

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

LETNO 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. Andrej Lavrič, izr. prof. dr. Boštjan Batagelj

Ljubljana, september 2024

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: dr. Špela Stres, v. d. direktorja

SONAROČNIK

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

Zemljemerska ulica 12

1000 Ljubljana

Matična številka: 2482886000

Davčna številka: 57410763

Predstavniki 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. dr. Klemen Ritlop (51000)
doc. dr. Oskar Sterle (25481)
prof. dr. Bojan Stopar (10196)

UL FE

izr. prof. dr. Boštjan Batagelj (18174)
asist. dr. Aljaž Blatnik (50192)
asist. Andrej Lavrič (53519)

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)

Ljubljana, 9. 9. 2024

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 nadaljnega 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 nadaljnega 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	

IV

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	
M5	Končno poročilo	30. 9. 2025	
M6	Objavljeni strokovni znanstveni članek	30.09.2025	

Legenda:

Opravljeno
V teku
Načrtovano

KAZALO

A.	Uvod	14
B.	Pregled dosedanjih raziskav	17
C.	Teoretična izhodišča	23
1	Analiza in ocena ranljivosti uporabnikov tehnologije GNSS na različne namerno povzročene motnje signalov GNSS.....	32
1.1	Pregled možnosti ocene motenj v omrežju SIGNAL (Naloga 1.1).....	32
1.1.1	Spektralni analizator v sprejemnikih Trimble.....	36
1.1.2	Spektralni analizator v sprejemnikih Leica Geosystems	39
1.2	Pregled možnosti ocene motenj z geodetskimi sprejemniki (Naloga 1.2).....	40
1.2.1	Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Javad Inc.	40
1.2.2	Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Leica Geosystems.....	42
1.2.3	Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Trimble Inc.	43
1.3	Pregled zaznave motenj z drugimi sprejemniki (Naloga 1.3)	44
1.3.1	Spremljanje spektra v sprejemniku u-blox ZED-F9P	44
1.3.2	Spremljanje spektra v sprejemniku Septentrio Mosaic x5	44
2	Razvoj metodologije ugotavljanja motenj in nadzora kakovosti opazovanj GNSS.....	47
2.1	Izdelava obrazca za vodenje meta-podatkov o scenarijih testiranj.....	47
2.2	Opredelitev metodologije ocene kakovosti opazovanj GNSS	48
2.2.1	Naknadna obdelava opazovanj in meritev	49
2.3	Opredelitev načrta arhiviranja podatkov s poimenovanjem datotek.....	49
2.4	Predlog poročila rezultatov testiranja motilnikov v laboratoriju in na terenu	52
2.4.1	Opredelitev dogodka	55
2.4.2	Poročanje o meritvah	56
2.5	Načrt izvedbe testov.....	57
2.6	Izbor območij in opreme za testiranje	58
3	Testiranje predlagane metodologije nadzora kakovosti meritev v omrežju SIGNAL in na strani uporabnikov.....	60
3.1	Testiranje motilnikov v laboratorijskem okolju brez prisotnosti drugih morebitnih elektromagnetnih motenj.....	60
3.2	Testiranje sprejemnikov GNSS na terenu	63
3.2.1	Nenamerne motnje – testno območje: stalna postaja FGG3.....	65

3.2.2	Nenamerne motnje – testno območje na geodetski točki Malijsa (izmera 26. 4. 2024)	72
3.2.3	Nenamerne motnje - testno območje na novi točki 0. reda Livade (izmere: 26. 4. 2024)	80
3.2.4	Nenamerne motnje - testno območje na novi točki 0. reda Livade (izmeri: 29. 4. 2024, 30. 4. 2024).....	85
3.2.5	Namerne motnje – testno območje: Črnotiče (15. 5. 2024)	87
3.3	Glavne ugotovitve, vezane na namerne motnje (Črnotiče, 15/05/2024)	128
4	Integracija in implementacija metodologije in izdelava priporočil nadaljnjega dela	130
4.1	Integracija in implementacija metodologije	130
4.2	Izdelava priporočil nadaljnjega dela.....	130
4.2.1	Seznam trenutnih priporočil dela (do septembra 2024)	130
5	Zaključek.....	131
	Viri in literatura	132
	Dodatek 1: Obrazec priprave na izmero.....	134
	Dodatek 2: Terenski obrazec izmere	135

KAZALO SLIK

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

Slika 36: Spekter signalov na L1, ki ni obremenjen z motnjami. Prilagodljiv sistem za zmanjšanje širokopasovnih motenj; možnost uporabe ali izključitve sit – izris.....	45
Slika 37: Izbor signalov, kjer nas zanima spekter signalov.	45
Slika 38: Spekter signalov ob prisotnosti naprav v bližini letališč.	46
Slika 39: Spekter signalov ob prisotnosti motilnika s preletnim signalom (ang. <i>Chirp jammer</i>).	46
Slika 40: Obrazec planiranja izmere (a) in obrazec, ki ga bomo v celoti izpolnili po terenskem delu (b)....	48
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.....	51
Slika 42: Primer prenosnega spektralnega analizatorja Rigol.	52
Slika 43: Prikaz trenutnih vrednosti signala motilnika z oznako Rušička na spektralnem analizatorju.	53
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).	53
Slika 45: Pripomočki za meritev moči motilnika z oznako usb na področjih L1, L2 in L5: spektralni analizator, kabel in paličasta antena.	54
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.....	54
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 Triumph LSA, Javad pod vplivom motenj na področju L1, ki jih je povzročal motilnik v mimovozečem vozilu.	55
Slika 48: Merilna postavitev GNSS-simulacije v laboratorijskem okolju.....	60
Slika 49: Fotografija testne merilne postavitve v laboratoriju.....	61
Slika 50: Deviacija položaja ob motenju z eno-frekvenčnim (CW) motilnikom - TESEO-LIV3R.....	61
Slika 51: Deviacija položaja ob motenju z eno-frekvenčnim (CW) motilnikom - GP-01.....	62
Slika 52: Stalna postaja na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, točka FGG3 ter dodatno izmera spektrov s sprejemnikom u-blox ZED-F9P.	65
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.	66
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.	67
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).	68
Slika 56: FGG3, 28/06/2024, 07:30 – 08:30 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij.	68
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.	69
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.....	69
Slika 59: FGG3, 28/06/2024. 07:25 do 08:40 UTC (na sliki lokalni čas); izris prekinjenih opazovanj GNSS (sprejemnik ZED-F9P).	70
Slika 60: FGG3, 28/06/2024. 07:25 do 08:40 UTC (na sliki lokalni čas); izris prekinjenih opazovanj GNSS (sprejemnik ZED-F9P).	71
Slika 61: Geodetska točka 180 Malija; (a) pogled proti severu; (b) pogled proti jugo-vzhodu.....	72
Slika 62: Terenski zapisnik izmere z dne 26/04/2024	73
Slika 63: Malija, 26/04/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.....	74

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).....	75
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).....	76
Slika 66: Malija, 26/04/2024. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij (levo); signali satelitov GLONASS, ki so zelo obremenjeni s skoki.....	77
Slika 67: Malija, 26/04/2024 od 10:38 do 11:03 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami skokov signalov (rdeče črtice).....	77
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).....	78
Slika 69: Malija 26/04/2024, izvedba preizkusa sprejemnikov po standardu ISO17123-8.	79
Slika 70: Livade, 26/04/2024.....	80
Slika 71: Terenski zapisnik izmere Livade, 26/04/2024.....	80
Slika 72: Livade, 26/04/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.....	81
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.	82
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.	83
Slika 75: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC; izris vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami skokov signala (rdeča črtica).	83
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.....	84
Slika 77: Terenski zapisnik izmere Livade, 26/04/2024. Uporabljeni sprejemnik je ZED F9P, u-blox.	85
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.	85
Slika 79: Terenski zapisnik izmere Livade, 30/04/2024. Uporabljeni sprejemnik je ZED F9P, u-blox.	86
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.	86
Slika 81: Črnotiče, 15/05/2015: izmera z geodetskimi sprejemniki (spreda) z namernimi motnjami signalov.....	87
Slika 82: Črnotiče, 15/05/2015: terenski zapisnik.....	87
Slika 83: Črnotiče, 15/05/2024, , 09:57:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Rušička.	88
Slika 84: 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).	89
Slika 85: 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.....	90
Slika 86: 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.....	90
Slika 87: Spekter GNSS na frekvenci L1, brez filtra, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 07:59:59.....	91
Slika 88: Spekter GNSS na frekvenci L1, Max Hold, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 08:00:00.....	91
Slika 89: Črnotiče, 15/05/2024: vidni satelit v času motnje z motilnikom Keysight N5182B.....	91

Slika 90: Črnotiče, 15/05/2024, 11:25:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Keysight.....	92
Slika 91: 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.....	93
Slika 92: 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	93
Slika 93: Izris vrednosti SNR (zgoraj), odboja signala (sredina) in višinskega kota (spodaj) za izbrane satelite v času motenj	94
Slika 94: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS L1	95
Slika 95: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	95
Slika 96: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	96
Slika 97: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1	96
Slika 98: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2.....	97
Slika 99: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	97
Slika 100: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b.	98
Slika 101: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2.	98
Slika 102: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji GPS.....	100
Slika 103: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, GLONASS	100
Slika 104: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, Galileo	101
Slika 105: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, BeiDou.....	101
Slika 106: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, vse konstelacije	102
Slika 107: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1	103
Slika 108: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	103
Slika 109: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	104
Slika 110: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2	104
Slika 111: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	105
Slika 112: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b	105
Slika 113: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5	106
Slika 114: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a.....	106
Slika 115: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS.....	108
Slika 116: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GLONASS	108
Slika 117: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, Galileo.....	109
Slika 118: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS + GLONASS + Galileo.....	109

Slika 119: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1	110
Slika 120: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	110
Slika 121: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	111
Slika 122: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1	111
Slika 123: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2	112
Slika 124: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	112
Slika 125: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b	113
Slika 126: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2	113
Slika 127: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5	114
Slika 128: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a	114
Slika 129: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a	115
Slika 130: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, GPS	116
Slika 131: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, GLONASS	116
Slika 132: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, Galileo	117
Slika 133: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, BeiDou	117
Slika 134: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, vse konstelacije	118
Slika 135: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1	119
Slika 136: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1	119
Slika 137: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1	120
Slika 138: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B1	120
Slika 139: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2	121
Slika 140: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2	121
Slika 141: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b	122
Slika 142: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2	122
Slika 143: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5	123
Slika 144: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a	123
Slika 145: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a	124

Slika 146: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2b	124
Slika 147: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Beidou B3	125
Slika 148: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, GPS.....	126
Slika 149: Črnotiče, 15/05/2024 Trimble R12i, SPP-položaji, GLONASS.....	126
Slika 150: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, Galileo	127
Slika 151: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, BeiDou.....	127
Slika 152: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, vse konstelacije	128

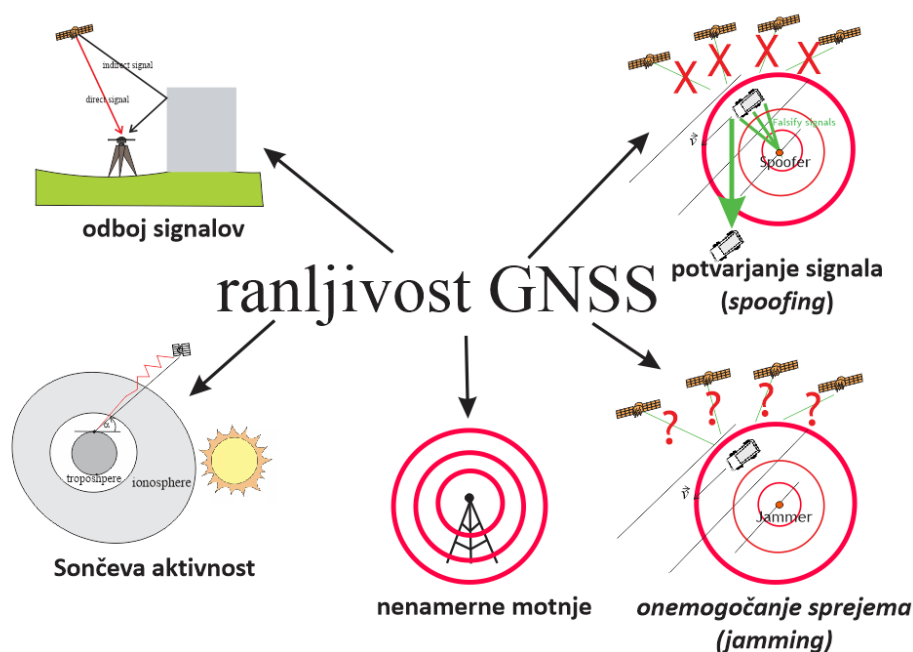
KAZALO PREGLEDNIC

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	33
Preglednica 2: Lastnosti prikaza motenj na posameznih frekvencah [32].....	39
Preglednica 3: Arhiviranje opazovanj - Poimenovanje datotek RINEX.....	50
Preglednica 4: Dopolnitev zapisa za arhiviranje sprejetega spektra radijskih spektralnih analizatorjev ..	52
Preglednica 5: Seznam motilnikov, s katerimi bodo (so) izvedene motnje.....	58
Preglednica 6: Seznam sprejemnikov GNSS, ki bodo vključeni v raziskavo namernih motenj	59
Preglednica 7: Lokacije meritev spektrov signalov in meritev s sprejemniki GNSS, ki so jih predlagali sodelavci z GURS-a. Sivo: še ni bilo meritev.....	64
Preglednica 8: Časi motenja	87
Preglednica 9: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami.....	99
Preglednica 10: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	102
Preglednica 11: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami.....	107
Preglednica 12: Črnotiče, 15/05/2024,, Leica GS15. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	109
Preglednica 13: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami.....	115
Preglednica 14: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	118
Preglednica 15: Trimble R12i. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami.....	125
Preglednica 16: Trimble R12i. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije	128

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 pride 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.

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 večžarkovnega 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.

16

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.

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).

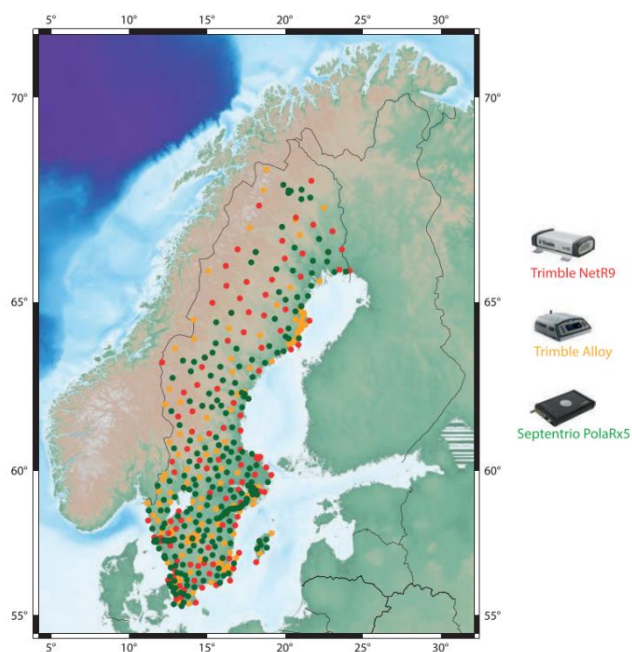


Slika 2: Omrežje NOAA (ang. *National Oceanic and Atmospheric Administration*) [10].

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.

18

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).

19

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:

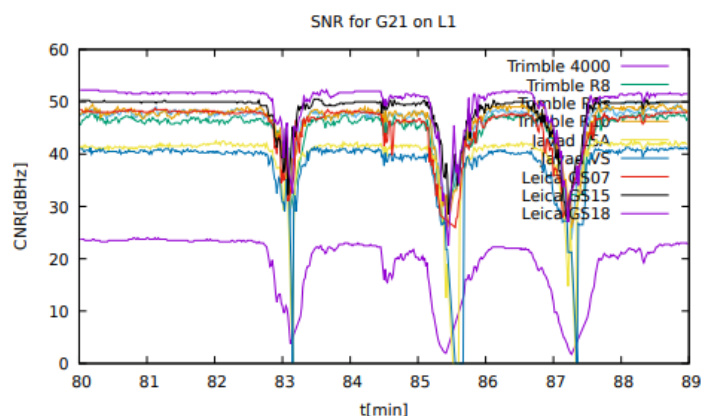
- izbor lokacije postaje in vpliv okolice na opazovanja GNSS skozi daljše časovno obdobje (brez upoštevanja motenj signalov),
- opremo na postajah, ki mora biti kakovostna, da lahko zagotovi neprestano delovanje in opazovanj GNSS,
- koordinate postaje, ki predstavljajo izhodišče za določitev položaja 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 povzročilo nepričakovane motnje.

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.

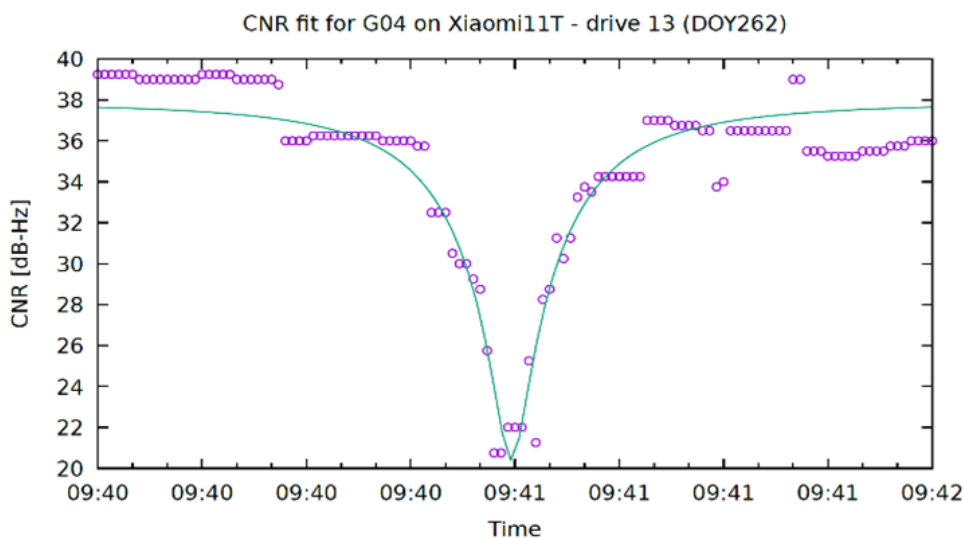
B 4. Študije lokalizacije motilnega signala

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:

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

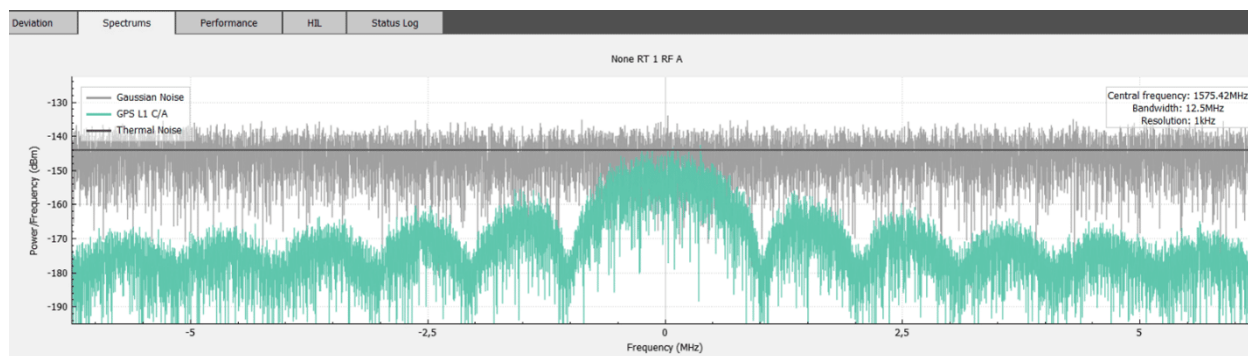
kjer je d razdalja v km med satelitom in sprejemnikom, f frekvenca valovanja v MHz, c hitrost svetlobe ter G_{T_x} in G_{R_x} dobitka satelitove (oddajnikove) in sprejemnikove antene (izraženo v dBi).

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].

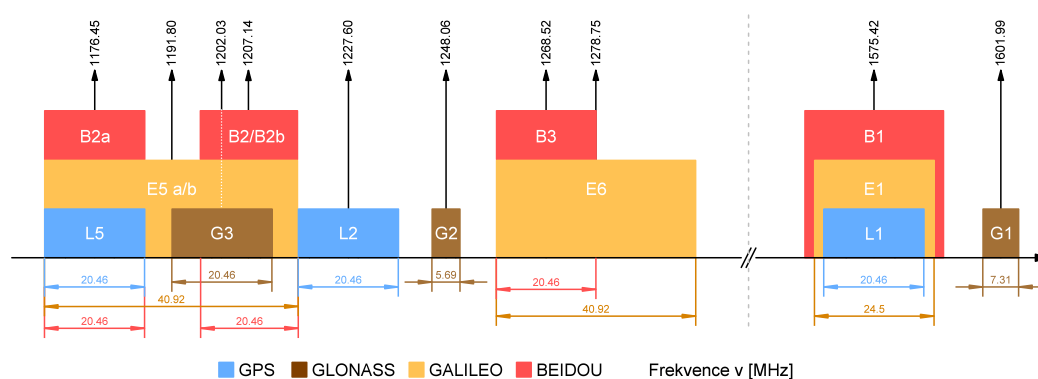
Posledično sprejeti signal GNSS na vhodu v anteno običajno preglasi šum (Slika 8). Moč sprejetih signalov je torej nižja od šuma, zato je naloga sprejemnika, da sprejeti signal ojača in ga izloči iz šuma s pomočjo kodnega demultipleksiranja.



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.

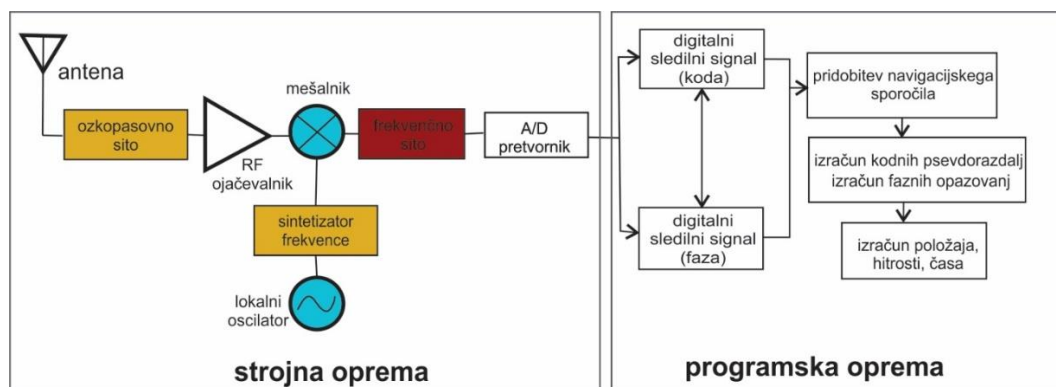
Širokopasovna motnja se lahko izvede z ustreznim modulatorjem ali v obliki razširjanja spektra s kodo, kjer je uporabljena modulacija BPSK (ang. *Binary Phase Shift Keying*). S tem motilnik hkrati pokriva želeno frekvenčno področje, pri tem pa je modulacija lahko povsem naključna (ne sinhronizirana z 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 (predstavitev 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 vhodu 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 zelenih informacij o položaju, hitrosti in času.

C 4. Razmerje med signalom in šumom (SNR) in razmerje med signalom in gostoto šuma (C/N_0 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/N_0 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.

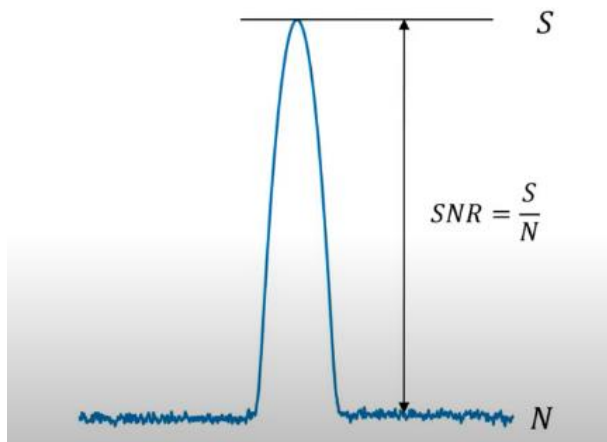
$$SNR = \frac{S}{N}$$

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

oziroma

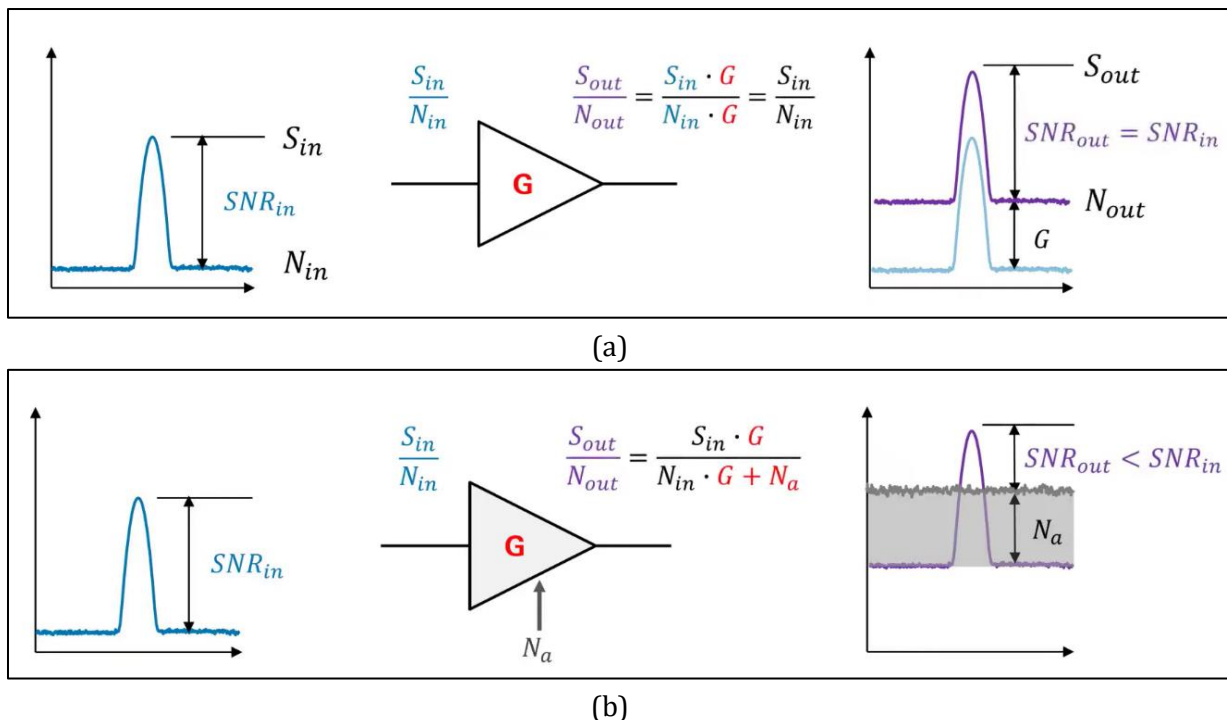
$$SNR_{dB} = S_{dB} - N_{dB}$$

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).



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/N0, ga moramo pretvoriti v SNR, da lahko ocenimo varianco šuma v simulaciji.

C 4.2. Razmerje med signalom in spektralno gostoto šuma (C/N0)

Po definiciji je C/N0 razmerje med močjo nosilnika in močjo šuma na enoto pasovne širine. C/N0 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:

$$\begin{aligned} C/N0_{dB-Hz} &= SNR + 10 \cdot \log(bw) \\ \text{ali} \\ C/N0_{dB-Hz} &= C - N0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{ali} \\ C/N0_{dB-Hz} = (C - N) + BW = SNR + BW,$$

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 vходу 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 $T = 290 \text{ K}$, $K = 17^\circ \text{ C}$ 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]:

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

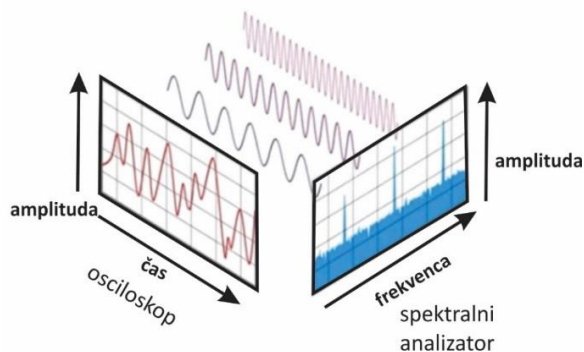
Če predpostavimo, da imamo na izhodu sito s pasovno širino 10 MHz , lahko izračunamo, da je $BW = 10 \cdot \log(10^6) = 70 \text{ dB}$. Tako lahko iz C/N0 izračunamo SNR kot:

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

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. 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 šibkejšje od signalov GNSS, a vseeno motijo delovanje.



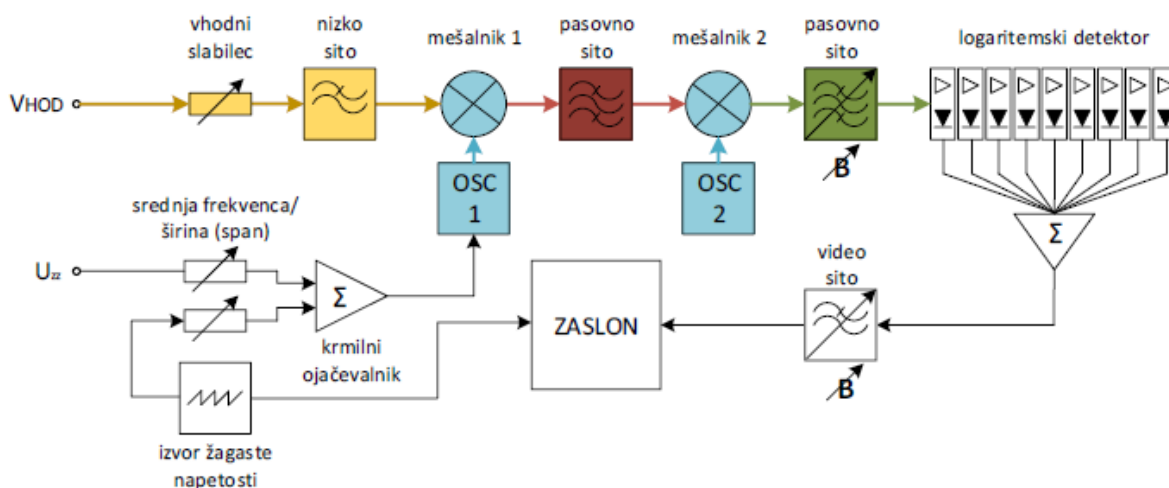
Slika 13: Razmejitev med časovnim in frekvenčnim prostorom (splošno).

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.

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

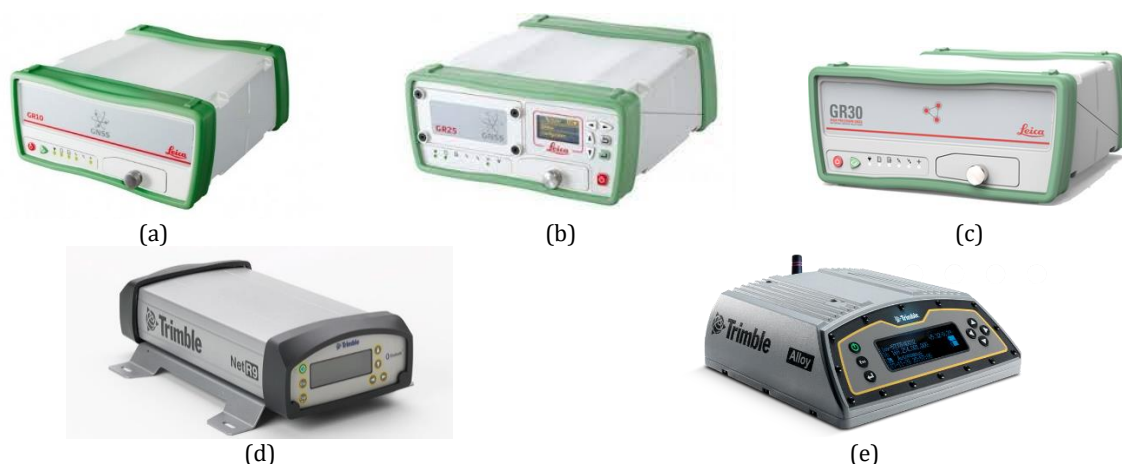
1.1 Pregled možnosti ocene motenj v omrežju SIGNAL (Naloga 1.1)

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.

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.



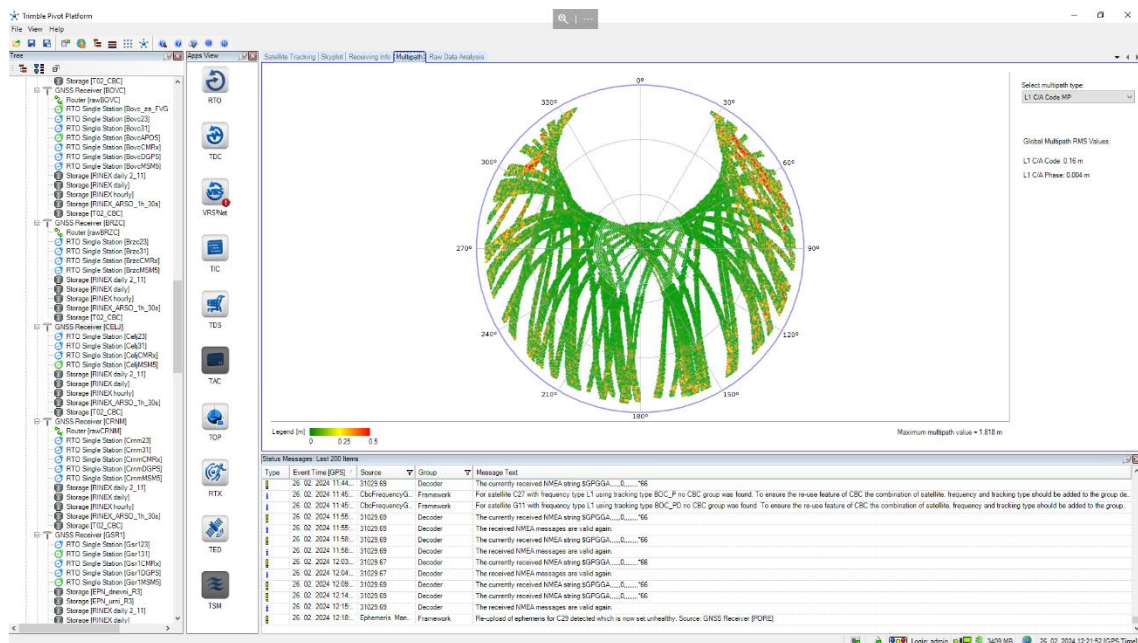
Slika 16: Sprejemniki, ki so v uporabi v omrežju SIGNAL; (a) Leica GR10, (b) Leica GR25, (c) Leica GR30, (d) Trimble NetR9, (e) Trimble Alloy

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

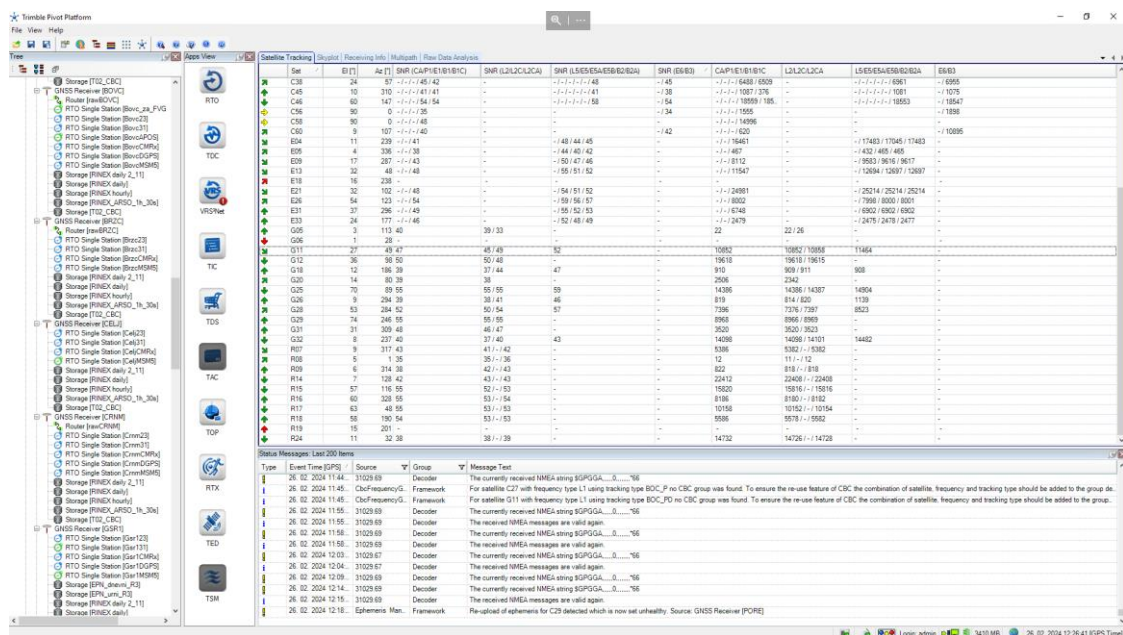
Omrežje	Oznaka postaje	Lokacija postaje	Sprejemnik	Spektralni analizator
SIGNAL	BODO	Bodonci	Trimble NetR9	Ne
SIGNAL	BOVC	Bovec	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	BRZC	Brežice	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	CELJ	Celje	Leica GR30	Opcija, ni nameščen
SIGNAL	CRNM	Črnomelj	Trimble Alloy	Nameščen
SIGNAL	GSR1	Ljubljana	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).

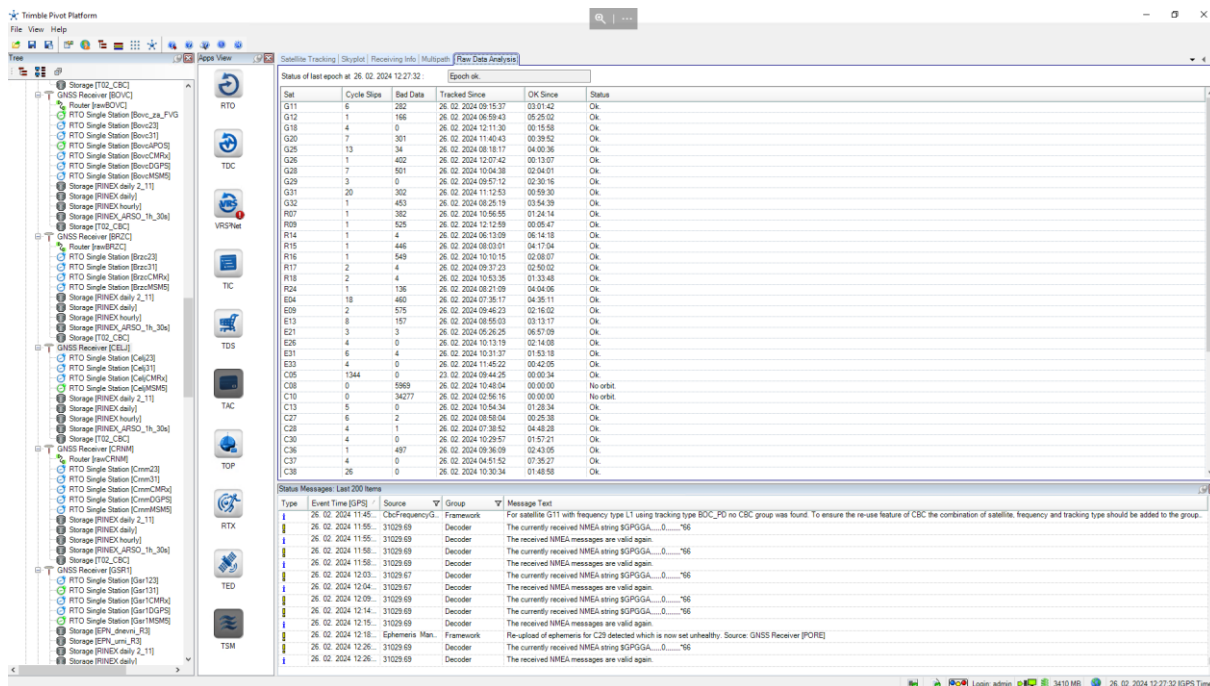
Programska oprema omrežja Trimble Pivot Platform v 5.1 (TPP) nudi vpogled v delovanje stalnih postaj, vključno z lokalnimi motečimi vplivi, kot so odboj signalov, nenadni skoki signala (ang. *cycle slips*) in razmerje moči med signalom in šumom (*SNR*) (Slika 17 – Slika 20).



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).

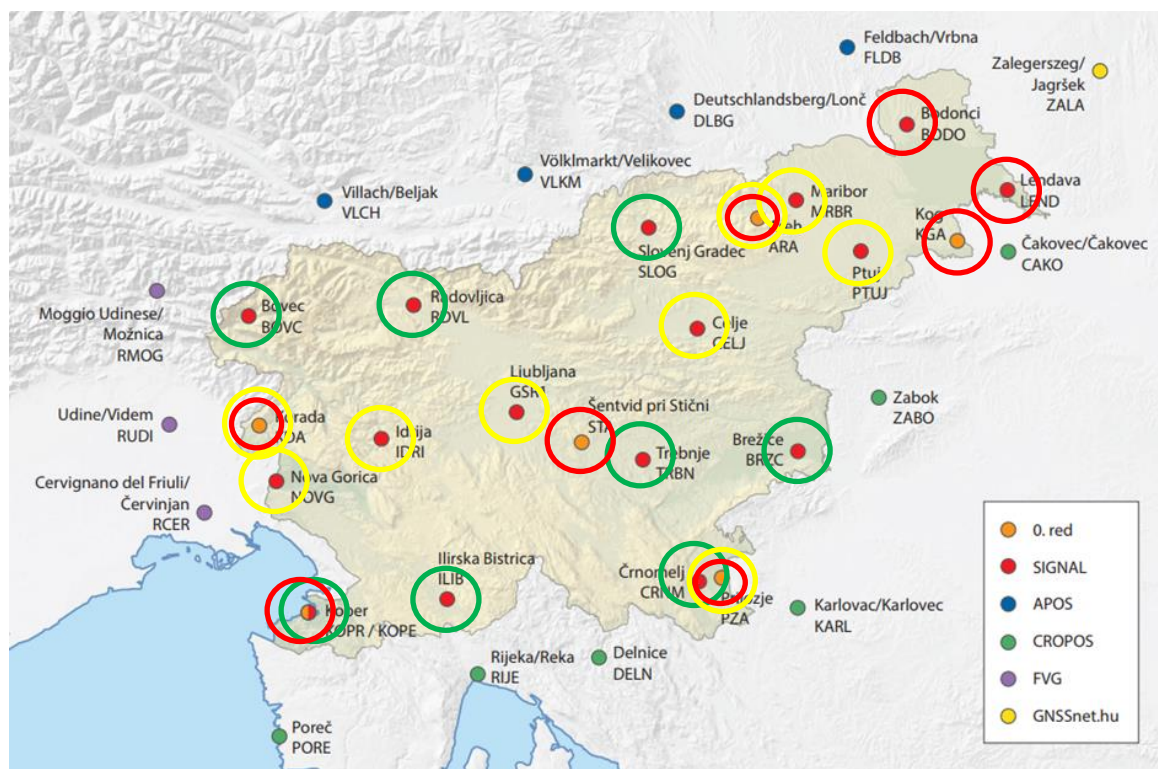


Slika 20: Izpis kakovosti opazovanj v smislu uporabnosti pri končni določitvi položaja (Trimble Pivot Platform).

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.

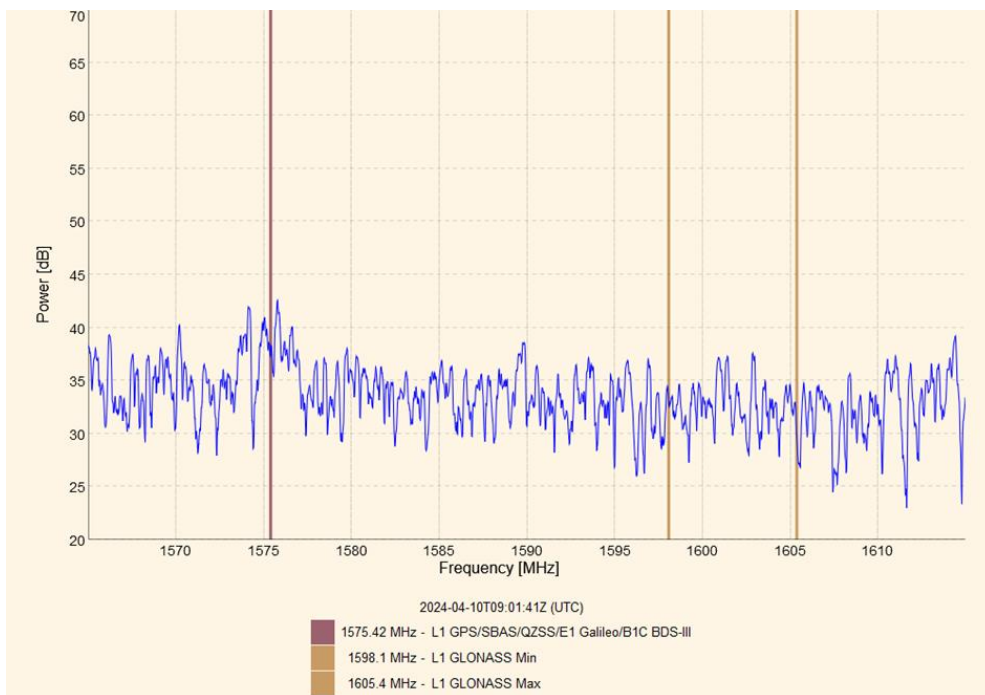
1.1.1 Spektralni analizator v sprejemnikih Trimble

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.

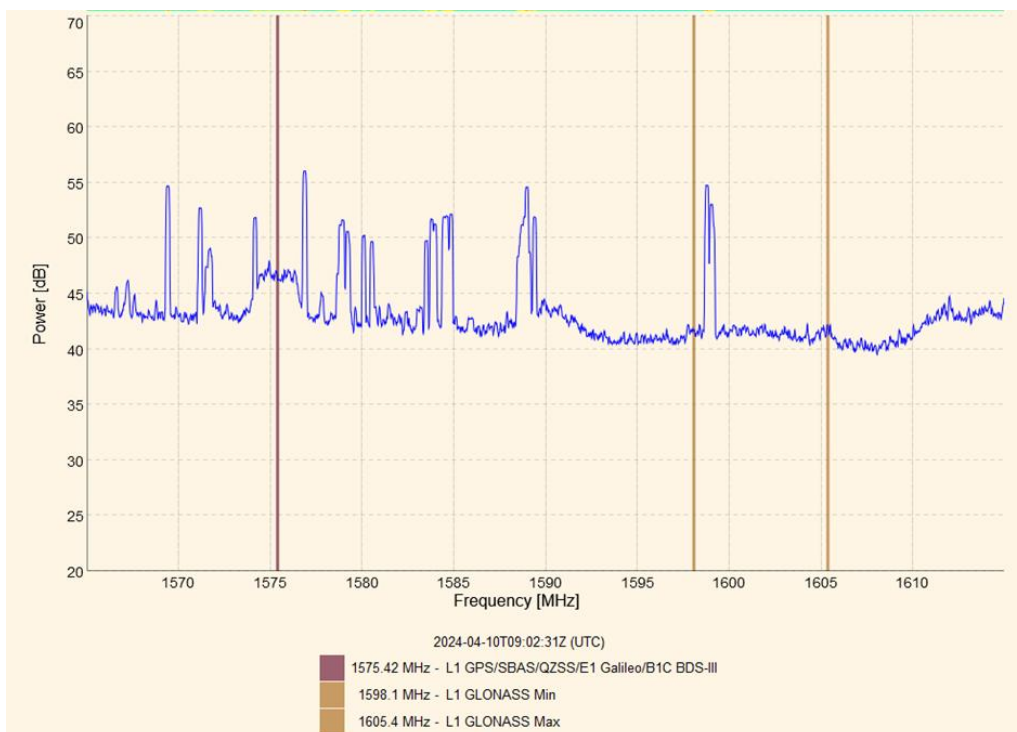
V sprejemnikih Trimble so na voljo trije načini filtriranja, in sicer:

- 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).



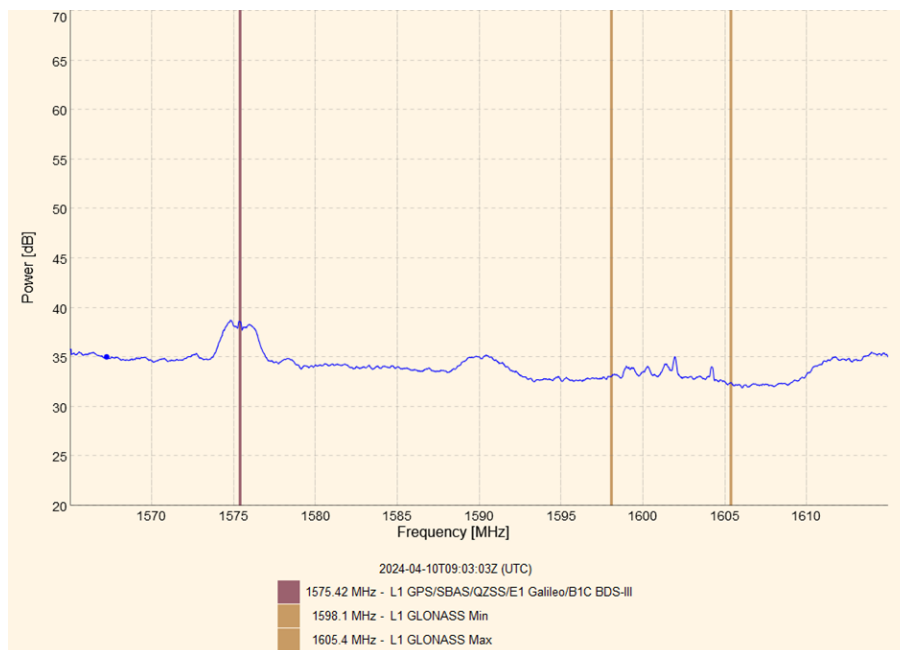
Slika 22: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy brez uporabe sit.

- 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).

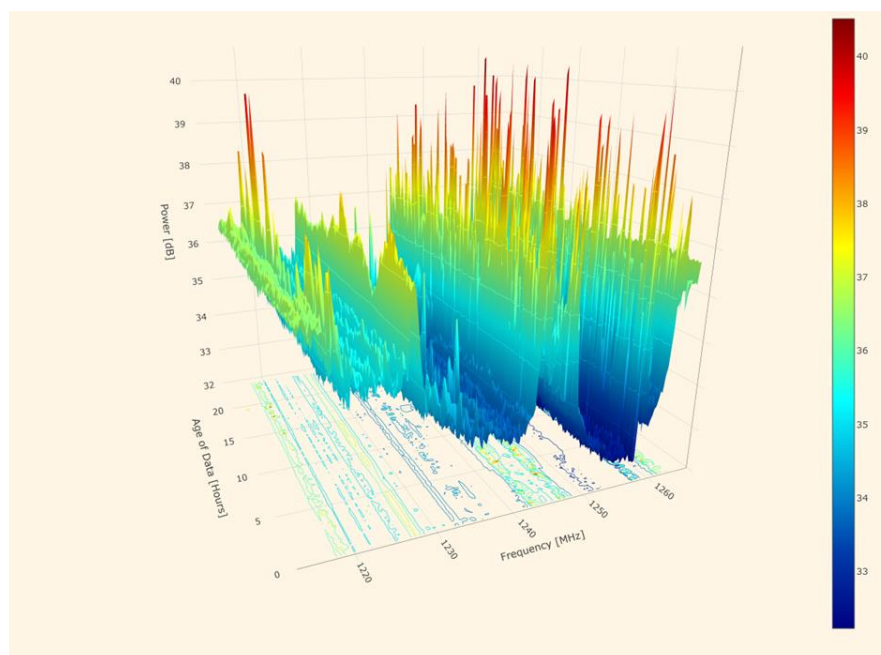


Slika 23: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy, način "Max hold".

- 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".



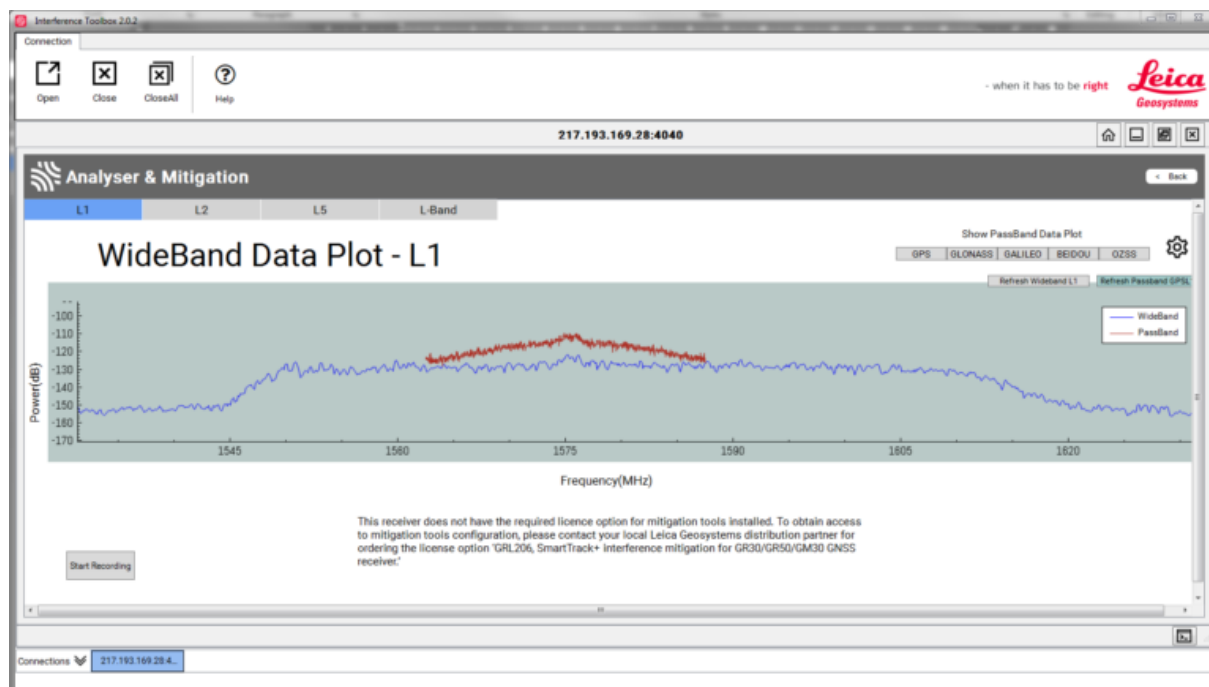
Slika 25: Spekter iz sprejemnika Trimble Alloy Spekter za celoten dan (Trimble Alloy).

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

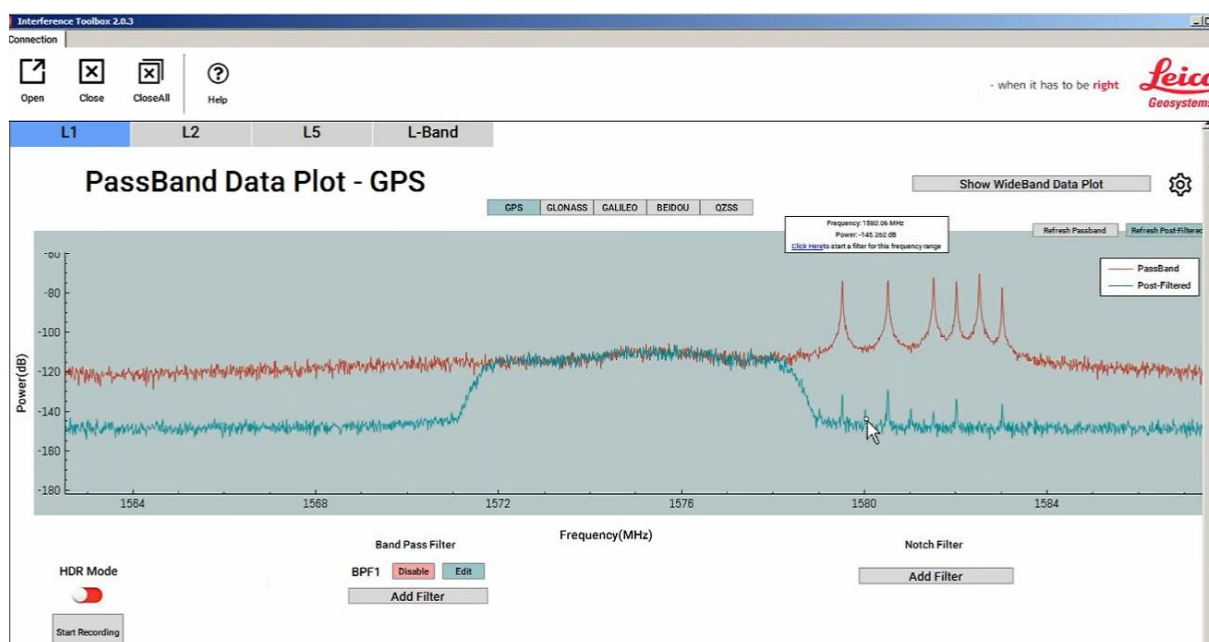
Band	Start	Stop	BW	Center	Signals
L1	1.5650 GHz	1.6150 GHz	50.0000 MHz	1.5900 GHz	L1 GPS/SBAS/QZSS/E1 Galileo (1575.42 MHz) L1 GLONASS Min (1598.1 MHz) L1 GLONASS Max (1605.4 MHz)
L2	1.2150 GHz	1.2650 GHz	50.0000 MHz	1.2400 GHz	L2 GPS/QZSS (1227.6 MHz) L2 GLONASS Min (1242.9 MHz) L2 GLONASS Max (1248.6 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:

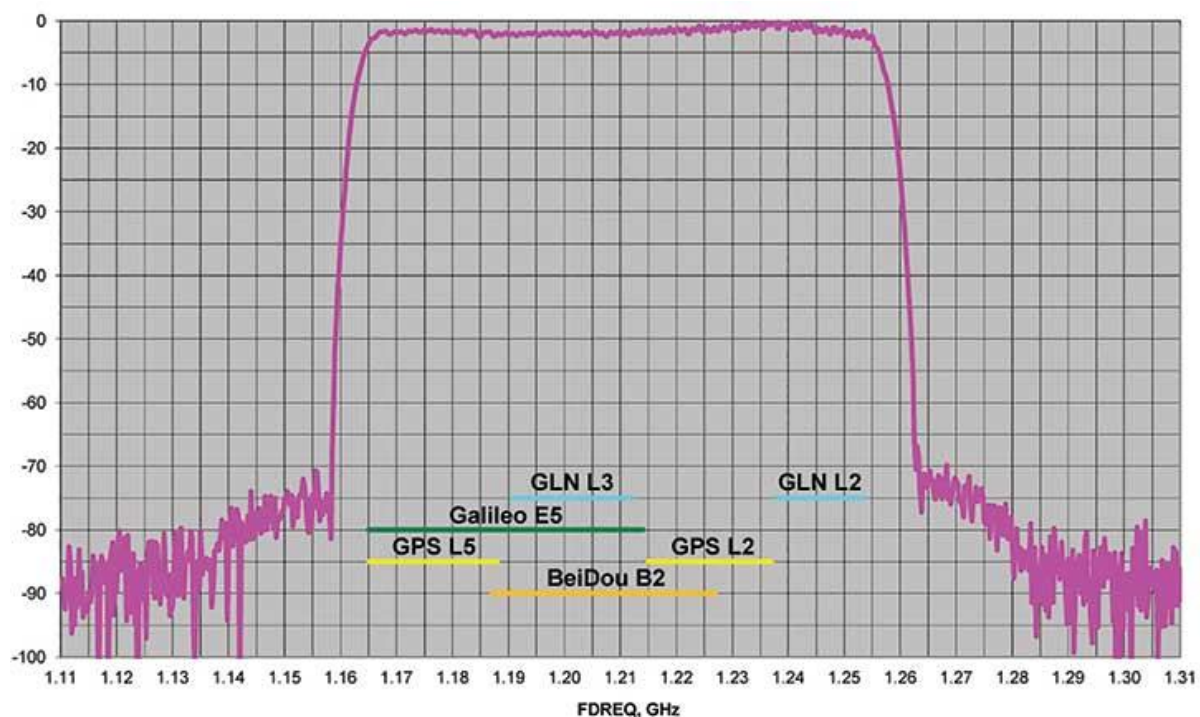
- a) z visokim dinamičnim razponom (ang. *High dynamic range* – HDR), ki izvaja širokopasovno ublažitev,
- b) s pasovno prepustnimi siti (ang. *Band-pass filter*) in
- c) s prilagodljivimi ozkimi pasovno zapornimi siti (ang. *Adaptive notch filter*).

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.

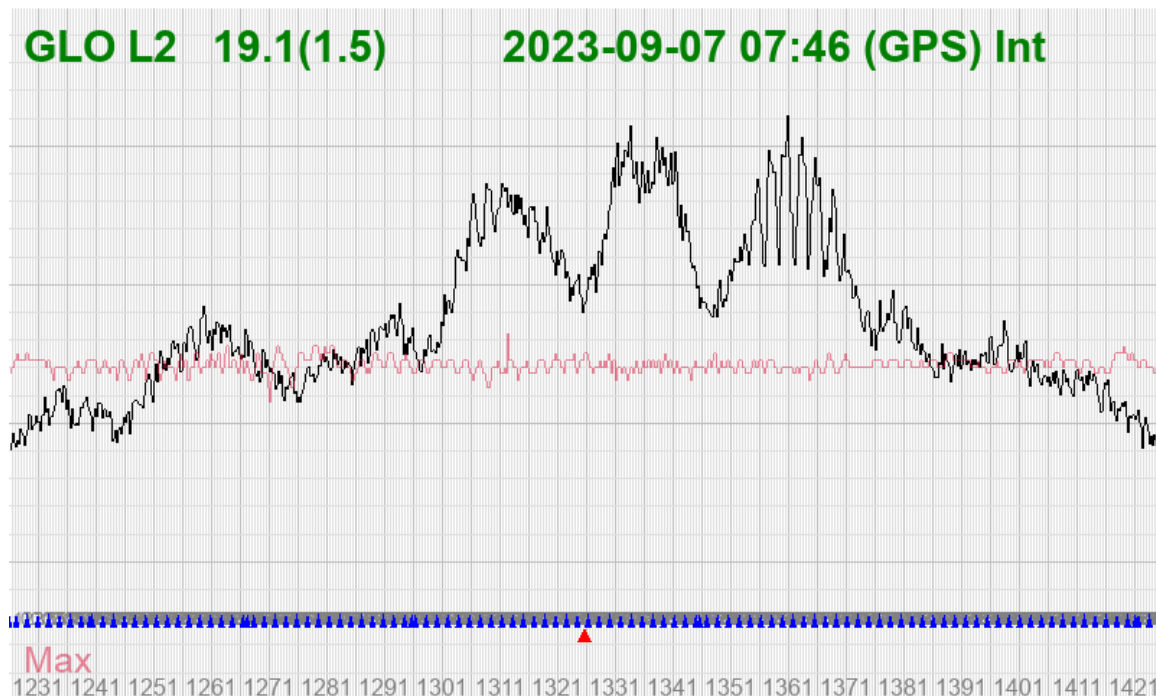
Prvi proizvajalec sprejemnikov GNSS, ki je že v letu 2012 omogočil širšemu krogu geodetskih uporabnikov možnost spremljanja spektra signalov GNSS, je bil Javad GNSS Inc., ki je predstavil sprejemnike Javad Triumph-VS, Javad Triumph-LS in Javad Triumph-LSA. Sprejemniki omogočajo grafično in numerično 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].

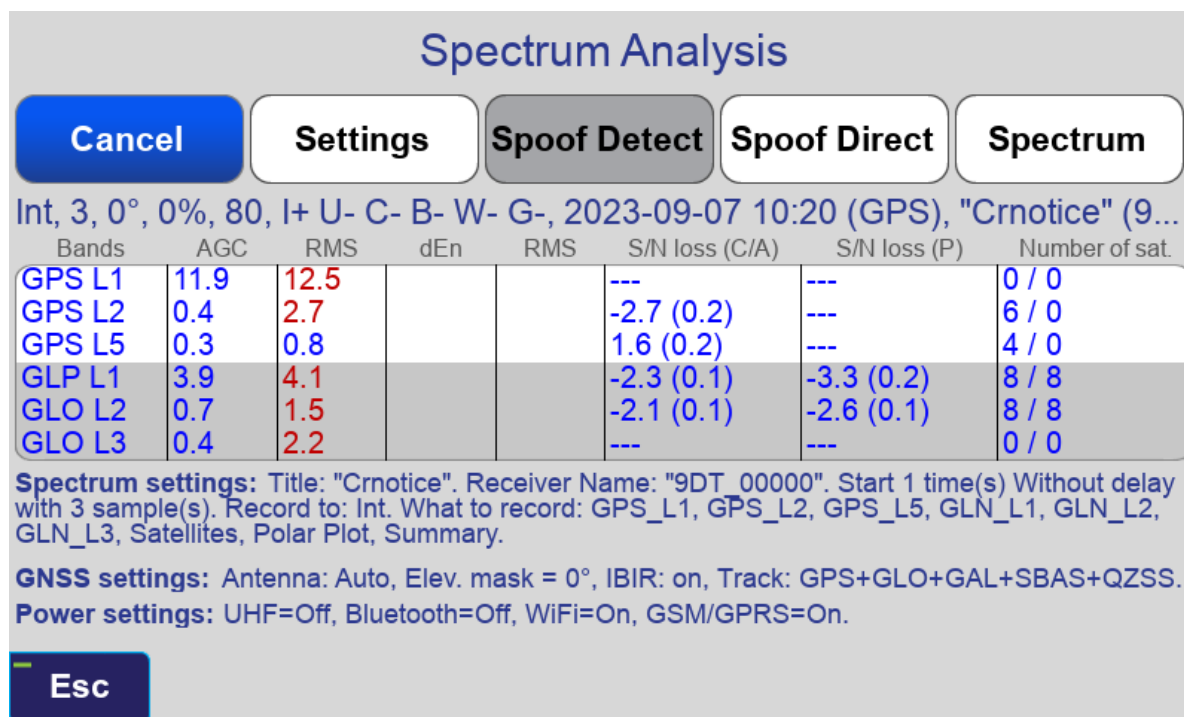
Sprejemniki Javad Triumph so bili prvi na tržišču sprejemnikov GNSS za geodetsko rabo, ki so omogočali spremljanje spektrov signalov GNSS (Slika 29) v realnem času ter vpogled v numerične vrednosti ojačevanja signalov.

41



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

42

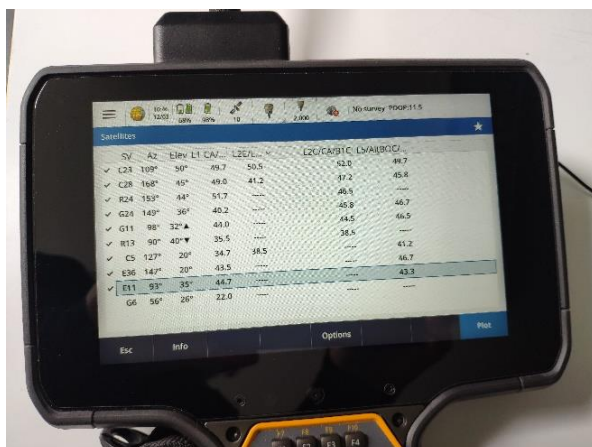
Proizvajalec Leica Geosystems AG (Heerbrugg, Švica) omogoča celostno spremljanje motenj na stalnih postajah. Serija sprejemnikov Leica GR/GM s sistemom RefWorkx 4.20 ublaži motnje signala, da lahko stalne postaje delujejo neprekinjeno tudi v zahtevnih radio-frekvenčnih okoljih. Pri sprejemnikih, ki jih 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).

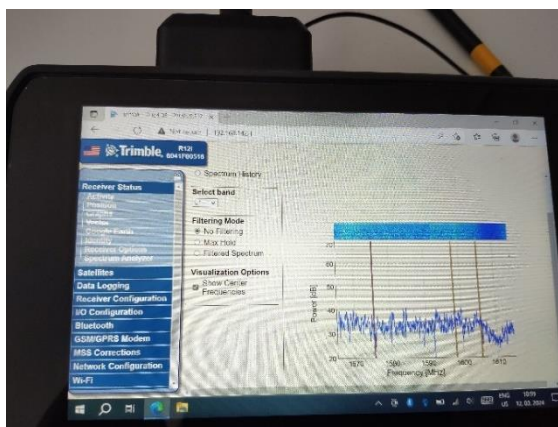
Čeprav nimamo direktnega vpogleda v signale, ki so obdelani z vgrajenimi siti, proizvajalec zagotavlja zanesljivo sledenje signalom GNSS z vgrajenimi siti.

1.2.3 Odkrivanje, ocena in odstranitev motenj z geodetskimi terenskimi sprejemniki Trimble Inc.

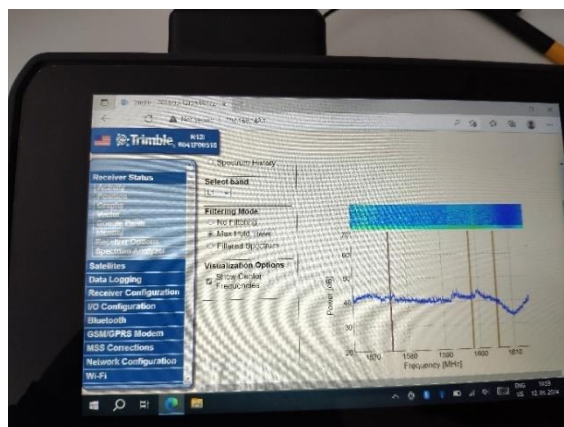


Slika 32: Spremljanje vrednosti SNR v realnem času (sprejemnik Trimble R12i).

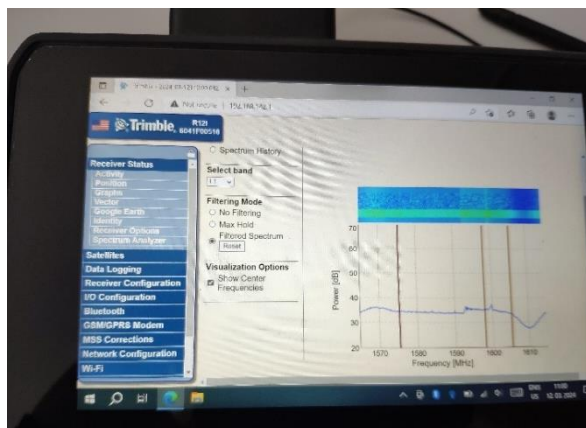
Z geodetskimi merskimi sprejemniki GNSS proizvajalca Trimble Inc. lahko na terenu v realnem času pojav motenj spremljamo tako preko vpogleda v vrednosti SNR (Slika 32), v primeru določenih sprejemnikov (preverjeno za Trimble R12i) pa je mogoče v realnem času mogoče grafičen vpogled v nefiltriran, delno filtriran in filtriran signal (Slika 33).



(a)



(b)



(c)

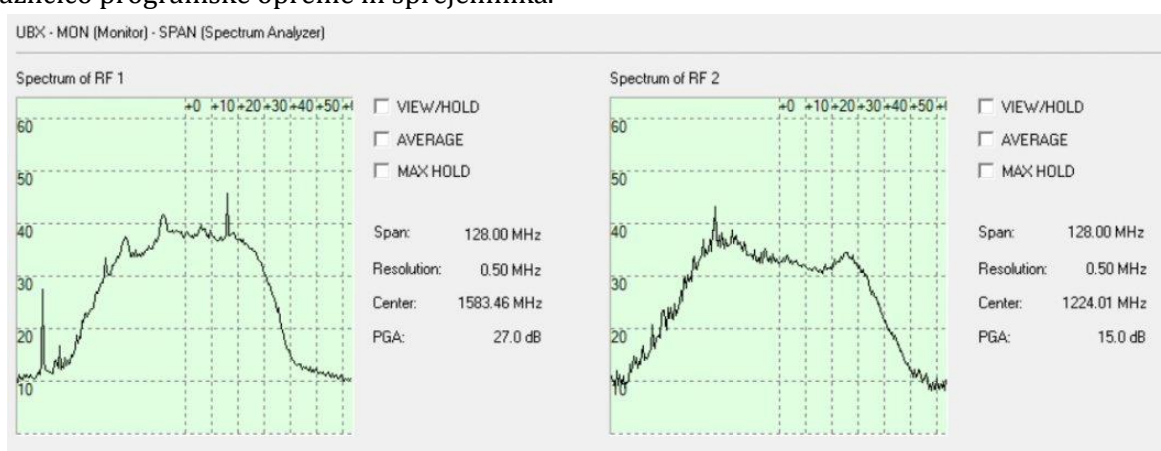
Slika 33: Spremljanje spektra signalov GNSS v realnem času s sprejemnikom Trimble R12i.

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.

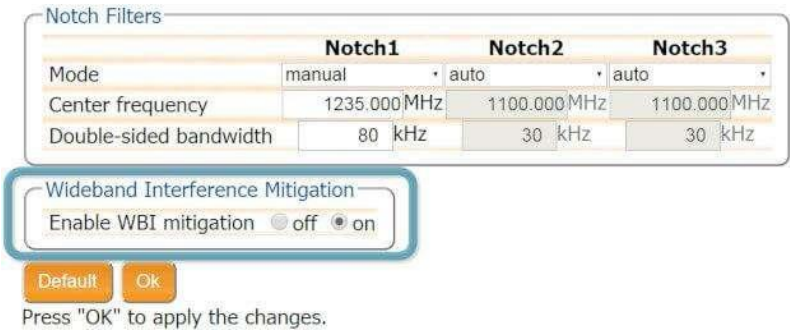


Slika 34: Spremljanje spektra signalov GNSS v realnem času s sprejemnikom ZED-F9P, program u-center.

1.3.2 Spremljanje spektra v sprejemniku Septentrio Mosaic x5

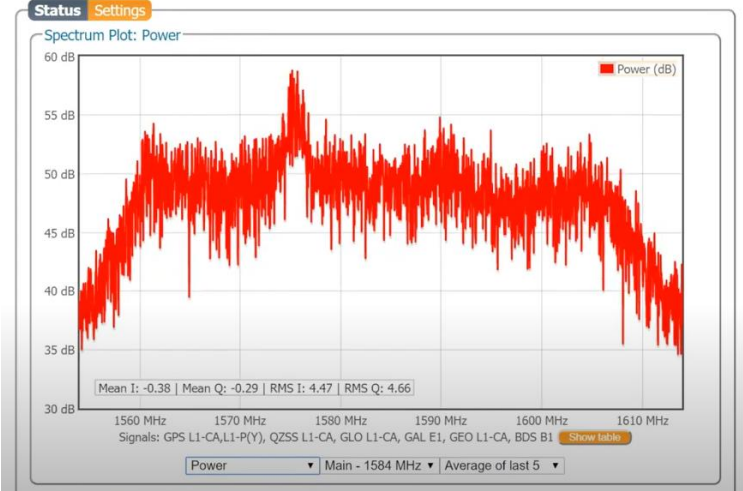
Sprejemnik Septentrio Mosaic x5 je po navedbah proizvajalca opremljen z algoritmi za prepoznavanje motenj signala in lažnih sporočil, čeprav metode podrobno niso znane. Septentrio sprejemniki GNSS imajo napredno tehnologijo odkrivanja motenj AIM+ (ang. *Advanced Interference Monitoring and Mitigation*). 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).

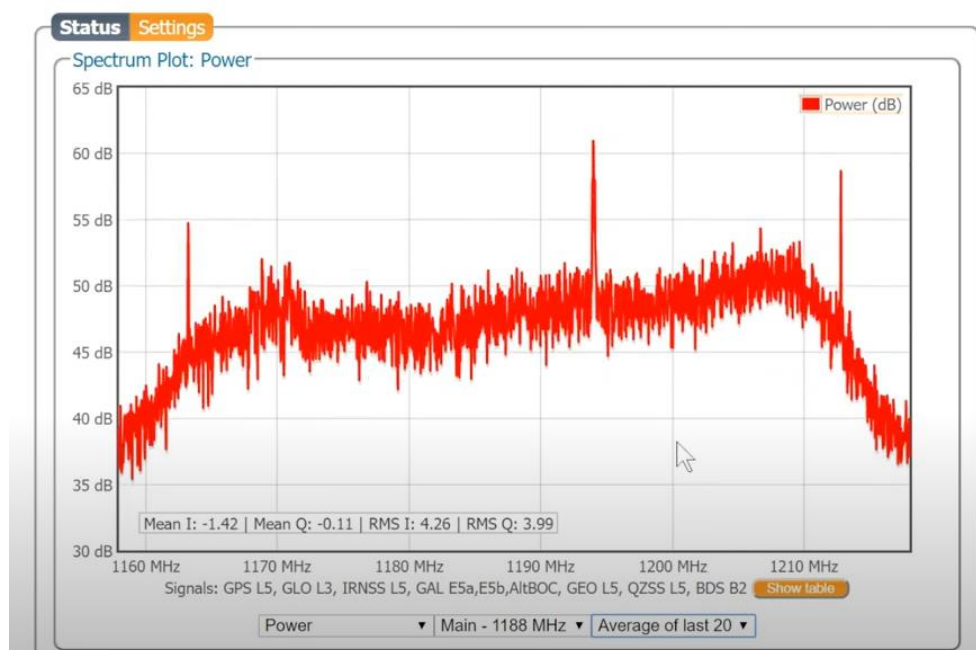


Slika 36: Spekter signalov na L1, ki ni obremenjen z motnjami. Prilagodljiv sistem za zmanjšanje širokopasovnih motenj; možnost uporabe ali izključitve sit – izris.



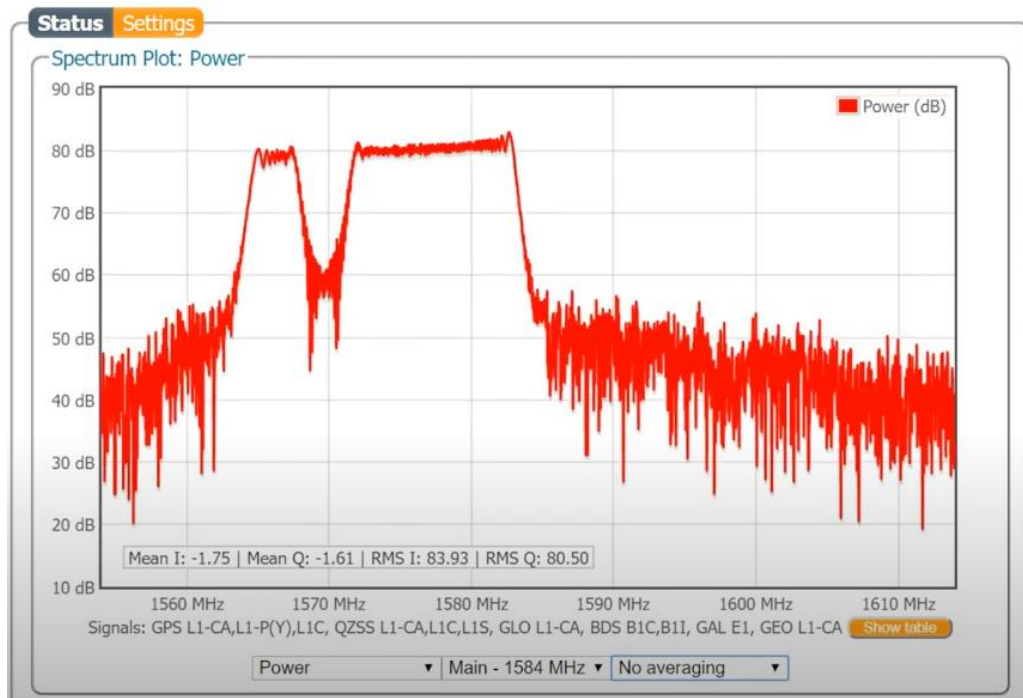
Slika 37: Izbor signalov, kjer nas zanima spekter signalov.

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.

46



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 skenograme 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.

49

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 RINEX-datotekah.

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

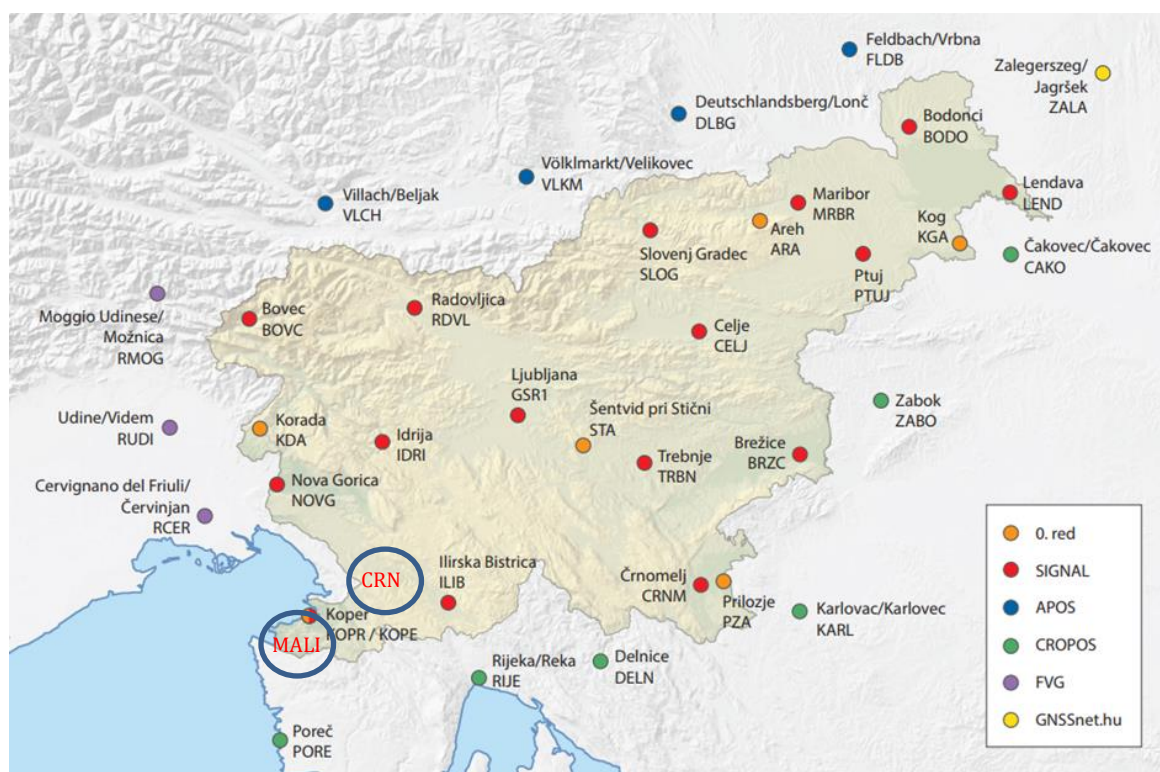
znak	opis
nnnn	4 znaki za ime točke
M	številka stebra (načina postavitve – (ang. Monument – M). Trenutno se uporablja samo (0)
R	Številka sprejemnika. Trenutno se uporablja samo (0).
CCC	ISO-kratica države
S	vir podatkov: “R” = sprejemnik (ang. <i>receiver</i>); “S” = pretok podatkov (ang. <i>stream</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.:

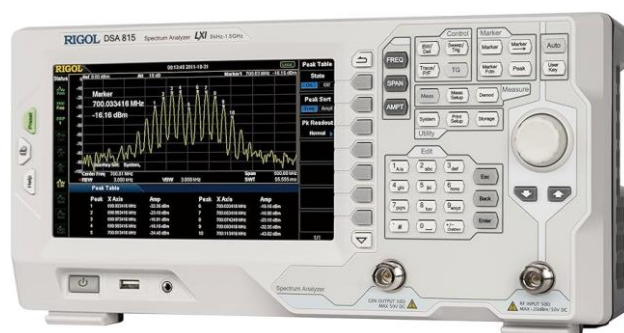
FGG300SLO_R_202409200900_15MIN_1s.* (* je npr. mp4)

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).



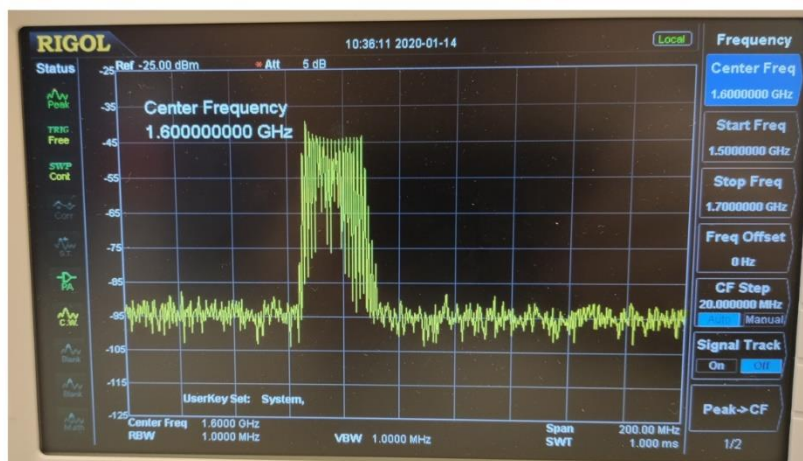
Slika 42: Primer prenosnega spektralnega analizatorja Rigol.

2.4 Predlog poročila rezultatov testiranja motilnikov v laboratoriju in na terenu

Motnje GNSS lahko uvrstimo med kibernetске 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].

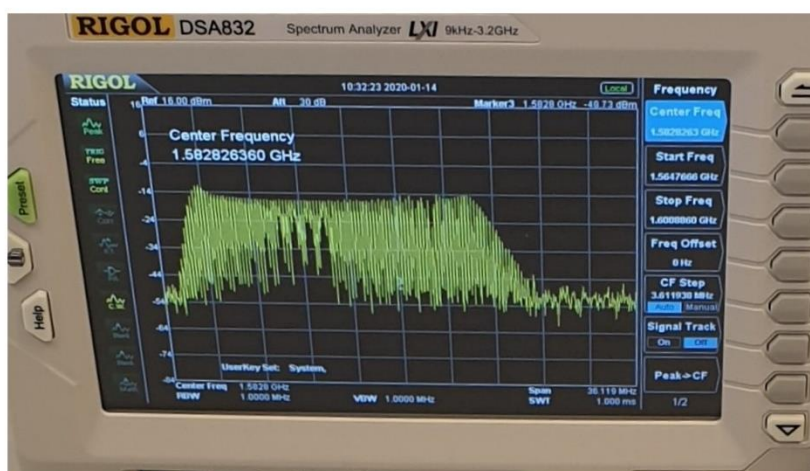
Cilj aktivnosti DS2-4 je torej podati predloge za scenarije testiranja motilnikov z radijskimi frekvenčnimi spektralnimi analizatorji, in sicer tako v laboratoriju kot na terenu v času, ko bomo izvajali motenje sprejemnikov GNSS. Zabeleženi podatki bodo osnova za kasnejša sklicevanja operaterjev na dogodke. 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.

Razmerje: izmerjena moč / 1 mW [dBm]



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

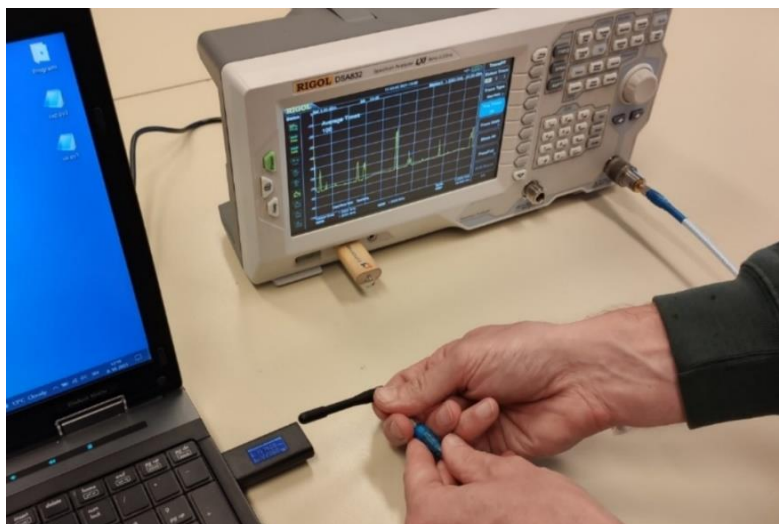
Razmerje: izmerjena moč / 1 mW [dBm]



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).

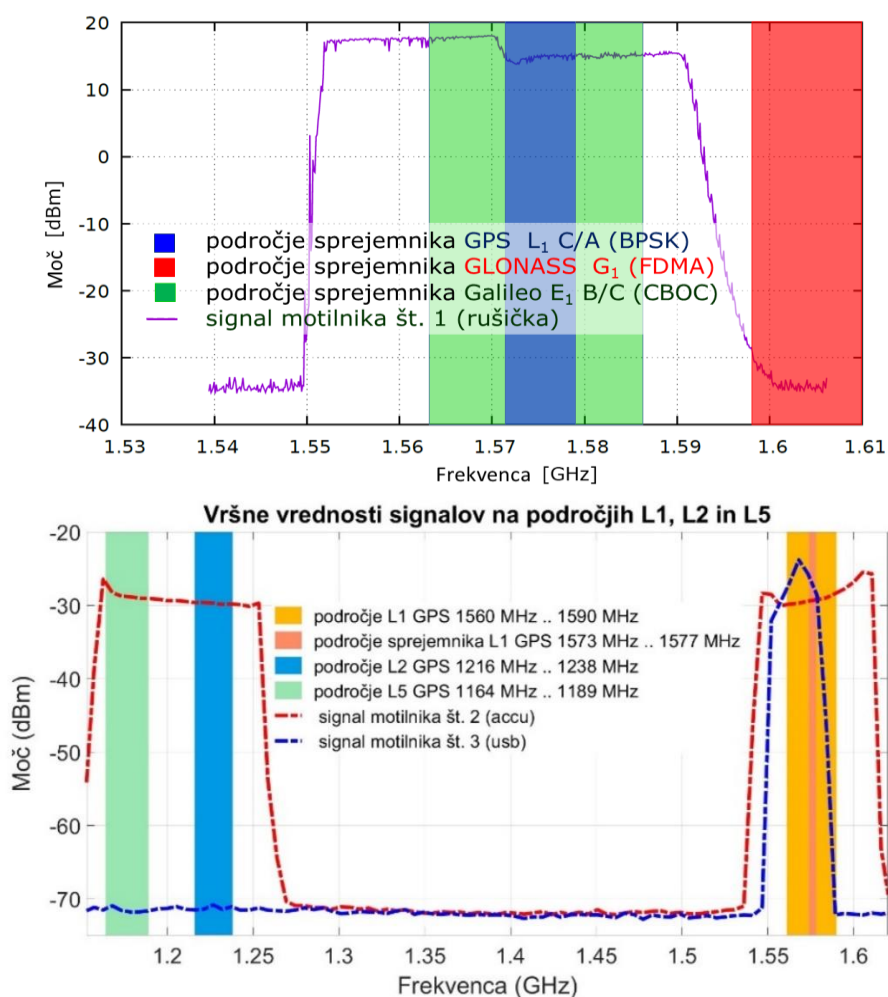
Za najbolj osnovni in za okolico popolnoma nezaznaven preizkus motilnikov beležimo signale motilnikov v nezašumljenem okolju laboratorija. Motilnike na spektralni analizator priključimo preko koaksialnega kabla in slabilnikov ter opazujemo signale na frekvenčnih področjih GNSS. Najprej pri izbranem zunanem 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.

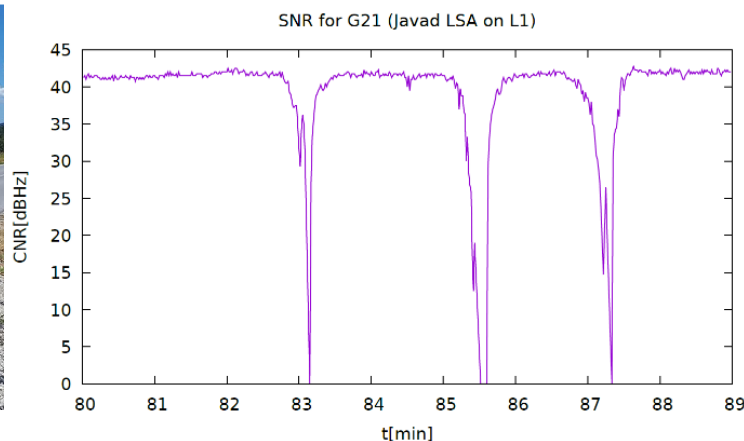
Pri izbrani razločljivosti spektralnega analizatorja lahko beležimo vršne moči in jih primerjamo s področji, v katerih sprejemniki GNSS dejansko delujejo (Slika 46).



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.

55

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.

56

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).

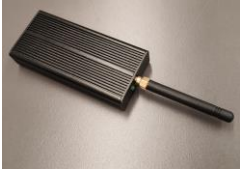
2.6 Izbor območij in opreme za testiranje

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

- 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;
- 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 Sečovlje ali Luka Koper);
- 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

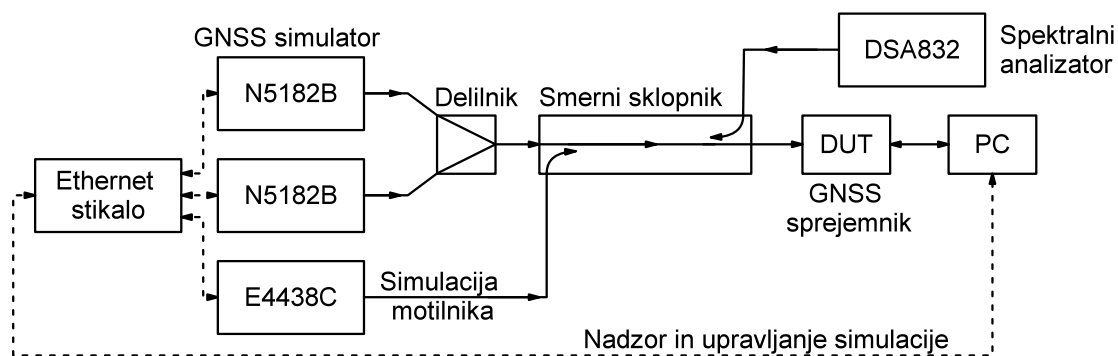
Seznam uporabljenih motilnikov in geodetskih sprejemnikov GNSS se bo med različnimi testiranjmi spreminjal, odvisen bo predvsem od razpoložljivosti opreme.

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.



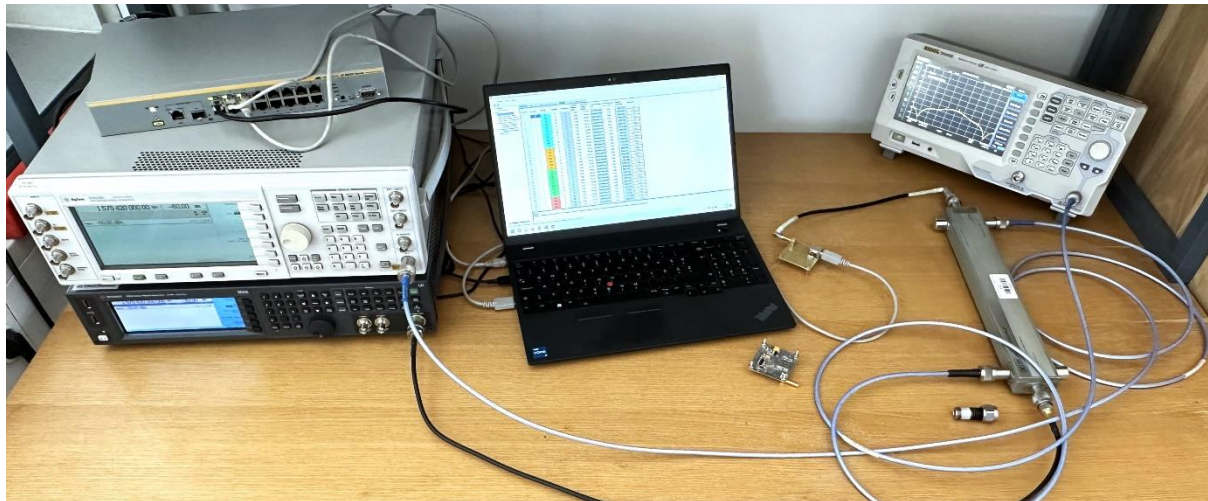
Slika 48: Merilna postavitve GNSS-simulacije v laboratorijskem okolju.

Slika 48 prikazuje merilno postavitve za simulacijo GNSS-sistemov ter motilnih signalov. Visokofrekvenčni izvori N5182B s pripadajočo programsko opremo ustvarjata dvo-frekvenčni signal GNSS vseh štirih glavnih sistemov (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). Predvajata statičen ali dinamičen scenarij po vnaprej 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 vnaprej. 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 postavitve 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

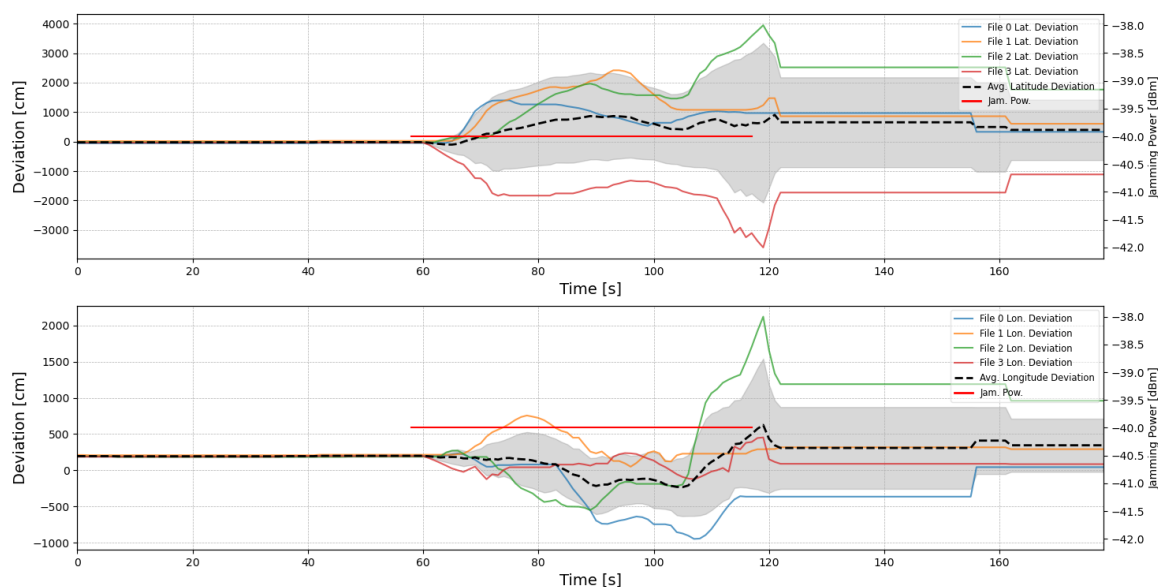
omogoča simulacijo večpotja in simulacijo pogreška antene, upad jakosti oddaje, urbane kanjone, itd. Spremenljivke se torej selijo v simulacijo).

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

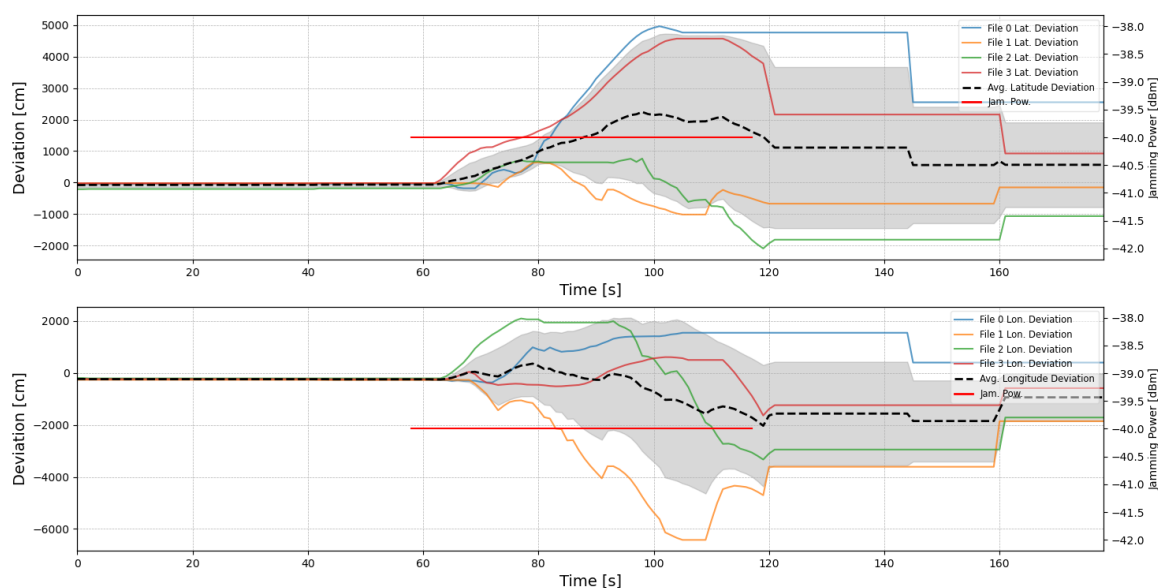


Slika 49: Fotografija testne merilne postavitve v laboratoriju.

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



Slika 51: Deviacija položaja ob motenju z eno-frekvenčnim (CW) motilnikom - GP-01

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 opremi. 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: še ni bilo meritev.

Ime in oznaka točke	Koordinate	Opomba	Datum izmere
Mališa (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	planirano konec septembra 2025
Postojna 2	45.77137870° N 14.20138529° E	nenamerne motnje (v bližini ovira), priporočilo GURS	planirano konec septembra 2025
Grmada pri Ribnici	45.81294104° N 14.69534714° E	nenamerne motnje, v bližini oddajnik, priporočilo GURS	-še ni bilo izmere-
Boč	46.28345473° N 15.59243084° E	nenamerne motnje, oddajniki v daljavi, priporočilo GURS	-še ni bilo izmere-
Rogla	46.45237144° N 15.33168322° E	nenamerne motnje, priporočilo GURS	-še ni bilo izmere-

3.2.1 Nenamerne motnje – testno območje: stalna postaja FGG3

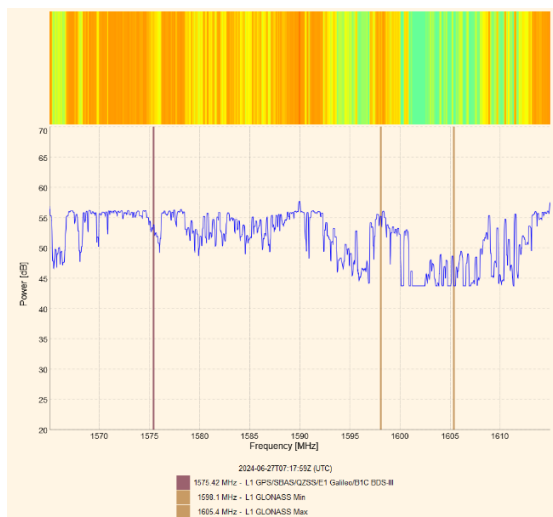
Nenamerne motnje signalov GNSS na stalni postaji FGG3 na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani lahko spremljamo kadarkoli (neprekinjeno delovanje postaje). Zaradi obsežnosti podatkov v nadaljevanju predstavljamo le bistvene izsledke, ki jih prikazujemo za dva zaporedna dneva izmere,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



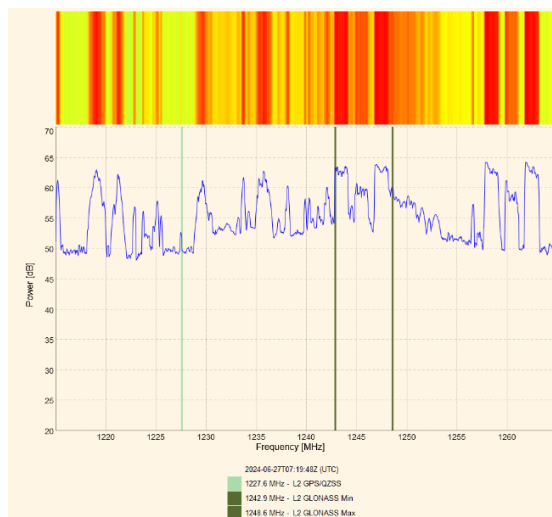
Slika 52: Stalna postaja na strehi Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, točka FGG3 ter dodatno izmera spektrov s sprejemnikom u-blox ZED-F9P.

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.



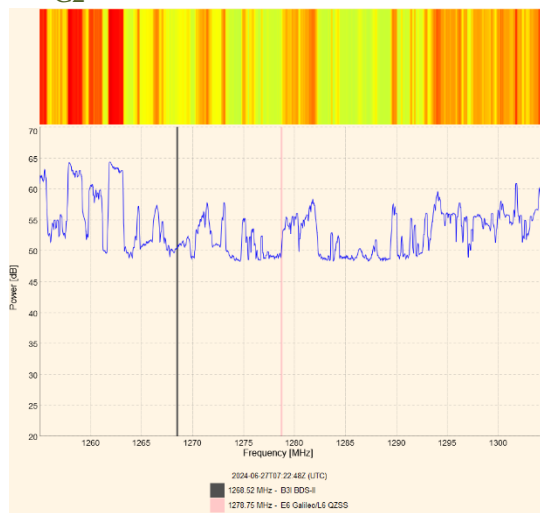
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



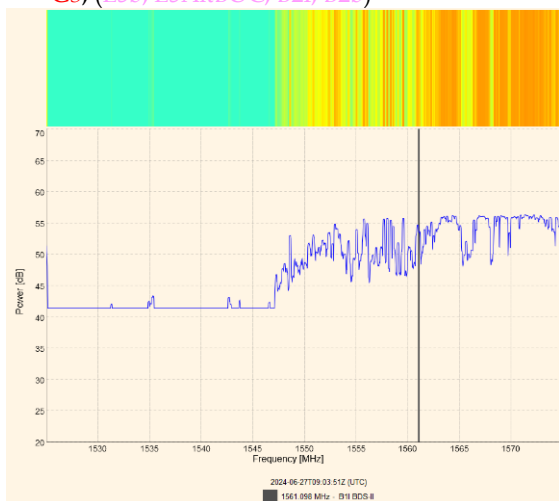
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



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



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

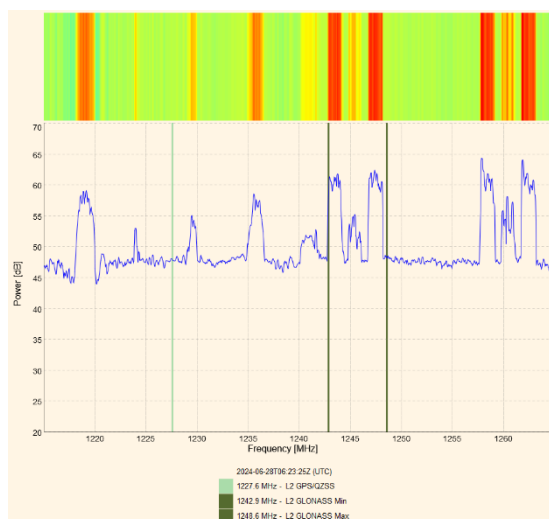


(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

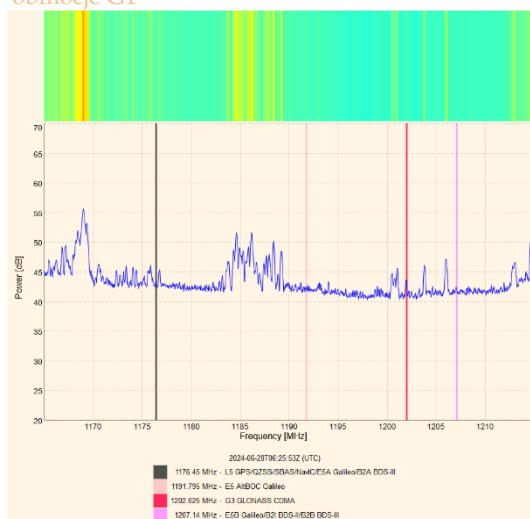
Slika 53: FGG3, 27/04/2024, 07:15 UTC do 08:25 - spektralne meritve s Trimble Alloy na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.



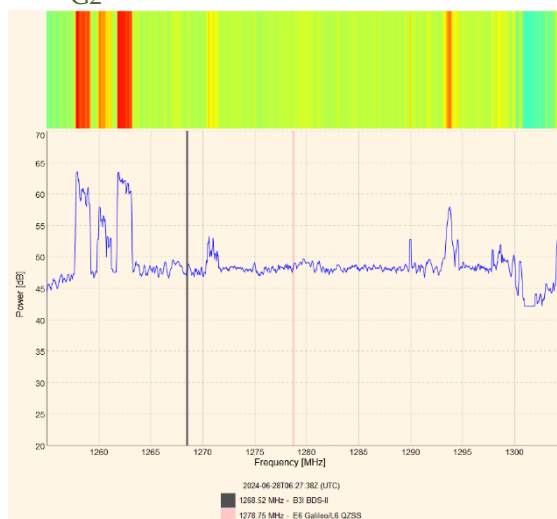
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



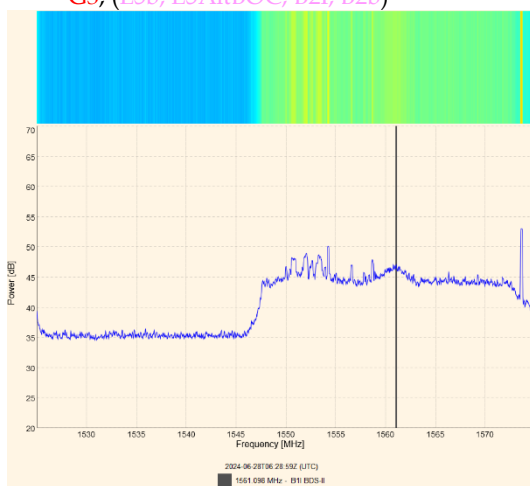
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



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



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

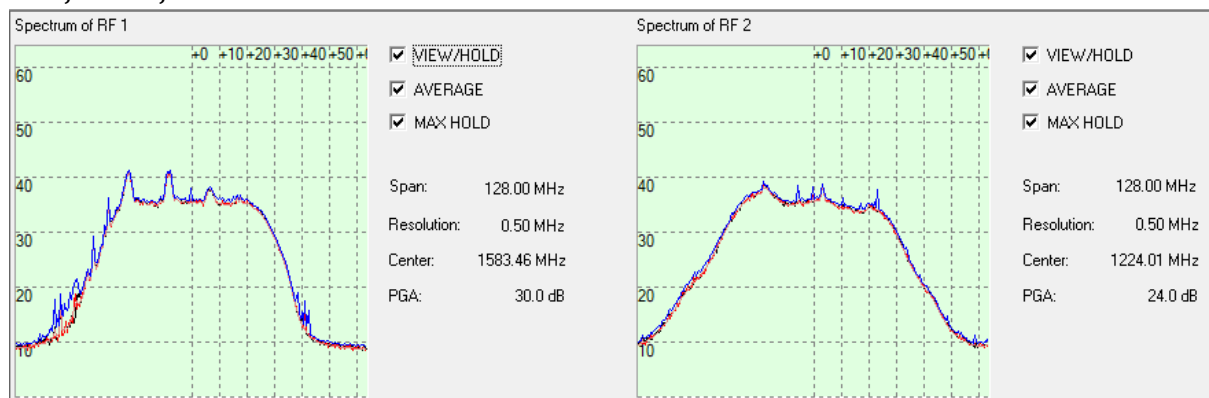


(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

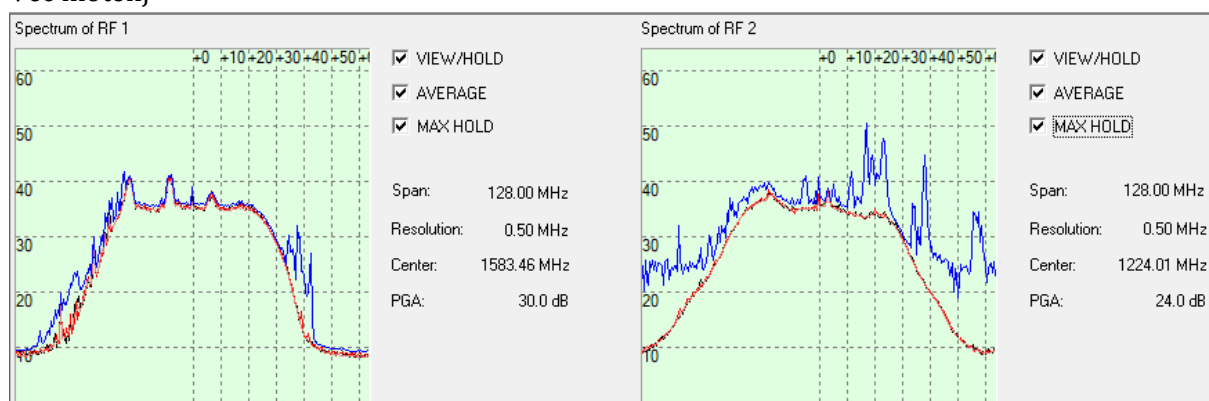
Slika 54: FGG3, 28/04/2024, 06:28 UTC - 07:40 UTC - spektralne meritve s Trimble Alloy na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.

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

Manj motenj



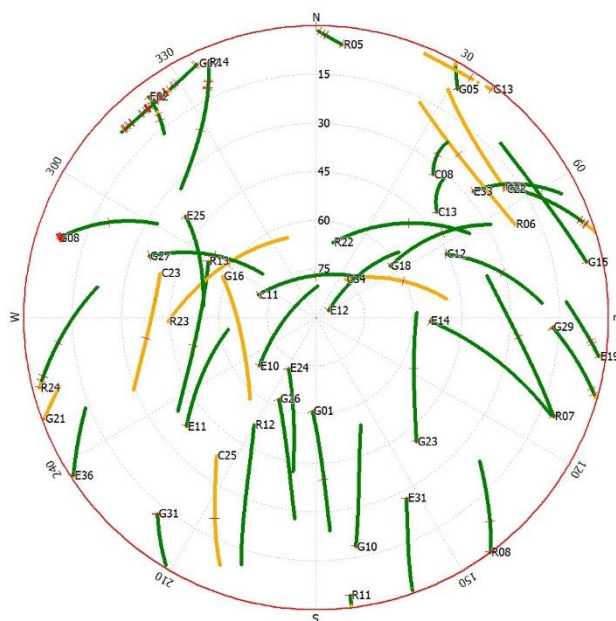
Več motenj



68

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).

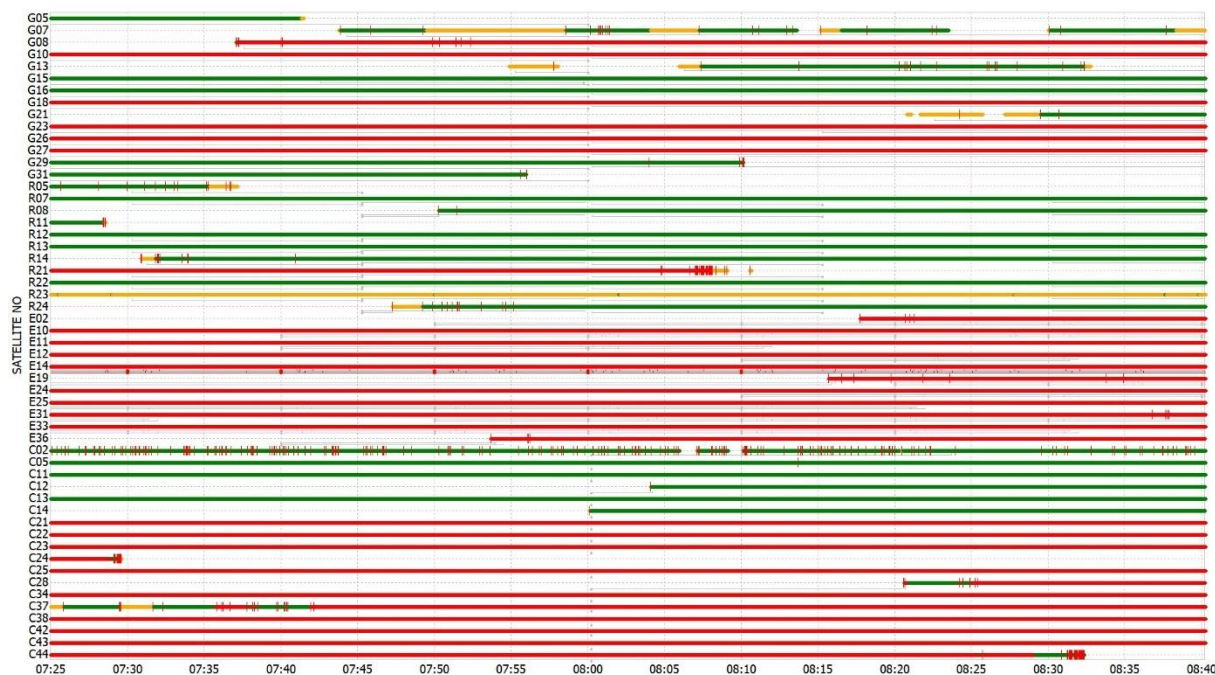
3.2.1.2 Prisotnost izgube signala ali nenadnih skokov signala



3.2.1.3 Prisotnost izgube signala ali nenadnih skokov signala

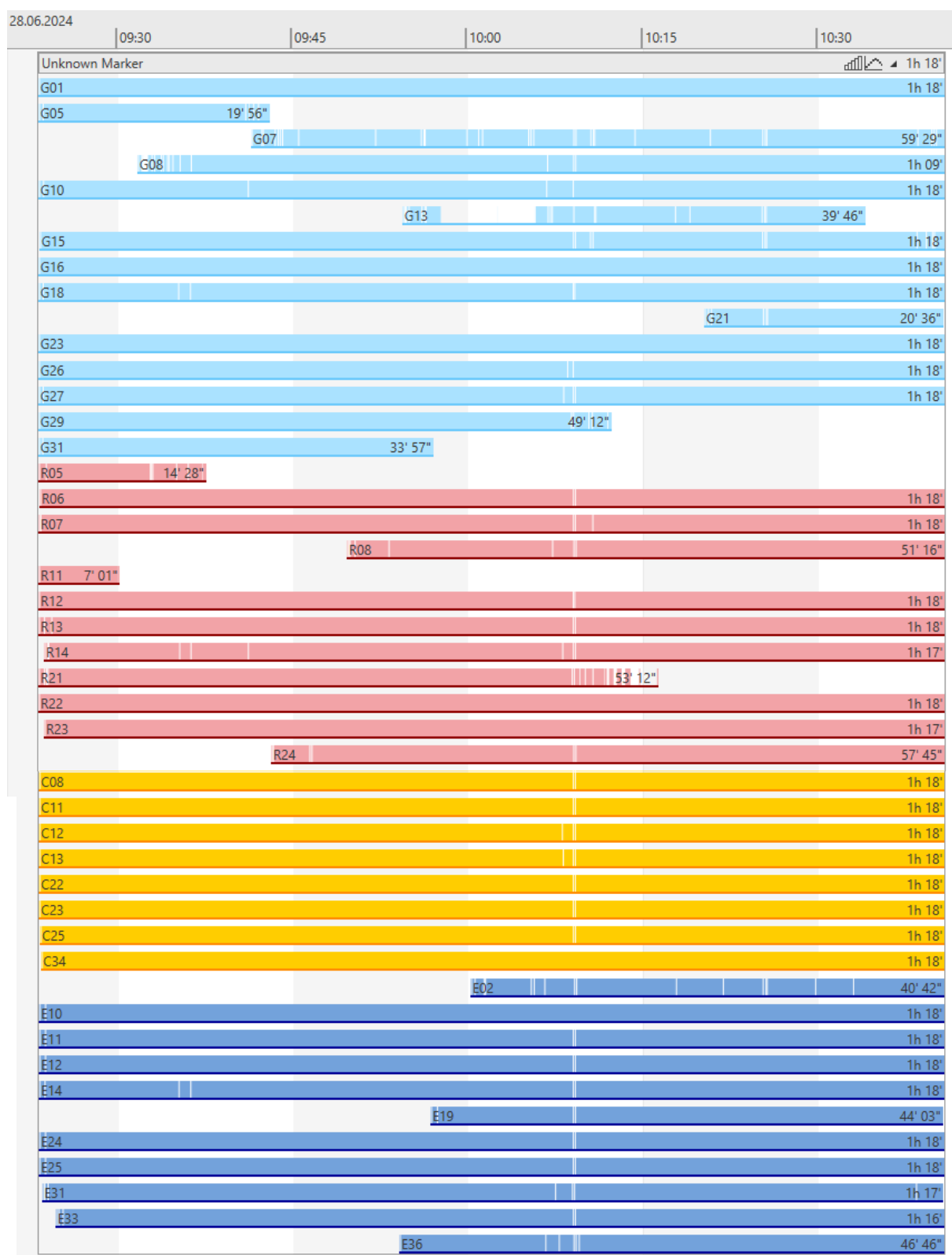


Slika 57: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami za skoke signalov (rdeče črtice); sprejemnik ZED-F9P.

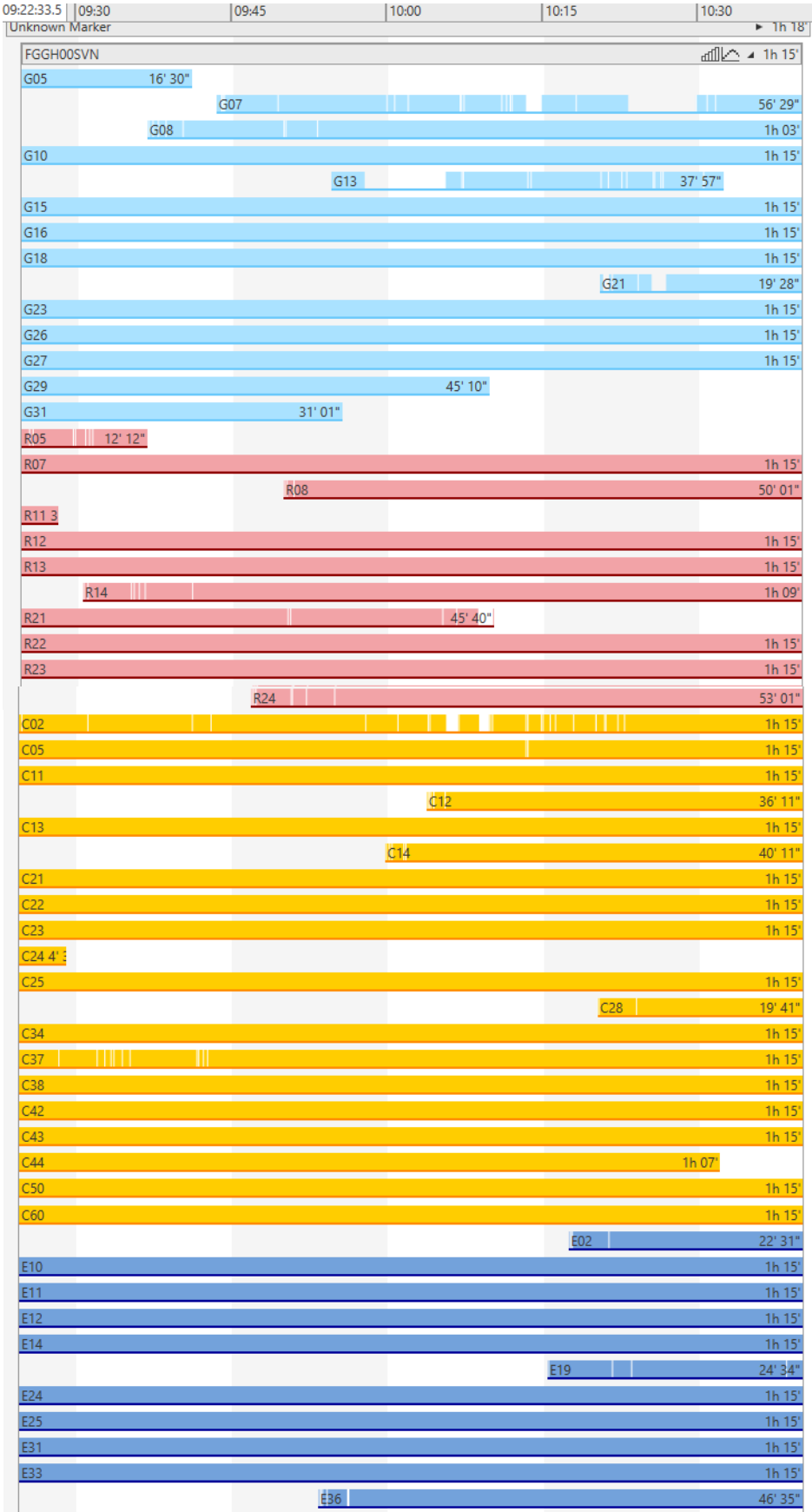


Slika 58: FGG3, 28/06/2024, 07:25 – 08:40 UTC. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij z oznakami za skoke signalov (rdeče črtice); sprejemnik Trimble R12i.

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

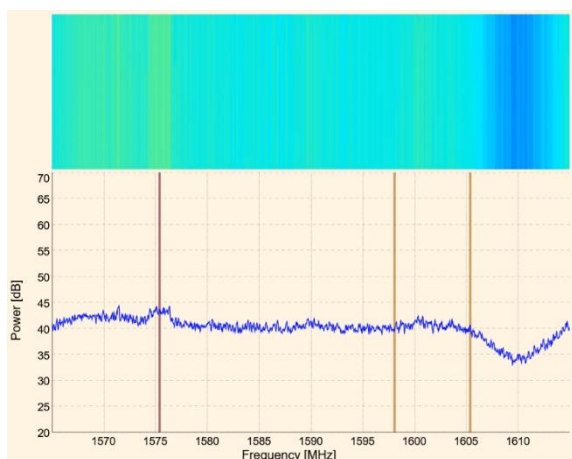
Priloge:



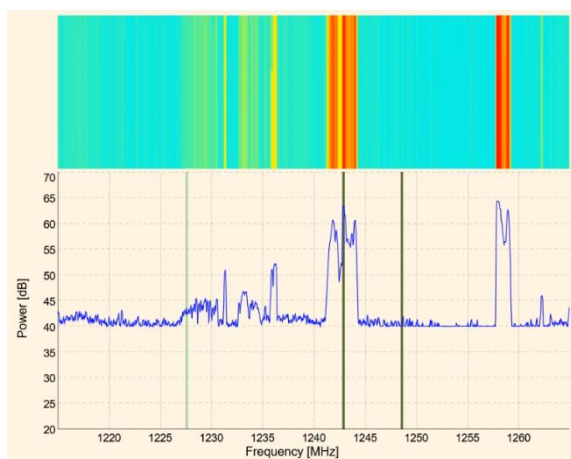
Slika 62: Terenski zapisnik izmere z dne 26/04/2024

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.

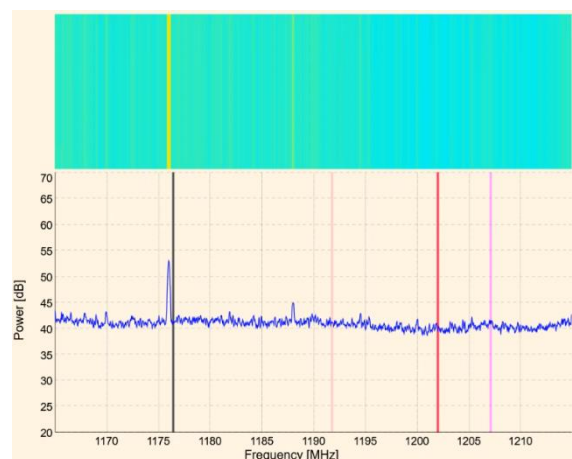
3.2.2.1 Spekter, določen s sprejemnikom Trimble R12i



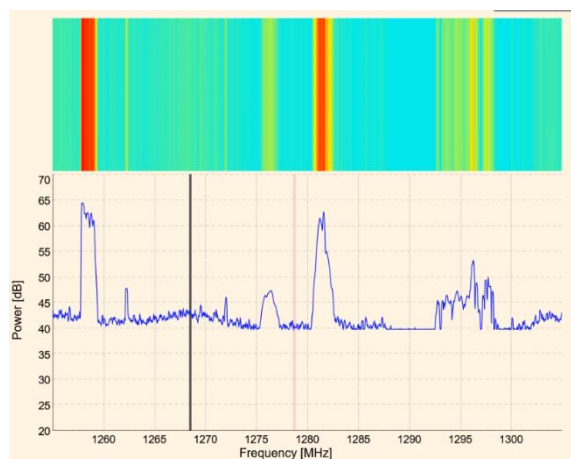
(f) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



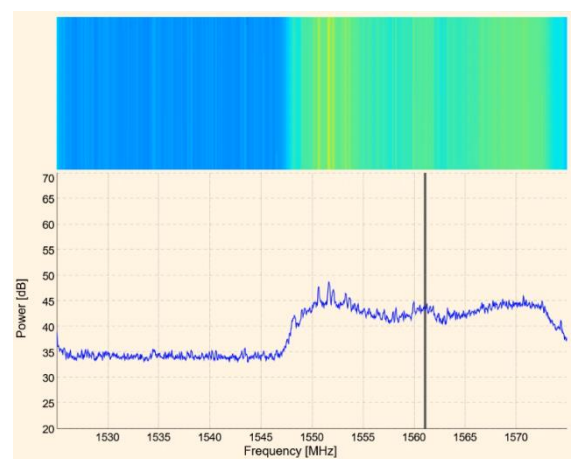
(g) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



(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

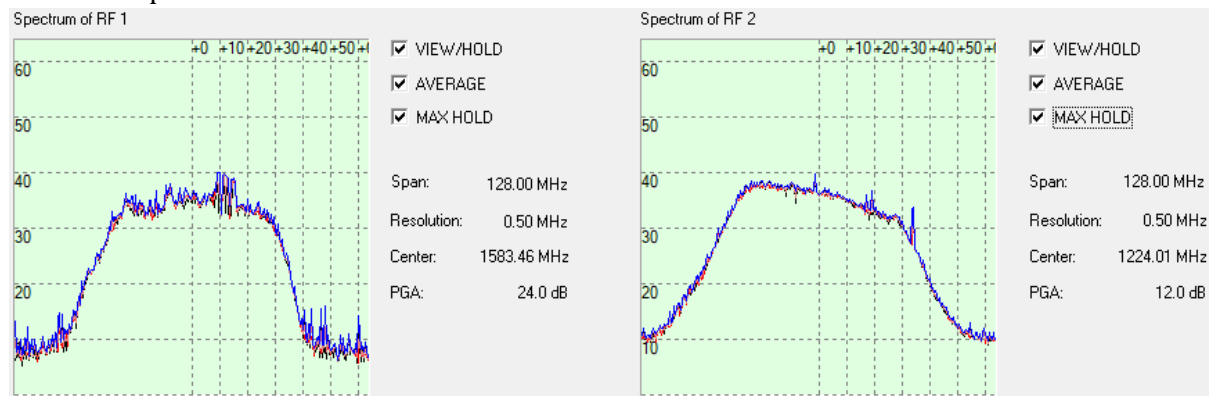
Slika 63: Malija, 26/04/2024 - spektralne meritve s Trimble R12i na širšem območju frekvenc L1, L2, L5, E6 in B1.

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

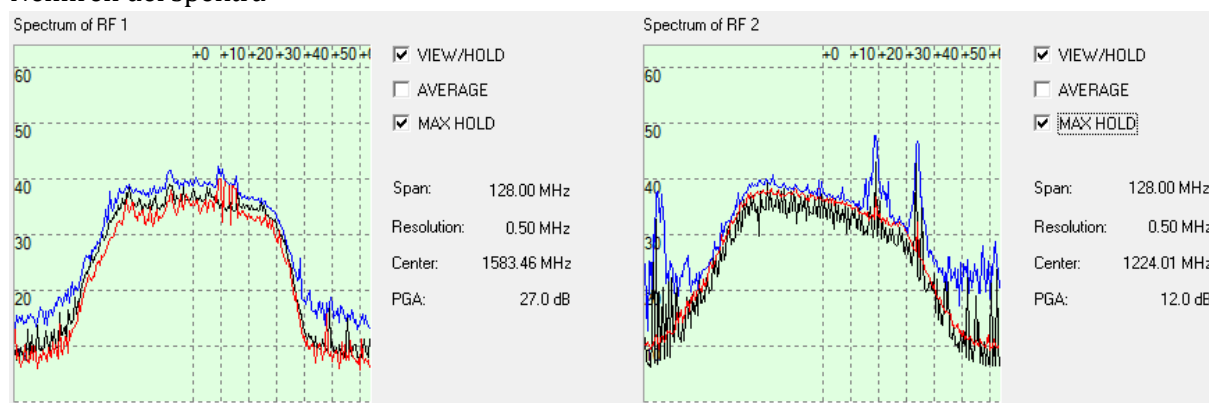
okoli 1175 MHz (blizu L5). Motnje so zaznane tudi v drugih frekvenčnih območjih, vendar ne sovpadajo s frekvencami signalov satelitov GNSS.

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

Miren del spektra



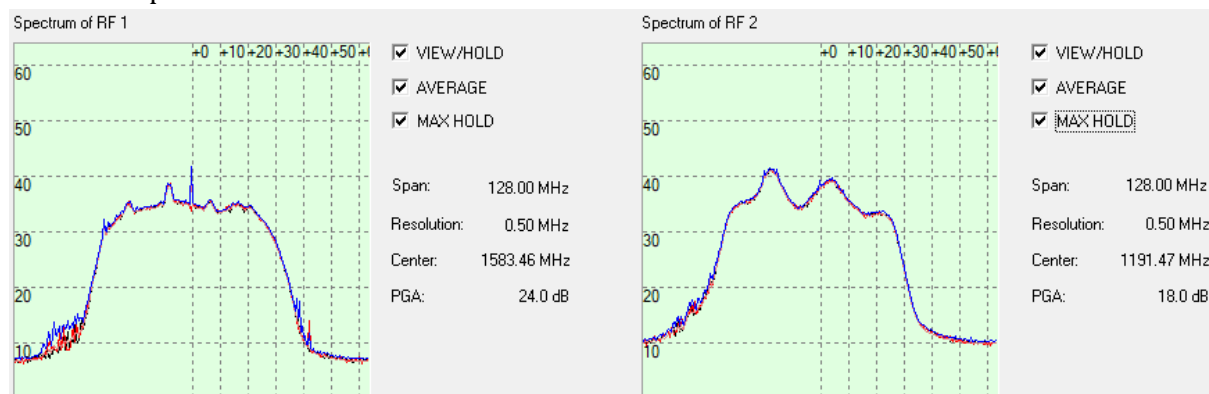
Nemiren del spektra



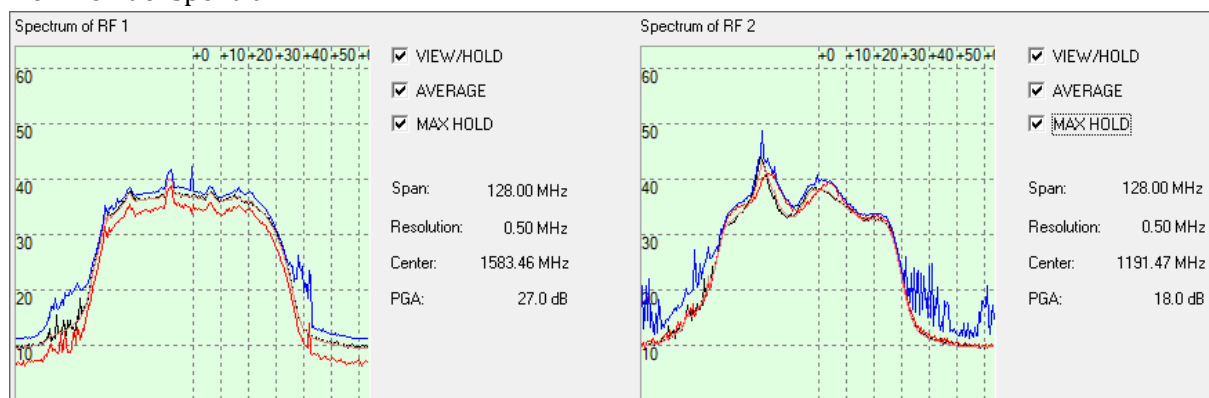
Slika 64: Malija, 26/04/2024 - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P. Levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz. Zgoraj: meritve v mirnem delu (06:29:38 UTC), spodaj: meritve v trenutku motenj (06:30:08 UTC).

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



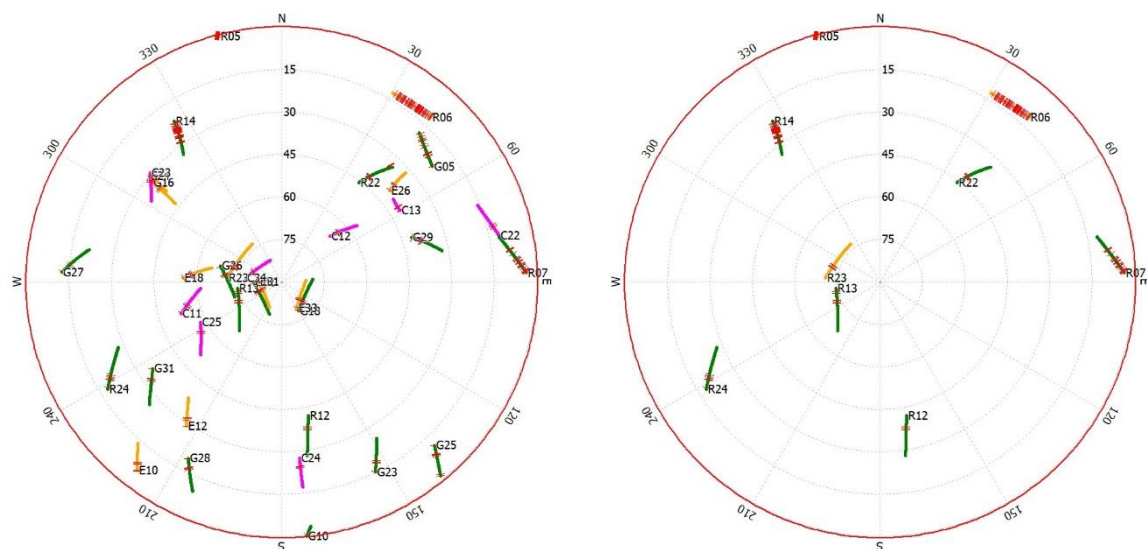
Nemiren del spektra



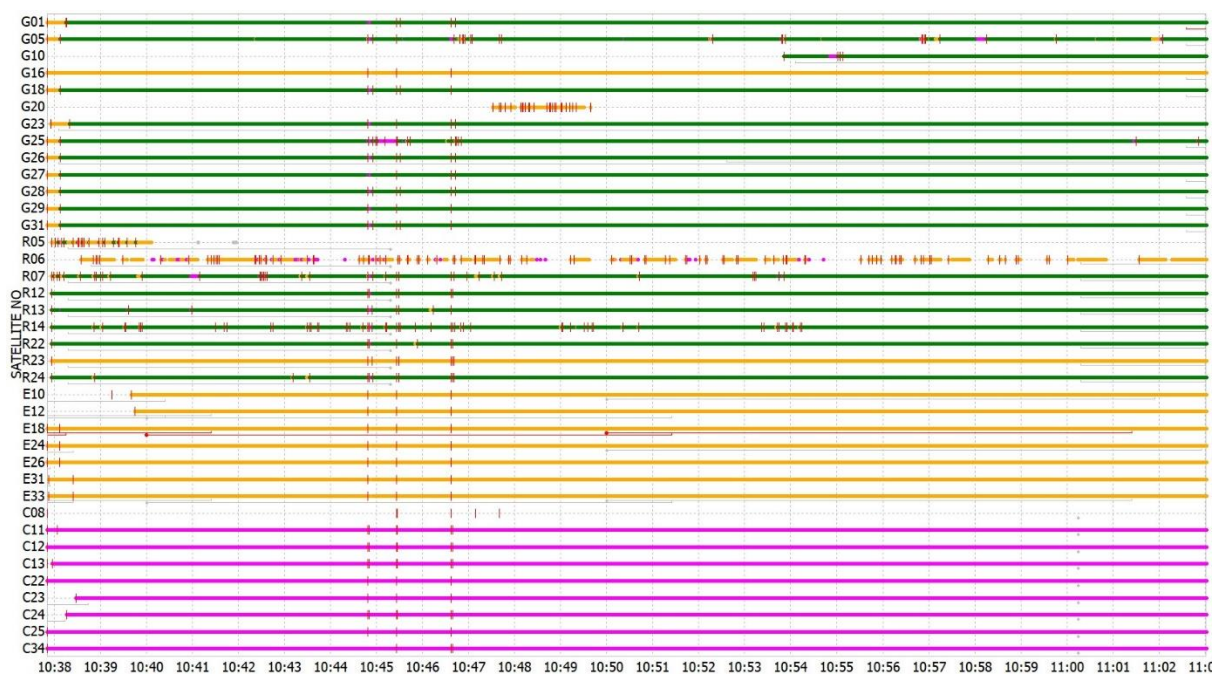
76 **Slika 65:** Malija, 09/05/2024 - spektralne meritve z u-blox NEO-F10N. Levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz. Zgoraj: meritve v mirnem delu (14:27:30 UTC), spodaj: meritve v trenutku motenj (15:35:30 UTC).

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

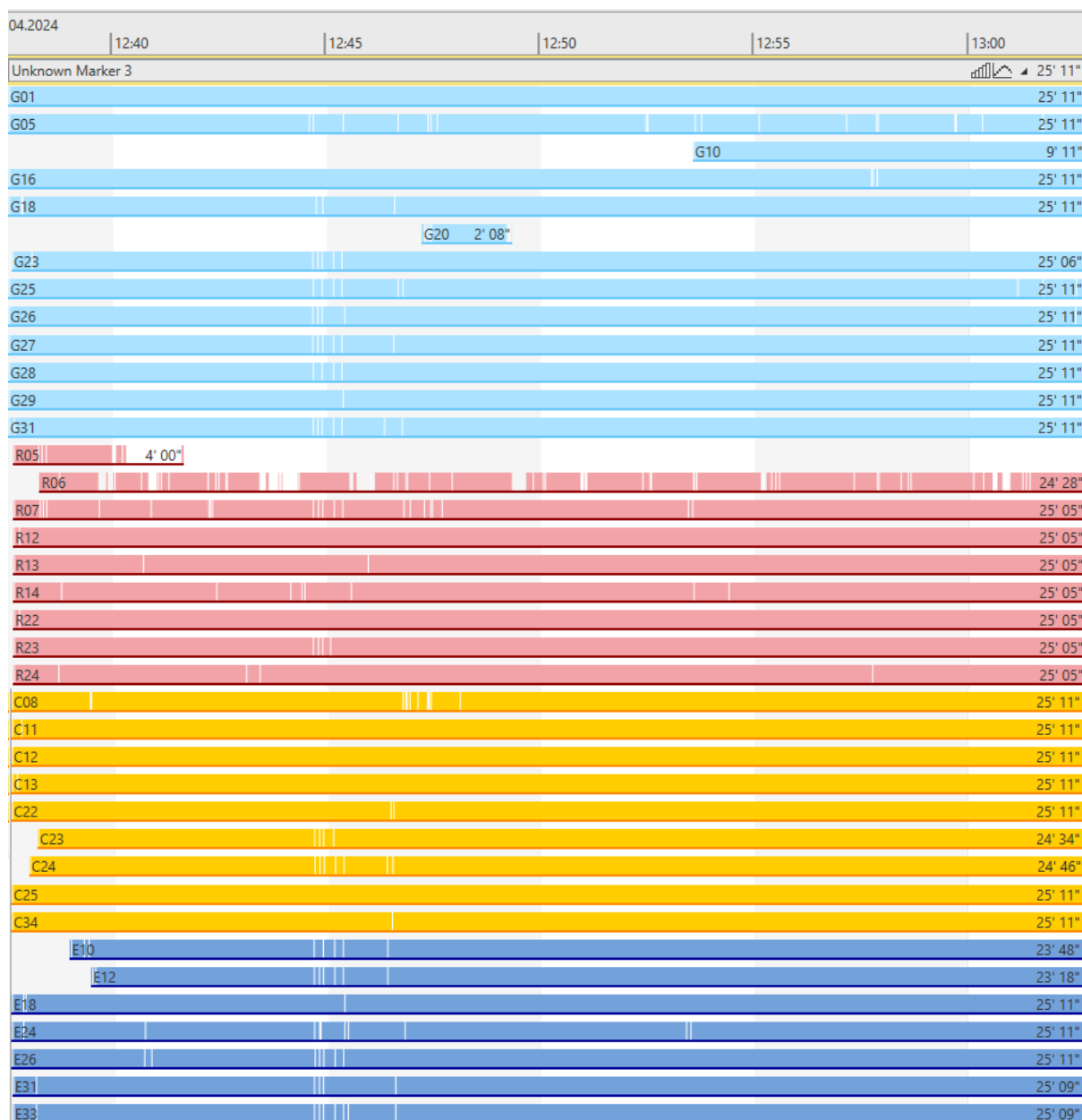


Slika 66: Malija, 26/04/2024. Signali vidnih satelitov vseh konstelacij (levo); signali satelitov GLONASS, ki so zelo obremenjeni s skoki.



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

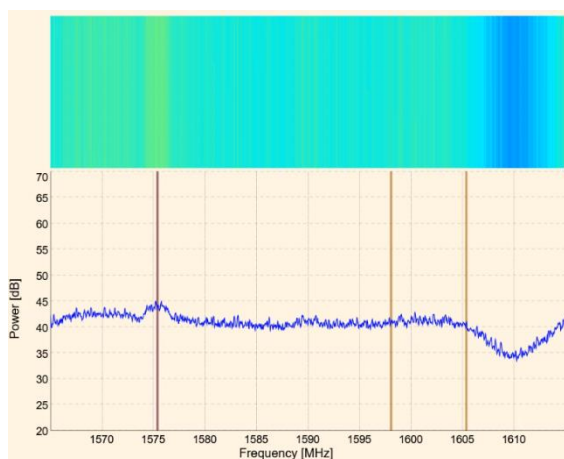
80

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

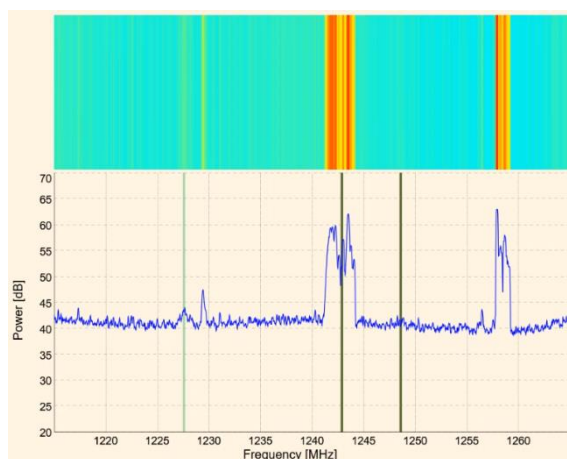
Delovišče	Livade
Datum	26. 4. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	11:20
Ura konca izmere (lokalni čas)	12:15
Namen	Izmera spektrov signalov
Prisotni na terenu	Veton Hamza Polona Pavlovčič Prešeren
Uporabljeni motilniki	/
Uporabljeni sprejemniki GNSS	Trimble R12i Ublox ZED-F9P
Uporabljeni spektralni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

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

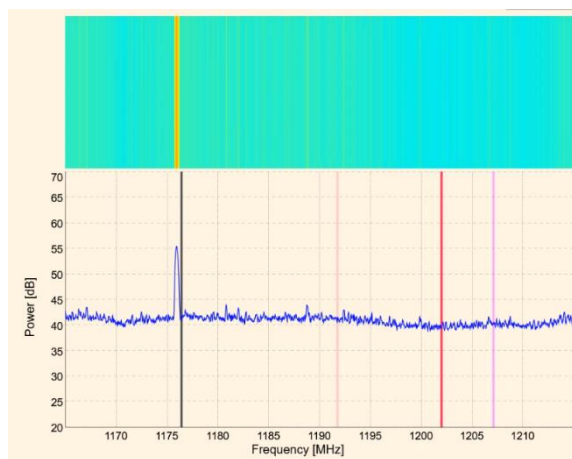
3.2.3.1 Spekter, določen s sprejemnikom Trimble R12i



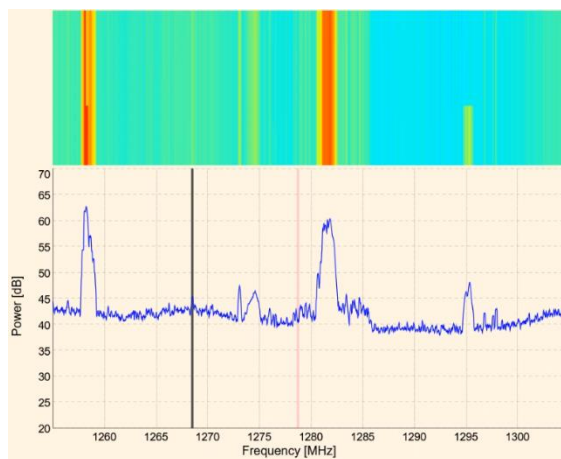
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1



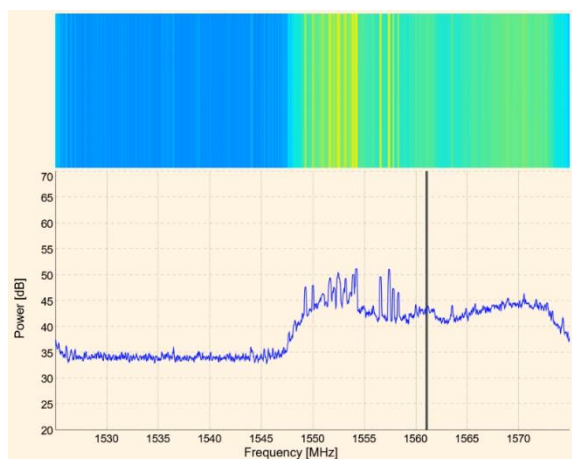
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2



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



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



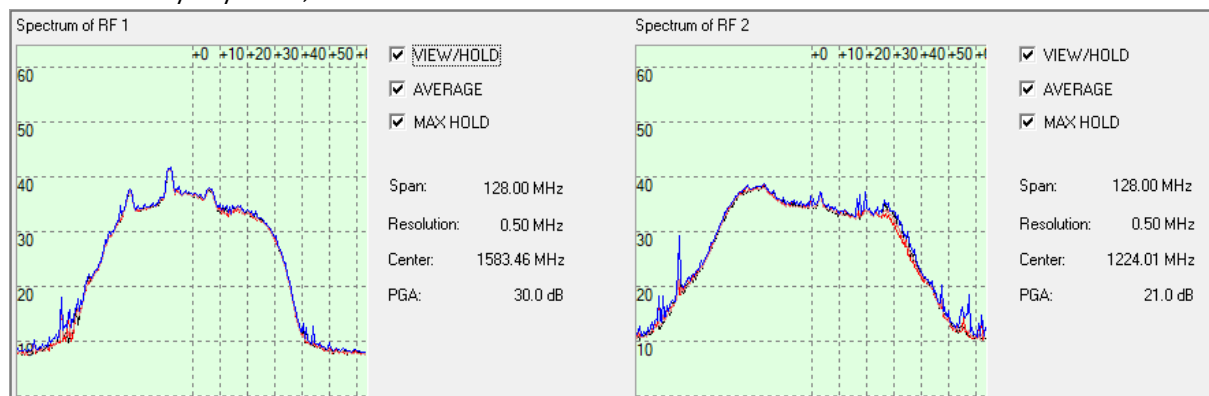
(e) izris B1 z označeno frekvenco B1

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

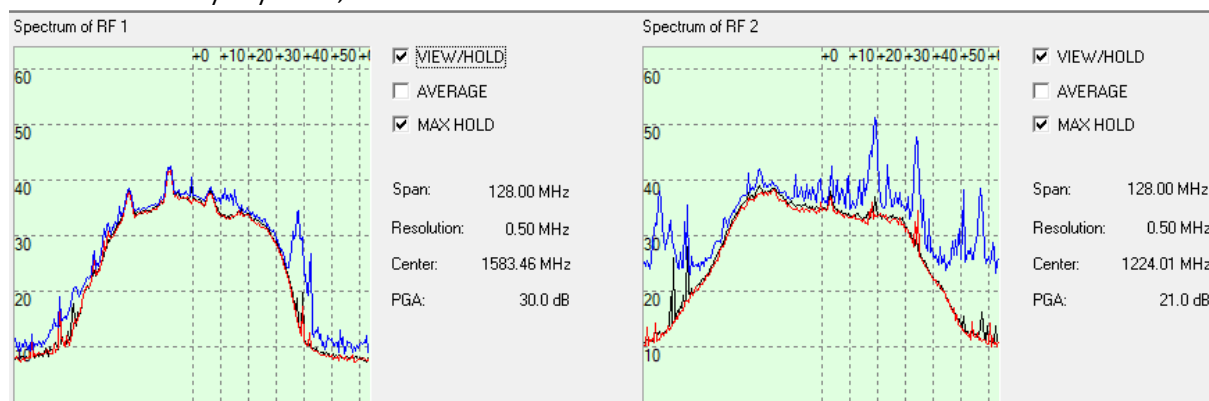
Spektralne meritve s sprejemnikom Trimble R12i so pokazale motnje v območju GLONASS G2 signalov in tik pred osredinjenim območjem signalov L5 (Slika 72). Glede na spektralne meritve je bilo pričakovati, da bodo fazna opazovanja GNSS za satelite GLONASS ter Galileo bolj obremenjena s skoki signalov (Slika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

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

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

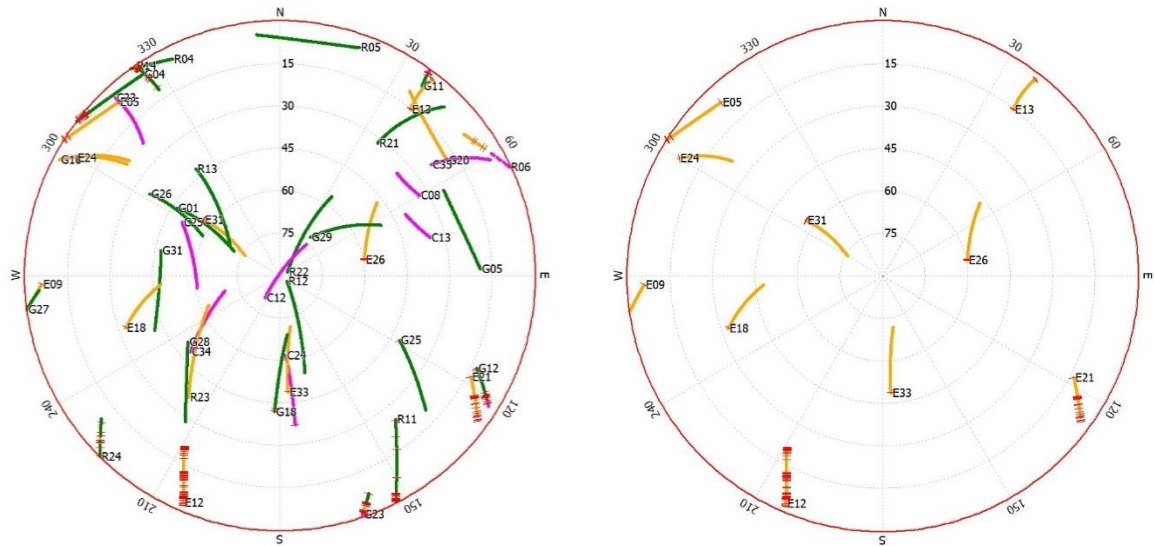


Nemiren del: 26/04/2024, 09:34:16

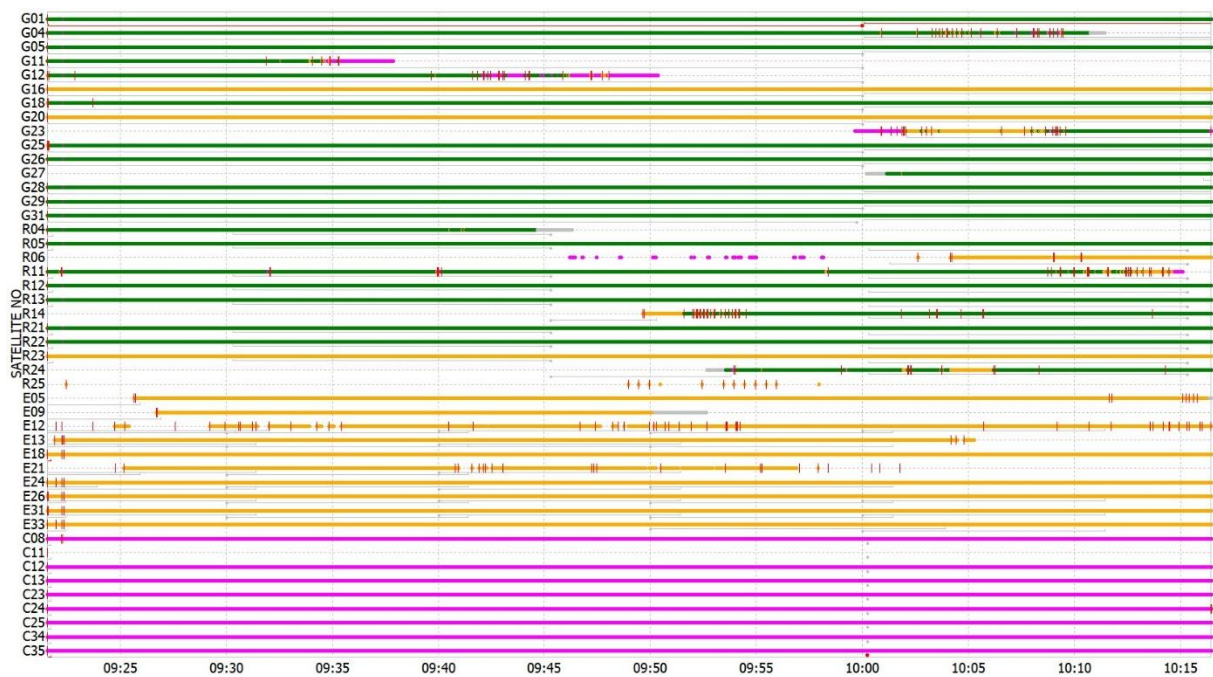


Slika 73: Livade, 26/04/2024, 09:21 – 10:16 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P; levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1224,01 MHz.

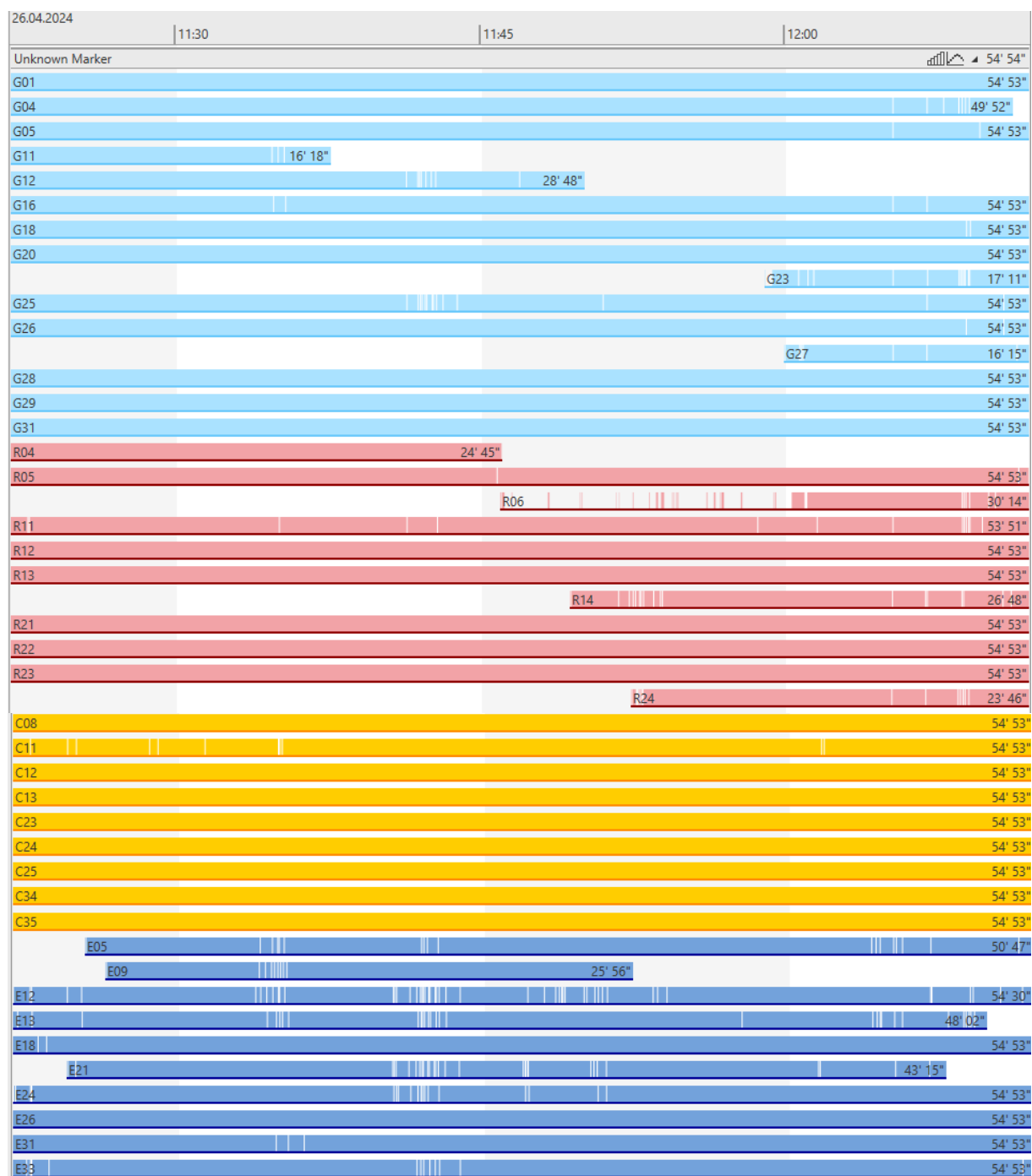
Spektralne meritve s sprejemnikom u-blox ZED-F9P so enako kot v primeru sprejemnika Trimble pokazale na motnje signalov GNSS, precej hitreje so tudi očitna večja odstopanja od spektrov signalov. Na dani točki so očitne večje motnje, ki se dogajajo občasno in trajajo nekaj sekund. Zgoraj (Slika 73) zato 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.

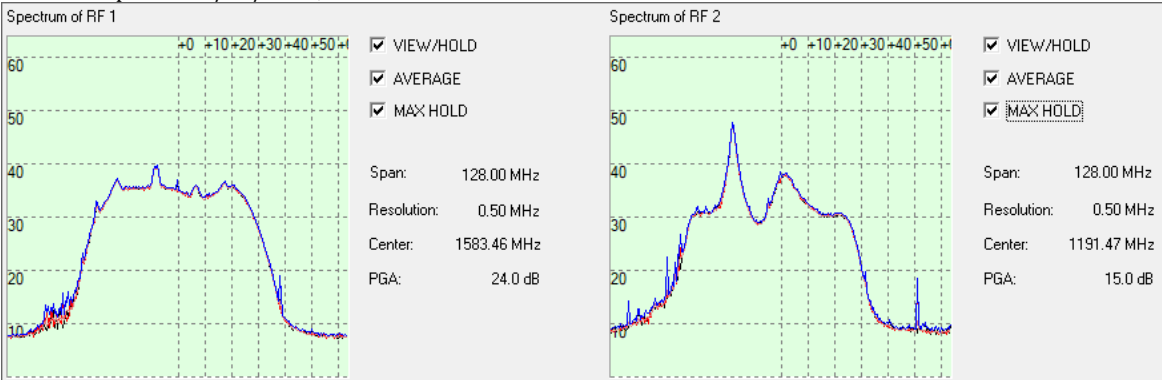
Na zgornjem prikazu (Slika 76, izris opazovanj GNSS za posamezne satelite različnih konstelacij v programskem okolju Leica Infinity) lahko potrdimo, da je precej prekinitev opazovanj satelitov GLONASS in še več Galileo, ki so bržkone posledica motenj signalov GNSS. Glede na rezultate meritev na nekaj 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)

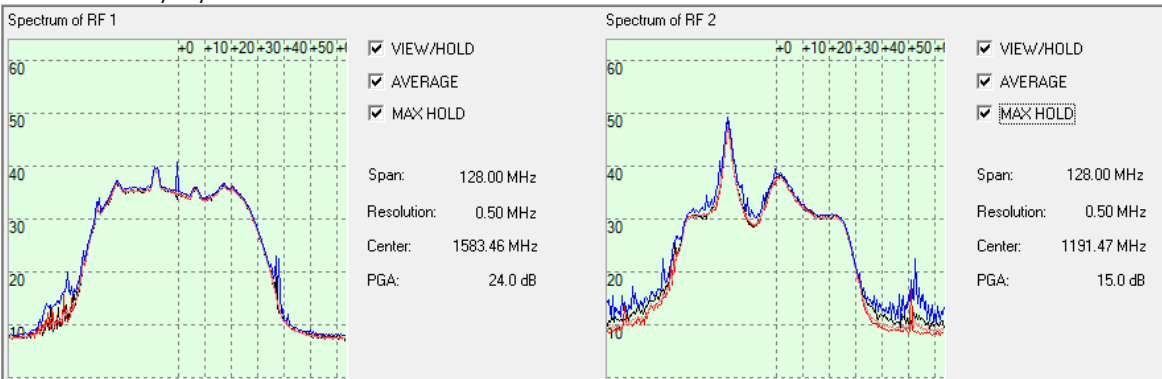
TERENSKI ZAPISNIK GNSS – ugotavljanje motenj signalov GNSS	
Care4SIGNAL – izdelan po izmeri	
Delovišče	Livade
Datum	29. 4. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	13:30
Ura konca izmere (lokalni čas)	14:00
Namen	Izmera spektrov signalov
Prisotni na terenu	Franc Dimc
Uporabljeni motilniki	/
Uporabljeni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

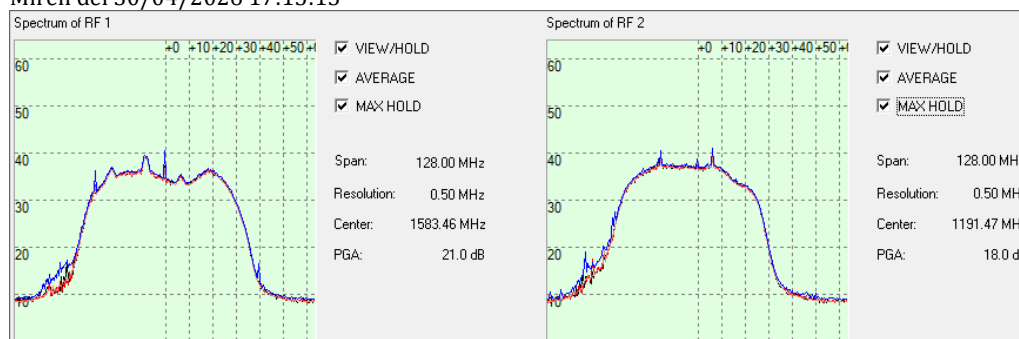


Slika 78: Livade, 29/04/2024, 11:30 do 12:00 UTC - spektralne meritve z u-blox ZED-F9P (L1 in L5); levo: osredinjeno na 1583,46 MHz, desno: osredinjeno na 1191,47 MHz.

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	/

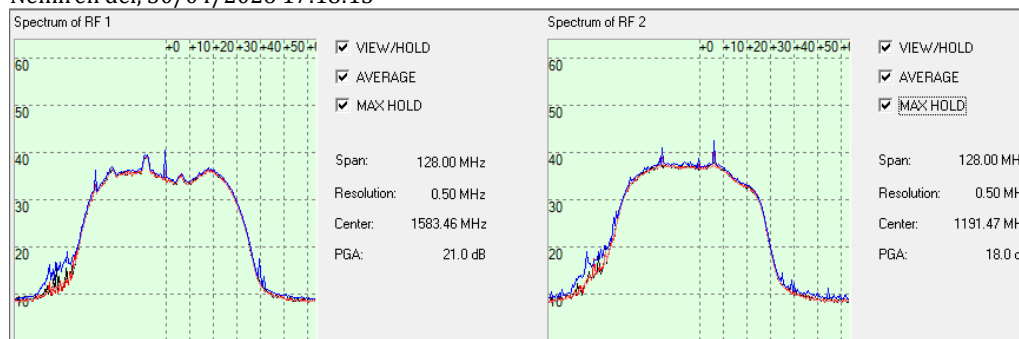
Slika 79: Terenski zapisnik izmere Livade, 30/04/2024. Uporabljeni sprejemnik je ZED F9P, u-blox.

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



86

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



Slika 81: Črnotiče, 15/05/2015: izmera z geodetskimi sprejemniki (spreda) z namernimi motnjami signalov

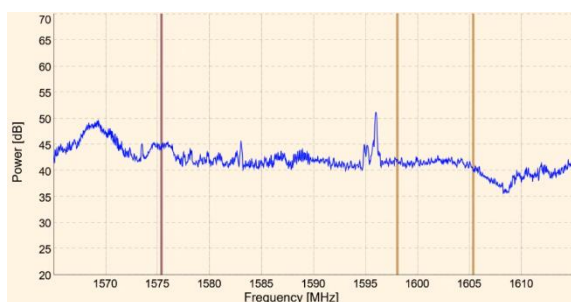
TERENSKI ZAPISNIK GNSS – ugotavljanje motenj signalov GNSS	
Care4SIGNAL – izdelan po izmeri	
Delovišče	Črnotiče
Datum	15. 5. 2024
Ura začetka izmere (lokalni čas)	8:00
Ura konca izmere (lokalni čas)	14:00
Namen	Namerne motenj signalov GNSS
Prisotni na terenu	Blatnik Aljaž (FE) Zmrzlak Luka (FE) Pavlovčič 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 82: Črnotiče, 15/05/2015: terenski zapisnik

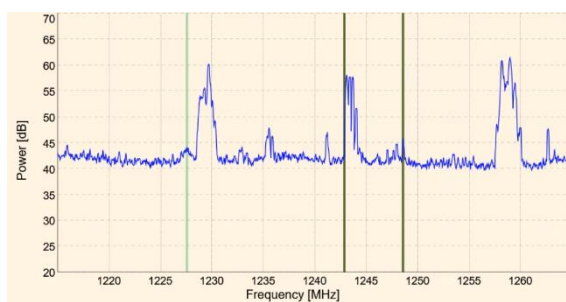
Preglednica 8: Časi motenja

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

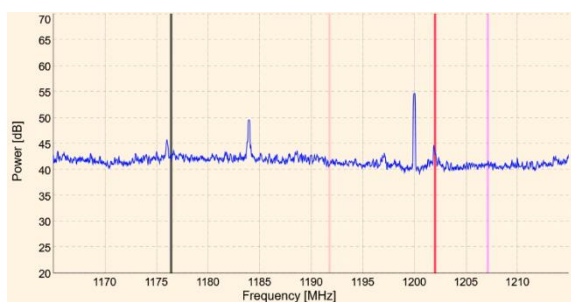
3.2.5.1 Spekter signalov (Trimble R12i), uporaba motilnika Rušička



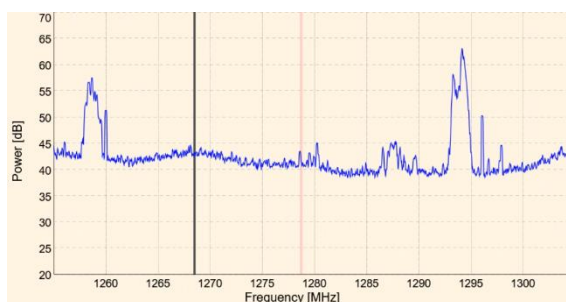
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1, Max Hold, motilnik Rušička, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00



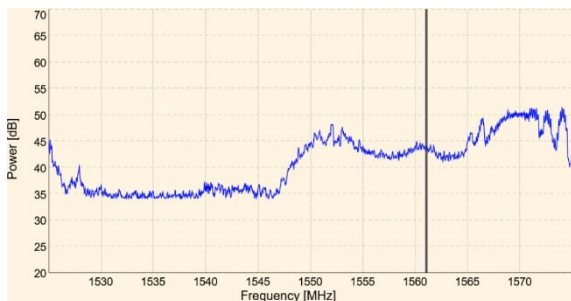
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2, Max Hold, motilnik Rušička, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00



(c) izris L5 z označenimi frekvencami: L5, E5a/b, G3, (E5b, E5AltBOC, B2I, B2b), Max Hold, motilnik Rušička, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00



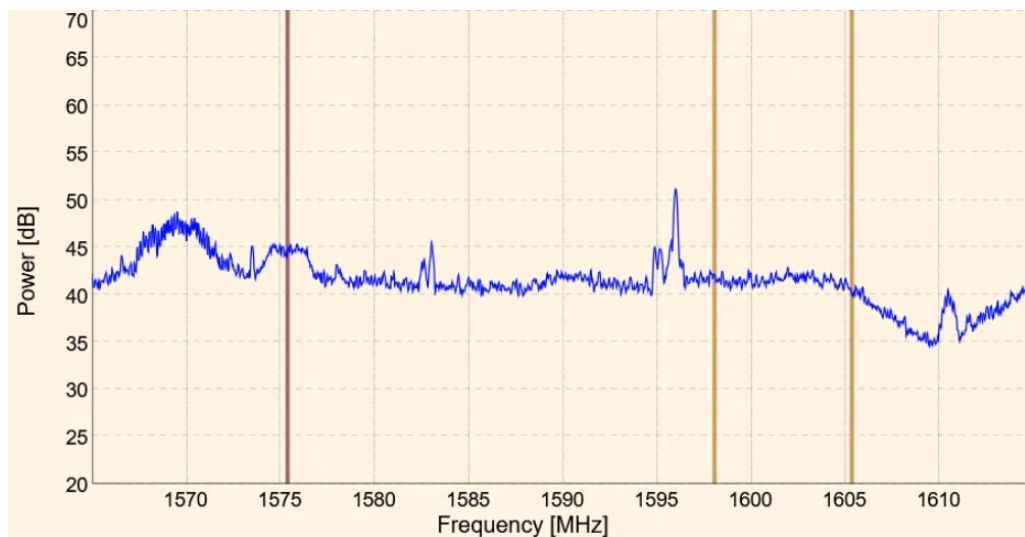
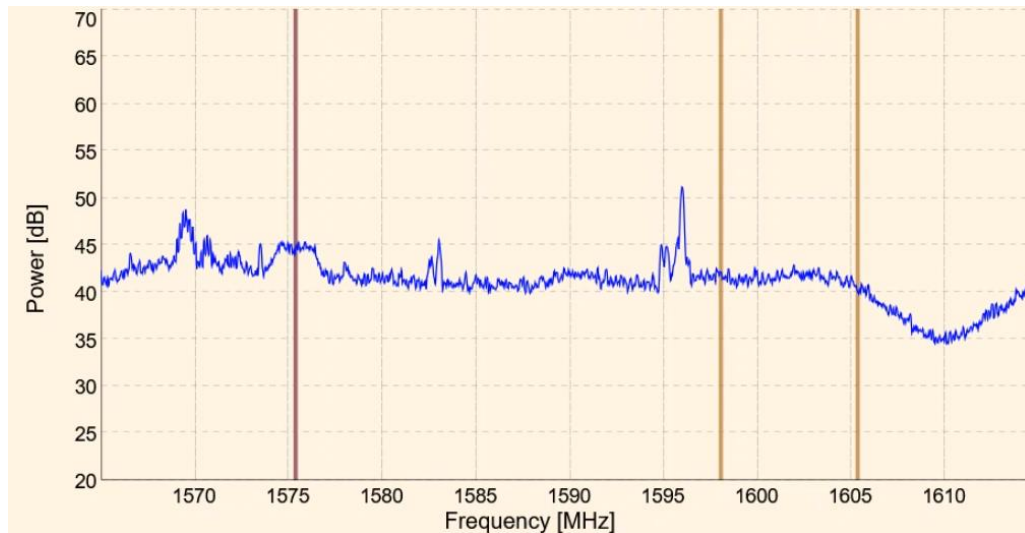
(d) izris E6 z označenimi frekvencami: B3I, E6, Max Hold, motilnik Rušička, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00



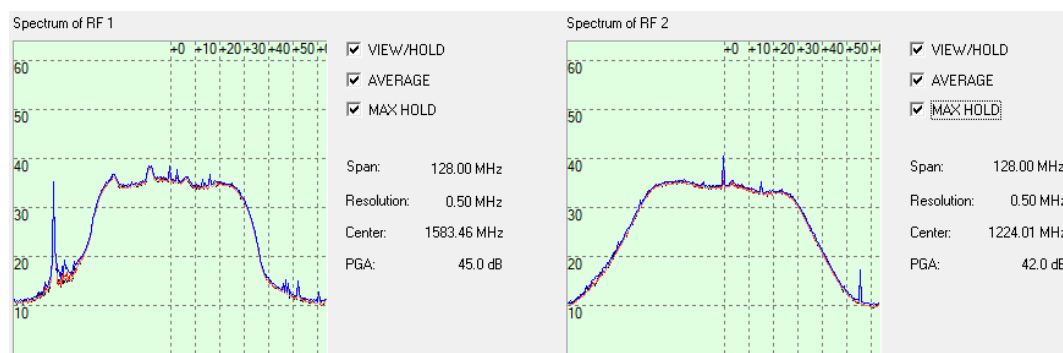
(e) izris B1 z označeno frekvenco B1, Max Hold, motilnik Rušička, čas motenja 2024/05/15, 09:57:00

Slika 83: Črnotiče, 15/05/2024, , 09:57:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Rušička.

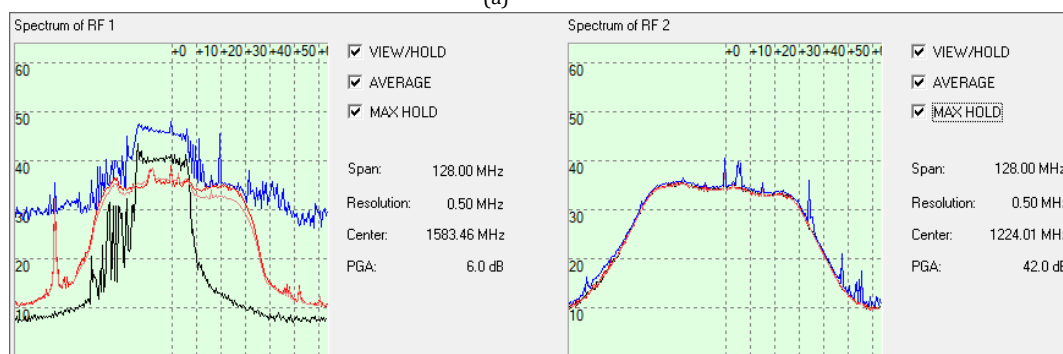
Če primerjamo spektralne meritve med namernimi motnjami z geodetskim sprejemnikom Trimble R12i (Slika 83) in nizko-cenovnima sprejemnikoma u-blox ZED-F9P (Slika 91, Slika 92), lahko rečemo, da so namerne motnje z motilnikom Rušička precej lažje zaznavne v spektrih, pridobljenih s sprejemniki u-blox. Precej bolj očitno je razvidno popačenje spektrov signalov na območju od 1230 MHz do 1640 MHz (primerjava levih slik zgoraj in spodaj, Slika 91 Slika 92). 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 83) je zaznaven dvig grafa na območju pred frekvenco L1 (1575,42 MHz) (Slika 91).



Slika 84: 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).



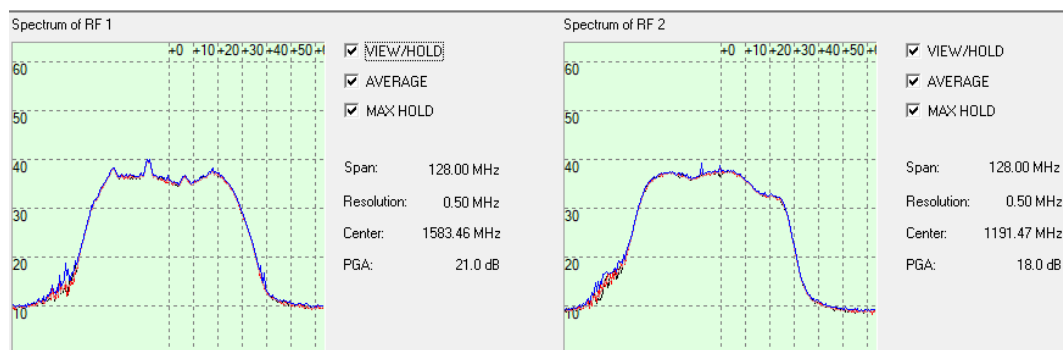
(a)



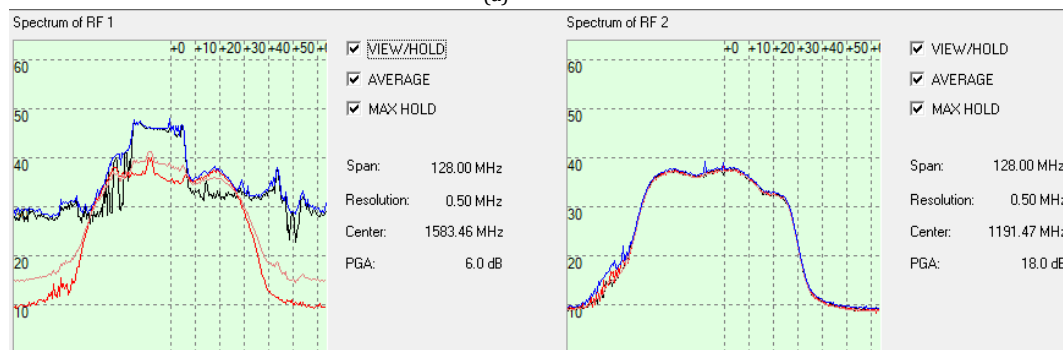
(b)

Slika 85: 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

90



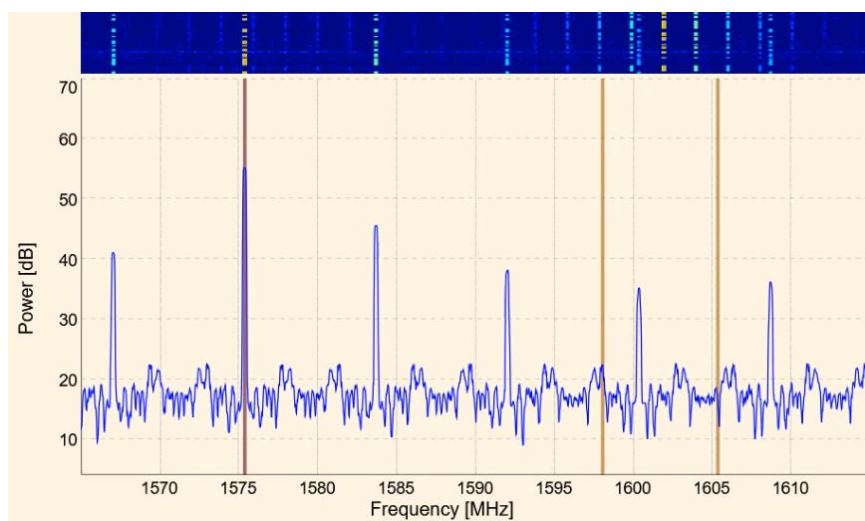
(a)



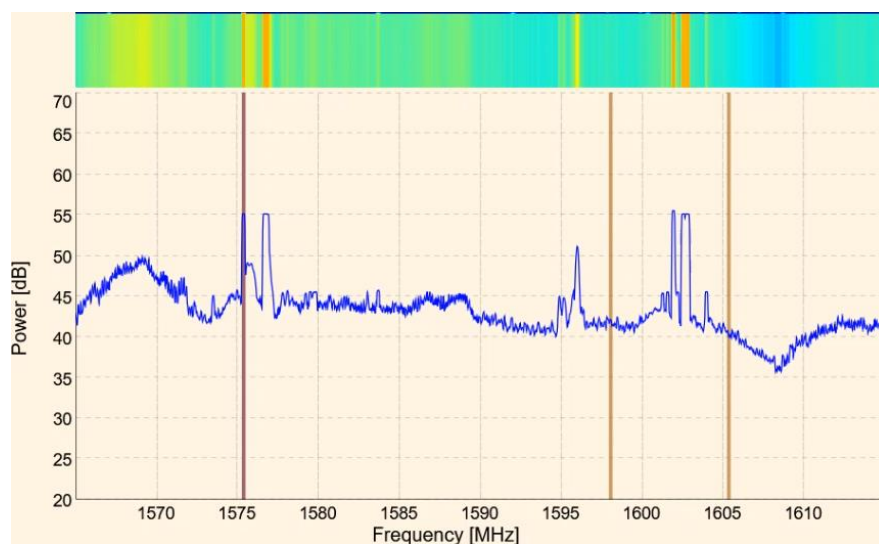
(b)

Slika 86: 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

3.2.5.2 Spekter (Trimble R12i), profesionalni motilnik Keysight N5182B

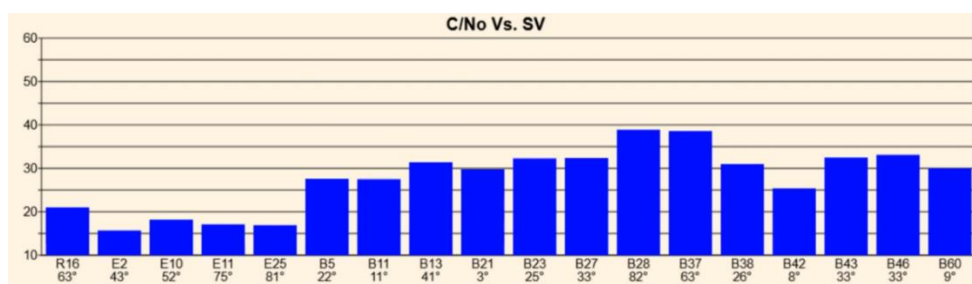


Slika 87: Spekter GNSS na frekvenci L1, brez filtra, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 07:59:59

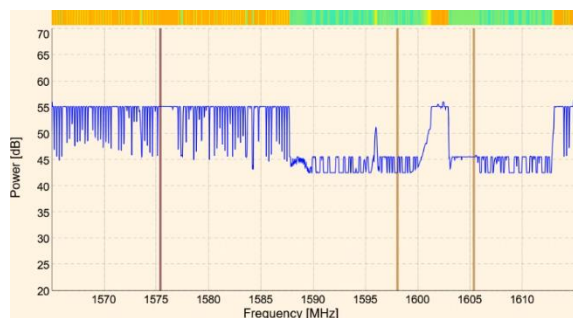


Slika 88: Spekter GNSS na frekvenci L1, Max Hold, motilnik Keysight N5182B, čas motenja 2024/05/15, 08:00:00

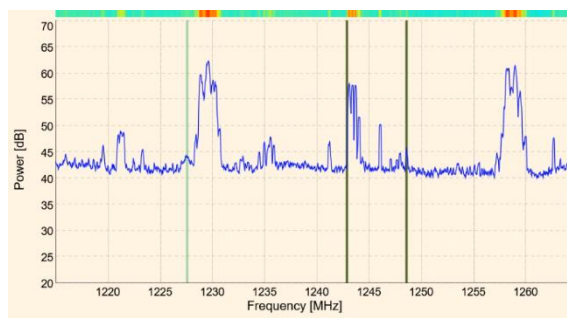
V času motenja s profesionalnim motilnikom Keysight N5182B smo s sprejemnikom Trimble R12i na frekvenčnem območju L1 zaznali precej očitno motenje, ki je bilo razpoznavno tako na nefiltriranih meritvah (Slika 87) kot tudi v meritvah v načinu *Max Hold* (Slika 88). Zaznali smo tudi občutno zmanjšanje satelitskih signalov vse do popolne izgube signalov GPS (Slika 89).



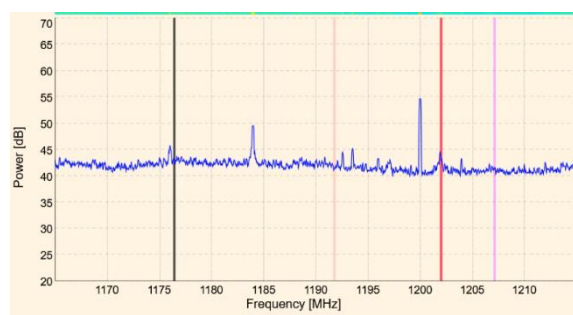
Slika 89: Črnotiče, 15/05/2024: vidni satelit v času motnje z motilnikom Keysight N5182B.



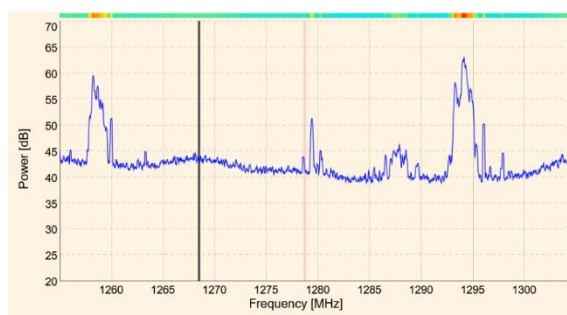
(a) izris L1 z označenimi frekvencami: L1, območje G1, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



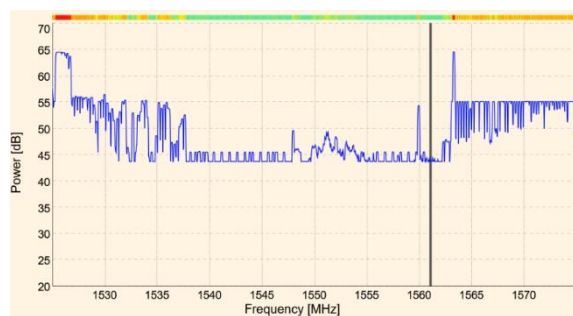
(b) izris L2 z označenimi frekvencami: L2, območje G2, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00



(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



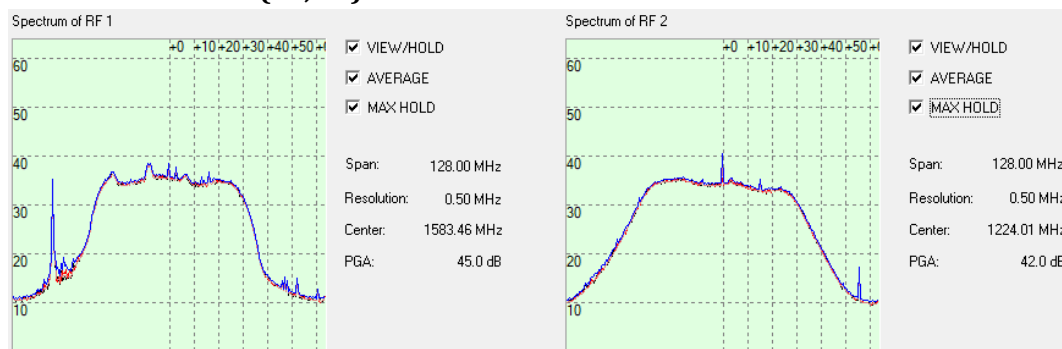
(e) izris B1 z označeno frekvenco B1, Max Hold, motilnik Keysight, čas motenja 2024/05/15, 11:25:00

Slika 90: Črnotiče, 15/05/2024, 11:25:00 - spektralne meritve s Trimble R12i v času motenja z motilnikom Keysight.

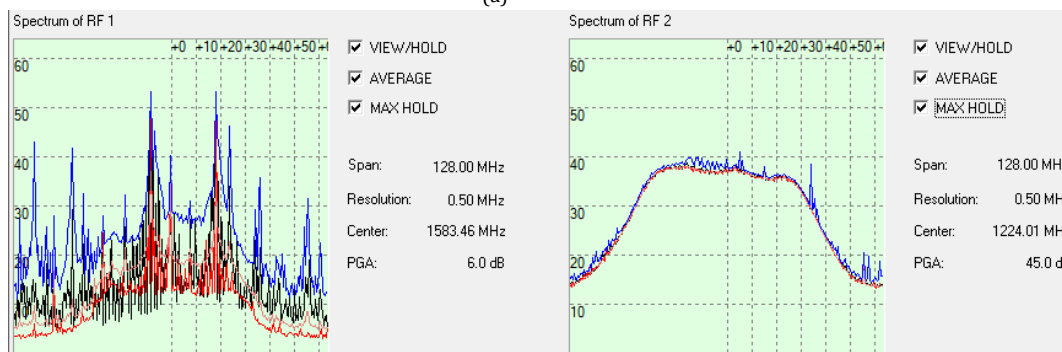
Če primerjamo izrise spektrov signalov med sprejemnikoma Trimble R12i (programje v sprejemniku) ter u-blox ZED-F9P (program u-center), so motnje, ki se jih lahko direktno opazi že med samo terensko izmero, bolj opazne pri izrisih v programu u-center. Prednost uporabe nizko-cenovnih sprejemnikov u-blox 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.

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

→ u-blox ZED-F9P (L1, L2)



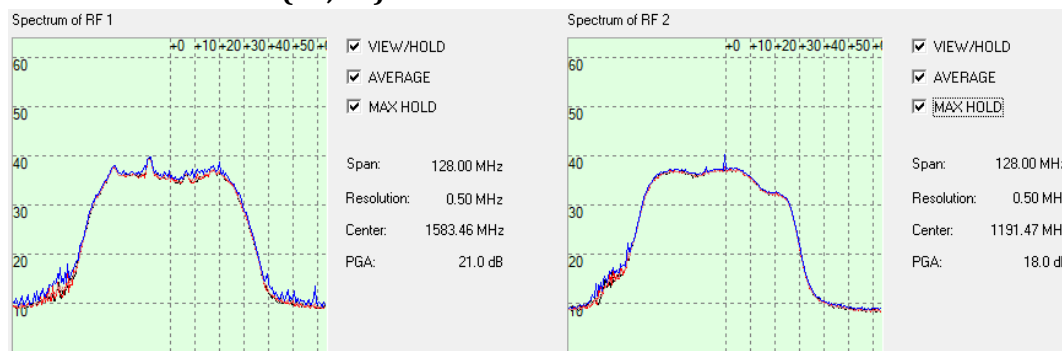
(a)



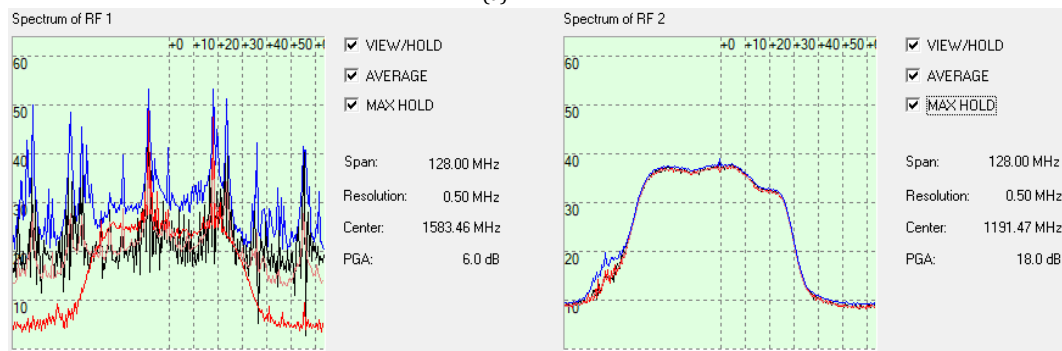
(b)

Slika 91: 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)

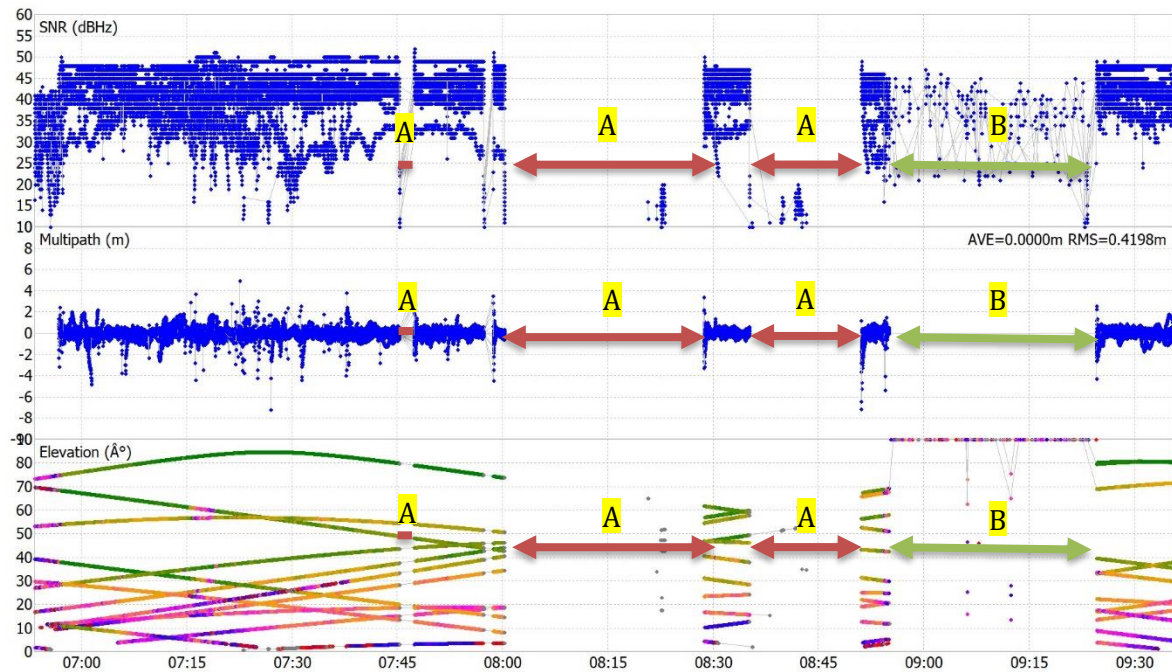
Slika 92: Spekter GNSS na frekvenci L1 (levo) in L5 (desno), motilnik Keysight; (a) pred motnjami 08:50:51 UTC, (b) med motnjami; 2024/05/15, 08:55:00 UTC

3.2.5.4 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 93: Izrisi vrednosti SNR (zgoraj), odboja signala (sredina) in višinskega kota (spodaj) za izbrane satelite v času motenj

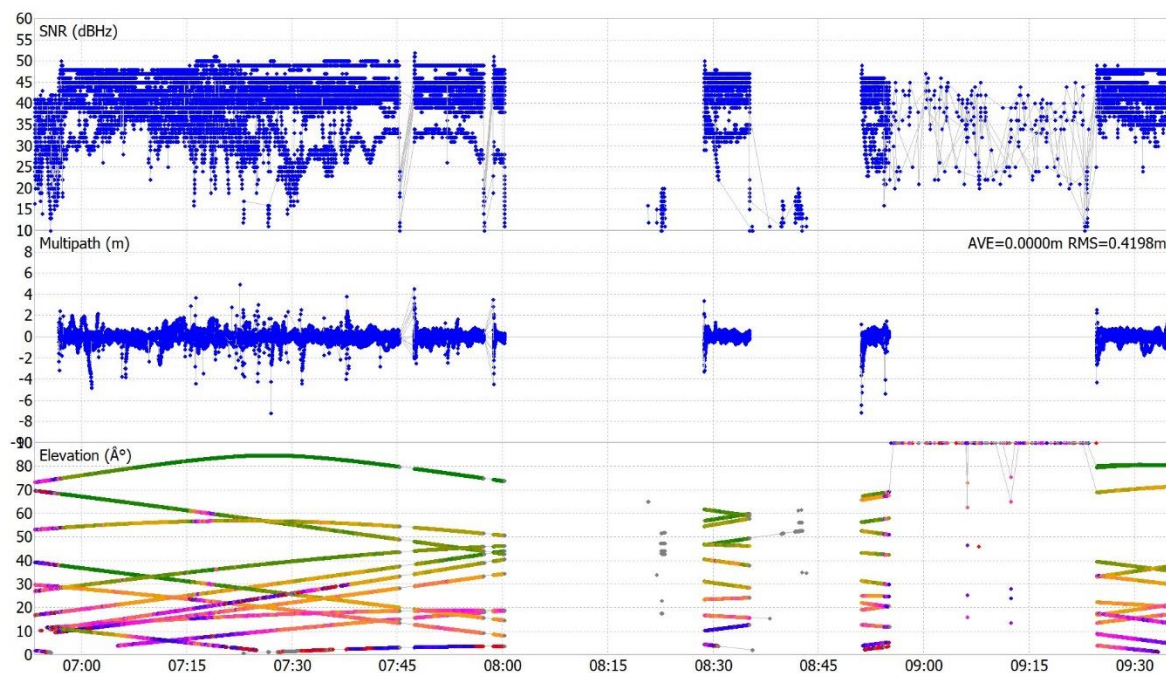
Glede na to, da sta oba motilnika delovala v frekvenčnem območju L1 (razvidno s spodnjih slik Slika 85, Slika 86, Slika 91, Slika 92), v nadaljevanju prikazujemo delovanje sprejemnikov posebej za posamezne konstelacije.

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

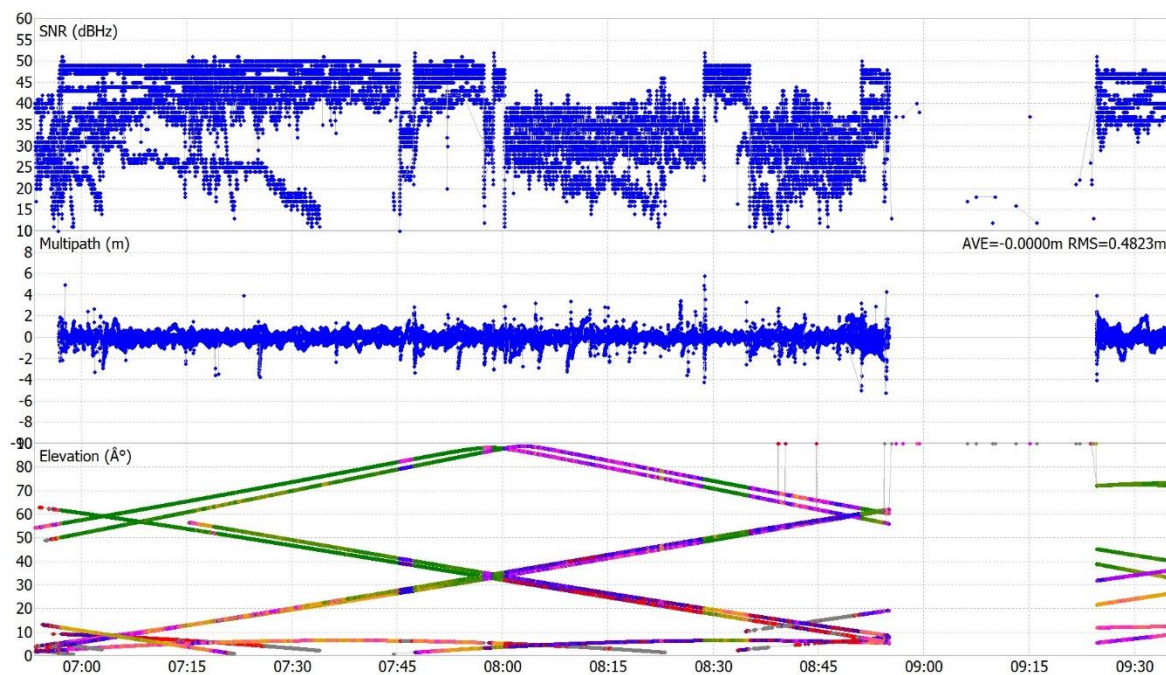
- u-blox ZED-F9P (leto izdelave 2018) je dvo-frekvenčni L1/L2 sprejemnik, ki sprejema signale vseh konstelacij (GPS, GLONASS, Galileo in BeiDou);
- Leica GS15 (leto 2012) je večfrekvenčni, ki sprejema signale GPS, GLONASS in Galileo;
- Leica GS18T (leto 2019) je večfrekvenčni, ki sprejema signale vseh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

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

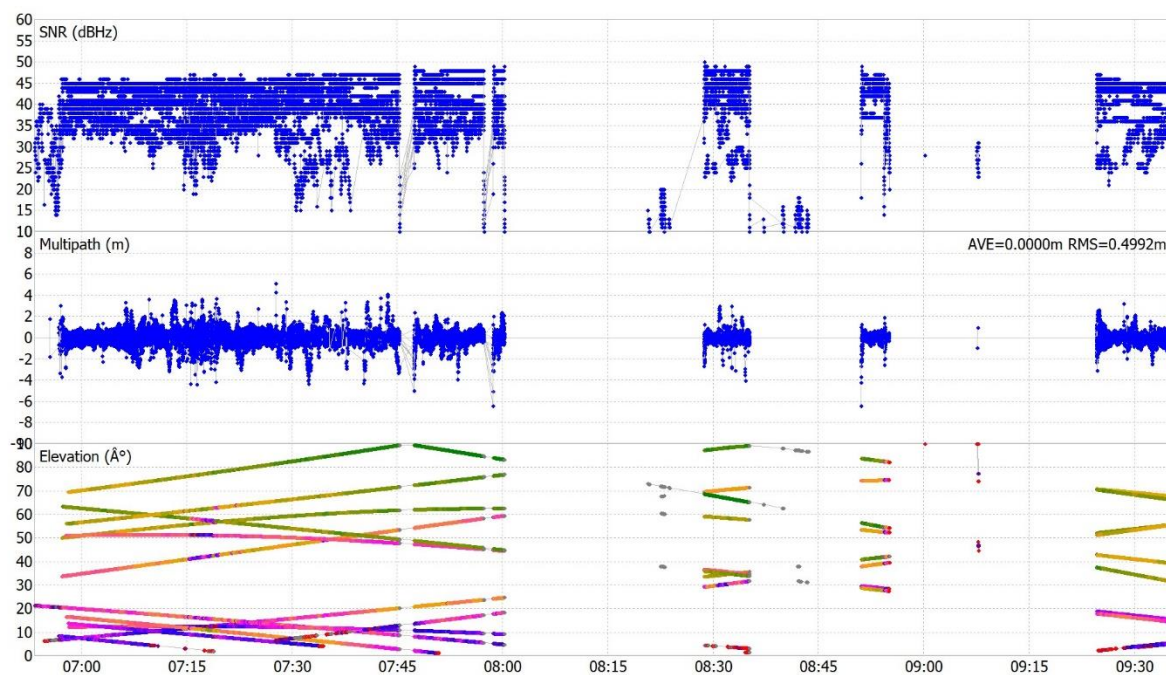
○ Vpliv na signal - frekvenčno območje



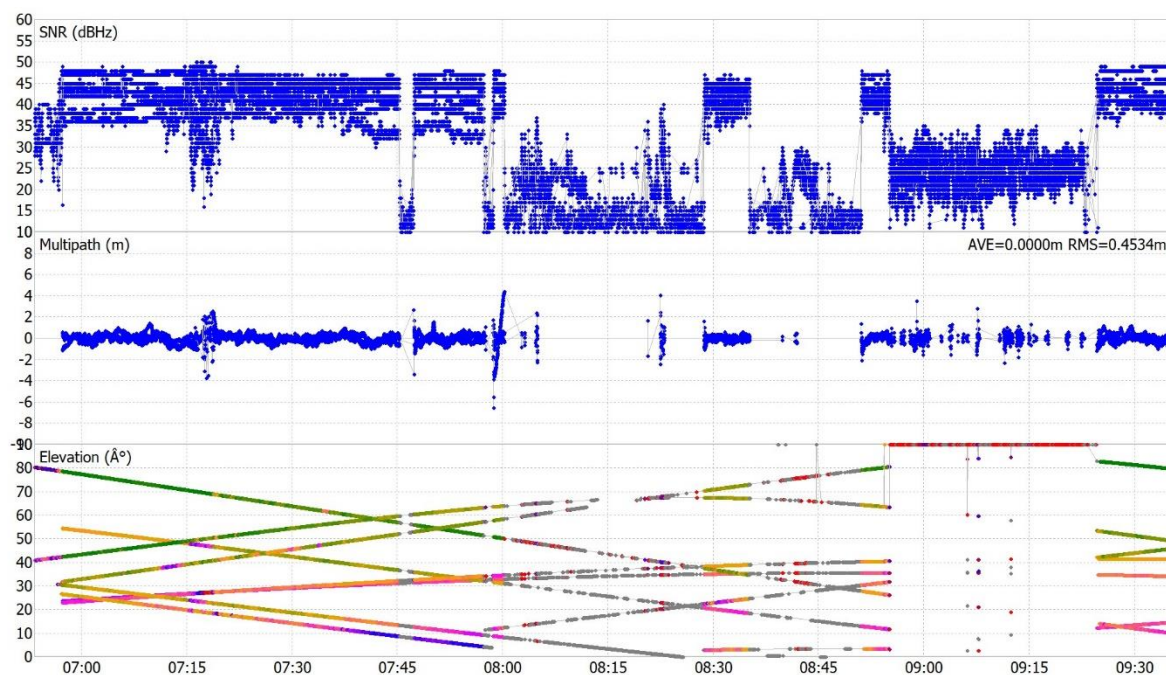
Slika 94: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS L1



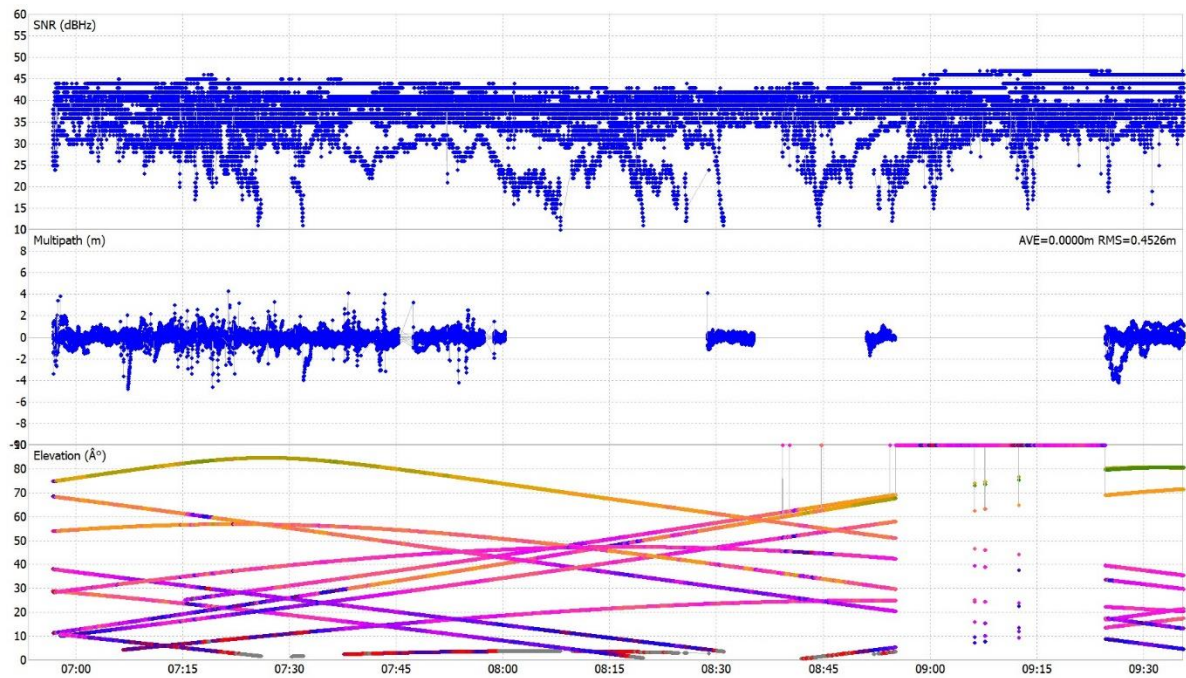
Slika 95: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



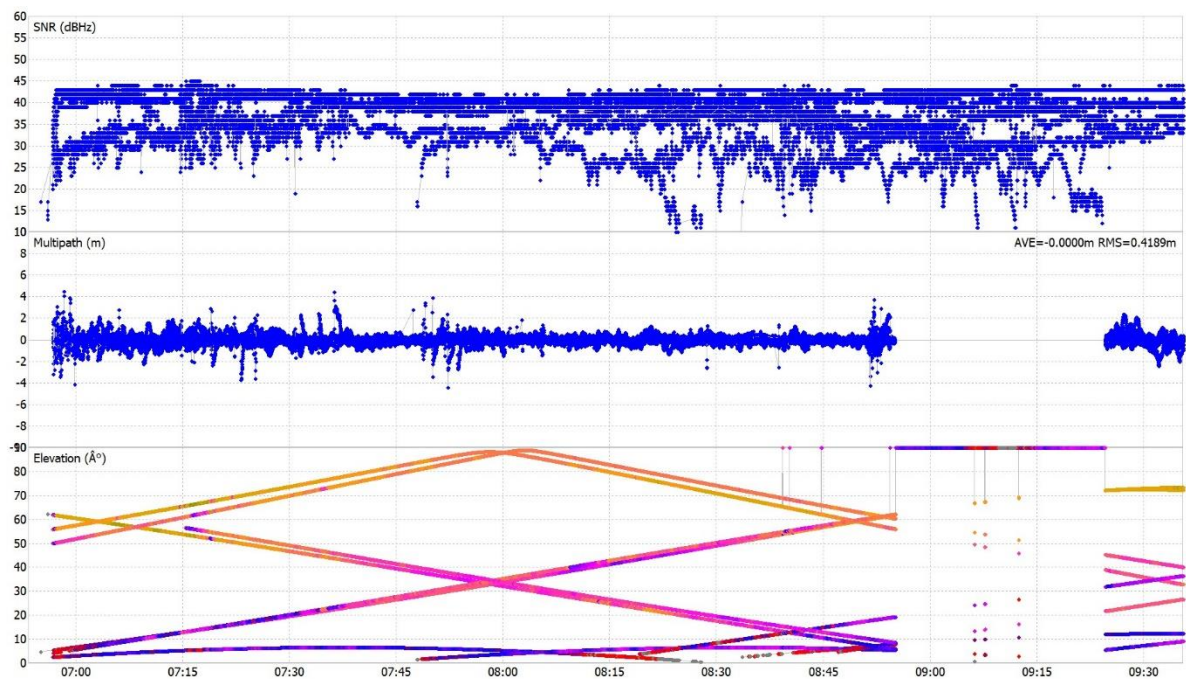
Slika 96: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



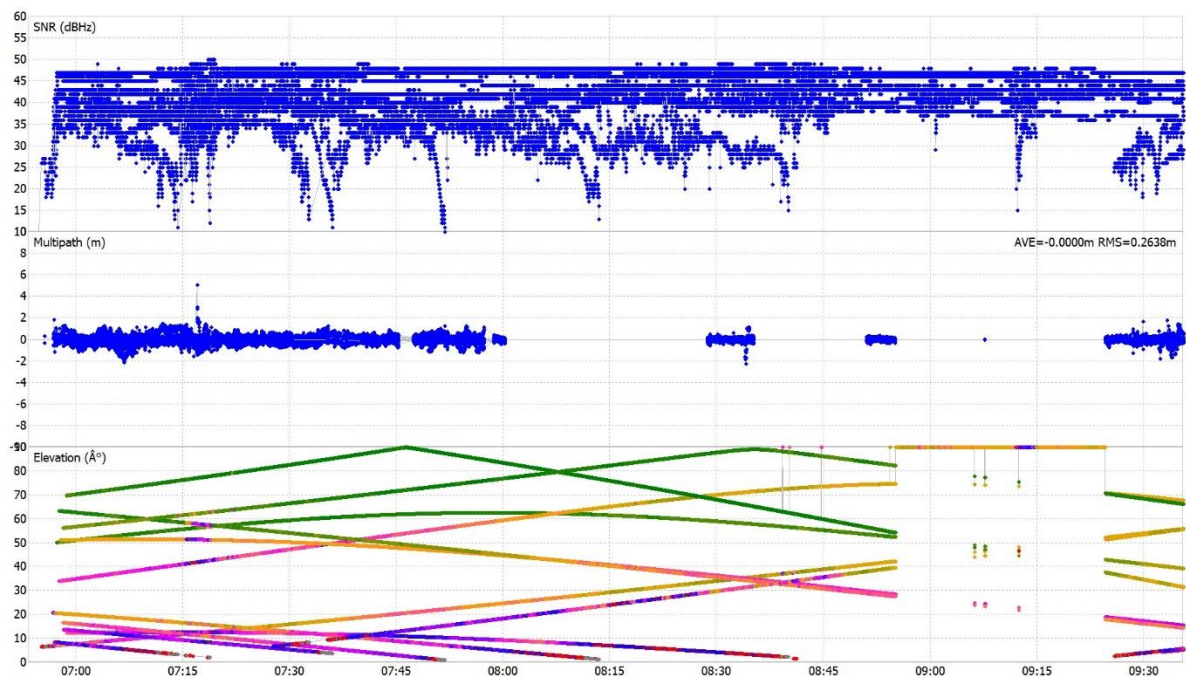
Slika 97: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1



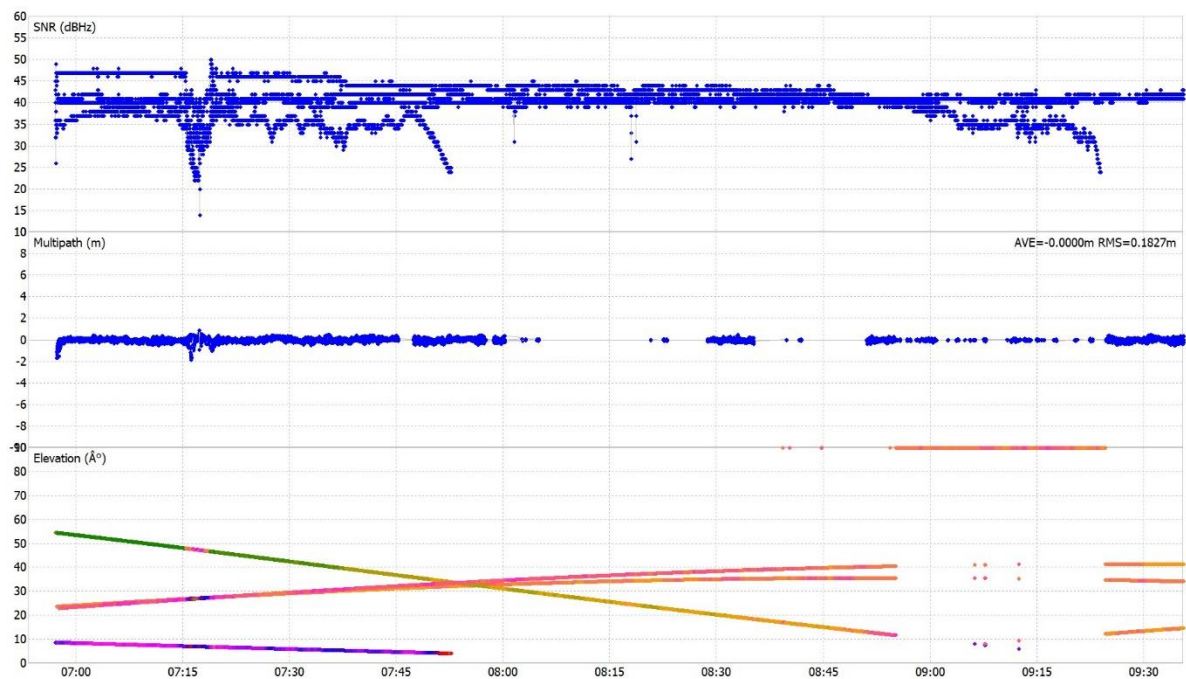
Slika 98: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2.



Slika 99: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2.



Slika 100: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b.



Slika 101: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2.

S slik (Slika 95 – Slika 97) 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

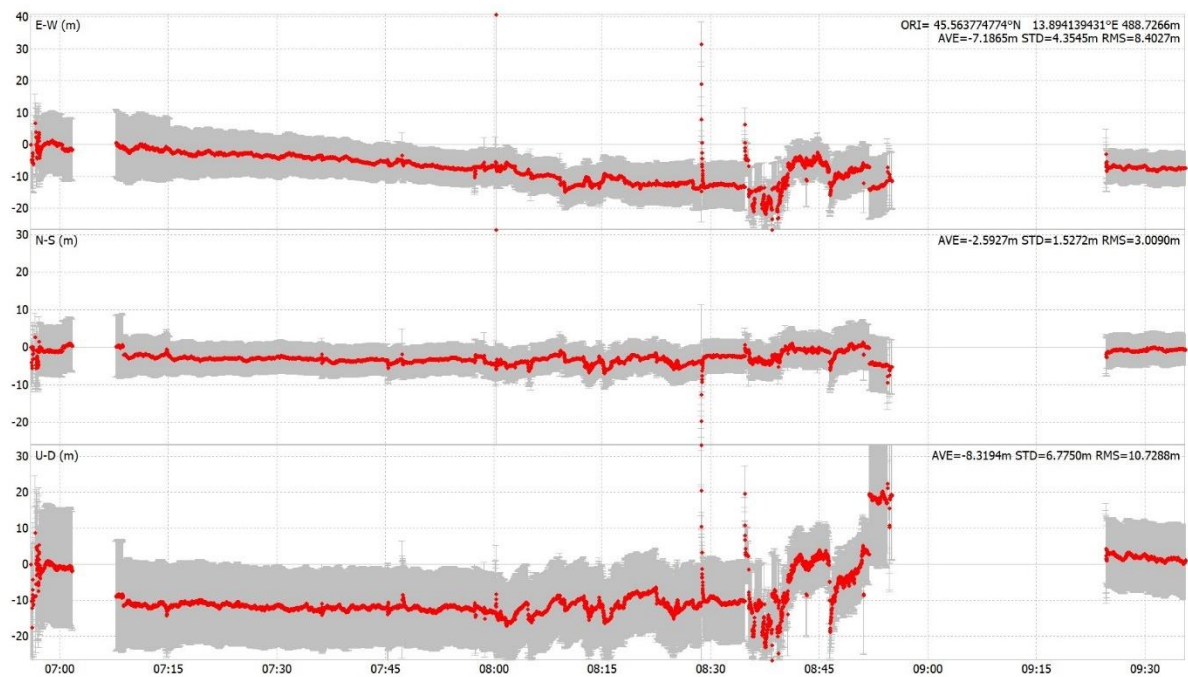
Signal	motilnik	
	Rušička	Keysight
GPS L1	ni signala	delna izguba signala
GLONASS G1	signal je prisoten, padec C/N0	ni signala
Galileo E1	ni signala	ni signala
BeiDou B1	signal je prisoten, padec C/N0	signal je prisoten, padec C/N0
GPS L2	ni posledic motenja	ni posledic motenja
GLONASS G2	ni posledic 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 94 – Slika 101), 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.

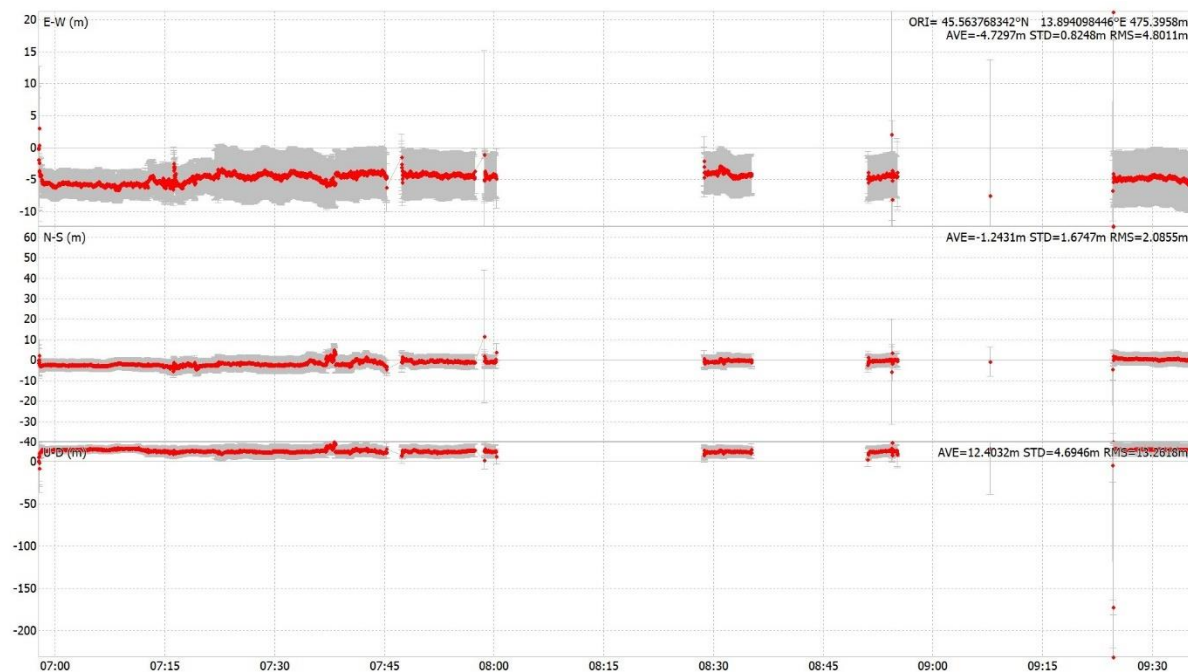
- **Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. *Single Point Positioning* - SPP)**



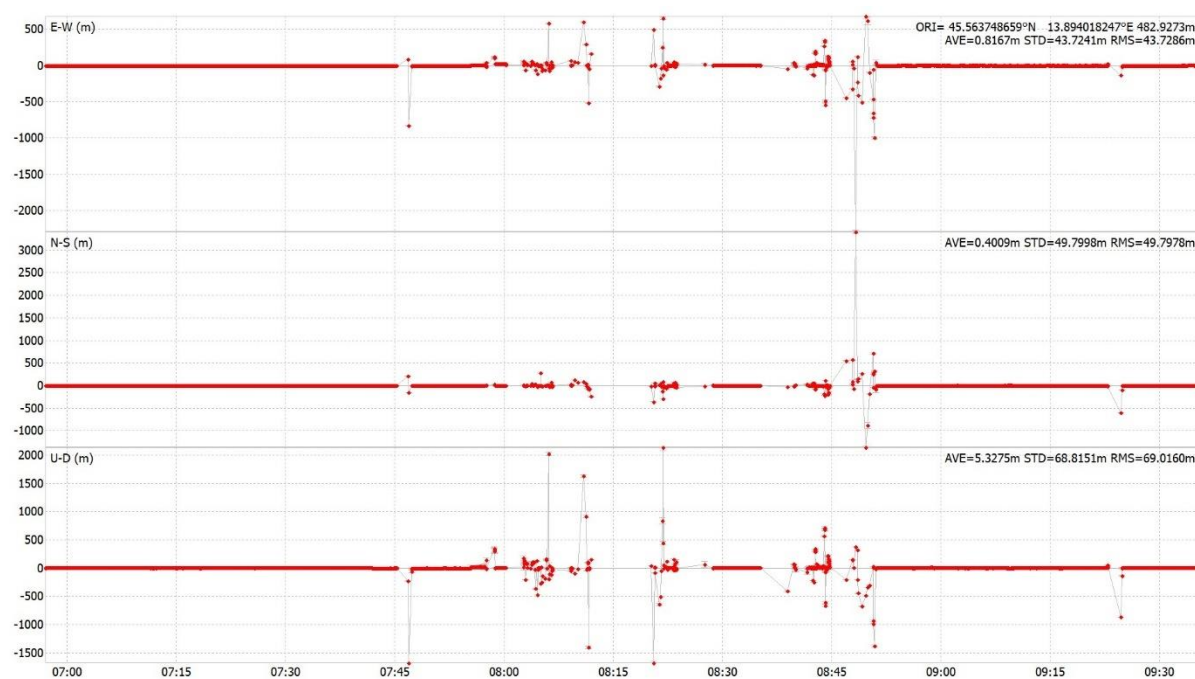
Slika 102: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji GPS



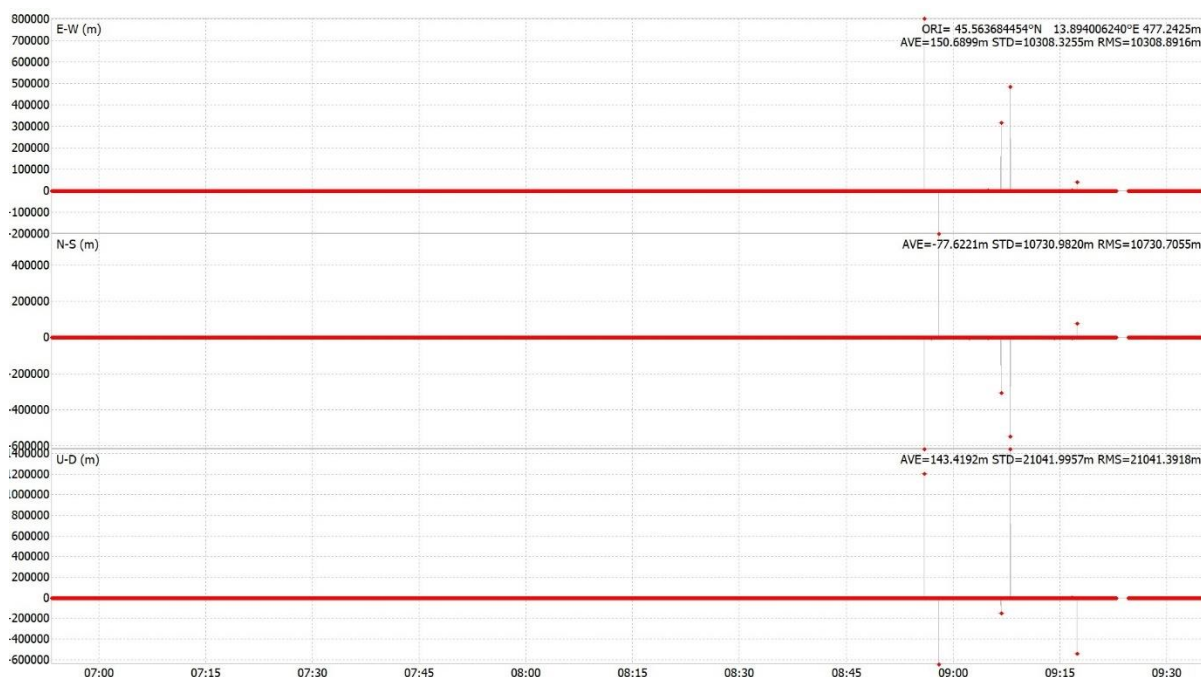
Slika 103: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, GLONASS



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



Slika 105: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P, SPP-položaji, BeiDou



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

Preglednica 10 vsebuje glavne ugotovitve (vrednosti faktorjev RMS po komponentah) s slik (Slika 94), kjer so prikazani absolutno pridobljeni položaji (ang. *Single Point Positioning* – SPP), pridobljeni z ločenimi obdelavami po posameznih konstelacijah.

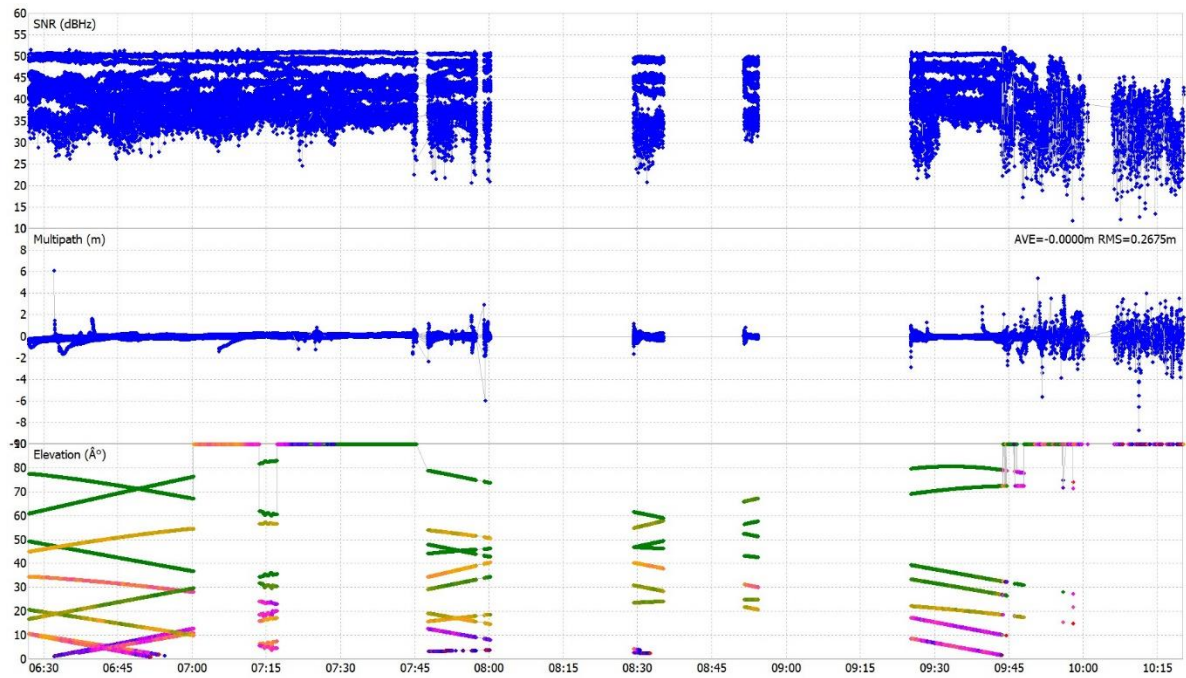
Preglednica 10: Črnotiče, 15/05/2024, u-blox ZED-F9P. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije

	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

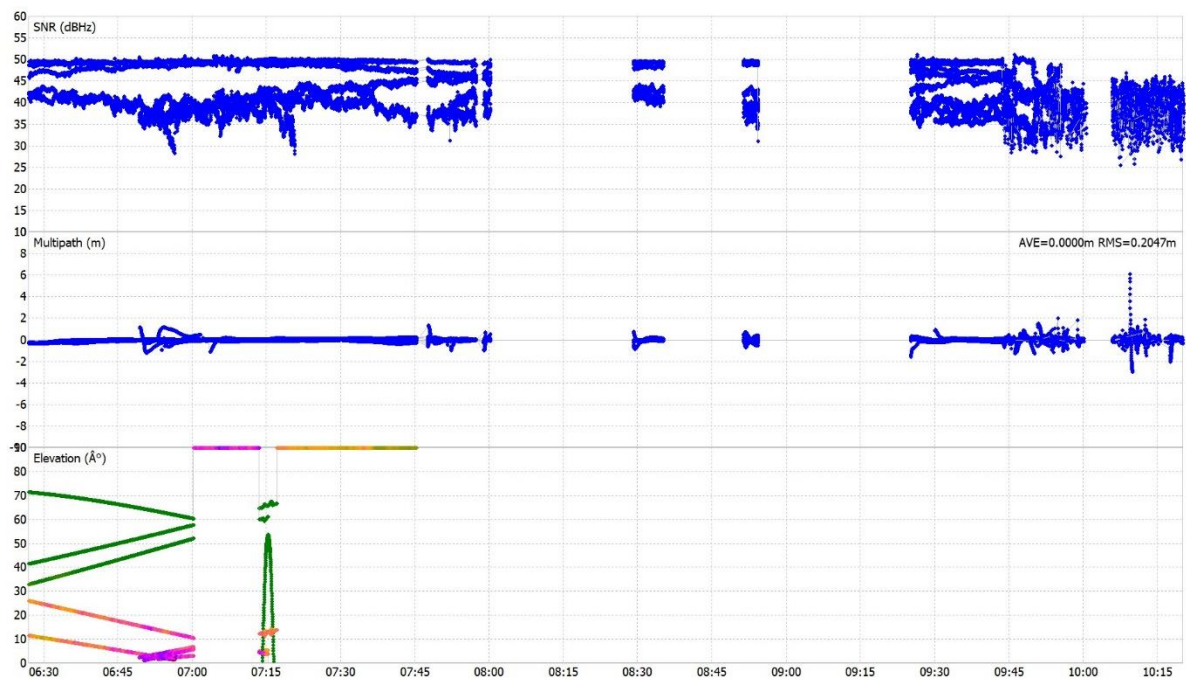
Iz rezultatov je očitno, da sta motilnika povzročila veliko odstopanje od pravega položaja za sistem GPS (12 km za smer vzhod-zahod (E-W), 58 km za smer sever-jug (N-S) om 88 km po višini (U-D)), medtem ko je določitev položaja z GLONASS in Galileo bila v mejah točnosti določitve položaja s tehniko SPP (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.

3.2.5.6 Vpliv motilnikov na sprejem signalov GNSS (Leica GS15)

○ Vpliv na signal - frekvenčno območje



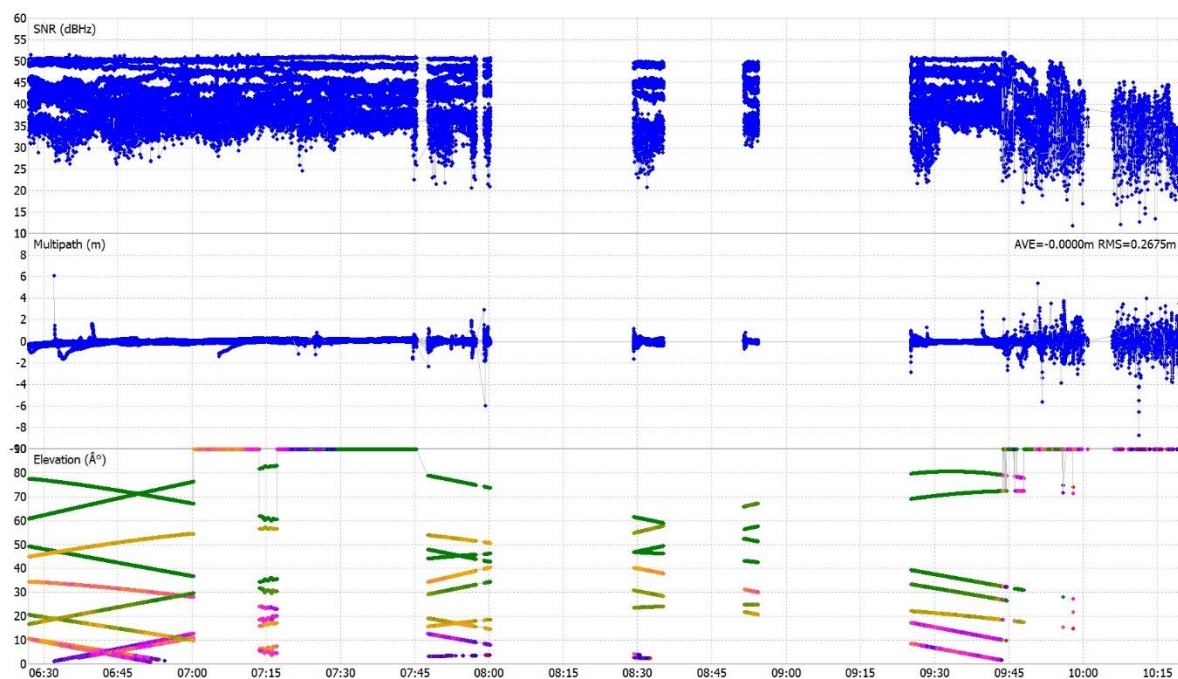
Slika 107: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1



Slika 108: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



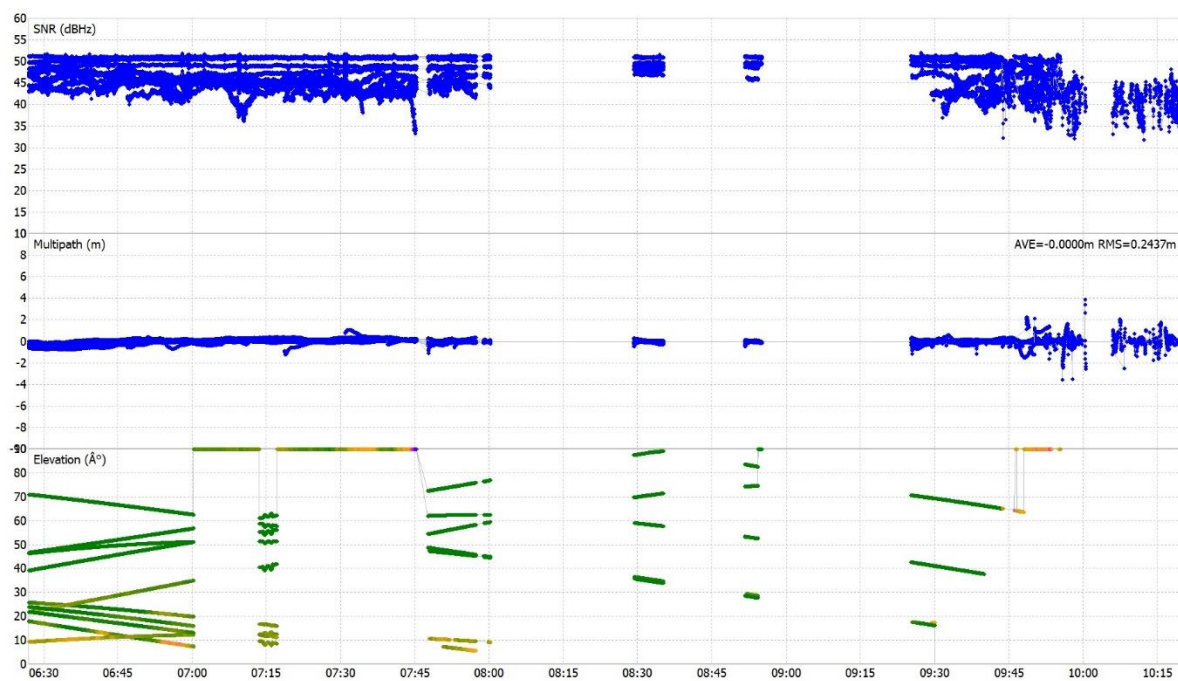
Slika 109: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



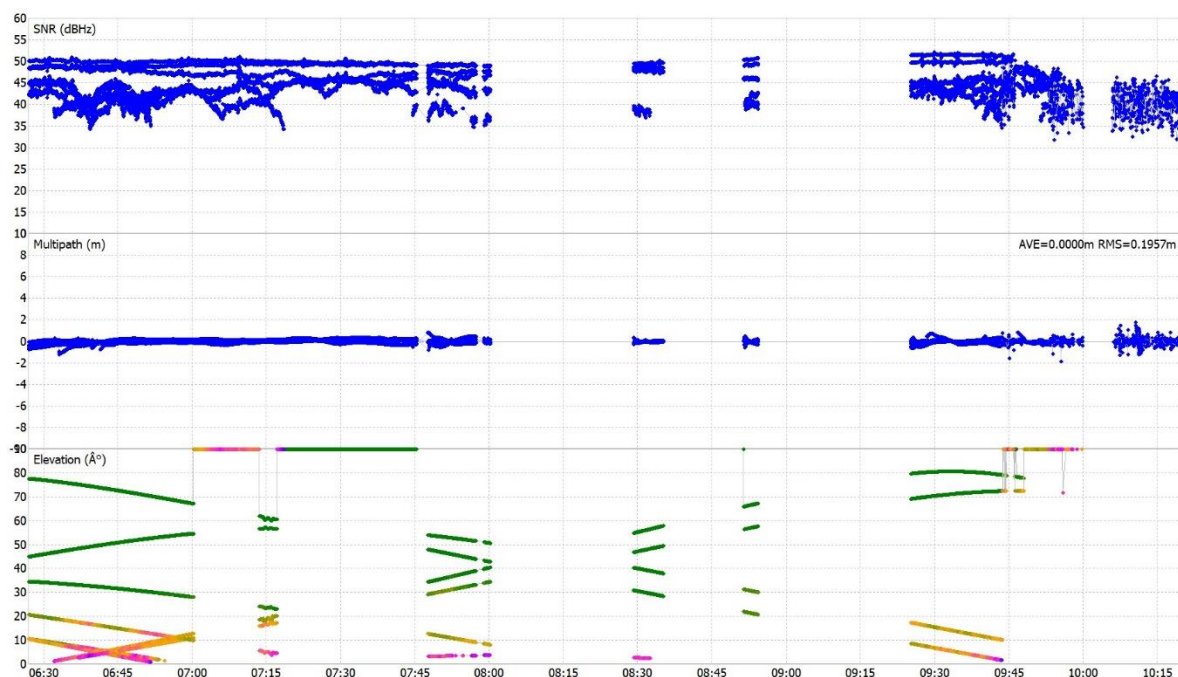
Slika 110: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2



Slika 111: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2



Slika 112: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b



Slika 113: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5



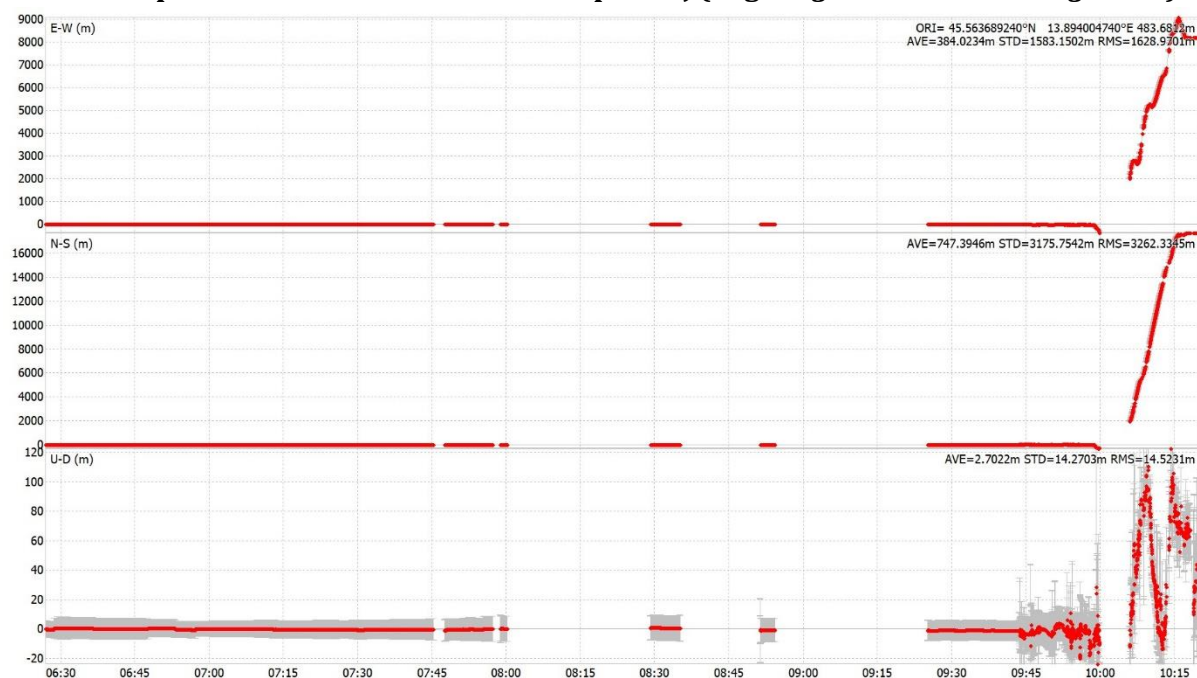
Slika 114: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a

S slik (Slika 107 – Slika 114) 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.

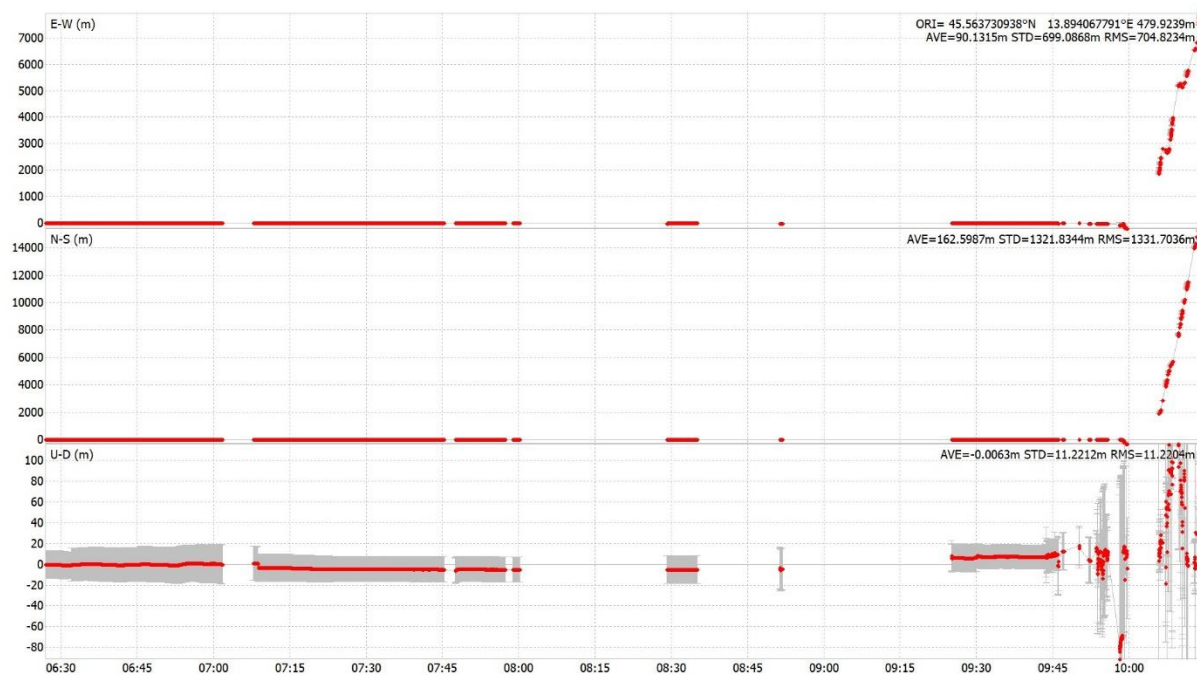
Preglednica 11: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami

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

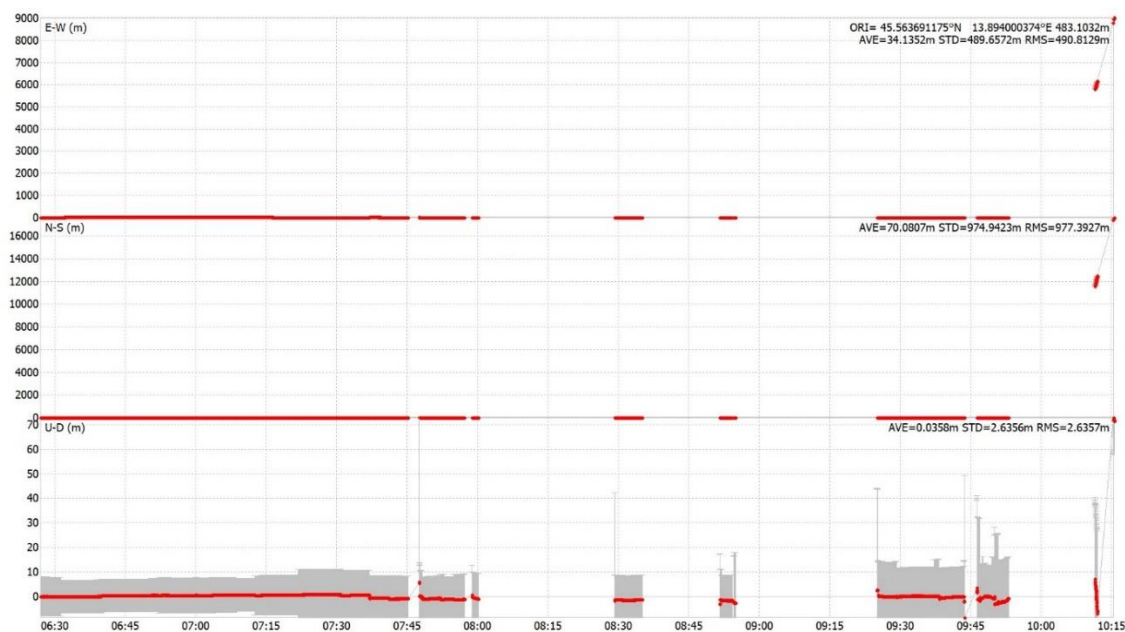
○ Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. *Single Point Positioning* – SPP)



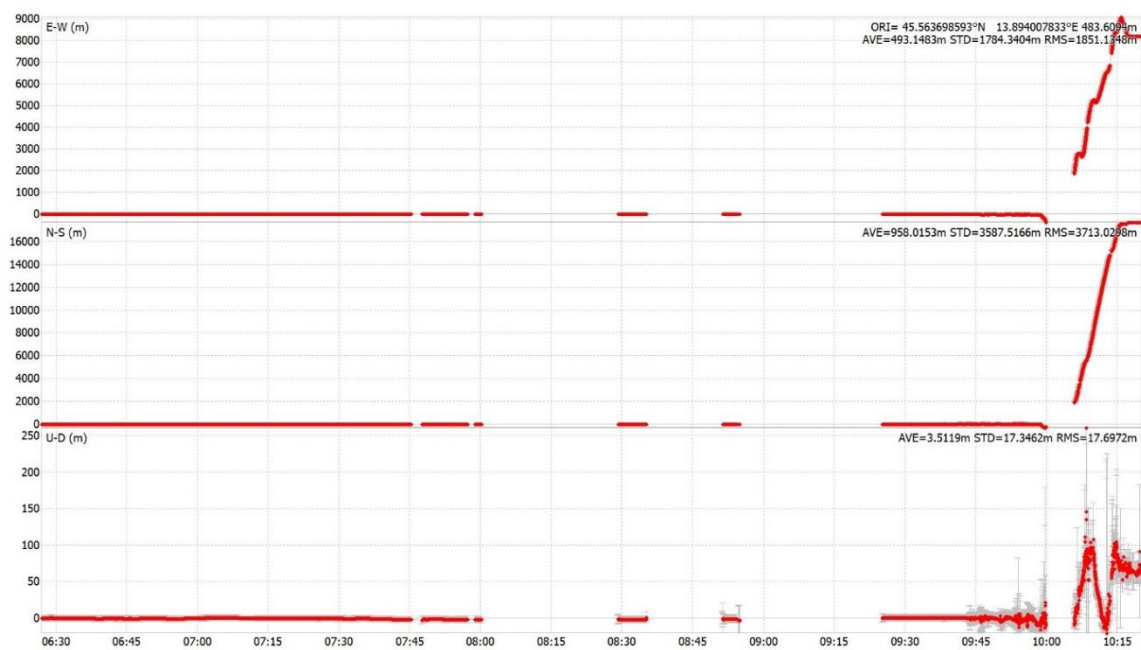
Slika 115: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS



Slika 116: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GLONASS



Slika 117: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, Galileo



Slika 118: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS15, SPP-položaji, GPS + GLONASS + Galileo

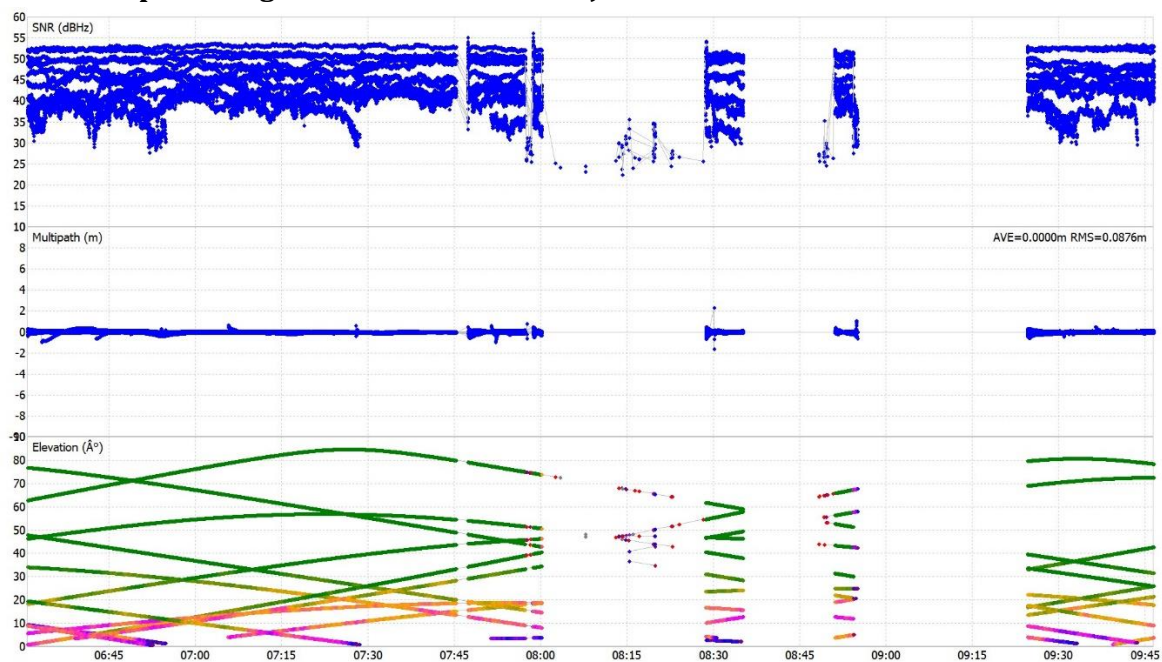
Iz rezultatov (Preglednica 12) je očitno, da sta motilnika povzročila veliko odstopanje od pravega položaja za sistem GPS (1,6 km za smer vzhod-zahod (E-W), 3,2 km za smer sever-jug (N-S) in 14 m po višini (U-D)), podobno tudi za GLONASS. Koordinate, določene le z obdelavo opazovanj Galileo, so nekoliko 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

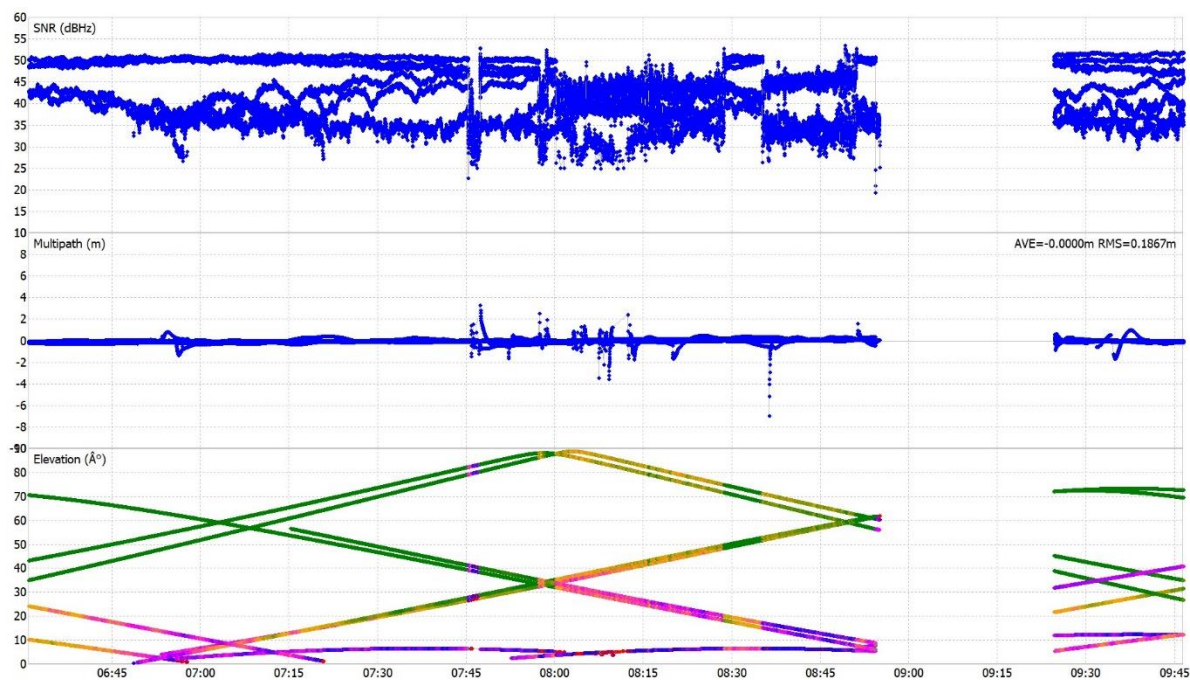
	RMS [m]				
	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou	Vse konstelacije
E-W	1 628,9701	704,8234	490,8129	/	1 851,1348
N-S	3 262,3345	1 331,7036	977,3927	/	3 713,0298
U-D	14,5231	11,2204	2,6357	/	17,6972

3.2.5.7 Vpliv motilnikov na sprejem signalov GNSS (Leica GS18T)

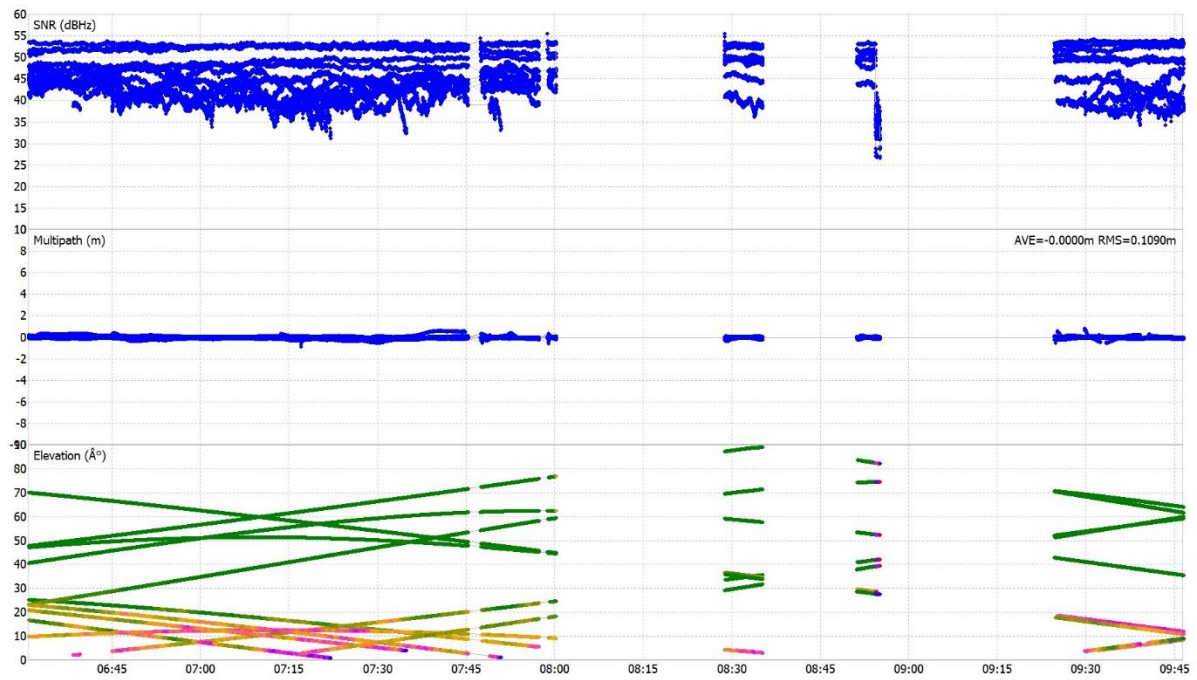
○ Vpliv na signal - frekvenčno območje



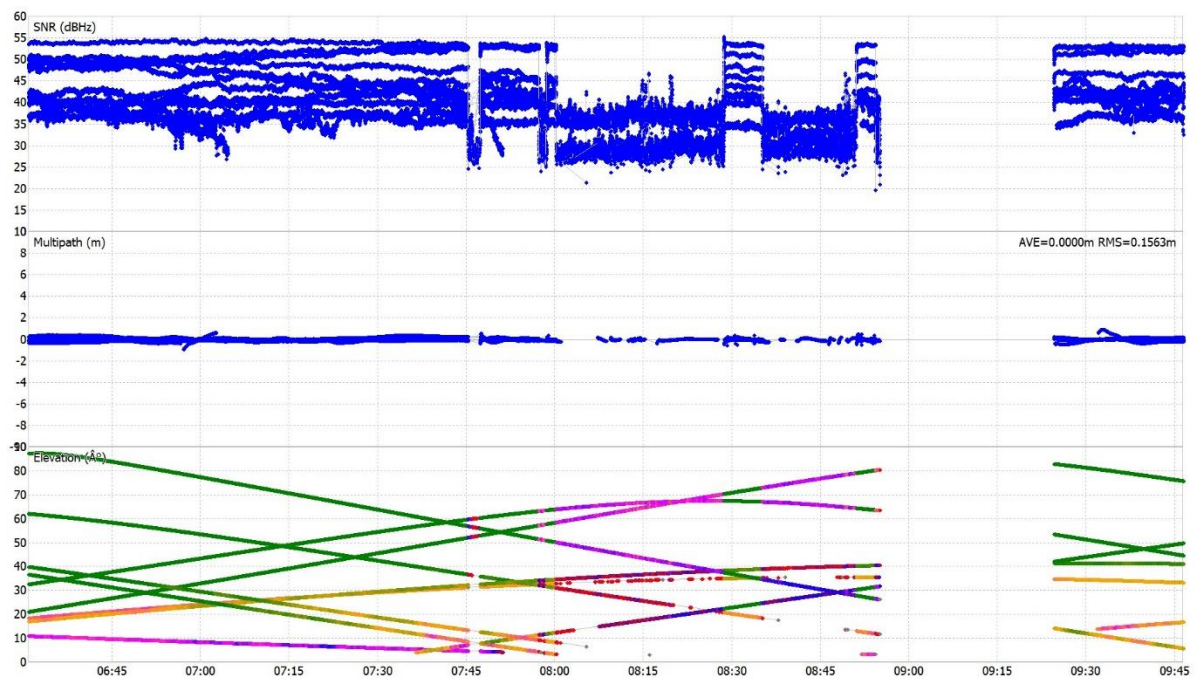
Slika 119: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1



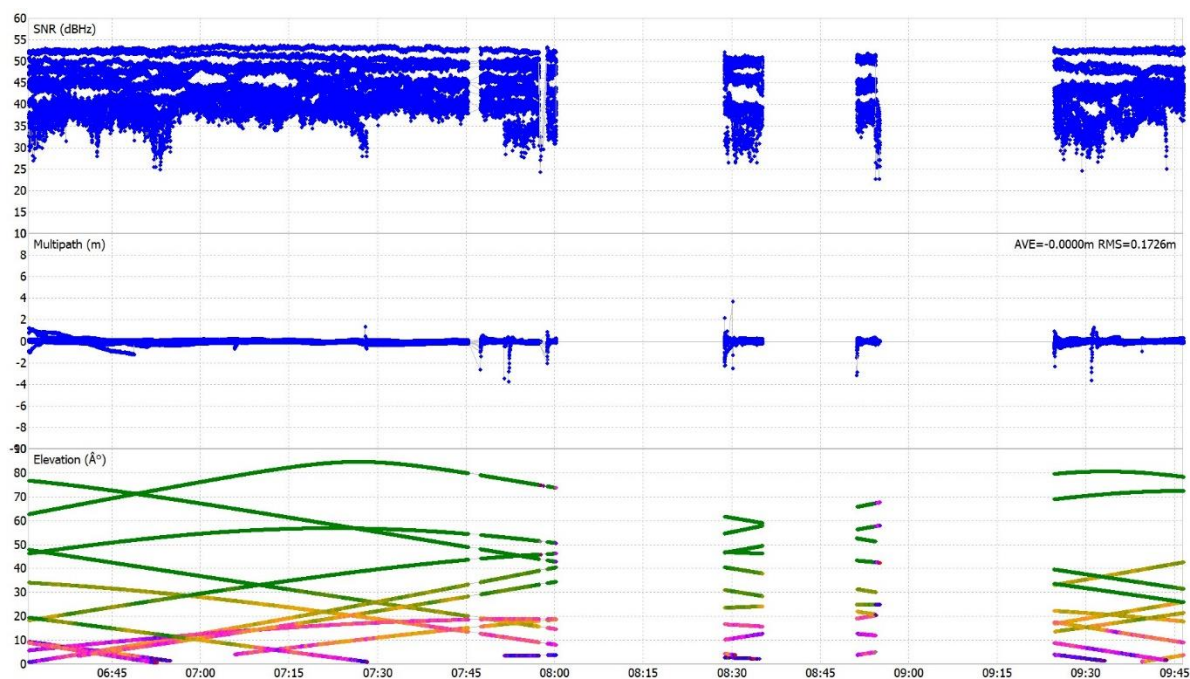
Slika 120: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



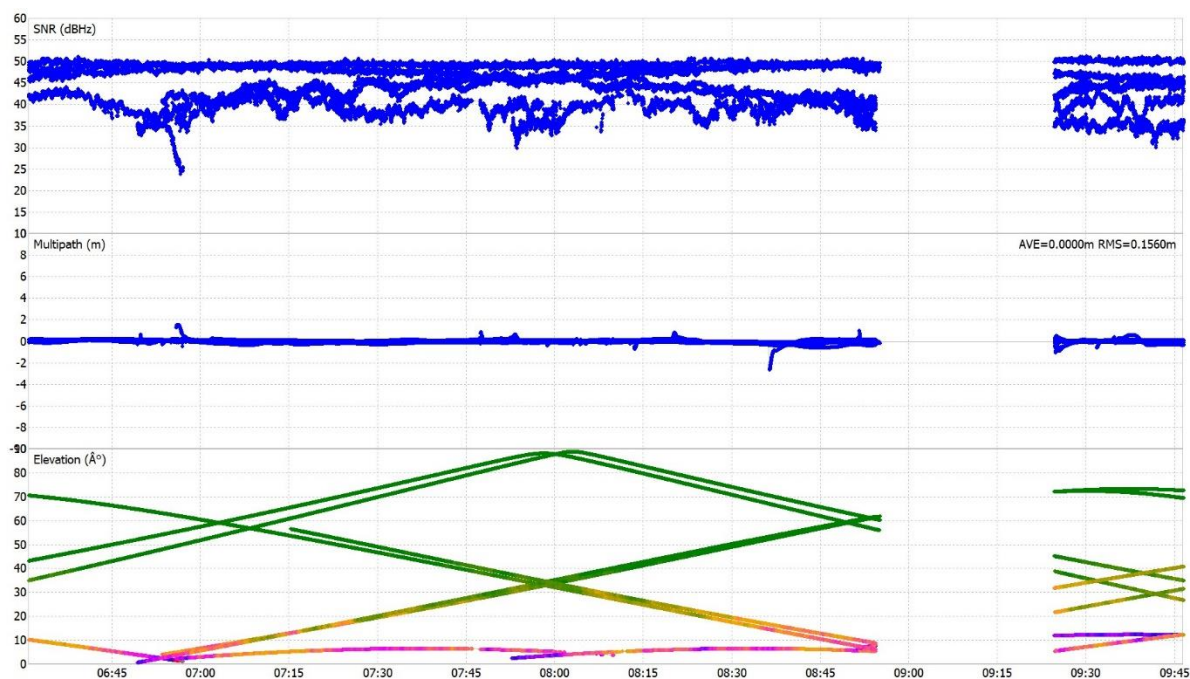
Slika 121: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



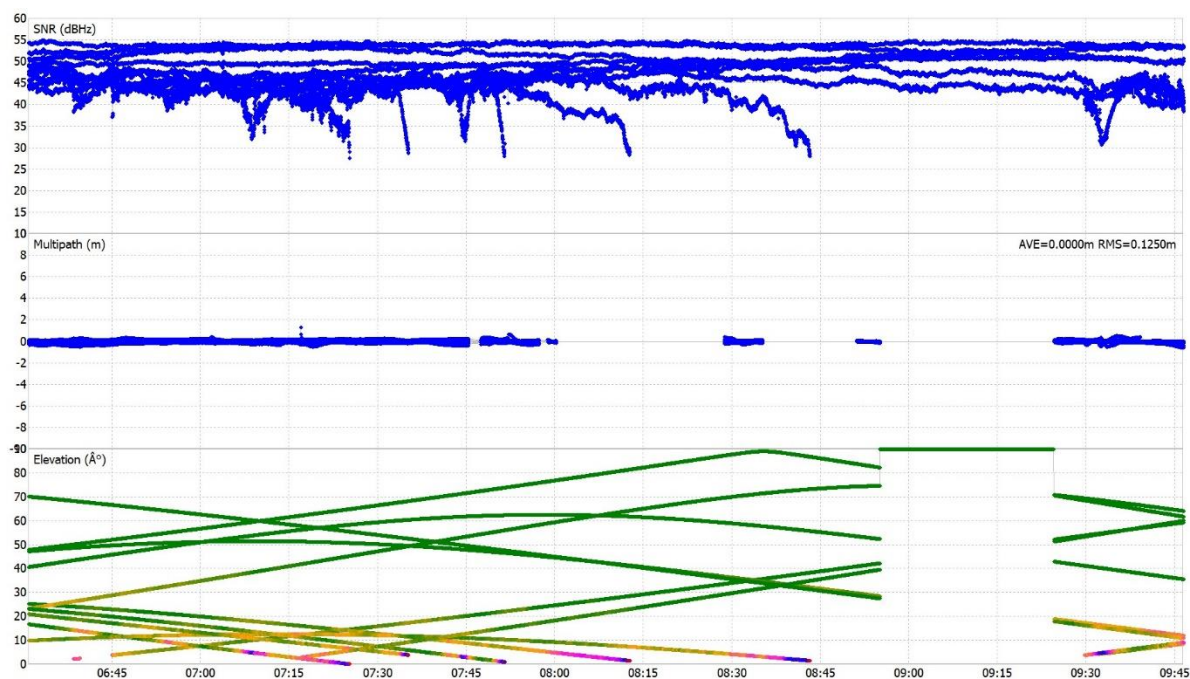
Slika 122: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1



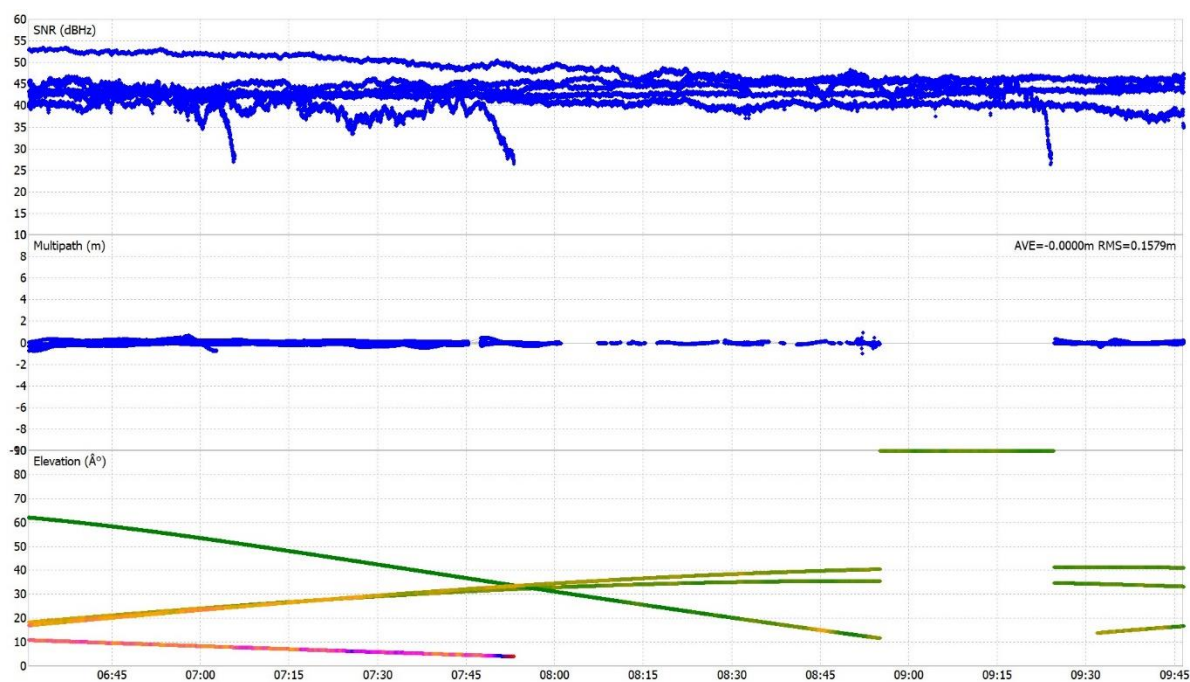
Slika 123: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2



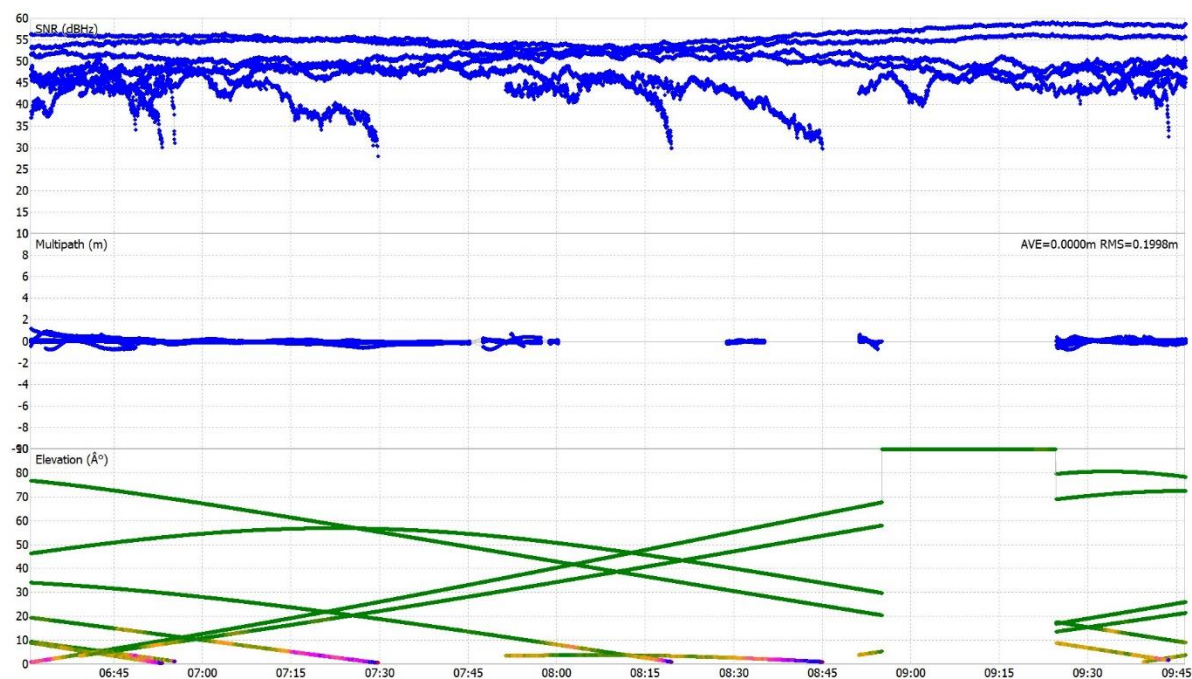
Slika 124: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2



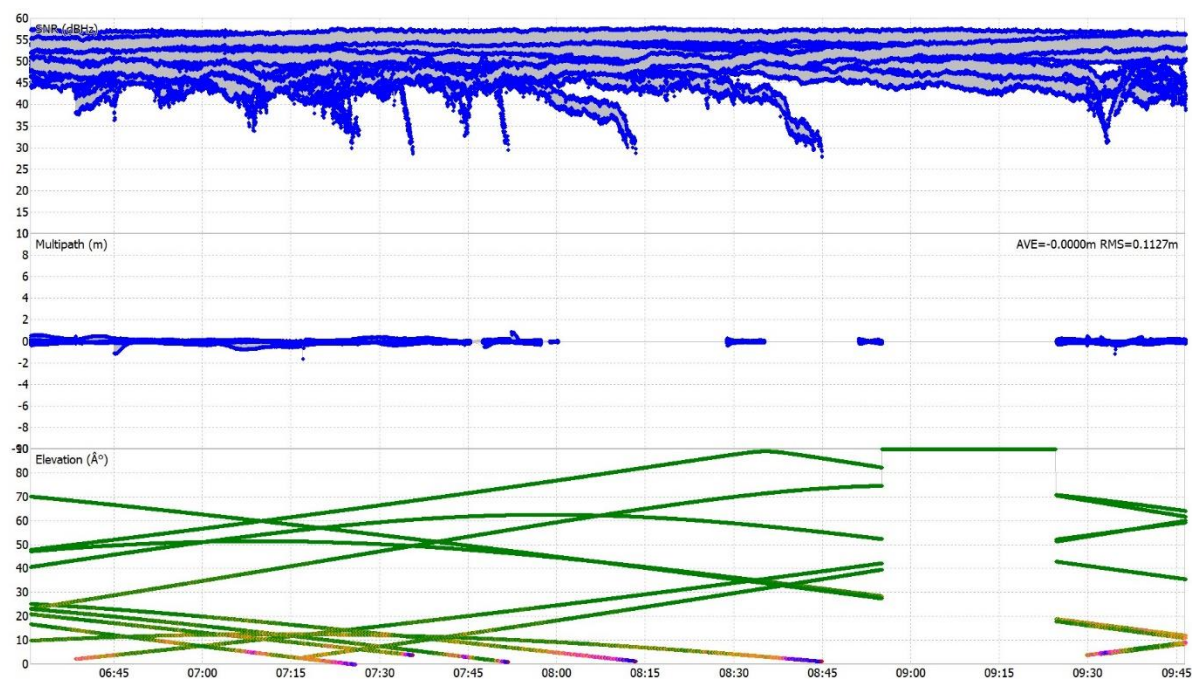
Slika 125: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b



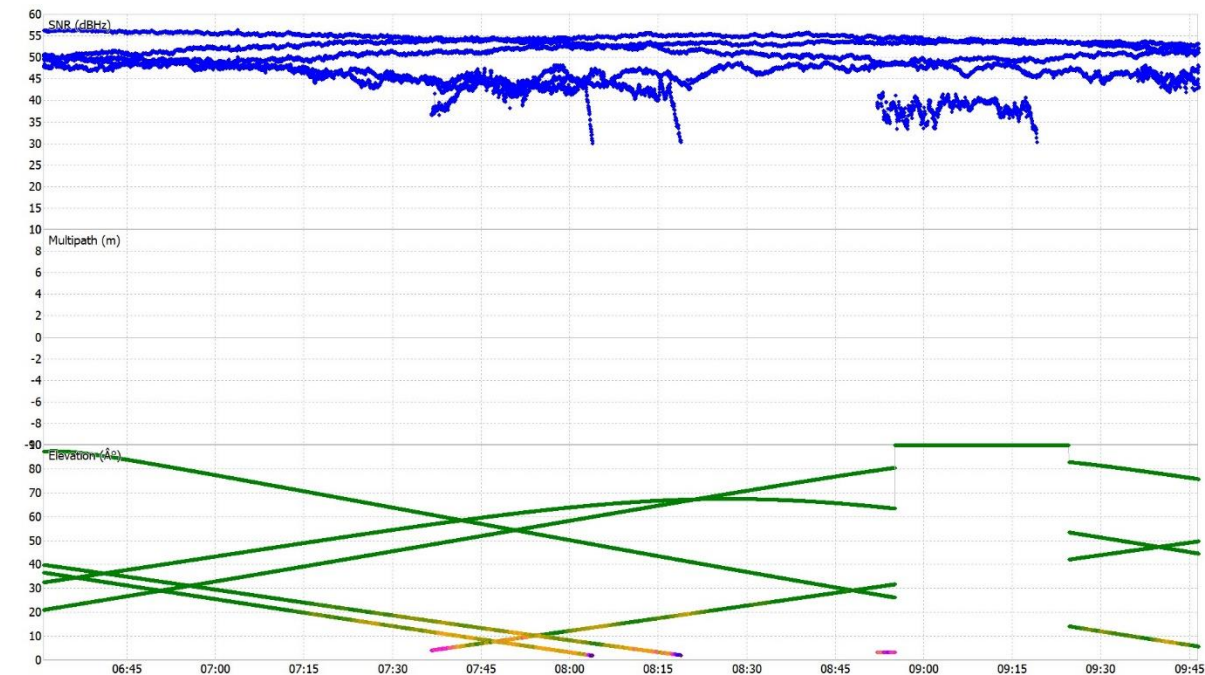
Slika 126: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2



Slika 127: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5



Slika 128: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a



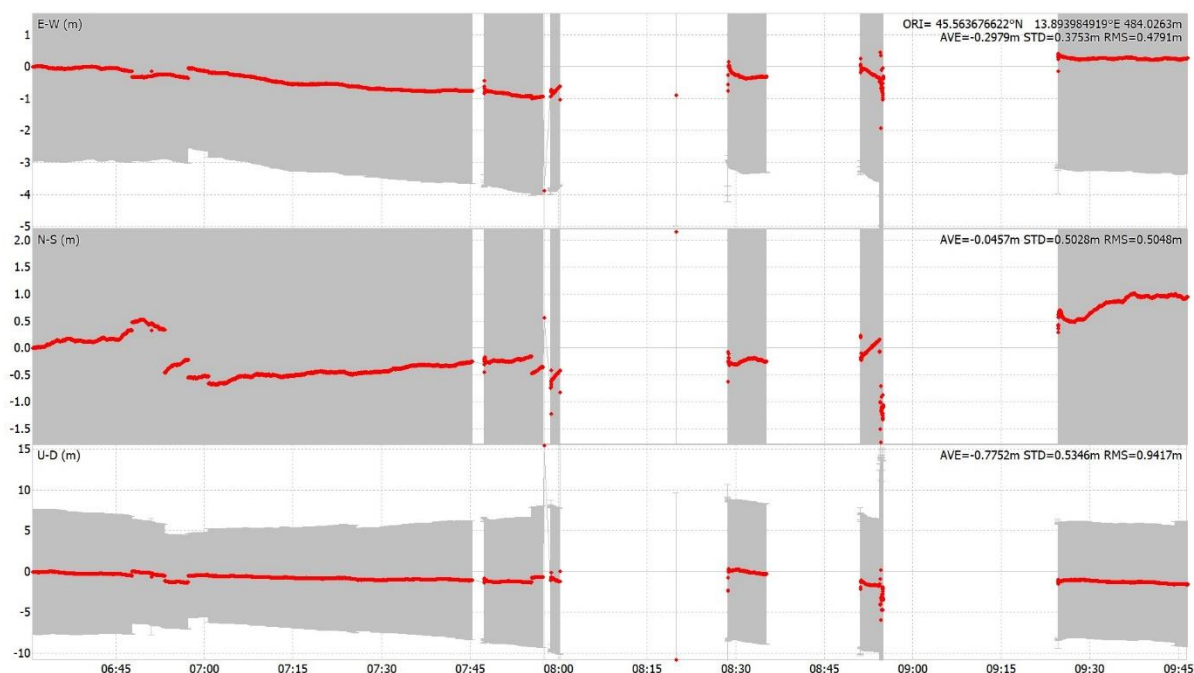
Slika 129: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a

Preglednica 13 strnjeno opisuje ugotovitve, prikazane na izrisih (Slika 119 – Slika 129) 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.

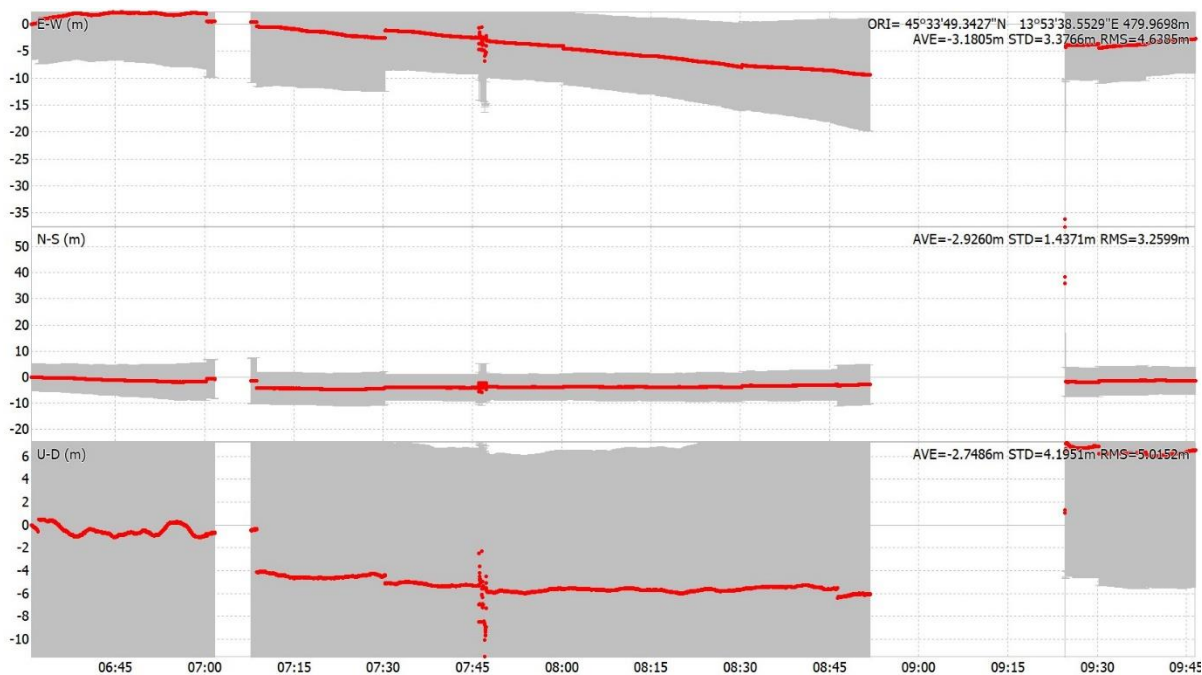
Preglednica 13: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami

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

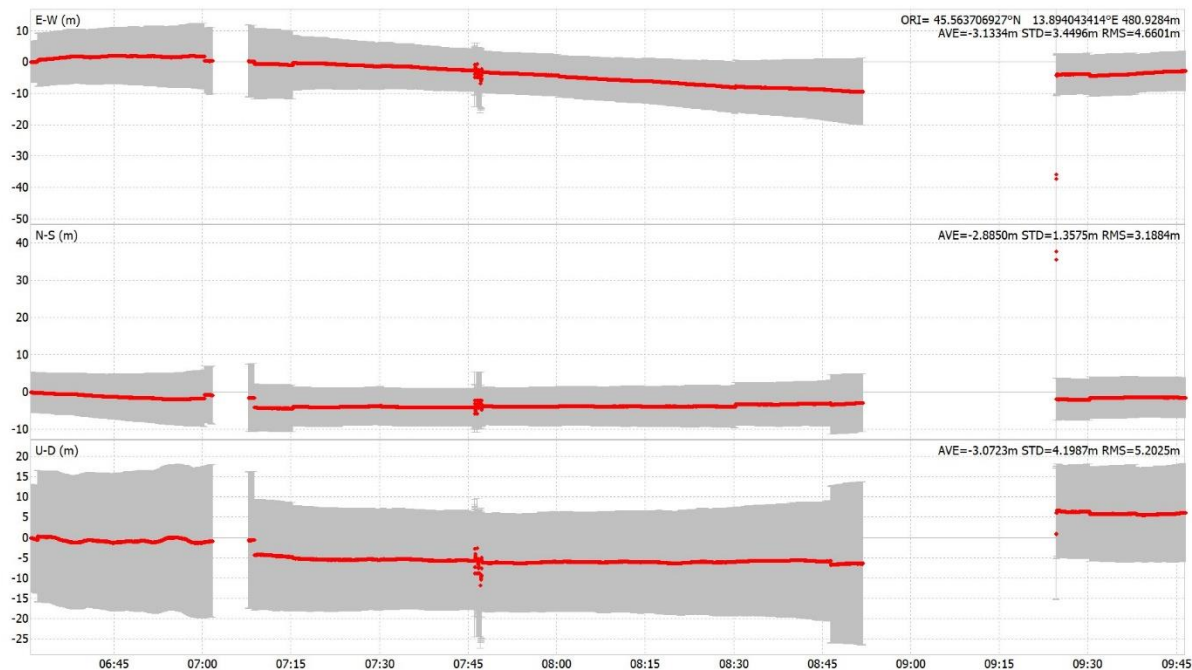
○ Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. Single Point Positioning – SPP)



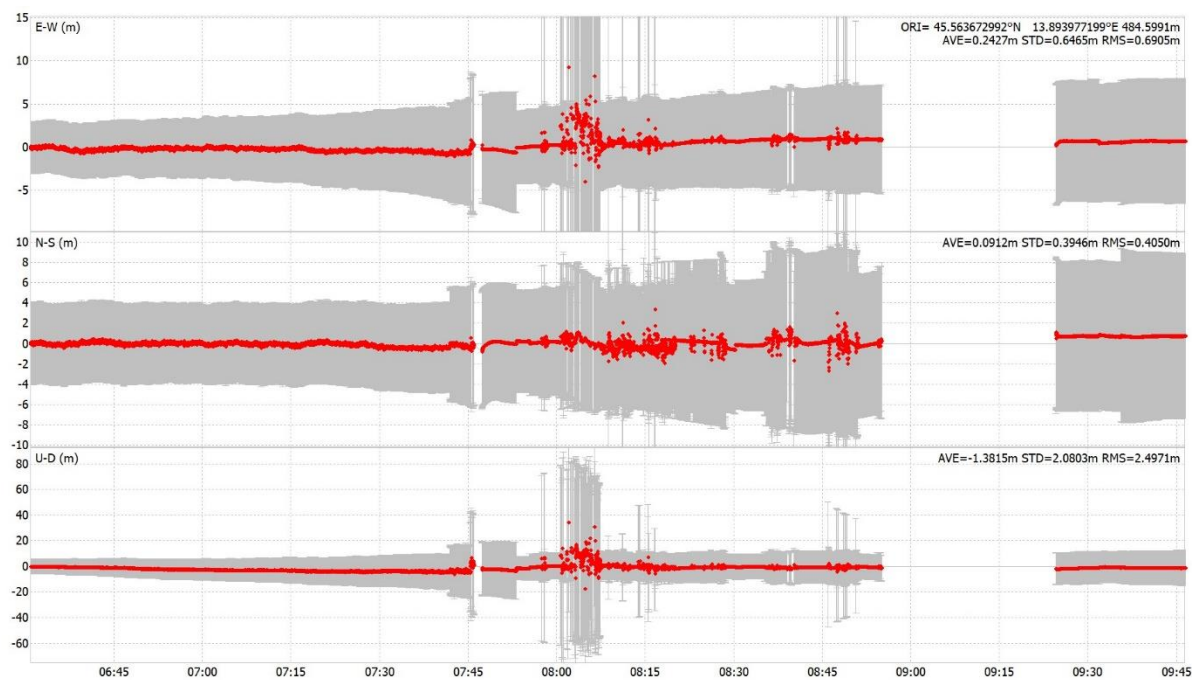
Slika 130: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, GPS



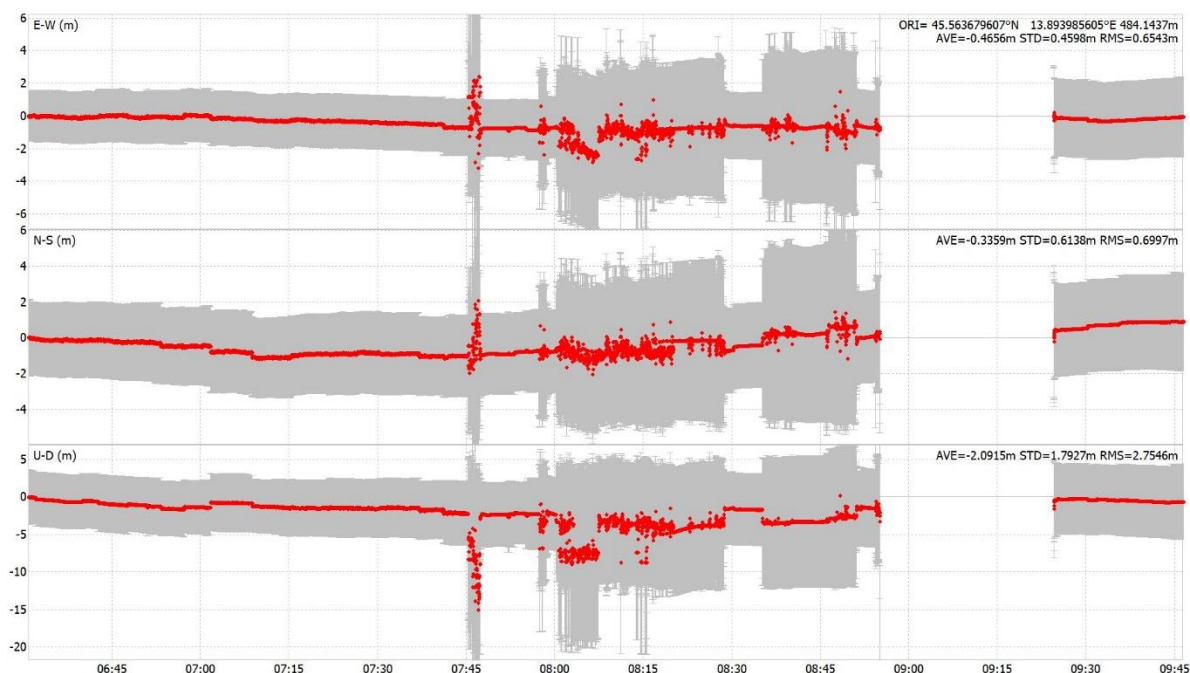
Slika 131: Črnotiče, 15/05/2024 Leica GS18T, SPP-položaji, GLONASS



Slika 132: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, Galileo



Slika 133: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, BeiDou



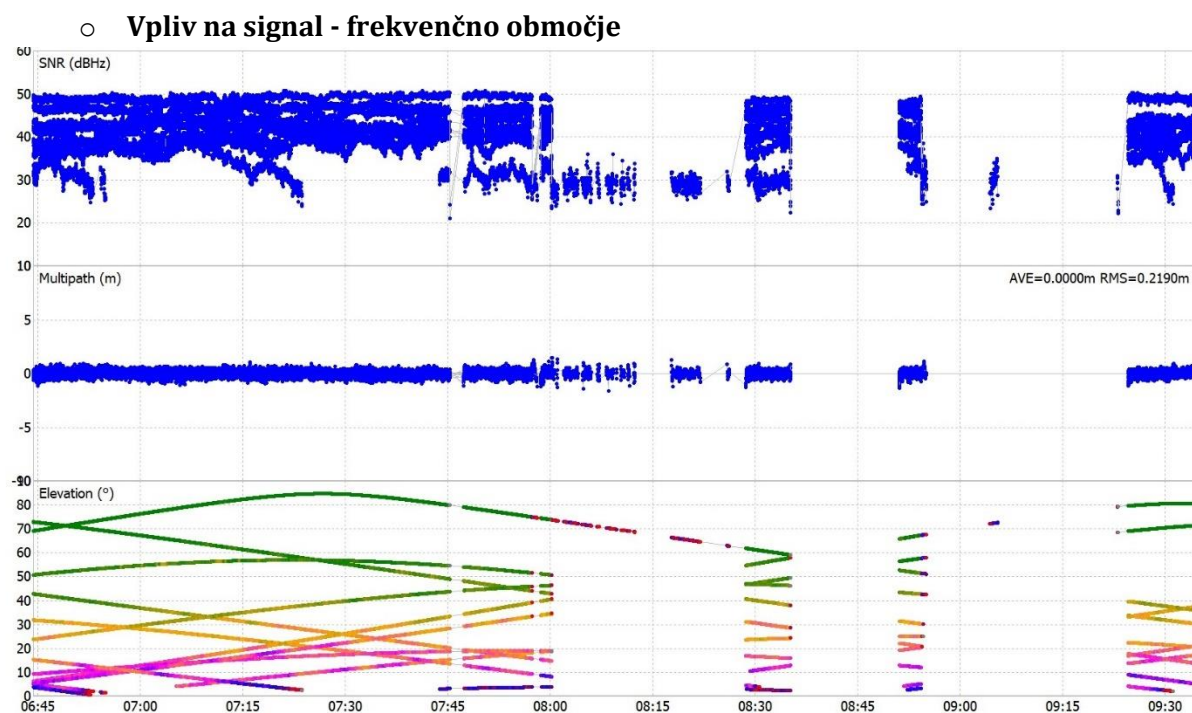
Slika 134: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T, SPP-položaji, vse konstelacije

Iz rezultatov (Preglednica 14 ter slike (Slika 130- Slika 134)) 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).

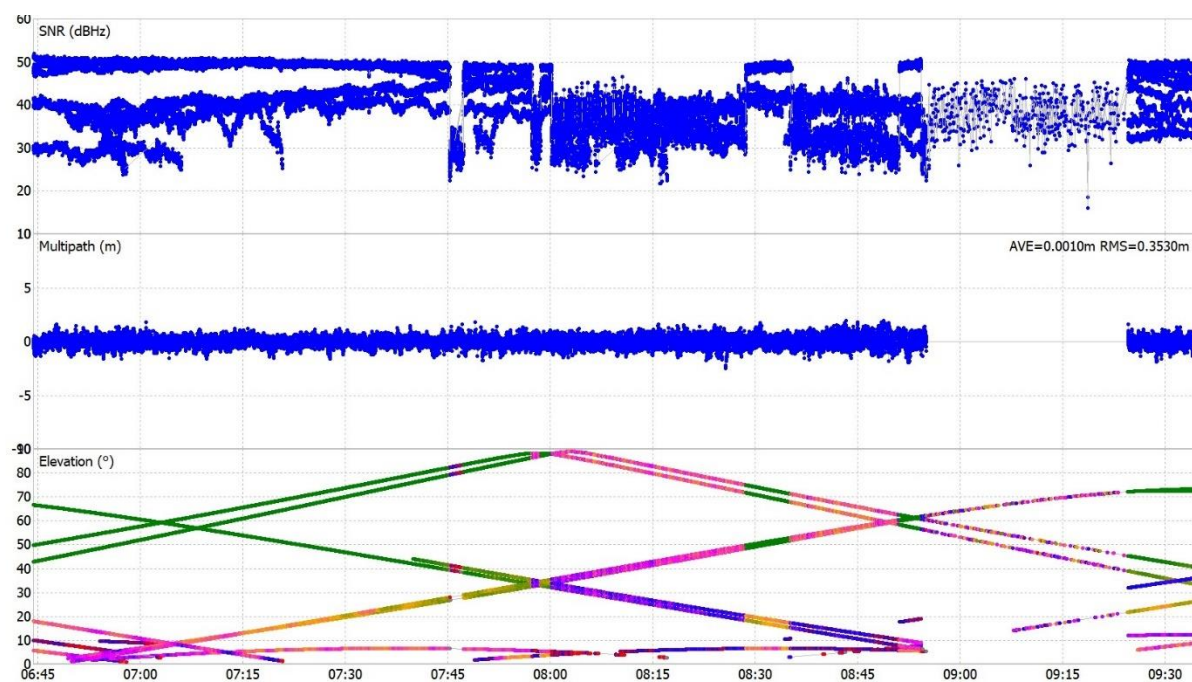
Preglednica 14: Črnotiče, 15/05/2024, Leica GS18T. SPP-položaji, faktorji RMS za posamezne konstelacije

	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

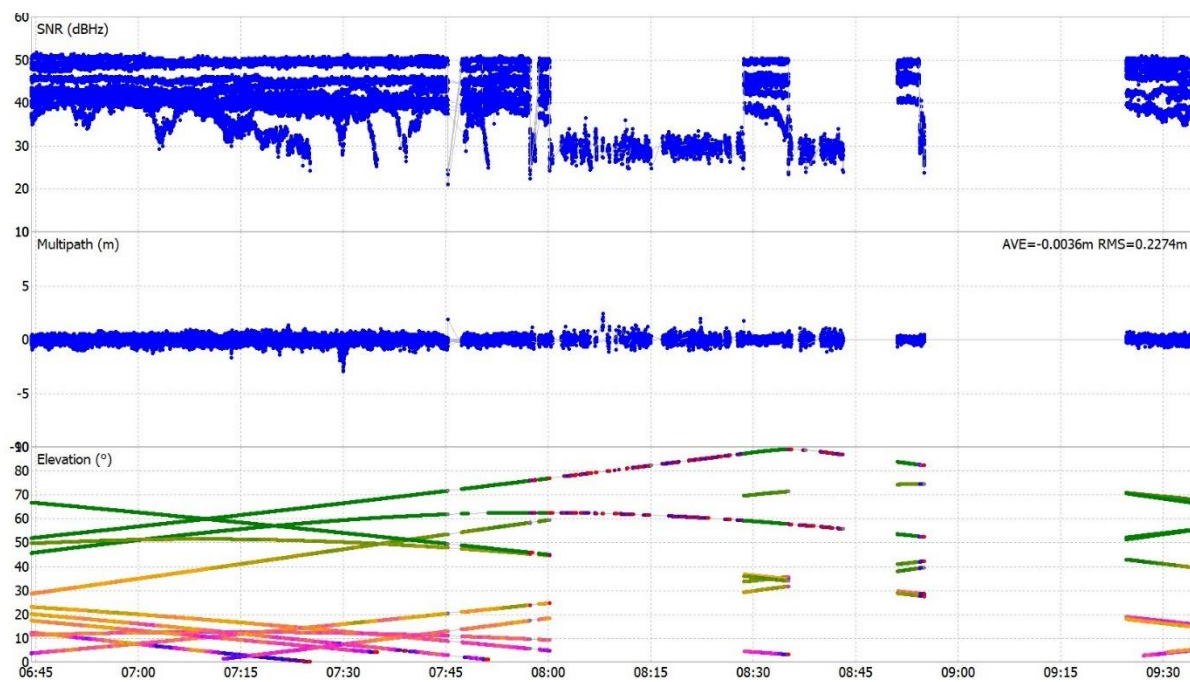
3.2.5.8 Vpliv motilnikov na sprejem signalov GNSS (Trimble R12i)



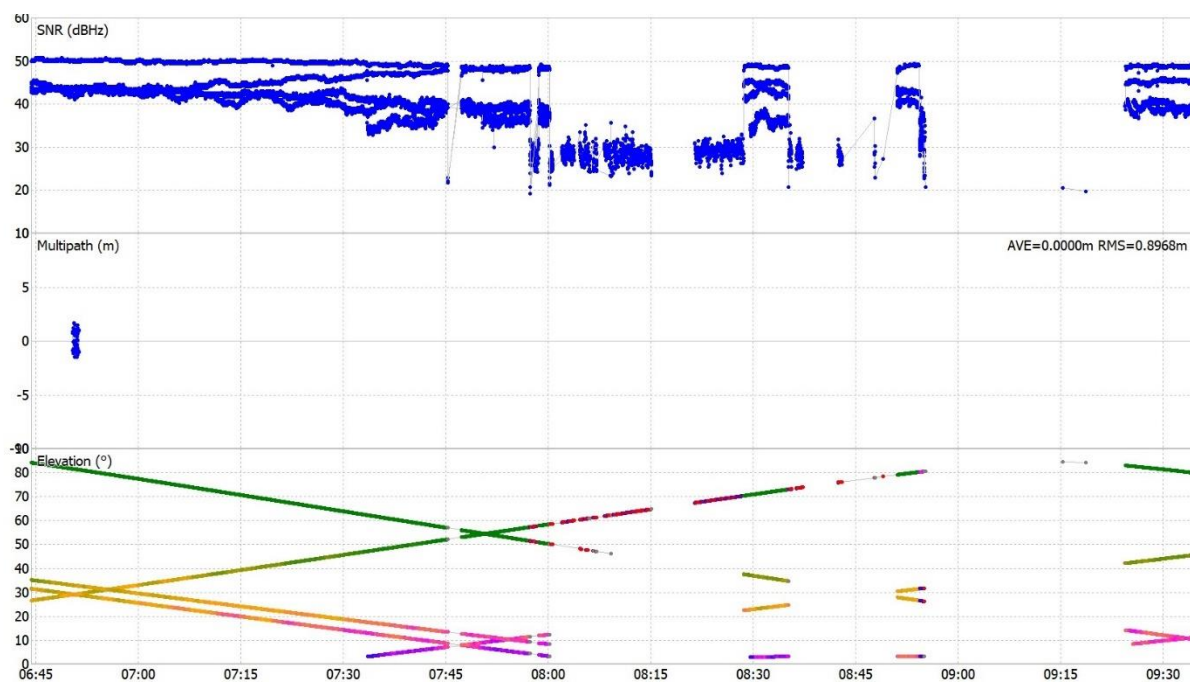
Slika 135: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L1



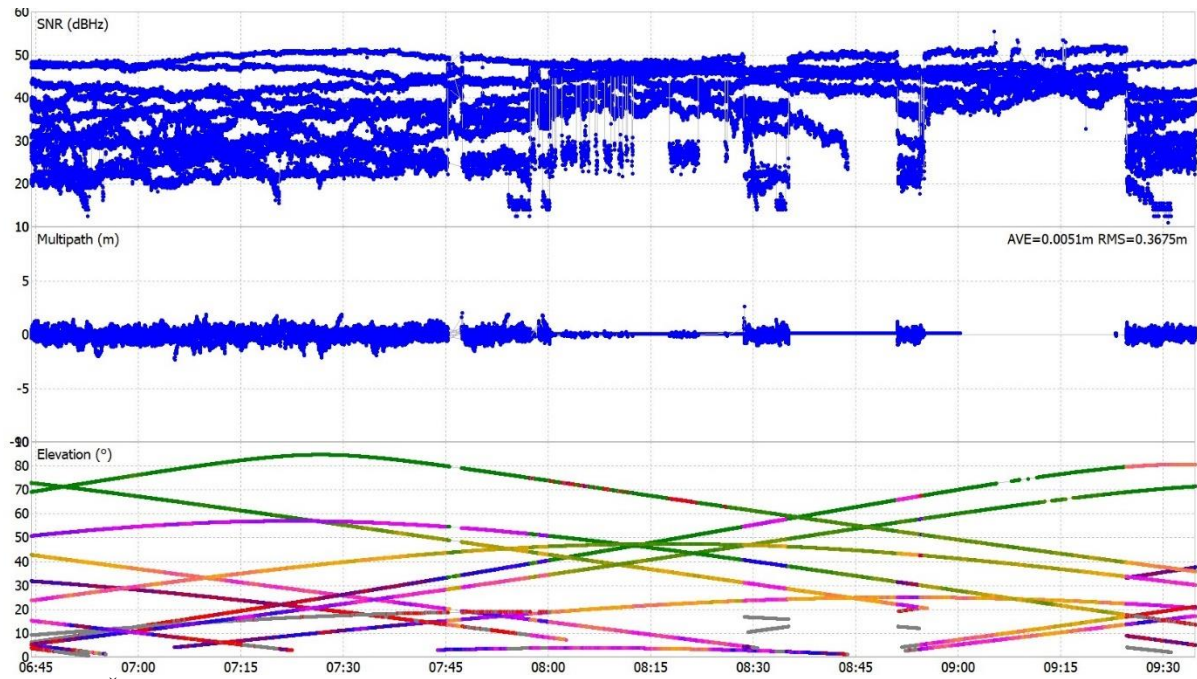
Slika 136: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G1



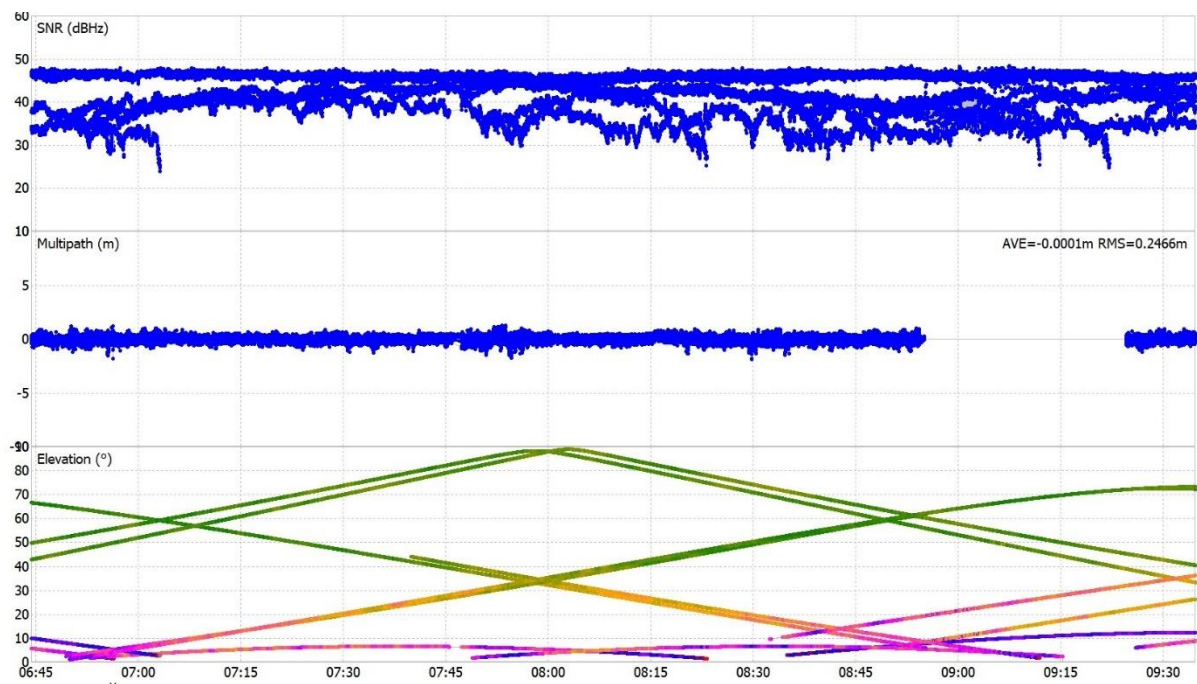
Slika 137: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E1



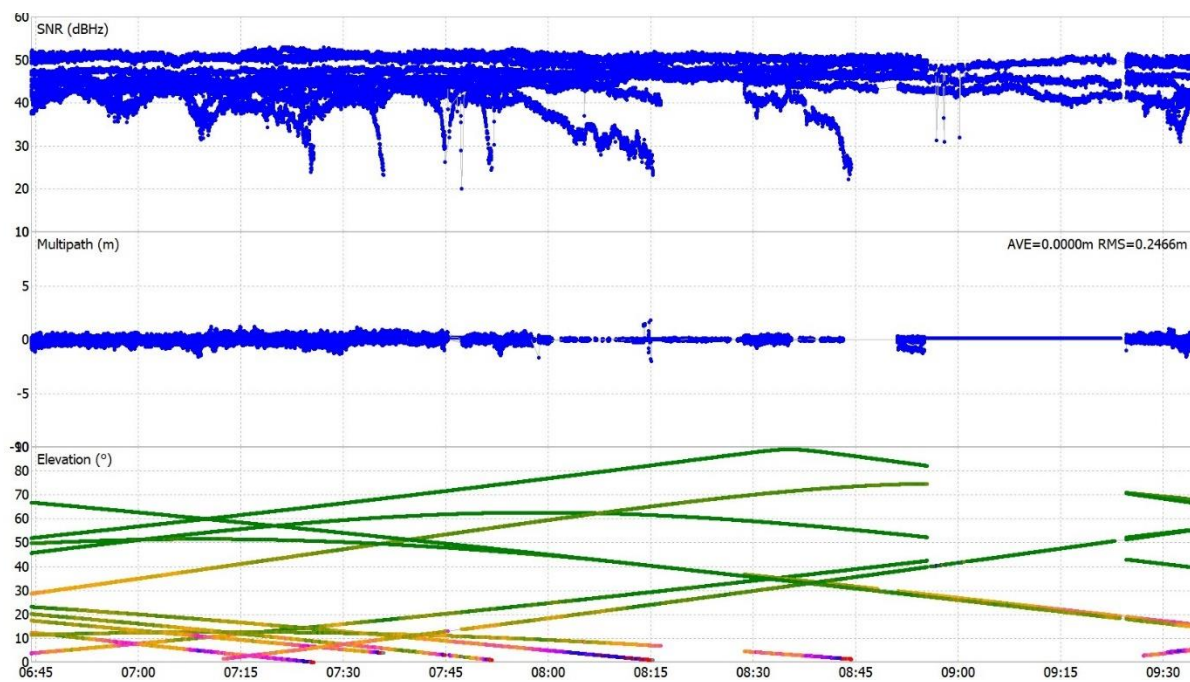
Slika 138: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B1



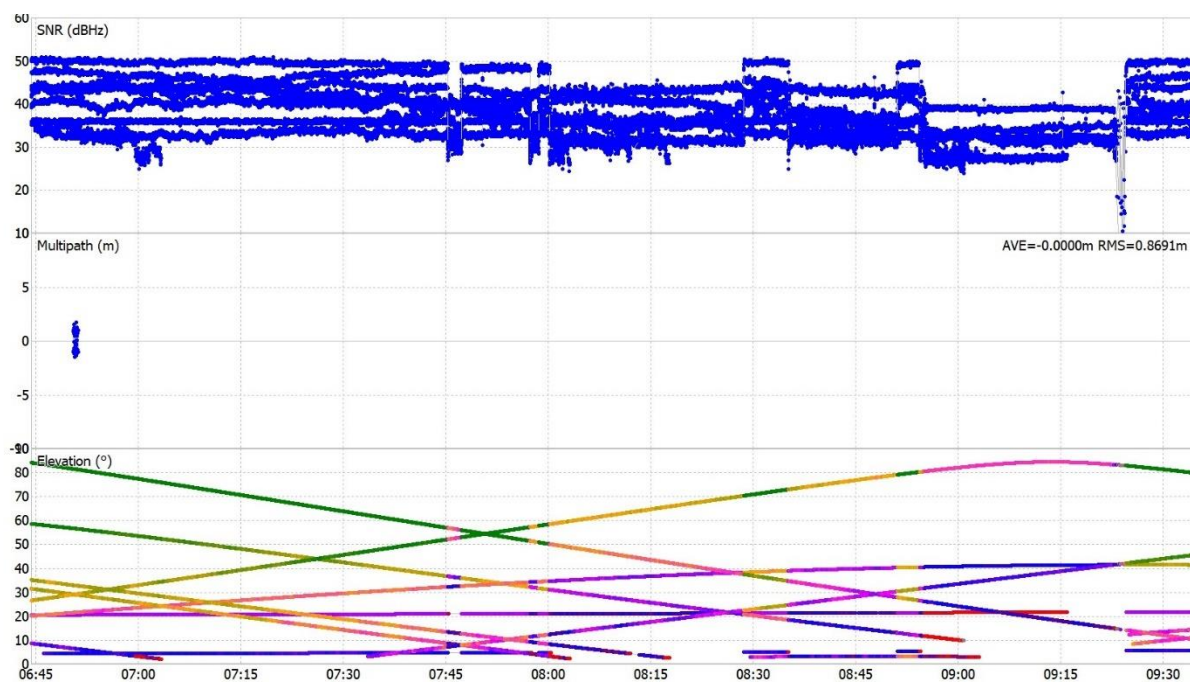
Slika 139: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L2



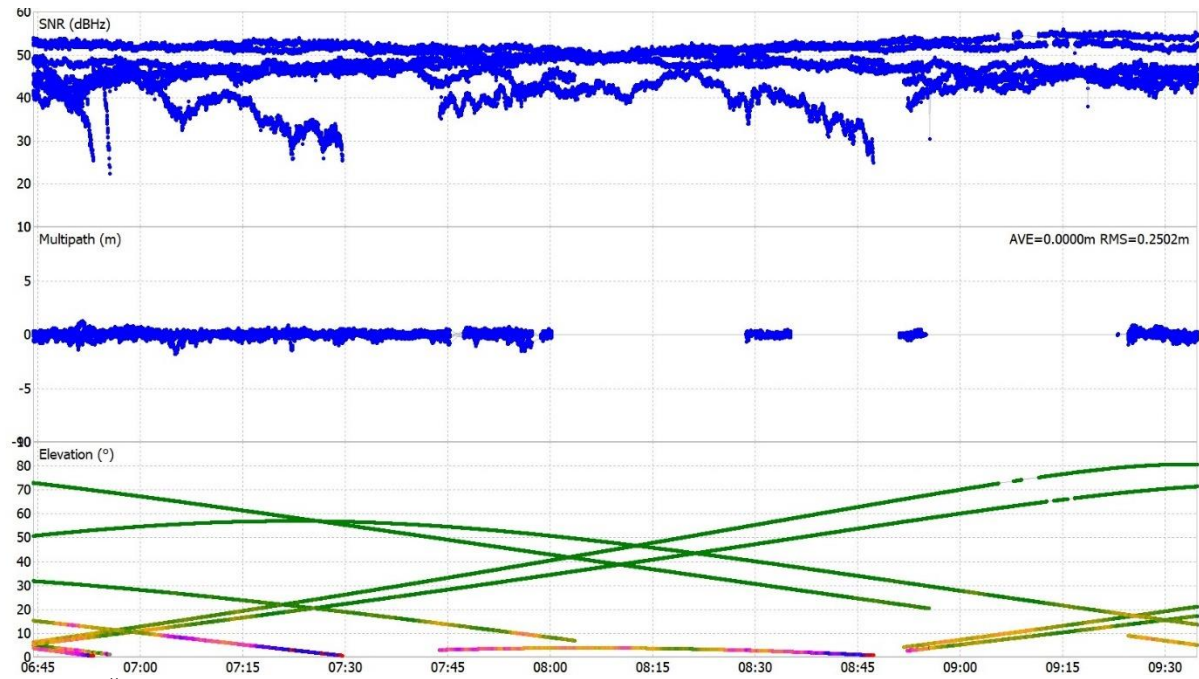
Slika 140: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GLONASS, G2



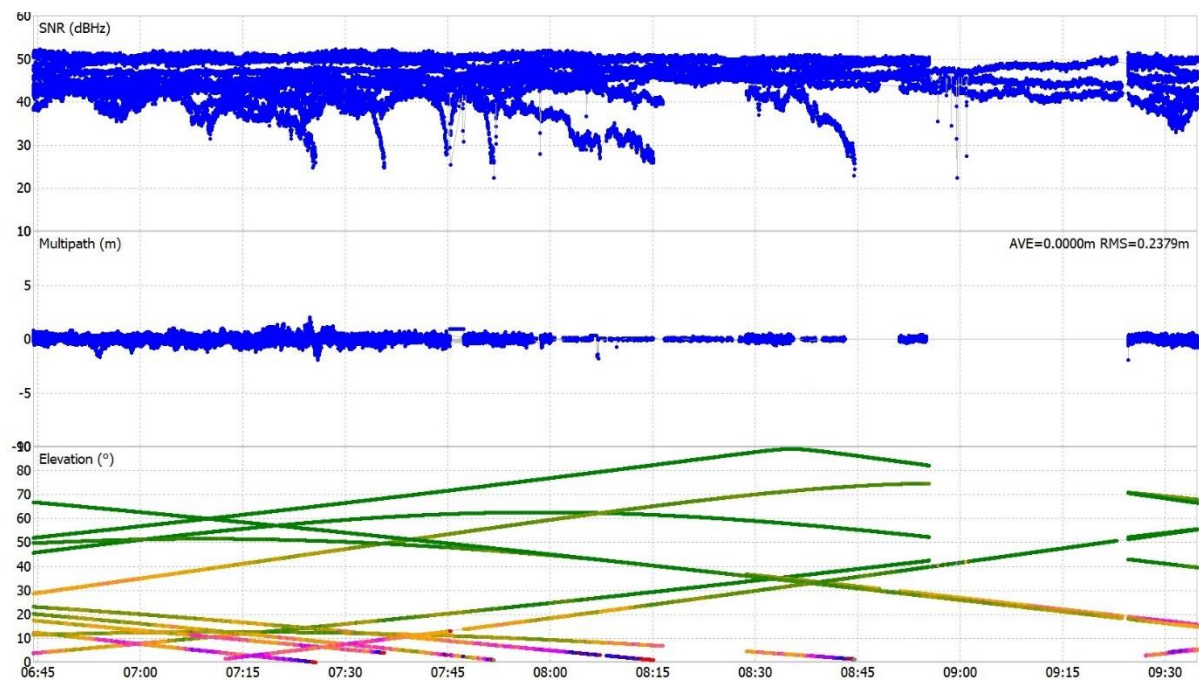
Slika 141: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5b



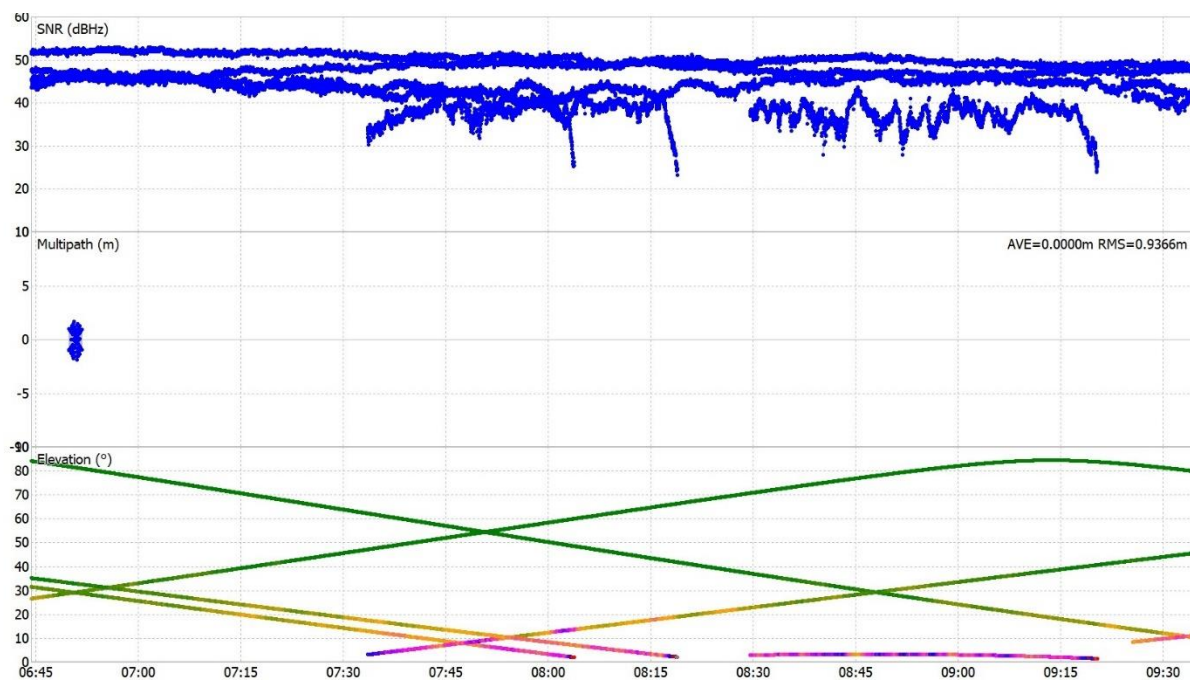
Slika 142: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou, B1-2



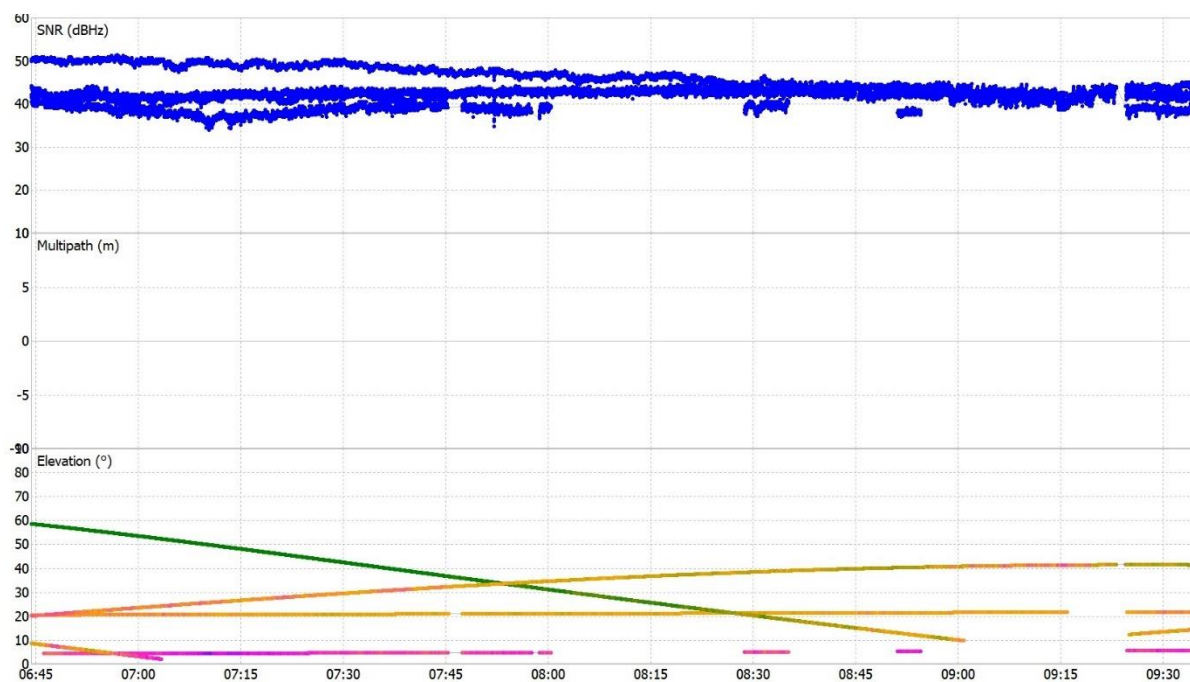
Slika 143: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za GPS, L5



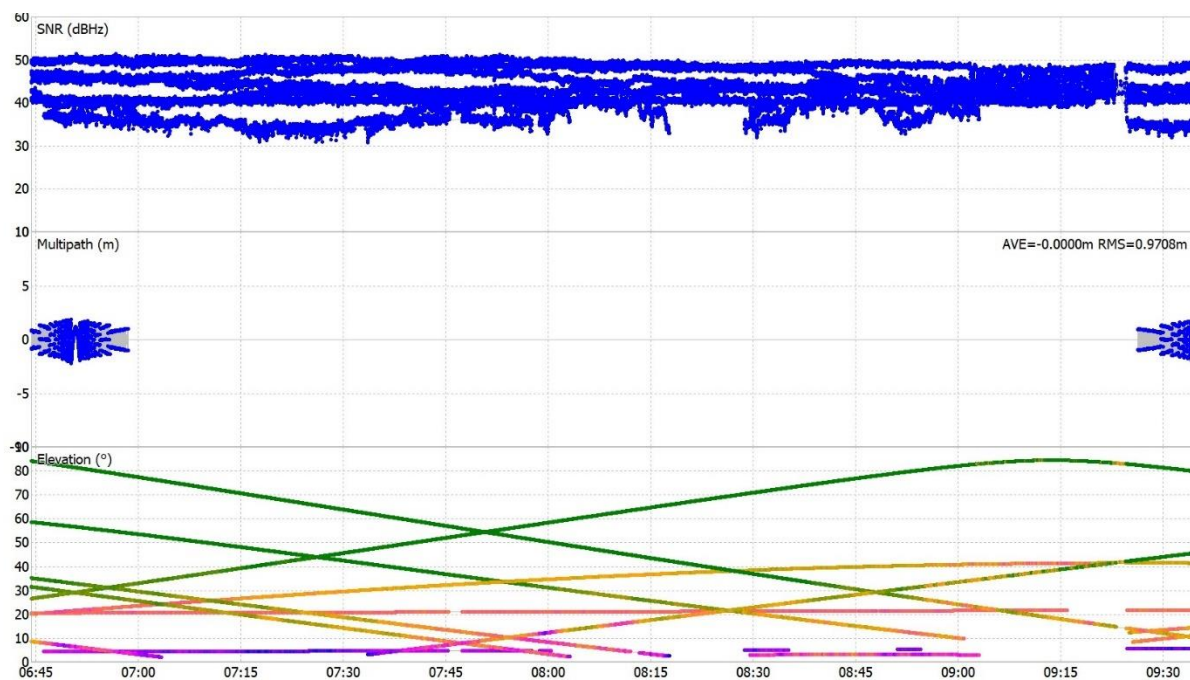
Slika 144: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za Galileo, E5a



Slika 145: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2a



Slika 146: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B2b



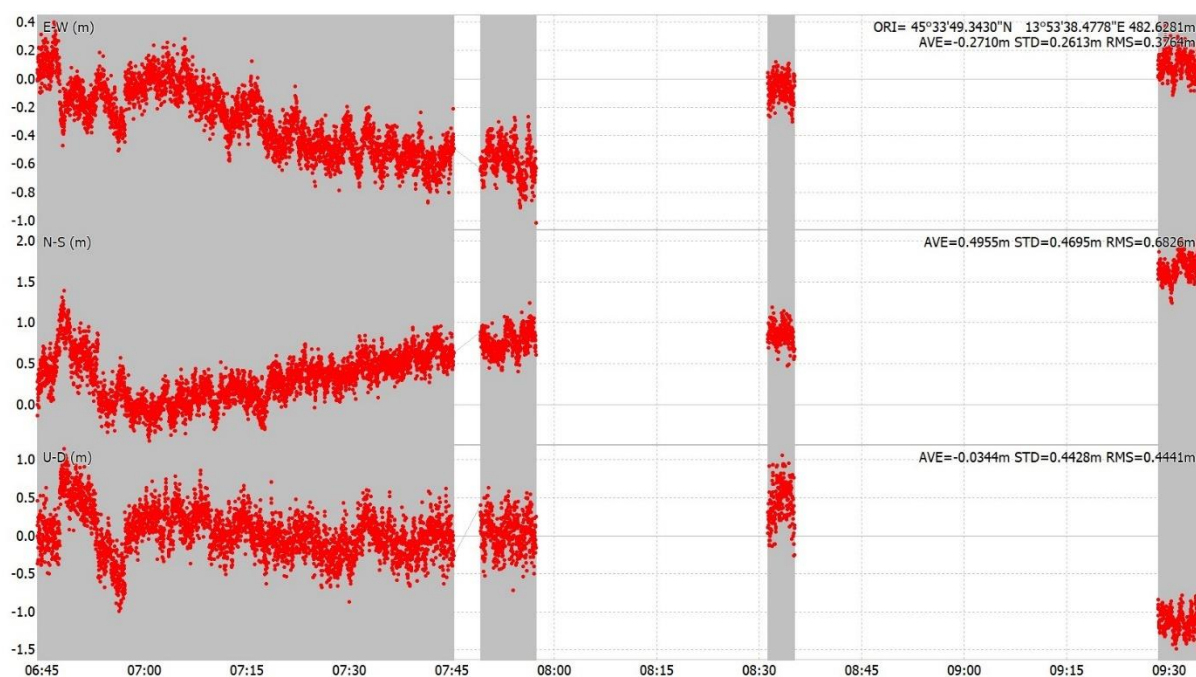
Slika 147: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, izris vrednosti SNR, odboja in višinskega kota za BeiDou B3

Pomembnejše ugotovitve z zgornjih prikazov (Slika 135 – Slika 147) 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.

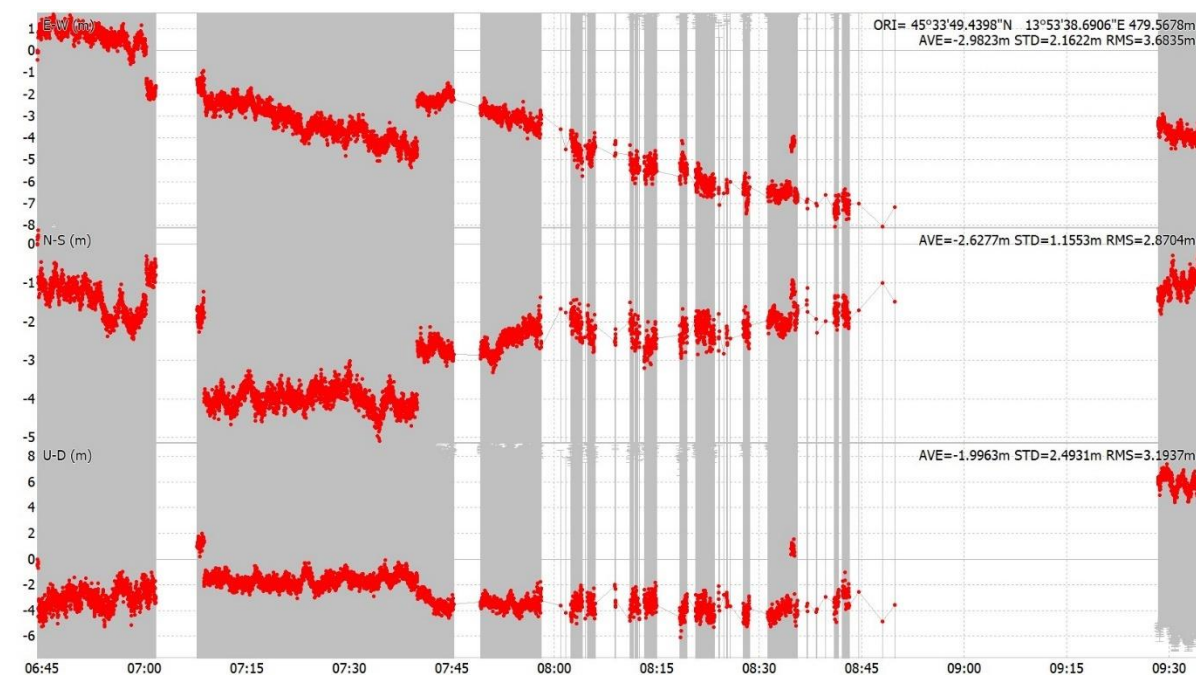
Preglednica 15: Trimble R12i. izguba signalov po konstelacijah in frekvencah med motnjami

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

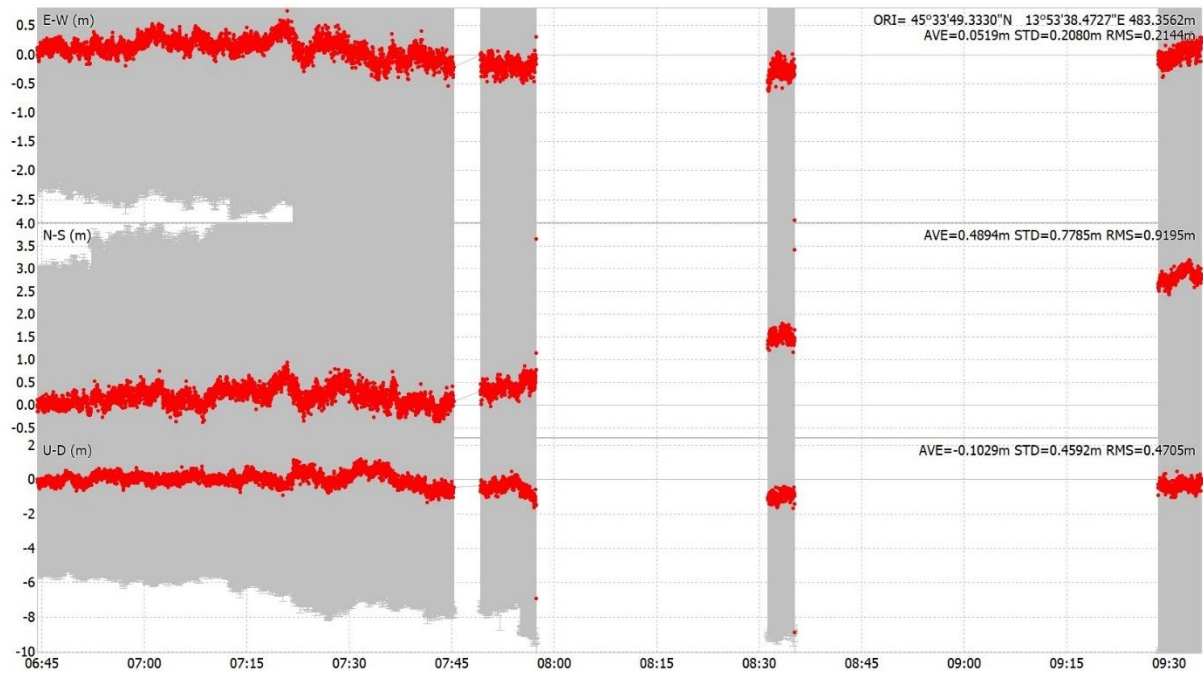
○ Vpliv na absolutno določen kodni položaj (ang. *Single Point Positioning* – SPP)



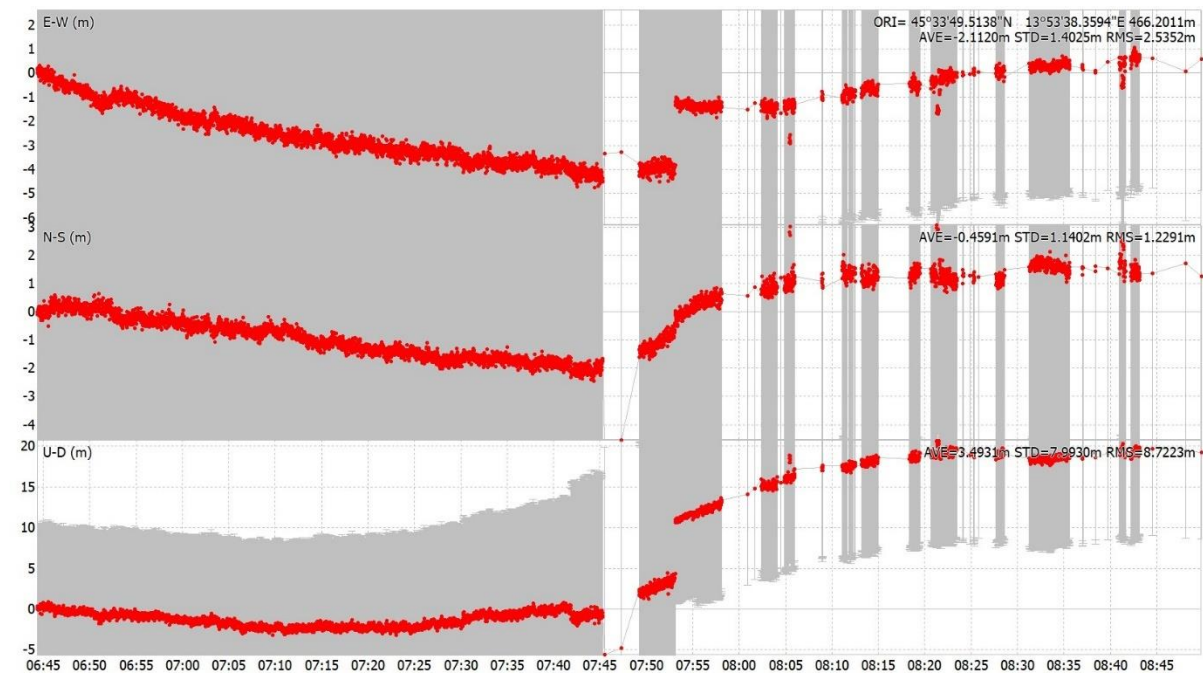
Slika 148: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, GPS



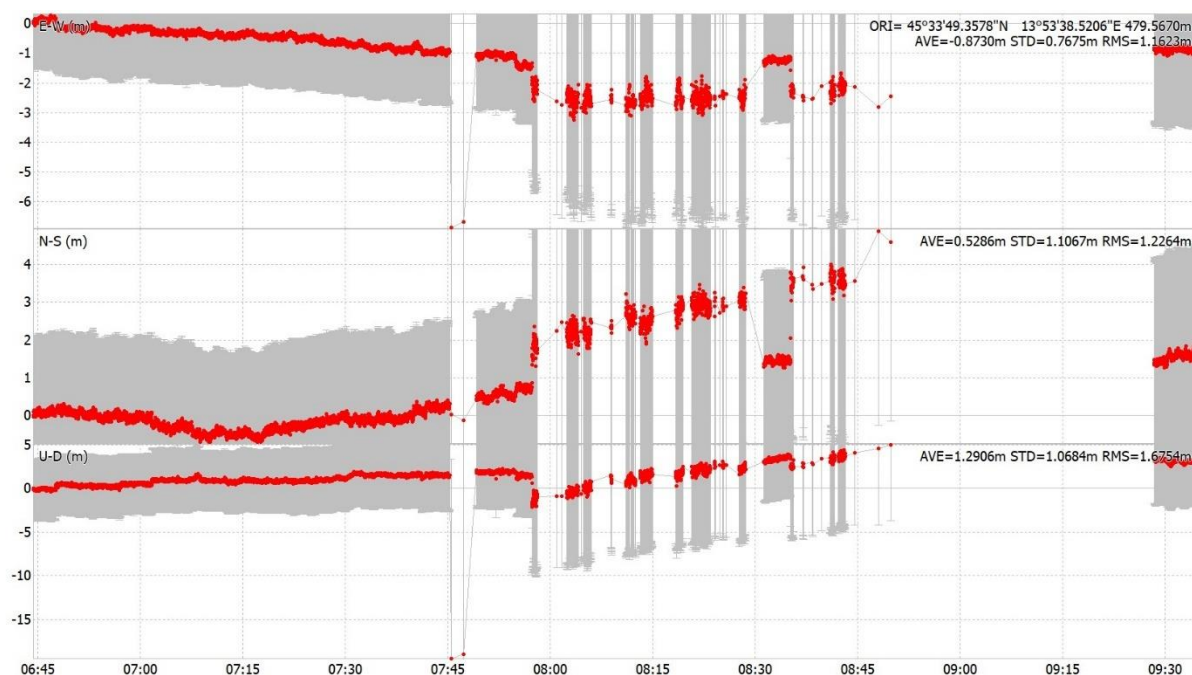
Slika 149: Črnotiče, 15/05/2024 Trimble R12i, SPP-položaji, GLONASS



Slika 150: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, Galileo



Slika 151: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, BeiDou



Slika 152: Črnotiče, 15/05/2024, Trimble R12i, SPP-položaji, vse konstelacije

Iz rezultatov (Preglednica 16 ter slike (Slika 148 – Slika 152)) 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

3.3 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-kilometrsko 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.

-poglavje se bo dopolnjevalo z nadaljnjimi terenskimi testi-

4 Integracija in implementacija metodologije in izdelava priporočil nadaljnjega dela

Poglavje se bo izdelalo po opravljenih terenskih testih v letu 2025.

4.1 Integracija in implementacija metodologije

V delu

4.2 Izdelava priporočil nadaljnjega dela

V delu

4.2.1 Seznam trenutnih priporočil dela (do septembra 2024)

- 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.
- 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 času meritev in naknadno ugotavljanje, ali so bile meritve s satelitov pristne.
 - naj 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) 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 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).

5 Zaključek

Poglavje se bo izdelalo po opravljenih terenskih testih v letu 2025.

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