, kaj se je s signalom GNSS dogajalo med samo meritvijo. Sprejemniki beležijo vrsto surovih parametrov, kot so C/N_0 , število uporabljenih satelitov za določitev položaja ter različne diagnostične informacije, vendar ti brez dodatne obdelave lahko ostanejo neizkoriščeni. Ti podatki pa vsebujejo dragocene informacije o kakovosti sprejema in so ključni za zaznavo morebitnih motenj. Pogosto se zgodi, da pogledamo le rezultat, ne da bi se vprašali, ali je bil signal med meritvijo sploh stabilen in nemoten.

Ena od možnih rešitev za zaznavo motenj bi bilo testiranje geodetskih sprejemnikov različnih proizvajalcev ter generacij v laboratorijskih pogojih, kjer bi opazovali njihovo obnašanje pod vplivom motenj in nato na podlagi zbranih podatkov razvijali algoritme za samodejno zaznavo motenj. Vendar so takšni sprejemniki pogosto zasnovani kot zaprti sistemi, brez dostopa do RF vmesnika, neposredne komunikacije z računalnikom ali nadzora nad delovanjem naprave, razen prek zaprtih lastniških aplikacij podjetja, ki je razvilo sprejemnik. Zaradi teh omejitev je izvajanje velikega števila ponavljajočih meritev z nadzorovanimi motnjami v praksi zelo zahtevno.

Zaradi navedenih razlogov smo uporabili nizkocenovni GNSS sprejemnik ublox ZED-F9P, ki omogoča enostaven dostop do podatkov, ima ločeno anteno, serijsko komunikacijo in enostaven vnos umetnih motenj prek smernega sklopnika. S tem lahko v realnih pogojih izvajamo nadzorovane motnje in hkrati spremljamo odziv sprejemnika. To omogoča zajem podatkov, ki so primerni za učenje in testiranje algoritmov za zaznavo motenj.

Pri tem se kot posebej uporabna izkaže uporaba metod umetne inteligence, zlasti nevronske mreže za obdelavo časovnih vrst. Ena takih je GRU (angl. Gated Recurrent Unit), ki omogoča zaznavo skritih in časovno odvisnih vzorcev v GNSS signalih. Tak pristop je zmožen prepoznati tudi subtilne spremembe, ki jih klasični pragovni pristopi pogosto spregledajo. Zanimivo je, da lahko ravno občutljivost nizkocenovnih sprejemnikov na motnje prispeva k uspešnejšemu zaznavanju.

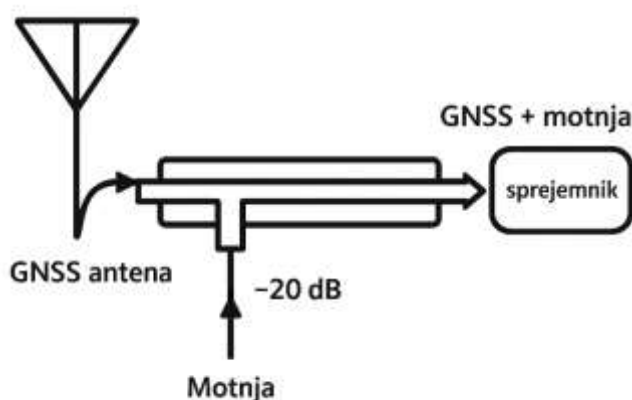
Alternativna rešitev, kot je uporaba spektralnega analizatorja pri bazni postaji, sicer omogoča neposredno zaznavo motenj, a zahteva neprekinjen nadzor in ogromno količino podatkov. Pri redkih in kratkotrajnih motnjah ta pristop hitro postane neučinkovit. Zato se kot bolj obetavna rešitev ponuja proaktivna detekcija motenj na podlagi podatkov, ki jih sprejemniki GNSS že beležijo, seveda pod pogojem, da jih znamo ustrezno interpretirati.

5.1 Integracija in implementacija metodologije

5.1.1 Eksperimentalna postavitve

Za učenje modela umetne inteligence, namenjenega zaznavanju motenj signalov GNSS, smo vzpostavili eksperimentalno merilno postavitve, ki omogoča sočasen zajem podatkov iz nizkocenovnega sprejemnika GNSS in generiranje različnih vrst motenj. Zasnova sistema je temeljila na popolni naključnosti, vsi ključni parametri motenj, vključno s tipom, močjo, nosilno frekvenco, frekvenčnim odmikom, trajanjem in vmesnimi premori, so bili izbrani iz enakomernih naključnih porazdelitev. Vsaka nova motnja je tako predstavljala edinstveno kombinacijo nastavitvev, kar je omogočilo izgradnjo raznolikega in realističnega podatkovnega nabora motenj.

Uporabljen je bil sprejemnik GNSS ublox ZED-F9, ki je s frekvenco 1 Hz pošiljal podatke. Iz njega smo pridobili povprečne vrednosti C/N_0 posameznih sistemov ter interni indikator motnje, imenovan jamInd_01. Pomembno je poudariti, da indikator jamInd_01 ni bil uporabljen kot vhodna značilka za učenje modela, temveč le kot referenčna primerjava. Po učenju modela smo rezultate njegove napovedi primerjali z vrednostjo tega indikatorja in ugotovili, da je model GRU zaznal motnje bistveno natančneje.



Slika 190: Merilna postavitve.

Motnje smo v RF-vhod sprejemnika vnašali preko smerne sklopničke, ki je omogočal hkratni sprejem signala GNSS in dodajanje umetno generirane motnje iz signalnega generatorja. Uporabljeni so bili štiri osnovni tipi motenj:

- CW (ang. Continuous Wave): ozkopasovni signal s stalno nosilno frekvenco in fiksno močjo.
- FM (ang. Frequency Modulation): sinusno modulirana motnja z modulacijskim signalom pri 1 kHz in frekvenčnim odklonom ± 8 MHz.
- Frekvenčni prelet (ang. Chirp): frekvenčno naraščajoč ali padajoč signal (linearni prelet) z deviacijo ± 2 MHz.
- Pulzna motnja (ang. Pulse): sestavljena iz hitrega vklopljanja in izklopljanja ozkopasovnega motilnega signala vsake 1ms na dani frekvenci.

Tip motnje je bil za vsak dogodek naključno izbran, prav tako nosilna frekvenca motnje med 1561,098 MHz, 1575,42 MHz in 1602 MHz. Dodaten frekvenčni odmik je bil določen znotraj intervala ± 2 MHz. Moč motnje je bila izbrana med -60 dBm in -25 dBm, pri čemer je bila na vhodu sprejemnika zaradi smerne sklopničke dodatno oslajljena za približno 20 dB. Trajanje motnje je

bilo naključno izbrano med 2 in 90 sekund, vmesni premori med dogodki pa med 60 in 180 sekund. Vsi ti parametri so bili določeni ob vsakem novem vklopu motnje, kar je zagotavljalo veliko variabilnost v zbranih podatkih.

Meritve so bile sprva izvedene v 10-minutnih časovnih oknih, kasneje pa tudi v 60-minutnih. Skupno je bilo zbranih 543 krajših in 93 daljših meritev. Sama dolžina posamezne meritve sicer ni igrala odločilne vloge, vse meritve, ne glede na trajanje, smo enakovredno vključili v proces učenja in validacije modela. Ključno je bilo, da so vsi podatki skupaj vsebovali dovolj prehodov med motenim in nemotenim delovanjem, z naključno razporejenimi tipi in parametri motnje.

Za vsak časovni trenutek smo izračunali povprečne vrednosti za štiri sisteme GNSS: GPS, Galileo, GLONASS in BeiDou. Povprečje je bilo izračunano na osnovi uteženega povprečja posameznih satelitov glede na njihov višinski kot in prisotnost v rešitvi določitve položaja. Utež je bila sinus višinskega kota, kar zmanjša vpliv satelitov nizko na obzorju. Če noben satelit iz določenega sistema ni bil uporabljen, je bila povprečna vrednost C/N_0 sistema nastavljena na NaN v pythonu. Za vsak navigacijski sistem smo tako izračunali povprečje po naslednji formuli:

$$\text{povprečje } C/N \text{ konstelacije} = \frac{\sum(C/N_{0i} \cdot u_i \cdot \sin(\theta_i))}{\sum(u_i \cdot \sin(\theta_i))}, \quad (6)$$

kjer je C/N_{0i} signalno razmerje posameznega satelita (ang. carrier-to-noise density), $u_i \in \{0,1\}$ indikator ali je bil satelit uporabljen v lokacijski rešitvi (0 če ni bil in 1 če je bil), θ_i pa satelitov višinski kot v stopinjah.

164

Rezultat vsakega časovnega vzorca je bil torej niz štirih vrednosti, in sicer po ena povprečna C/N_0 vrednost za vsako izmed sistemov: GPS, Galileo, GLONASS in BeiDou. Te vrednosti so skupaj z informacijo o prisotnosti ali odsotnosti motnje tvorile označene podatke za učenje modela. Tak nabor je bil dovolj raznolik in reprezentativen, da je omogočil učenje modela, ki lahko zazna tudi subtilne spremembe, povezane z motnjami, zgolj na podlagi signalov GNSS.

5.2 Model nevronske mreže GRU (angl. Gated Recurrent Unit)

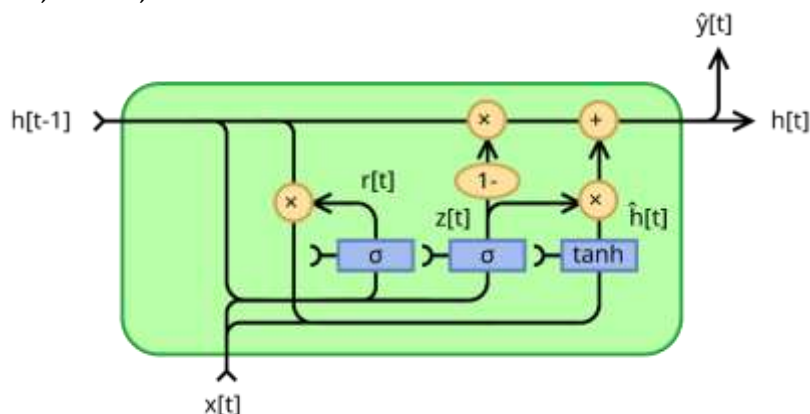
Model, ki smo ga uporabili za zaznavo motenj signalov GNSS, temelji na strukturi GRU (angl. Gated Recurrent Unit), tipu rekurentne nevronske mreže, ki je posebej primeren za obdelavo časovno odvisnih podatkov. V nasprotju s standardnimi nevronskimi mrežami, kjer se vsaka napoved opira zgolj na trenutne vhodne vrednosti, model GRU ohranja informacije iz preteklosti z uporabo notranjega stanja. To omogoča prepoznavanje vzorcev, ki se razvijajo skozi čas, kar je značilno tudi za spremembe v signalih GNSS pod vplivom motenj.

Celica GRU ima dve ključni komponenti, imenovani "vrata", ki omogočata nadzor pretoka informacij: resetna vrata R_t in posodobitvena vrata Z_t . Resetna vrata določajo, koliko vpliva bo imelo prejšnje stanje na izračun trenutnega kandidata za novo stanje. Posodobitvena vrata pa odločajo, koliko prejšnjega stanja naj se ohrani in koliko naj se nadomesti z novim stanjem. Na podlagi teh vrednosti se izračuna končno skrito stanje celice H_t , ki se prenese naprej v naslednji časovni korak.

Delovanje celice GRU poteka po naslednjih enačbah:

$$\begin{aligned} R_t &= \sigma(W_r \cdot (X_t + H_{t-1}) + b_r) \\ Z_t &= \sigma(W_z \cdot (X_t + H_{t-1}) + b_z) \\ \tilde{H}_t &= \tanh(W_h \cdot (X_t + (R_t \circ H_{t-1})) + b_h) \\ H_t &= (1 - Z_t) \circ \tilde{H}_t + Z_t \circ H_{t-1} \end{aligned} \quad (7)$$

V teh enačbah je X_t vhod v trenutnem času t , H_{t-1} prejšnje skrito stanje, R_t resetna vrata, Z_t posodobitvena vrata, $\tilde{H}_t$ kandidatno stanje in H_t novo skrito stanje. Simbol $\circ$ označuje elementno množenje, σ sigmoidno aktivacijo in $\tanh$ tangens hiperbolično funkcijo. V našem primeru se je model učil na osnovi štirih vhodnih značilk, ki predstavljajo povprečne vrednosti C/N_0 za štiri GNSS sisteme: GPS, Galileo, GLONASS in BeiDou.



Slika 191: Model GRU, vir: By Jeblad - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=66225938>

Model je kot vhod prejel 15 zaporednih časovnih korakov teh štirih značilk, torej vhodna struktura je bila dimenzije 15×4 . Za vsak navigacijski sistem je obstajal ločen vhod in ločen niz GRU. Vsak navigacijski sistem je bila obdelan ločeno skozi tri zaporedne sloje GRU, vsak s po 6 enotami. Izhodi vseh štirih konstelacij (vsak vektor dolžine 6) so bili nato združeni v en skupen vektor dolžine 24, ki je bil posredovan gostemu (angl. Dense) sloju z eno samo enoto in sigmoidno aktivacijsko funkcijo.

Model je za vsak vhodni niz podal eno samo vrednost, realno število med 0 in 1, ki predstavlja verjetnost, ali je bila motnja prisotna. Pomembno je poudariti, da ta napoved ni veljala za trenutek na začetku ali koncu časovnega okna, temveč za sredinski časovni korak (v našem primeru 8. sekundo znotraj 15-sekundnega okna). To smo vnaprej določili pri sestavi učnih nizov, kjer smo motnjo označili kot prisotno, če je bila aktivna ravno v tej sredinski točki.

Tako zasnovan model se je izkazal za zelo učinkovit pri zaznavi tako nenadnih kot postopnih sprememb v signalih GNSS, saj GRU omogoča dinamično tehtanje pomena preteklosti in sedanjosti pri vsaki napovedi. Njegova sposobnost, da vzdržuje notranje stanje in se uči, katera informacija je pomembna in katera ne, ga naredi še posebej primerne za zaznavo motenj, kjer vizualni vzorci v surovih podatkih pogosto niso očitni.

5.2.1 Učenje nevronske mreže

Model GRU smo učili na skupno 484.086 sekundah podatkov, validacijo pa izvedli na ločenem naboru z 195.656 sekundami. Datoteke z meritvami smo predhodno naključno razdelili na učni in validacijski del v razmerju 70 proti 30 odstotkov, s čimer smo zagotovili ločenost podatkov med učenjem in ocenjevanjem modela.

5.2.2 Evalvacija učenja z nevronske mreže

Za oceno učinkovitosti modela GRU pri zaznavanju motenj GNSS smo izvedli postopek evalvacije na validacijskem naboru podatkov, ki vključuje tako časovne serije modelovih napovedi kot tudi informacije o znani prisotnosti motnje. Vsaka validacijska datoteka vsebuje vrednosti napovedi modela GRU, moči motnje, če je bila v tistem trenutku prisotna in vrste motnje. Model je za vsak časovni korak napovedal kolikšna je verjetnost, da je v sredini okna dolžine 15 sekund prisotna motnja.

V prvem koraku smo v vsaki datoteki identificirali časovne intervale, v katerih je bila motnja vklopljena. Za vsak tak interval smo preverili, ali je bila napoved modela znotraj tega časovnega segmenta višja od izbranega detekcijskega praga. Če je vsaj ena napoved presegla ta prag, smo šteli, da je bila motnja uspešno zaznana. Tako smo lahko ocenili, pri katerih vrstah motenj in pri katerih močeh model deluje zanesljivo.

Poleg zaznave smo želeli preveriti, kako pogosto model zazna motnjo tam, kjer je v resnici ni bilo. Takšne napačne zaznave imenujemo lažni alarmi (angl. false positives). Pri tem pa se pojavi težava, ker model napoveduje stanje za sredino časovnega okna dolžine 15 sekund, lahko zazna motnjo še nekaj sekund pred njenim začetkom ali po njenem koncu. To ni nujno napaka modela, ampak posledica časovnega okna modela. Da bi se izognili temu učinku in model ne bi bil kaznovan za pravilno zaznavo tik ob robu motenega obdobja, smo definirali varnostni rob dolžine 8 sekund okoli vsakega motenega intervala. V tem območju zaznav ne štejemo ne kot uspešnih zaznav ne kot lažnih alarmov.

Zaznava izven vseh motenih in zaščitениh območij, ki preseže prag, pa šteje kot lažni alarm. Tako lahko izračunamo, kolikšen del napovedi je napačno označen kot motnja, in ocenimo stabilnost modela tudi v nemotenih pogojih. Za razliko od osnovne metrike "accuracy", ki je lahko varljiva pri zelo redkih motnjah, ta pristop omogoča natančnejši vpogled v vedenje modela.

Vrednotenje smo izvedli ločeno za posamezne tipe motenj (CW, FM, frekvenčni prelet, pulzna motnja), pa tudi glede na moč motnje, razdeljeno po razredih (npr. od -60 do -55 dBm, od -55 do -50 dBm itd.). Tako lahko ocenimo, pri katerih močeh model še zazna motnjo in ali je bolj občutljiv na določene tipe spektralnih motenj.

Na ta način dobimo celovito sliko o delovanju modela, vključno s stopnjo zaznave motenj, zanesljivostjo pri različnih pogojih, ter številom in razmerjem lažnih alarmov glede na skupno število dogodkov ali zaznav. Evalvacijo lahko po enaki metodologiji izvedemo tudi za notranjo napoved U-blox modula, ki se imenuje jamInd_01, kar omogoča neposredno primerjavo med našo napovedjo in napovedjo sprejemnika.

5.2.3 Rezultati in komentar

Podrobnejša analiza po tipu motnje razkrije nekaj zanimivih vzorcev. FM in frekvenčni prelet (angl. chirp) sta bili zaznani z najvišjo uspešnostjo. To je pričakovano, saj ti dve motnji pokrivata precej širši frekvenčni spekter kot ozkopasovni CW ali pulzna motnja. Posledično lahko hkrati vplivata na več sistemov GNSS, kar vodi do večjih sprememb signalnih parametrov in posledično boljše zaznave. Poleg tega sta FM in frekvenčni prelet motnji po svoji naravi zelo dinamični, kar pomeni, da ju sprejemnik težje sam izloči. To vodi do padcev oziroma skakanja vrednosti C/N_0 , kar model zazna kot značilne motene vzorce.

Nasprotno je motnja CW statična in frekvenčno ozka. Model jo običajno dobro zazna na začetku in koncu, ko pride do spremembe v vhodnih podatkih. Če je motnja dolgotrajna in enakomerna, se vpliv na vrednosti C/N_0 pogosto stabilizira, kar vodi do postopnega upada napovedi modela, kljub temu da motnja še vedno traja. To nakazuje, da je model bolj občutljiv na spremembe v signalnem vzorcu kot pa na dolgotrajno enakomerno degradacijo.

Še nekoliko slabša je bila zaznava pulzne motnje. Čeprav so pulzni signali izrazito dinamični in bi zato pričakovali, da bodo bolj opazni kot CW, jih model zaznava najmanj uspešno med vsemi tipi motenj. Razlog za to ni povsem znan. Pri modelih umetne inteligence pogosto poznamo vhodne in izhodne podatke, vendar nimamo vpogleda v notranje odločitvene procese. Čeprav lahko sklepamo, kateri vzorci vodijo do zaznave, ostaja mehanizem odločanja znotraj modela delno neznan.

Preglednica 17: Zaznava motnje z nevronske mreže v odvisnosti od tipa motnje.

Detekcija po tipu motnje					
Prag	Vir	FM	CW	Fr. prelet	Pulz
0,90	GRU	95,3 %	88,6 %	99,2 %	84,0 %
0,90	jamInd_01	0,7 %	53,8 %	3,7 %	62,1 %
0,75	GRU	97,7 %	93,8 %	99,6 %	89,5 %
0,75	jamInd_01	1,0 %	71,0 %	5,3 %	74,6 %

Skupna uspešnost modela pri pragu 0,90 znaša 91,8 % (1001 od 1091 motenj), pri čemer je največjo zaznavo dosegel pri frekvenčnem preletu (99,2 %) in FM (95,3 %), najslabšo pa pri pulzni motnji (84,0 %). Znižanje praga na 0,75 je uspešnost zvišalo na 95,1 %, vendar se je število lažnih alarmov povečalo iz 19 na 57. To je pričakovano, saj nižji prag pomeni večjo občutljivost, a tudi več možnosti za napačno zaznavo. Kljub temu pa ostaja razmerje lažnih zaznav še vedno relativno nizko, 1,74 % pri višjem pragu in 5,22 % pri nižjem.

Preglednica 18: Skupna uspešnost učenja z nevronske mrežo in lažni alarmi..

Skupna uspešnost in lažni alarmi (FP)					
Prag	Vir	Uspešnost (%)	Lažni alarmi (FP)	FP / vse (%)	FP / zaznane (%)
0,90	GRU	91,8 %	19	1,74 %	1,90 %
0,90	jamInd_01	29,9 %	0	0 %	0 %
0,75	GRU	95,1 %	57	5,22 %	5,49 %
0,75	jamInd_01	37,9 %	0	0 %	0 %

Pomembno je poudariti, da določen del zaznanih lažnih alarmov v resnici ni posledica napačnega delovanja modela, temveč obnašanja samega sprejemnika GNSS. V številnih primerih se je namreč zgodilo, da je bila motnja že končana, vendar se sprejemnik še ni uspel povsem stabilizirati, ni uspel sprejeti signalov vseh satelitov, vrednosti C/N_0 pa se še niso povrnila na običajno raven. Model je takšno stanje upravičeno interpretiral kot moteno, čeprav je bila motnja tehnično že izklopljena.

Zanimiv je tudi pogled na zaznavo glede na moč motnje. Že pri najšibkejši močnostni skupini, med -80 in -75 dBm, model uspe zaznati 60,7 % motenj pri pragu 0,90 in 71,7 % pri pragu 0,75. To nikakor ni slab rezultat, saj je ta najnižja moč bila namenoma izbrana blizu meje zaznavnosti. Model tako pokriva celoten spekter, od zelo šibkih do zelo močnih motenj, pri čemer zaznavanje v najnižjem območju potrjuje njegovo robustnost.

Preglednica 19: Zaznava motnje glede na moč.

Detekcija motenj glede na moč (v dBm)								
Prag	Vir	-80:-75	-75:-70	-70:-65	-65:-60	-60:-55	-55:-50	-50:-45
0,90	GRU	60,7 %	81,8 %	98,2 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
0,90	jamInd_01	0,0 %	1,8 %	27,0 %	42,5 %	45,9 %	42,2 %	50,3 %
0,75	GRU	71,7 %	93,3 %	99,4 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
0,75	jamInd_01	0,7 %	18,2 %	46,0 %	50,6 %	49,3 %	47,6 %	51,0 %

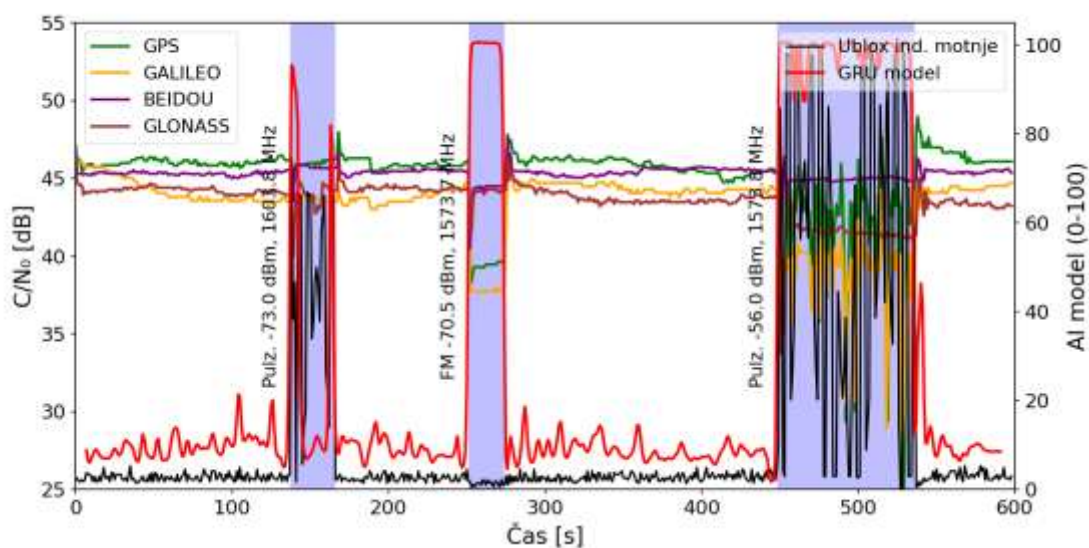
Če rezultate modela GRU primerjamo z vgrajenim indikatorjem motenj jamInd_01, hitro opazimo velik razkorak v uspešnosti. Pri istem pragu, 0,9, jamInd_01 zazna le 29,9 % vseh motenj, kar je bistveno manj kot GRU. Še posebej slabo zazna dinamične motnje, kot sta FM (0,7 %) in frekvenčni prelet (3,7 %), kar pomeni, da v teh primerih skoraj popolnoma odpove. Pri znižanem pragu (75,0) se uspešnost nekoliko izboljša na 37,9 %, a je še vedno nizka. Njegova prednost pa je v tem, da v celotni evalvaciji ni zaznal niti enega lažnega alarma. Zaradi tega bi ga lahko uporabili kot dodatni varnostni signal, čeprav je njegova samostojna uporabnost pri zaznavanju precej omejena.

Kljub razlikam med tipi in jakostmi motenj lahko zaključimo, da model GRU zanesljivo deluje v širokem spektru interferenčnih pogojev. Sposoben je zaznati tako hitre in sunkovite spremembe

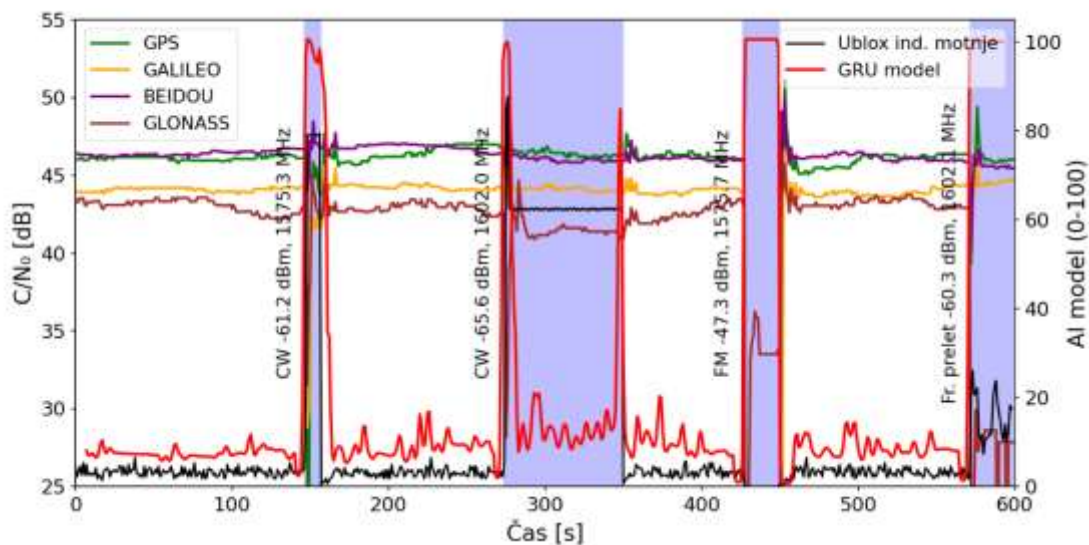
kot tudi počasne degradacije, s čimer presega zmogljivosti preprostih pragovnih metod. Razlike med motnjami so dragocen pokazatelj, katere značilnosti motilcev vplivajo na sprejem signalov GNSS, in hkrati usmerjajo nadaljnji razvoj modelov glede na specifične zahteve uporabe.

5.2.4 Grafična predstavitev rezultatov

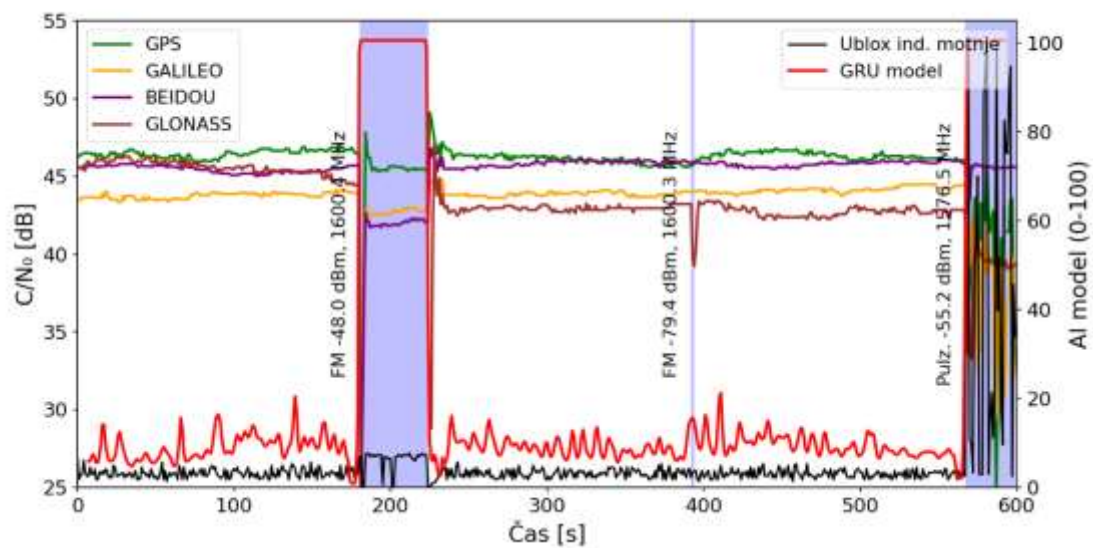
Večina grafov jasno potrjuje uspešno delovanje modela GRU, zato smo v poročilo vključili le enega kot reprezentativen primer dobre zaznave. Ostali prikazani grafi so bili izbrani namenoma, saj prikazujejo primere, kjer model ni deloval idealno, s čimer želimo opozoriti na njegove omejitve. Vsi preostali grafi so priloženi v mapi, ki spremlja to poročilo.



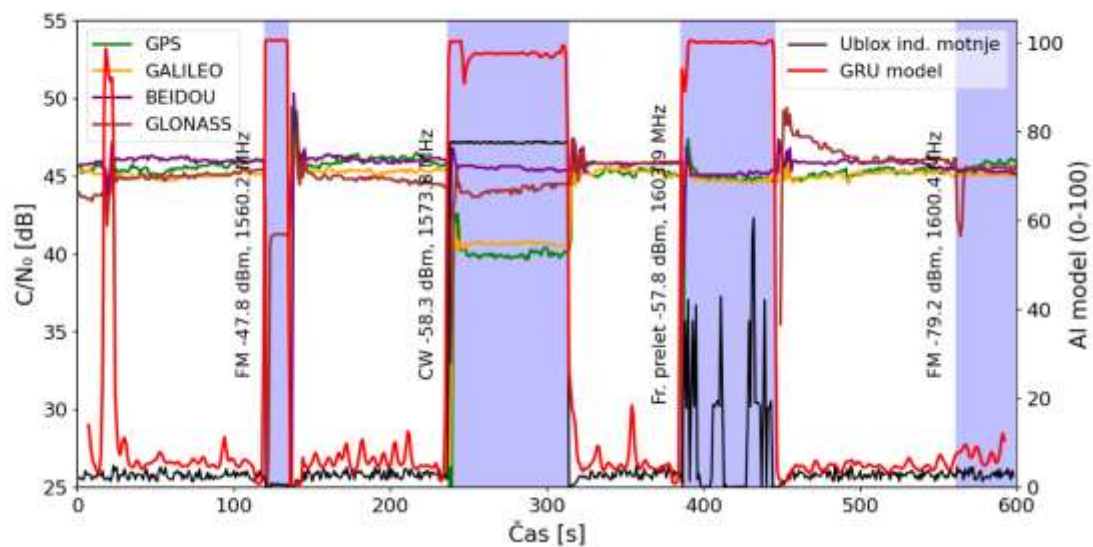
Slika 192: Uspešna napoved motnje z modelom GRU



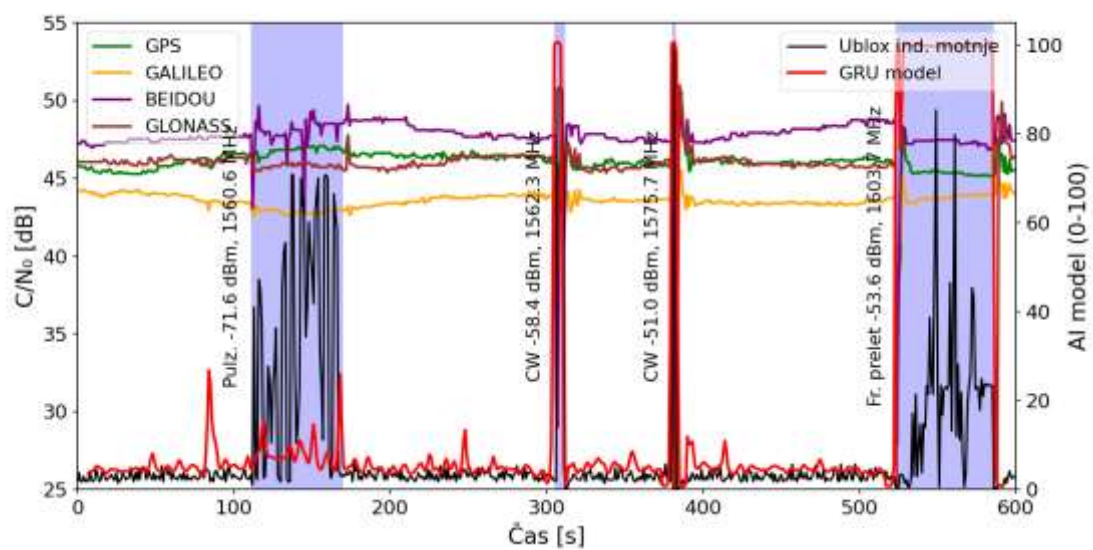
Slika 193: Zaznava začetka in konca dolgotrajne motnje CW



Slika 194: Kratka 2-sekundna motnja, ki je model ne zazna kot motnjo



Slika 195: Lažno pozitivna zaznava brez dejanske prisotnosti motnje



Slika 196: Primer neuspešne zaznave šibke pulzirajoče motnje

6 Zaključek

Model GRU, razvit za zaznavanje motenj signalov GNSS na osnovi povprečnih vrednosti C/N_0 štirih globalnih navigacijskih sistemov, se je izkazal kot izredno učinkovitega. Dosegel je visoko stopnjo zaznave za različne tipe motenj in širok razpon jakosti motilnih signalov, ob tem pa ohranil relativno nizko stopnjo lažnih zaznav. Zaradi enostavnega vhodnega formata in nizke kompleksnosti modela predstavlja dostopno in uporabno rešitev za zaznavo motenj signalov GNSS.

V praksi bi bilo tak model možno preizkusiti tudi v realnem okolju. Na primer, nizkocenovni sprejemnik GNSS v povezavi z oddaljenim strežnikom, bi lahko namestili na eno izmed referenčnih postaj omrežij SIGNAL ali 0. red, kjer se pojavljajo motnje. Sprejemnik bi zbiral podatke, jih pošiljal v podatkovno bazo na strežniku, kjer bi model GRU sproti analiziral tok parametrov GNSS in zaznaval morebitne znake motenj. Na ta način bi bilo mogoče enostavno določiti, kdaj in kako pogosto se na določeni lokaciji pojavljajo motnje. Takšna rešitev bi bila za implementacijo sorazmerno preprosta, vendar je za zdaj še vedno v fazi koncepta in bi jo bilo treba skrbno preizkusiti v različnih pogojih delovanja.

Seveda ostaja še veliko možnosti za nadaljnji razvoj. Ključna smer je širitev podatkovne zbirke, kar nam sicer s sedanjimi avtomatiziranimi meritvami ne predstavlja večje ovire. Zajeti bi bilo treba še več motenj različnih moči, trajanj in oblik. Prav tako model za zdaj temelji zgolj na podatkih iz frekvenčnega pasu L1, zato bi bilo smiselno vključiti tudi motnje v pasovih L2 in L5.

172

Model tudi še ne deluje popolnoma brezhibno. V prihodnje bi bilo treba zmanjšati število lažno zaznanih motenj ter izboljšati občutljivost na šibkejša motnje, ki trenutno še niso vedno zanesljivo zaznane. Prav tako ni znano, ali je model prenosljiv, torej ali bi lahko zanesljivo deloval tudi na podatkih C/N_0 iz drugih sprejemnikov GNSS. Za zdaj domnevamo, da to sicer zaradi razlik v sprejemnikih in antenah ne bi bilo mogoče brez večje degradacije delovanja.

Poleg tega je treba poudariti, da je bil model učen izključno na podatkih, zajetih v pogojih odprtega neba, brez zastrtosti zaradi urbanega okolja, hribov ali goste vegetacije. V takšnih razmerah, kot običajno veljajo za stalne postaje državnih omrežij 0. red in SIGNAL, model najverjetneje deluje optimalno. Če bi pa bil sprejemnik GNSS postavljen v bolj zaprtih okoljih, kjer bi bilo vidnih manj satelitov ali bi bili signali šibkejši, bi to lahko vplivalo na zaznavo motenj in bi bilo treba ustrezno prilagoditi model ali njegov prag odločanja.

Skupno gledano se model GRU izkazuje kot zelo obetavna metoda za zaznavo motenj GNSS, a še vedno zahteva nadaljnji razvoj, testiranje v realnem okolju in precejšno razširitev podatkovne osnove, preden bi ga lahko uporabili kot zanesljivo orodje.

6.1 Izdelava priporočil nadaljnjega dela

- Stalne postaje GNSS bi bilo smiselno opremiti z nizko-cenovnimi sprejemniki GNSS, s katerimi bi beležili spekter signalov GNSS v realnem času ali za naknadno obdelavo. Razlog za to je, da so geodetski sprejemniki na stalnih postajah že tako izpopolnjeni, da večkrat motenj, ki jih

zaznajo običajni geodetski sprejemniki, ne zaznajo oziroma prenehajo sprejemati signalo s satelitov v času motenj.

- Uporabnike bi bilo dobro opozoriti, naj:
 - shranjujejo surova opazovanja GNSS (ali v binarnem formatu ali pa pretvorjena v RINEX) tudi v primeru izvedbe RTK-meritev. Le na ta način je možna rekonstrukcija stanja v smislu kakovosti opazovanj GNSS v času meritev in naknadno ugotavljanje, ali so bile meritve s satelitov pristne;
 - določitev položaja z RTK delajo večkrat neodvisno (priporočilo trikrat ali več), po preteku ca. 0,5 h od zadnje meritve; določitev položaja naj poteka na osnovi daljšega (priporočeno 30 s, še bolje nekaj minut, odvisno od zahtev izvedbe izmere) niza opazovanj GNSS (na meritvah na geodetski točki Malija smo opazili, da so nenamerne motnje, ki jih povzročajo različne oddajne antene GNSS, kratkotrajne, tj. nekaj sekundne).
- V tehničnem delu elaboratov bi bilo nujno navesti: tip sprejemnika in letnico njegove izdelave, glede na odziv nizkocenovnih sprejemnikov na motenje bi njihovo uporabo pri pozicioniranju morali obravnavati s še večjo previdnostjo (z nizko-cenovnimi sprejemniki je mogoče tudi izvajati vse metode izmere GNSS).
- Če je mogoče, je priporočljivo na terenu beležiti spekter signalov GNSS (to omogočajo le nizko-cenovni sprejemniki GNSS).
- V naknadnih obdelavah bi bilo dobro preveriti kakovosti opazovanj GNSS na posameznih frekvencah (predvsem faktorja C/N0 in DOP), pri bolj naprednih obdelavah pa tudi izvesti pregled navigacijskih datotek (v primeru lažnih signalov se v navigacijskih datotekah pojavljajo napačni datumi veljavnosti efemerid).
- V strojno učenje bi bilo smiselno vključiti tudi podatke odziva drugih geodetskih sprejemnikov, kar je mogoče le na osnovi pridobivanja podatkov na terenu. V laboratoriju je povezava simulatorja z geodetskim sprejemnikom GNSS praktično nemogoča, saj so sprejemniki GNSS zaprti in ni mogoče dostopati do njihovega RF-dela.

Viri in literatura

1. O'Connor, A.C.; Gallaher, M.P.; Clark-Sutton, K.; Lapidus, D.; Oliver, Z.T.; J. Scott, T.; Wood, D.W.; Fletcher, M.A.G.; Brown, E.G.; Fletcher, J. Economic Benefits of the Global Positioning System to the U.S. Private Sector Study. *Natl. Inst. Stand. Technol.* 2019, 306.
2. EUSPA *Open Service*; 2019;
3. Borio, D.; Dovis, F.; Kuusniemi, H.; Lo Presti, L. Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. *Proc. IEEE* 2016, 104, 1233–1245, doi:10.1109/JPROC.2016.2543266.
4. Bhunia, S.; Behzadan, V.; Regis, P.A.; Sengupta, S. Adaptive beam nulling in multihop ad hoc networks against a jammer in motion. *Comput. Networks* 2016, 109, 50–66, doi:10.1016/j.comnet.2016.06.030.
5. Bhuiyan, M. Z. H.; Ferrara, N.G.; Thombre, S.; Hashemi, A.; Pattinson, M.; Dumville, M.; Pölöskey, M.; Alexandersson, M.; Eliardsson, P.; Manikundalam, V.; et al. H2020 STIKE3: Standardization of Interference Threat Monitoring and Receiver Testing - Significant Achievements and Impact. In Proceedings of the European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE),; 2019; Vol. 11, pp. 1–14.
6. Kumar, D.; Gurjar, N. Determination of Optimal Site Location for Continuously Operated Reference Station (CORS) and It's Validation With CORS Station Quality Index (Csqi). *FIG Congr. 2022, Volunt. Futur. - Geospatial Excell. a better living* 2022.
7. Rost, C.; Wanninger, L. Carrier phase multipath corrections based on GNSS signal quality measurements to improve CORS observations. *Rec. - IEEE PLANS, Position Locat. Navig. Symp.* 2010, 1162–1167, doi:10.1109/PLANS.2010.5507235.
8. Lau, L.; Tai, K.W. A Data Quality Assessment Approach for High-Precision GNSS Continuously Operating Reference Stations (CORS) with Case Studies in Hong Kong and Canada/USA. *Remote Sens.* 2023, 15, doi:10.3390/rs15071925.
9. Septiawan, R.; AgungSyetiawan; Rufiyanto, A.; Taufik, N.; Sulistya, B.; Putro, E.M. GNSS interference reduction method for CORS site planning. *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.* 2019, 17, 1159–1167, doi:10.12928/TELKOMNIKA.V17I3.11744.
10. Weston, N.D.; Mader, G.L.; Snay, R.; Schwarz, C.; Stone, W.; Marion, F. A Near Real-time GPS Interference Detection System in the United States Using the CORS Network CORS Network – Array of Sensors. *Facing Challenges - Build. Capacit.* 2010, 11–16.
11. Rubinov, E.; Wonnacott, R.; Fuller, S.; Collier, P. Integrity Monitoring of CORS Networks - TrigNet Case Study. *South African J. Geomatics* 2012, 1, 1–13.
12. Weston, N.; Schwieger, V. *Cost Effective GNSS Positioning Techniques*; 2010;
13. ICSM Guideline for Continuously Operating Reference Stations Special Publication 1. 2014, 1–43.
14. Abraha, K.E.; Frisk, A.; Westberg, M.; Wiklund, P. SWEPOS data quality monitoring – GNSS Signal Disturbances Detection System. 2021.
15. Abraha, K.E.; Frisk, A.; Wiklund, P. GNSS interference monitoring and detection based on the Swedish CORS network SWEPOS. *J. Geod. Sci.* 2024, 14, doi:10.1515/jogs-2022-0157.
16. Medved, K.; Berk, S.; Koler, B.; Komadina, Ž.; Kuhar, M.; Oven, K.; Prešeren, P.P.; Režek, J.; Sterle, O.; Stopar, B. National Report of Slovenia to the EUREF 2019 Symposium in Tallinn. *29th EUREF Symp. held Tallinn, Est. May 21–24, 2019* 2019, 6.
17. Ritlop, K.; Fabiani, N.; Oven, K.; Prešeren, P.P.; Sterle, O.; Stopar, B.; Čekada, M.T. Increase of reliability of the signal and zero-order gnss networks. *Geod. Vestn.* 2019, 63, 514–524, doi:10.15292/geodetski-vestnik.2019.04.514-524.
18. Bažec, M.; Dimc, F.; Pavlovčič-prešeren, P. Evaluating the vulnerability of several geodetic GNSS receivers under chirp signal L1/E1 Jamming. *Sensors (Switzerland)* 2020, 20, doi:10.3390/s20030814.
19. Pavlovčič-Prešeren, P.; Dimc, F.; Bažec, M. A comparative analysis of the response of GNSS receivers under vertical and horizontal L1/E1 chirp jamming. *Sensors* 2021, 21, 1–24,

- doi:10.3390/s21041446.
20. Dimc, F.; Pavlovčič Prešeren, P.; Bažec, M. Operation of geodetic GNSS instruments under chirp signal L1 jamming. *Geod. Vestn.* 2021, *65*, 189–204, doi:10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.189-204.
 21. Brown, A.; Atterberg, S.; Gerein, N.; Team, I.R.; Board, S.A. detection and location of gps interference sources using digital receiver electronics. 2000.
 22. Cheong, Joon Wayn, Dempster, Andrew G, Fleming, Joe , Zhu, Ming, Hooper, G. Detecting and Geolocating Jammers and Spoofers Using Integrated AOA and TDOA Measurements. *Insid. GNSS* 2019.
 23. Borio, D.; Gioia, C.; Štern, A.; Dimc, F.; Baldini, G. Jammer localization: From crowdsourcing to synthetic detection. *29th Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. ION GNSS 2016* 2016, *5*, 3107–3116, doi:10.33012/2016.14689.
 24. Strizic, L.; Akos, D.M.; Lo, S. Crowdsourcing GNSS jamming detection and localization. *Proc. 2018 Int. Tech. Meet. Inst. Navig. January 29 - 1, 2018* 2018, 626–641.
 25. Hamza, V.; Stopar, B.; Sterle, O.; Pavlovčič-Prešeren, P. Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receivers and Antennas for Surveying in Urban Areas. *Sensors* 2023, *23*, doi:10.3390/s23052861.
 26. Bažec, M., Dimc, F., Pavlovčič-Prešeren, P. An Attempt to Localize GNSS Jammer Position: A Case Study. In Proceedings of the 16th Baška GNSS Conference: PNT Technologies, Techniques and Applications, 2023.; 2023.
 27. GPS, I., online: <https://www.gps.gov/technical/icwg/>.
 28. Safran, 2024. Measuring a GNSS Signal and Gaussian Noise Power Available online: <https://safran-navigation-timing.com/document/measuring-a-gnss-signal-and-gaussian-noise-power/>.
 29. Syam, W. The difference between C/N0 and SNR in GNSS signal processin. Dostopna na: <https://www.wasyresearch.com/the-difference-between-c-n0-and-snr-in-gnss-signal-processing/> (18. 04. 2024).
 30. Denisowski, P. Understanding Spectrum Analyzers - Noise Figure.
 31. Troglia Gamba, M.; Polidori, B.D.; Minetto, A.; Dovi, F.; Banfi, E.; Dominici, F. GNSS Radio Frequency Interference Monitoring from LEO Satellites: An In-Laboratory Prototype. *Sensors* 2024, *24*, doi:10.3390/s24020508.
 32. Trimble Inc. Trimble Inc.- Spectrum analyzer.
 33. Cozzens, T. *GPS World*. 2019,.
 34. Septentrio Septentrio - how to use spectrum analyzer?
 35. Thombre, S.; Bhuiyan, M.Z.H.; Eliardsson, P.; Gabrielsson, B.; Pattinson, M.; Dumville, M.; Fryganiotis, D.; Hill, S.; Manikundalam, V.; Pölöskey, M.; et al. GNSS Threat Monitoring and Reporting: Past, Present, and a Proposed Future. *J. Navig.* 2018, *71*, 513–529, doi:10.1017/S0373463317000911.

Dodatek 1: Obrazec priprave na izmero

Care4SIGNAL – Ocena tveganja motenj signalov GNSS v slovenskem državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL

PREDHODNA PRIPRAVA NA TERENSKO IZMERO

Datum sestanka pred terenom	
Delovišče	
Datum in ura prihoda na teren	
Kontaktna oseba z AKOS-a	
Namen	
Prisotni na terenu	
Uporabljeni motilniki	
Uporabljeni sprejemniki GNSS in tipi anten	
Uporabljeni spektralni analizatorji	

Plan scenarijev meritev

Številka scenarija	Postavitev sprejemnikov GNSS (statično, kinematično)	Uporabljeni motilniki/spektralni analizatorji	Opis
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			

Dodatek 2: Terenski obrazec izmere

Care4SIGNAL – Ocena tveganja motenj signalov GNSS v slovenskem državnem omrežju stalnih postaj SIGNAL

TERENSKI ZAPISNIK

Delovišče	
Datum	
Ura začetka izmere (lokalni čas)	
Ura konca izmere (lokalni čas)	
Namen	
Prisotni na terenu	
Uporabljeni motilniki	
Uporabljeni sprejemniki GNSS	
Uporabljeni spektralni analizatorji	

Opis scenarijev meritev

Zaporedna številka	Pričetek	Konec	Opis

Priloge

Terenska slika celotnega delovišča

Terenska slika (podrobneje) - motilniki

Terenska slika (podrobneje) – spektralni analizator

Terenska slika (podrobneje) – sprejemniki GNSS

Slike/skenogrami zapiskov s terena