

ODZIV GEODETSKIH INSTRUMENTOV GNSS NA MOTENJE Z ODDAJNIKOM PRELETNEGA SIGNALA L1

OPERATION OF GEODETIC GNSS INSTRUMENTS UNDER CHIRP SIGNAL L1 JAMMING

Franc Dimc, Polona Pavlovčič Prešeren, Matej Bažec

UDK: 528.28:528.5:655.023
 Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
 Prispelo: 1. 2. 2021
 Sprejeto: 14. 5. 2021

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.189-204
 SCIENTIFIC ARTICLE
 Received: 1. 2. 2021
 Accepted: 14. 5. 2021

IZVLEČEK

V prispevku predstavljamo rezultate testa ranljivosti geodetskih sprejemnikov GNSS ob namernem motenju signala v frekvenčnem področju L1 tehnologije GPS (angl. Global Positioning System). Preizkusili smo odziv devetih sprejemnikov GNSS različnih proizvajalcev, in sicer Leica Geosystems AG, Trimble Inc. in Javad GNSS Inc. Praktični preizkus je bil zasnovan na statičnih in kinematičnih motnjah signalov. Statične motnje z mirujočim motilnikom na različnih oddaljenostih od sprejemnikov (od 10 do 160 metrov) so trajale večkrat zaporedoma po tri minute. Za kratkotrajne kinematične motnje smo namestili motilnik v vozilo, ki se je testnemu območju približevalo z različnimi hitrostmi. Analiza različnih scenarijev je pokazala, da so motilniki v nekaterih situacijah onemogočili sprejem signalov s satelitov GPS, medtem ko so se sprejemniki na motnje signalov GLONASS odzvali različno. Ker med meritvami julija 2019 Galileo ni deloval kot predvideno, smo v študijo vključili le GPS in GLONASS. Geodetski instrumenti GNSS so se na motenje signala odzvali z zmanjšanjem razmerja med signalom in šumom (angl. signal-to-noise ratio – SNR) in bodisi s popolno nezmožnostjo določitve položaja bodisi z nepravilnim izračunom faznih neznank (inicializacijo) ter posledično nepravilno določitvijo položaja. Vzrok popolne nezmožnosti sprejema signala najbolj pripisujemo bližini motilnika, za nepravilno kodno in/fazno določitve položaja pa tudi trajanju motenja.

KLJUČNE BESEDE

GNSS, namerno motenje signala, motilnik L1, prekinitve signala, razmerje signal-šum

ABSTRACT

This paper presents the results of a vulnerability test of several geodetic Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers in case of intentional signal interference in the frequency L1 for GPS (Global Positioning System). Nine instruments from different manufacturers (i.e., Leica Geosystems AG, Trimble Inc., Javad GNSS) were tested. The test was based on static and kinematic jamming. A static scenario with three-minute interruptions was followed by experiments with a stationary jammer located at distances from 10 m to 160 m from the receivers. For short-term kinematic interference, the jammer was installed in the vehicle, which passed the GNSS instruments at different speeds. An analysis of different scenarios showed that the jammer interrupted GPS but not GLONASS signals in certain situations. Since Galileo was not nominally operational at the time of the July 2019 measurements, only GPS and GLONASS were eligible for the study. The geodetic GNSS instruments reacted to the interruptions with a decreased signal-to-noise-ratio (SNR) and either with a complete inability to determine the code/phase position or with an incorrect calculation of phase ambiguities (initialization), which also affected the quality of the positioning. The proximity of the jammer played the most significant role in the complete inability to receive the signal; however, for the incorrect positioning longer duration of jamming was also a reason.

KEY WORDS

GNSS, intentional signal interference, jammer L1, signal interruptions, signal-to-noise ratio

1 UVOD

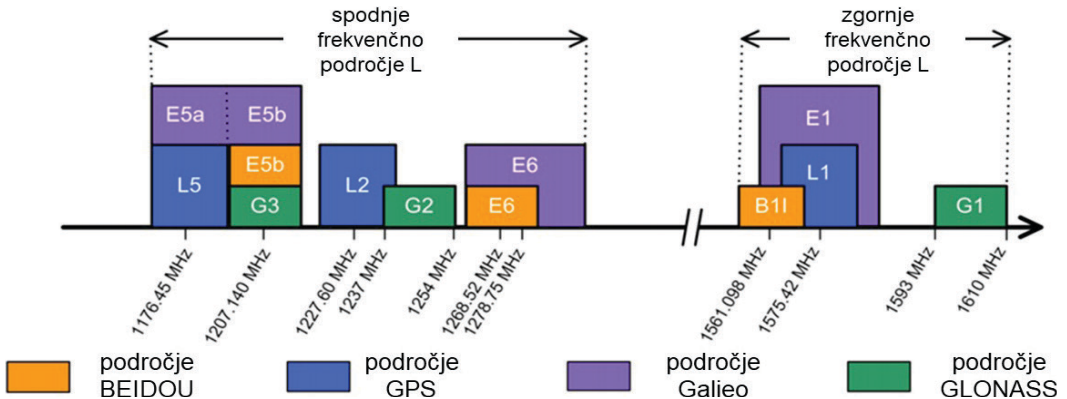
Pri vsakodnevni uporabi in zanašanju na tehnologijo globalnega pozicioniranja enega ali več globalnih satelitskih navigacijskih sistemov (angl. *Global Navigation Satellite System – GNSS*) se premalo zavedamo, da je satelitske signale GNSS precej enostavno motiti. Motnje so lahko nenamerne ali namerne. Prve izhajajo iz naprav, ki oddajajo signale večkratnikov oziroma višjih harmonikov osnovne frekvence, kateri sovpadajo neposredno v frekvence signalov GNSS ali v njihovo bližino. Povzročitelji nenamernih motenj so okvarjeni radijski oddajniki, kot so radioamaterske naprave, radarji, televizijski oddajniki, bazne postaje mobilnih omrežij ali celo sateliti. Namerne motnje so v zadnjem času zelo pogoste v vojaški in tudi civilni rabi. Pri slednji so najpogostejše motnje signalov iz naprav za zagotavljanje zasebnosti (angl. *personal privacy device – PPD*), ki so povezane z izogibanjem plačilu cestnine, s kriminalnimi dejanji, na primer tatvinami vozil, ki imajo vgrajeno možnost sledenja, in z izogibanjem sledenju. Seveda obstajajo tudi drugi razlogi za nastanek motenj, od naravnih do nenamernih umetnih, katerih učinke je mogoče zaznati in jih urejeno opisati v standardizirani obliki poročila (Thombre et al., 2018).

Uporaba motilnikov GNSS je zakonsko prepovedana in kazniva, ker uporabnik nima dovoljenja za oddajanje signala na frekvencah, določenih za GNSS. Motenje elektronskih naprav poteka s posebnim instrumentom, ki oddaja signal z enako frekvenco, kot je frekvenca signalov, ki se jih želi motiti. Pri GNSS je motenje zelo enostavno, saj so signali, ki prispejo na Zemljo, zelo šibki. Motilna naprava (angl. *jammer*) ustvari motilni signal, ki v skrajnem primeru lahko preglasi s satelita sprejeti signal in povzroči nezmožnost sprejema navigacijskih signalov in posledično določanje položaja. Zaradi karakteristik sprejemnikove antene je sprejemnik občutljivejši za motilne signale, sprejete z višjih višinskih kotov. Precej bolj tehnično so izpopolnjeni potvarjalniki signalov (angl. *spoofers*), kjer naprava oddaja lažni signal, zaradi česar je določitev položaja nepravilna. Težava pri tem je, da obe vrsti naprav vplivata na pravilnost ali sploh zmožnost določitve položaja in ju je brez dodatne namenske opreme izredno težko locirati.

GNSS pa ni namenjen le lokacijskim storitvam, ampak tudi prenosu časa za globalno poenoteno delovanje. Poleg transporta in zaščite ter reševanja se na optimalno delovanje naprav GNSS zanaša tudi gospodarska, komunikacijska in finančna infrastruktura. Zakonodajni vidik uporabe motilnikov podrobno opisujeta Rettinger in Batagelj (2013). Skupno izhodišče pri zakonskih rešitvah držav je, da je uporaba motilnikov strogo prepovedana. Mehiška vlada je izredno zaostriła kaznovalne ukrepe po ugotovitvi, da so bili v 85 % kraj tovornjakov uporabljeni motilniki (RNT, 2020). Prepoved rabe motilnikov ne izničuje pojava namernega motenja signalov GNSS, česar se proizvajalci geodetske opreme GNSS že dolgo zavedajo, zato skušajo z različnimi konstrukcijskimi in programskimi rešitvami učinke motenja signalov s satelitov omiliti ali pa moteče signale čim bolj odstraniti s prilagodljivimi visokofrekvenčnimi siti. K problemu pristopajo na dva načina, lahko izboljšujejo konstrukcijo anten GNSS ali pa v sprejemniku GNSS motnje zaznajo s posebnim programjem in jih rekonstruirajo, da jih lahko odštejejo od opazovanega signala (Borio in Closas, 2017). Pristop k zmanjšanju vpliva motečih signalov je zelo podoben problematiki sprejema odbitih signalov GNSS (angl. *multipath*) (Chang, 2011; Špánik in Hefty, 2017). V obeh primerih je cilj povečati razmerje med signalom in šumom (angl. *signal-to-noise ratio – SNR*). Pri konstrukcijskih rešitvah lahko omenimo nenehno izpopolnjevanje anten GNSS, kar je podrobno opisano v Rettinger in Batagelj (2013).

Motilniki GNSS oddajajo signale, ki v najpogosteje periodično preletajo frekvenčno področje s spreminjanjem frekvence, osredinjene okoli določenih vrednosti. Pri GPS se vrivajo v frekvenčna področja L1 (1575,42 MHz s širino 15,345 MHz), L2 (1227,60 MHz s širino 11,0 MHz) in L5 (1176,45 MHz s širino 12,5 MHz),

pri ostalih globalnih sistemih pozicioniranja se signali motilnikov vrivajo na druge frekvence (slika 1). Ker je uporaba motilnikov signalov GNSS na prostem zakonsko prepovedana in kazniva, večina študij ranljivosti signalov poteka v laboratorijih ali v strogo nadzorovanih razmerah. V Združenem kraljestvu poteka več napovedanih vojaških namernih motenj signalov GNSS, kjer napovedujejo lokacijo, čas in frekvenčno področje motenja (Ofcom, 2021). Pri tem uporabljajo motilnike visokih jakosti, ki vplivajo na instrumente GNSS na oddaljenosti več deset kilometrov (tudi do petdeset) od lokacije motilnika. V večini gre za motnje v zgornjem delu frekvenčnega področja L (frekvence 1575,42 MHz in 1597,55 MHz – 1605,89 MHz).



Slika 1: Frekvenčni spekter za opazovanja GNSS (Reil, 2017).

V študijah kakovosti določitve položaja z GNSS med motenjem so do sedaj večinoma ugotavljali možnost določitve položaja z navigacijskimi, to je kodnimi instrumenti (Fontanella et al., 2012). Pokazale so, da so navigacijski instrumenti zelo občutljivi, saj jih med motnjami 75 % ni bilo sposobnih določiti položaja, medtem ko so preostali položaj določili nepravilno (Kuusniemi et al., 2012). V praktičnem preizkusu namernih motenj v Severnem morju leta 2014 so v poizkus vključili geodetski sprejemnik Leica GS10 z anteno Leica AS10 (Glomswoll in Bonenberg, 2017), druga skupina leta 2015 pa tudi sprejemnik Javad Delta z anteno navXperience 3G+C (Medina et al., 2019). Študije so pokazale, da z uporabo motilnika v frekvenčnem področju L1 vplivajo na kakovost sprejema signalov GPS in Galileo, medtem ko signali GLONASS z motnjami večinoma niso bili obremenjeni. Razlog za to je predvsem drugačen koncept delovanja tehnologije GLONASS, kjer je frekvenčno področje G1 zamaknjeno nekoliko nad L1, medtem ko sta področji G2 in G3 precej pod L1 (slika 1). Večina motilnikov deluje zunaj GLONASS-ovih frekvenčnih področij. Sprejem področja G1 signalov GLONASS je morda manj moten tudi zato, ker vhodna enota (angl. *font-end*) sprejemnika GLONASS, ki je vgrajen v sprejemnike GNSS, zajema za signal vsakega satelita le 0,5 MHz široko prepustno področje, medtem ko je prepustno frekvenčno področje vhodnih enot sprejemnikov GPS na L1 široko 3 MHz (Demyanov et al., 2013).

Precej raziskav je bilo usmerjenih tudi v analize učinkovitosti delovanja eno- in večfrekvenčnih motilnikov na navigacijske sprejemnike GNSS (Jones, 2011; Kuusniemi et al., 2012; Borio et al., 2016), kjer se je predvsem izkazalo, da se je med prisotnostjo motenj napaka določanja horizontalnega položaja izrazito povečala. Nepravilna določitev položaja v horizontalni ravnini je znašala tudi več kot 10 metrov pri enofrekvenčnih kodnih opazovanjih in nekoliko manj, od 2,5 do 7,8 metra, pri dvofrekvenčnih kodnih opazovanjih, čeprav jih je oddajal oddajnik preletnega signala s sorazmerno majhno izsevano močjo.

Vsaj enak vpliv kot motilniki, katerih signali hkrati preletavajo več frekvenčnih področij ali hkrati z različnimi periodami preletavajo isto področje, imajo tako imenovani sistemski motilniki (Curran et al., 2017), ki lahko otežujejo delo na frekvenčnem področju L1. Sistemski motilnik je vmesni člen med lahko zaznavnim motilnikom, ki seva močne motnje na slepo, in potvarjalnikom (ang. *spoofers*), ker se osredotoča na onemogočanje delovanja sprejemnika na fizičnem ali podatkovnem sloju (ang. *physical, data layer*), ne zgolj na povečevanje moči motenja. Podatkovni sloj je v odsotnosti podatkov o efemeridah in časih oddaje signala najšibkejši člen pri določanju navigacijske rešitve. Za preprečitev določitve koordinat so dovolj že občasne, a pravočasne ter razmeroma šibke in težje zaznavne motnje, sistemski motilnik se lahko celo osredotoči na onemogočanje posameznega navigacijskega sistema, čeprav si frekvenčno področje deli z drugim sistemom, ali celo na onemogočanje izbranih satelitov (Curran et al., 2017). Študije kažejo, da so sprejemniki občutljivi tudi za motnje sistemov GSM, DECT, LTE, torej zunaj področja L1, a morajo biti vsaj pet velikostnih razredov močnejše, da dosežejo enak učinek kot motnje v področju L1 (Glomsvoll, Bonenberg, 2017).

V dani raziskavi nam je kot civilnim uporabnikom po odobritvi *Agencije za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije* (AKOS) uspelo zakonito izvesti poizkus uporabe motilnikov, izvorov preletnega signala, na prostem. V pretekli raziskavi uporabe nizkocenovnega motilnika L1 smo uporabili različne geodetske sprejemnike (Bažec et al., 2020) in ugotovili, da se instrumenti različnih proizvajalcev drugače odzivajo na motnje. Ugotovili smo, da so novejši sprejemniki precej bolj izpopolnjeni v odpornosti na motnje, vendar se še vedno lahko zgodi, da motilnik povsem onemogoči sprejem signalov. Zanimivo je, da je uporaba motilnika L1 pri nekaterih instrumentih vplivala tudi na težave sprejema signalov GLO-NASS, kar je v nasprotju z ugotovitvami drugih avtorjev (Glomsvoll in Bonenberg, 2017). V danem prispevku opisujemo nadgradnjo raziskave z dodatnimi rezultati, ki so pomembni predvsem za geodetske uporabnike. Namen prispevka je s problemom seznaniti širšo geodetsko javnost, ki za določitev položaja in navezavo na državni koordinatni sistem uporablja tehnologijo GNSS.

1.1 Cilj raziskave

Cilj raziskave je bil ugotoviti ranljivost in odzivnost nekaterih geodetskih sprejemnikov GNSS različnih proizvajalcev ob namernih motnjah signala v frekvenčnem področju L1. Pri tem smo se osredotočili na odziv geodetskih instrumentov GNSS na:

- a) nekajminutne namerne motnje signala, pri čemer je bil motilnik lociran na različnih oddaljenostih od instrumenta, in
- b) kratkotrajne namerne motnje, ko se je motilnik nahajal v premikajočem se vozilu.

V prvem primeru smo ugotavljali, do katere oddaljenosti motilnik, ki v področju L1 oddaja moč velikostnega reda 10 mW (primerjaj s Septentrio, 2019), vpliva na delovanje geodetskih instrumentov, medtem ko smo v drugem primeru ocenjevali, ali na sprejem signalov GNSS in na končno določitev koordinat vplivajo tudi kratkotrajne (nekajsekundne) motnje v bližini instrumenta (približno 20 metrov).

1.2 Struktura prispevka

Uvodu sledi poglavje s teoretičnimi izhodišči obravnavanega problema (2. poglavje). V tretjem poglavju opišemo metodologijo raziskave, ki ji sledijo rezultati z diskusijo (4. poglavje) in zaključek (5. poglavje).

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Jakost sprejema signala GNSS

S sprejemniki GNSS sprejemamo satelitske signale in jih obdelamo, da določimo položaj. V datotekah z opazovanji poleg kodnih, faznih ter Dopplerjevih opazovanj pridobimo tudi razmerje med šumom in signalom za posamezen satelit na različnih frekvencah, ki podaja kakovost sprejema signala. Sprejemnik GNSS lahko signal sprejme in brez napak obdela vsebovane podatke le, če moč šuma in v sprejetem frekvenčnem področju prisotnih motenj skupaj ne presega dopustne mejne vrednosti. Razširitev spektra med oddajanjem signalov omogoča, da signale posameznih satelitov v sprejemniku izločimo iz prevladujočega šuma s postopkom korelacije sprejetega signala in v sprejemniku generiranimi kodami satelitov. S korelacijo spekter sprejetega signala skrčimo. Kot že rečeno, vsak sprejemnik dopušča določen SNR, ki se običajno nanaša na moč signalov po izvedeni korelaciji in moč sprejetega šuma, obe moči sta izraženi v vatih (Hofmann-Wellenhof et al., 2007):

$$\text{SNR [dBm]} = S [\text{dBm}] - N [\text{dBm}] = 10 \cdot \log \left(\frac{P [\text{mW}]}{N [\text{mW}]} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{S^2}{\sigma_N^2} \right), \quad (1)$$

kjer S predstavlja jakost korelacijskega vrha popolnoma nekoreliranih signalov in kode, σ_N pa standardno deviacijo jakosti šuma SNR, ki ga izražamo v decibelih (dB), pove, kolikokrat signal presega vsoto zajetih šumov. Ob odboju signala oziroma v pogojih raznolikega sprejema, ko v sprejemnik vstopajo različno zakasneni signali, izvirajoči iz istega satelita, SNR splošno definiramo z amplitudama signala in šuma ($A_{\text{signal}}, A_{\text{sum}}$) (Leick et al., 2015):

$$\text{SNR [dB]} = 10 \cdot \log \left(\left(\frac{A_{\text{signal}} (\text{mV})}{A_{\text{sum}} (\text{mV})} \right)^2 \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{A_{\text{signal}} (\text{mV})}{A_{\text{sum}} (\text{mV})} \right). \quad (2)$$

Tipična vrednost SNR, predstavljena v veliko tehničnih dokumentih geodetskih sprejemnikov GNSS, je v področju 30 ± 2 dB (Leick et al., 2015). Če so vrednosti SNR višje, je sprejeti signal bolj kakovosten. SNR določamo za vsak sprejem posameznega satelita posebej, zato so SNR-ji istega satelita, ko se nahaja na različnih višinskih kotih, različni. Pri starejših instrumentih (primer Trimble 4000 SSI) znašajo vrednosti SNR okoli 30 dB, medtem ko je pri novejših instrumentih precej višji, lahko tudi okoli 50 dB.

Kakovost sprejetega signala izrazimo z razmerjem med signalom in skupaj z njim sprejetim šumom, ki je odvisen od šumne temperature okolice in samega sprejemnika (podrobnejša razlaga v: Vidmar, 2005). Običajno je za opis kakovosti sprejema uporabljeno razmerje med močjo sprejetega nemoduliranega nosilnega signala P_s in gostoto moči šuma N_0 , kar se za signale v sprejemnikih GNSS v literaturi podaja kot C/N_0 ali CNR (angl. *carrier-to-noise ratio*) (Badke, 2009; Faletti, 2010; Joseph, 2010):

$$\begin{aligned} \text{CNR [dBHz]} &= 10 \cdot \log \left(\frac{P_s [\text{W}]}{N_0 \left[\frac{\text{W}}{\text{Hz}} \right]} \right) = C [\text{dBW}] - (N [\text{dBW}] - \text{BW} [\text{dBHz}]) \\ &= C [\text{dB}] - N_0 [\text{dBHz}] = \text{SNR} [\text{dB}] + \text{BW} [\text{dBHz}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Pri tem C predstavlja moč nosilnega signala in N moč šuma, oba izrazimo v dBm ali dBW, N_0 je gostota

moči zatečenega šuma, izražena v dBmHz ali dBWHz, BW je pasovna širina opazovanih signalov glede na 1 Hz in jo podobno kot relativno izražene moči tudi izrazimo glede na 1 Hz z dBHz. Moč signala s satelita do sprejemne antene upade zaradi izgub med razširjanjem zgolj na približno 10^{-17} W, na toplotni šum vezana gostota moči šuma pa znaša -204 dBWHz. CNR je definiran za pasovno širino 1 Hz, kar pomeni, da običajna vrednost CNR-signalov C/A (angl. *coarse acquisition*) v sprejemnikih GPS, upoštevajoč pasovno širino, 2,046 MHz (BW = 63,1 dBHz), pade za 19,1 dB pod teoretično vrednost moči šuma, medtem ko CNR v sprejemnikih GLONASS zaradi manjše pasovne širine vhodne sprejemnikove enote (Demyanov et al., 2013) pade manj, torej ostaja moč signalov pri enakem šumu do dvakrat večja kot pri GPS v L1.

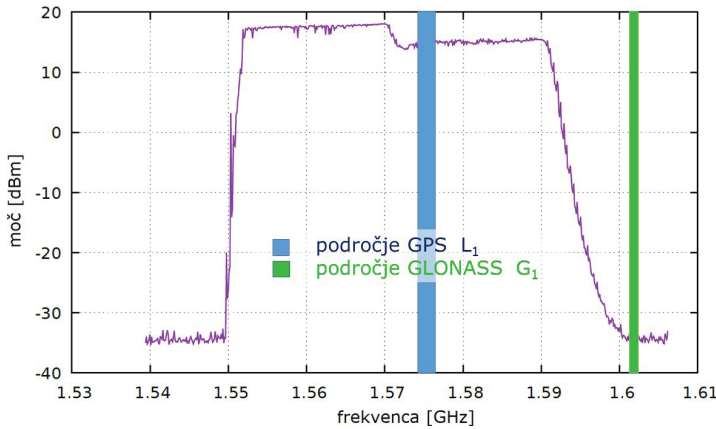
2.2 Motenje signalov GNSS

Motenje je odvisno od:

- a) vrste motilnega signala:
 - motenje s signalom sinusnega kontinuiranega valovanja (angl. *continuous wave* – CW),
 - enojna frekvenca ali modulirani signali glede na amplitudo (AM), frekvenco (FM) ali fazo (PM), ki motijo signal v širšem frekvenčnem področju,
 - motenje z generiranjem naključnega šuma (beli ali rožnati šum);
- b) osrednje frekvence motenja, kjer je lahko motilni signal:
 - v frekvenčnem področju signalov GNSS,
 - blizu frekvenčnega področja signalov GNSS ali
 - izven frekvenčnega področja signalov GNSS;
- c) frekvenčne pasovne širine motenj signala, kjer je moteče signale mogoče razdeliti na:
 - širokopasovne ali
 - ozkopasovne motnje;
- d) moč motnje, ki je opredeljena kot razmerje med močjo signala motnje in močjo nosilnega signala ali razmerjem J/S (angl. *jammer to signal*), in
- e) časovnega obdobja trajanja motnje, ki je lahko:
 - neprekinjeno ali
 - diskretno v časovnih intervalih ali impulzih. Pri motnjah z impulzi je lahko označen s širino impulza ali številom impulzov na sekundo.

Civilni uporabniki najpogosteje zaznavajo motenje, ki jih povzročajo PPD (Glomswoll in Bonenberg, 2017). Signalu, ki ga oddaja PPD, se frekvenca v prvem delu periode linearno povečuje od spodnjega roba frekvenčnega področja, v drugem pa zmanjšuje nazaj do spodnjega roba (angl. *single saw-tooth chirp signal*). Signali PPD-jev se med seboj ločijo po širini frekvenčnega področja, ki ga signal preletava (značilno od 10,7 do 44,9 MHz), po periodi, v kateri se zgodi prelet (pogosto med 8,62 in 18,97 μ s), in frekvenci, na katero je signal osredinjen (1575,42 MHz) (Kraus et al., 2011). Tovrstni preletni signal žagaste oblike je v strokovni literaturi imenovan tudi žvižg (angl. *chirp*). Primer spektra PPD, uporabljenega v terenskih preizkusih, je prikazan na sliki 2. Tovrstne motnje lahko do neke mere odpravimo z ustreznim sprejemnikom in primerno usmerjeno anteno. Sprejemniki so lahko opremljeni z zaščito pred motnjami bodisi s spreminjanjem algoritma pozicioniranja bodisi z ustrezno izbranimi visokofrekvenčnimi siti, ki odpravljajo vplive signalov zunaj frekvenčnega področja satelitskih signalov pred mešalno stopnjo

superheterodinskega pretvornika, s čimer zmanjšajo vpliv na korelacije.

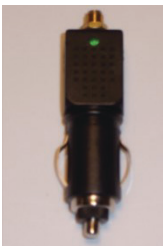


Slika 2: Izmerjena moč signala na izhodu uporabljenega motilnika druge kategorije (Mitch et al., 2012; Borio et al., 2016) s periodo preleta 10 μ s na frekvenčnem področju 1,570 GHz \pm 0,020 GHz, posneta s pasovno ločljivostjo 1 MHz.

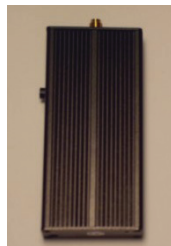
Razdalja, na kateri lahko PPD vpliva na sprejem signala, je eden najpomembnejših parametrov za oceno tveganja motenj, ki jih povzročajo te naprave in jih opažajo uporabniki ter o njih poročajo ustreznim službam. Pri najbolj enostavni obliki motnje (angl. *jamming*) sprejemnik GNSS ne zmore sprejeti in obdelati oslabljenega signala s satelitov zaradi premočnih motilnih signalov. Rezultat tega je nezmožnost sprejema signalov GNSS.

Motilnike GNSS, s katerimi nepridipravi namenoma motijo spekter GNSS, razdelimo v tri kategorije, ki se ločijo glede na napajanje in ohišje (Mitch et al., 2012):

1. kategorija (J01): so motilne naprave, zasnovane za priključitev na 12-voltno avtomobilsko vtičnico pomožnega napajanja (vtičnica za vžigalnik) (angl. *cigarette lighter jammers*) (slika 3.a),
2. kategorija (J02): so motilne naprave, ki se napajajo iz notranje akumulatorske baterije in imajo zunanjo anteno, nameščeno prek priključka SMA (slika 3.b), in
3. kategorija (J03): so motilne naprave oblike mobilnega telefona, napajajo se prek baterije in nimajo zunanjih anten (slika 3.c).



(a)



(b)



(c)

Slika 3: Motilniki GNSS (Mitch et al., 2012).

3 METODOLOGIJA RAZISKAVE

3.1 Opis poizkusa

Uporaba motilnikov GNSS je strogo prepovedana, zato smo poizkus na prostem izvedli šele po odobritvi Agencije za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije (AKOS). Meritve GNSS smo izvedli 20. julija 2019 v 120 minutah, vmes je večkrat potekalo motenje, najdlje zdržema tri minute. V poizkusu smo na testnem polju blizu Črnotič testirali devet geodetskih instrumentov 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. Sprejemnike smo postavili na stativ v vrsto in sprejemali opazovanja z intervalom registracije 1 s (slika 4). Medtem smo se z motilnikom gibali okoli instrumentov, in sicer smo se najprej ustavljali na točno določenem mestu in sprožili triminutne motnje. Takrat je bil motilnik v mirujočem položaju, prvič s horizontalno in drugič z vertikalno orientacijo antene, vsakokrat smo motenje izvedli na različnih oddaljenostih (12 m, 50 m, 100 m, 160 m in nazadnje spet 12 m). To je bilo tako imenovano »statično motenje« signalov iz satelitov GNSS.



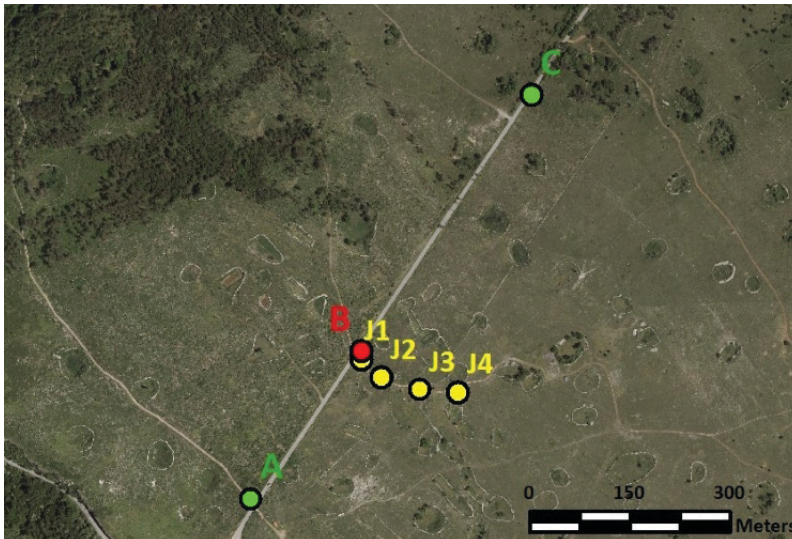
Slika 4: Geodetski instrumenti, testirani na motnje signala, ki preleta v frekvenčnem področju L1.



Slika 5: V vozilu nameščen motilnik povzroča kinematične motnje mirujočim obcestnim sprejemnikom.

Naprej smo motilnik namestili v vozilo in se mimo sprejemnikov GNSS peljali večkrat z različnimi hitrostmi: trikrat s 30 km/h, dvakrat s 60 km/h in po enkrat z 80 km/h in 90 km/h (slika 5). To so bile kratkotrajne motnje, ki smo jih glede na to, da je bil motilnik v kinematičnem načinu, poimenovali

»kinematične motnje«. Na sliki 6 prikazujemo lokacije motilnika med statičnimi motnjami (rumeno) glede na položaj instrumentov (rdeče) in skrajni točki vožnje mimo instrumentov A in C (zeleno).



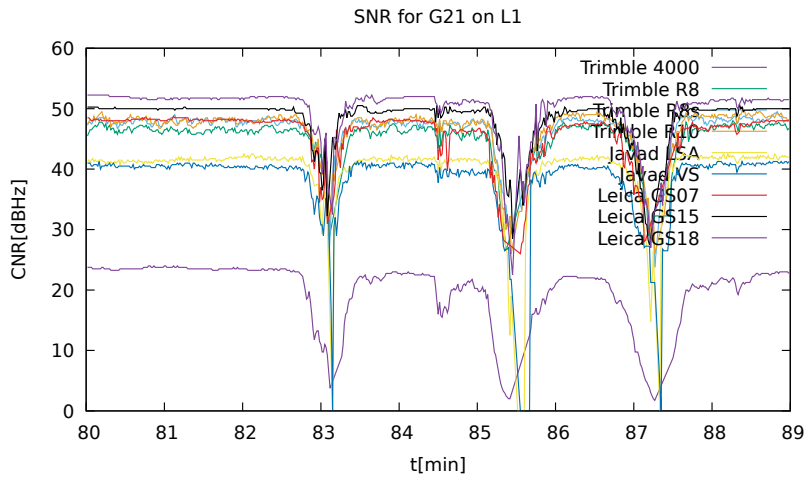
Slika 6: Lokacija instrumentov ob cesti, točka B (rdeče), skrajni točki vožnje mimo instrumentov A in C (zeleno), lokacije motilnika med statičnimi motnjami J1–J4 (rumeno) (Bažec et al., 2020).

4 OBDELAVA IN OBRAVNAVA REZULTATOV

Opazovanja GNSS smo iz vsakega sprejemnika posebej obdelali za vsak trenutek registracije, da smo lahko poleg ugotavljanja sprememb v vrednosti CNR določali tudi kakovost pozicioniranja v obdobjih motenja. Z obdelavo opazovanj GNSS iz vsakega instrumenta posebej smo koordinate določili relativno z navezavo na državno omrežje stalnih postaj SIGNAL. Ob tem velja posebej omeniti, da so meritve potekale ravno v času izpada tehnologije Galileo (Minetto et al., 2019); opazovanja s satelitov Galileo nam je sicer uspelo pridobiti, navigacijskega sporočila tega sistema pa ne. To je razlog, da smo v analize v nadaljevanju vključili le obravnavo GPS in GLONASS. Drugi razlog za navedeno analizo je dejstvo, da je tudi omrežje stalnih postaj GNSS, SIGNAL, med izvedbo poizkusa delovalo le na sprejemu signalov GPS in GLONASS.

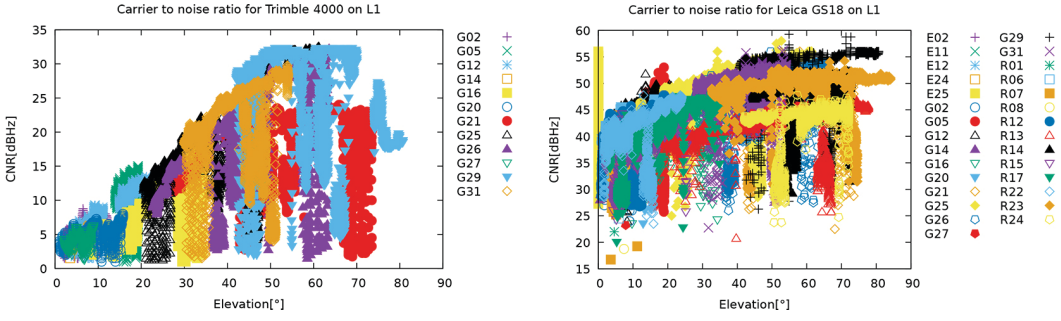
4.1 Analiza sprememb v vrednosti CNR

Iz opazovanj posameznega instrumenta (*.yyO datoteke RINEX) smo najprej ugotavljali spremembo vrednosti SNR, ki smo jih pretvorili v CNR. Le-te smo ugotavljali posebej za vsak instrument, satelit in izbrano frekvenco opazovanj. Zaradi obsežnosti podajamo le rezultate za vse instrumente za frekvenco L1 in satelit G21 (7). S slike 7 je razvidno, da je razmerje med signalom in šumom za najstarejši sprejemnik Trimble 4000 SSi zelo nizko, medtem ko so s konstrukcijo anten in z algoritmi razmerje pri ostalih instrumentih očitno izboljšali, tako da so vrednosti CNR celo za 20 dBHz ali več višje glede na navedeni sprejemnik. Nenadni padci v vrednostih so rezultat delovanja motilnika.



Slika 7: Primerjava razmerij moči motilnika glede na močnostno gostoto šuma za testirane instrumente.

Vrednosti CNR se med posameznimi sateliti z različnimi višinskimi koti razlikujejo. Velja, da imajo sateliti z višjimi elevacijami tudi pričakovano višje vrednosti CNR. Na sliki 8 prikazujemo, kako variirajo vrednosti CNR za različne satelite v odvisnosti od višinskih kotov (angl. *elevation*). Spet je očitno, da ima starejši sprejemnik Trimble 4000 SSi (leva slika) precej nižje vrednosti CNR kot novejši instrument Leica GS18.



Slika 8: Sprememba CNR v odvisnosti od višinskega kota za vse satelite, ki jih je sprejemniku uspelo sprejeti. Primerjava za stari instrument Trimble 4000 SSi, ki je sprejemal le opazovanja GPS, in instrument zadnje generacije Leica GS18 (statične motnje). CNR-območji za posamezna instrumenta sta izbrani drugače, da je slika preglednejša.

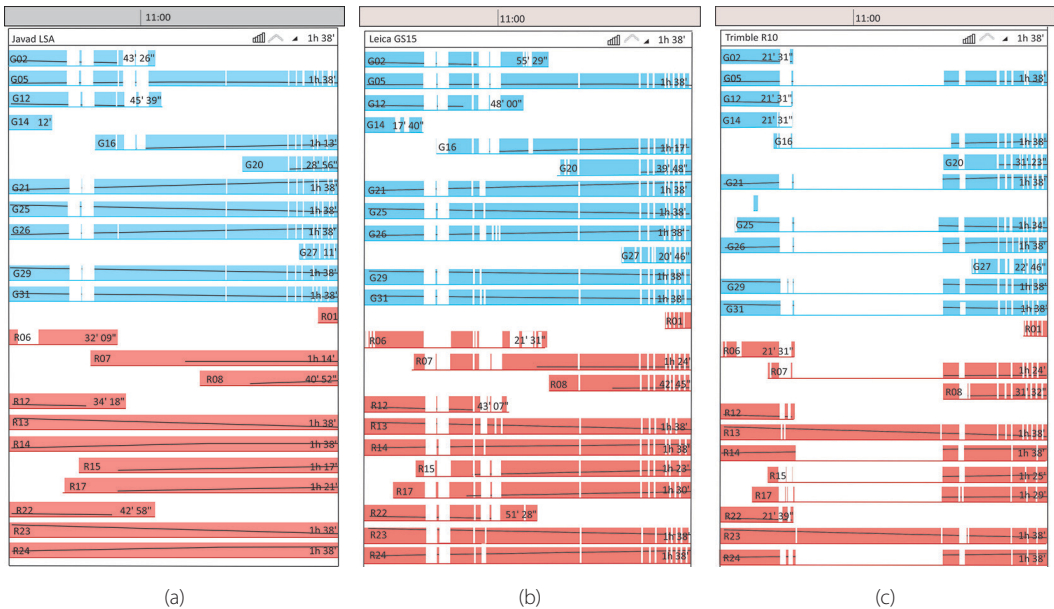
Med stacionarnimi motnjami, ki so trajale po tri minute (preglednica 1), je očitna izguba signalov GNSS (slika 9). Instrumenti so se na motnje odzivali precej različno. Ker smo motenje povzročali v frekvenčnem področju L1, bi lahko pričakovali, da signali s satelitov GLONASS sploh ne bodo moteni, a se pri posameznih sprejemnikih pričakovanja niso izpolnila. Pri instrumentih Trimble R8S, Leica GS07 in Leica GS15 je motilnik povzročil tudi izpad sprejema signalov s satelitov GLONASS, sprejemnik Leica GS18 pa je opazovanja GLONASS izgubil le deloma in za precej krajši čas kot ostali sateliti. Zaradi obsežnosti podajamo le tri ključne, ki ponazarjajo sprejem signalov GPS (modro) in GLONASS (rdeče) z instrumentov Javad Triumph-LSA, ki mu med motnjami ni uspelo sprejemati signalov GPS, uspešno

pa je sprejemal satelite GLONASS, Leica GS15, kjer so očitne prekinitve sprejema signalov s satelitov GPS in GLONASS, in s sprejemnika Trimble R10, kjer je nastopila očitna blokada delovanja, in sicer zaradi izpada signalov ali zaradi napake v obdelavi, saj daljši čas ni sprejemal opazovanj z večine satelitov.

Preglednica 1: Časi zaporednega triminutnega statičnega motenja na različnih oddaljenostih motilnika od instrumentov

Oddaljenost motilnika od instrumentov	Pričetek in konec motenja (lokalni čas)
GNSS	
12 m	9:37:21–9:40:37 9:41:11–9:44:10
50 m	9:53:51–9:56:54 9:57:25–10:00:19
100 m	10:03:03–10:06:16 10:03:03–10:06:16
160 m	10:13:44–10:17:36 10:18:09–10:20:58
12 m	10:24:01–10:24:23

Vsi instrumenti so se na bližino motilnika do 100 metrov odzvali s popolno izgubo podatkov s satelitov GPS. Podatki s satelitov GLONASS so bili med motnjami razpoložljivi na instrumentih Javad Triumph -VS, Javad Triumph-LSA, Trimble R8 in Leica GS18 (primerjava preglednica 1 in slika 9).

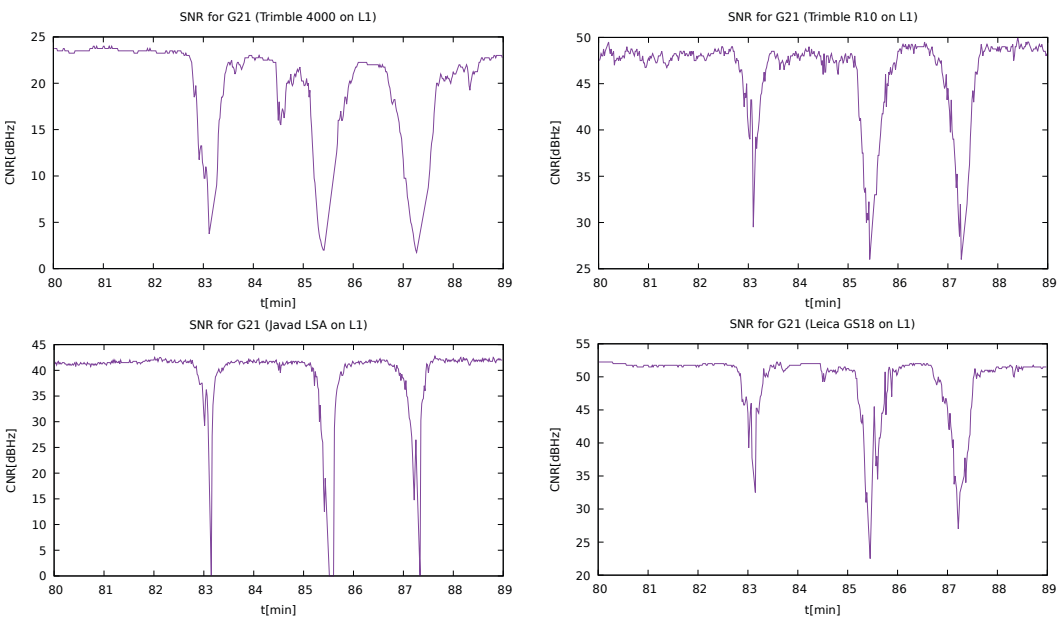


Slika 9: Pregled razpoložljivosti podatkov GPS (modro) in GLONASS (rdeče) za posamezne satelite in instrumente, ki so se na motnje odzvali različno: (a) Javad Triumph-LSA, (b) Leica GS15 in (c) Trimble R10.

Instrument Trimble R10 (9.c) se je na statično motenje odzval precej nenavadno, saj tudi po končanem motenju, ko je bil motilnik oddaljen približno 12 metrov od instrumentov, ni sprejel opazovanj s satelitov. Njegovo delovanje nam je uspelo ponovno vzpostaviti šele z večkratnimi vklopi in izklopi motilnika po daljšem trajanju izgube signala, kar je razvidno s slike 9. Pri tem je zanimivo, da je instru-

mentu vendarle vseskozi uspelo registrirati opazovanja dveh satelitov GLONASS, to je R13 in R23, ki sta sicer imela precej velik višinski kot. Nastala situacija je lahko izjema v našem eksperimentu, in ne pravilo, zato ne moremo preprosto skleniti, da je instrument Trimble R10 najbolj dovzeten za motnje od vseh preizkušenih.

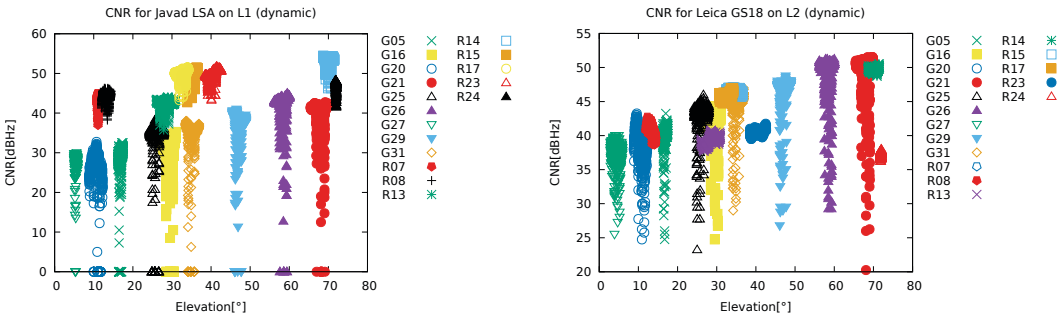
Pri kinematičnih motnjah je sprejemnik Trimble R10 deloval podobno kot ostali instrumenti. Na motnje se je odzval s padcem vrednosti CNR na okoli 20 dBHz, kar je veliko bolje kot pri instrumentu Javad Triumph-LSA, kjer so bili padci CNR veliko bolj izraziti (celo do 0 dBHz). Zanimivi in značilni so padci vrednosti CNR v času kratkotrajnih kinematičnih motenj, ki jih prikazujemo kot funkcijo časa, in sicer do 80. do 90. minute, ko smo izvajali kinematične motnje (slika 10). Očiten padec vrednosti CNR smo zabeležili na instrumentu Javad Triumph-LSA, ki je bil še izrazitejši kot pri instrumentu Trimble 4000 SSi. Odziv instrumenta Trimble R10 na kinematične motnje je bil podoben kot odziv instrumenta Leica GS18. Vrednosti CNR instrumenta Trimble R10 zunaj obdobja motenja so izrazito manjše kot CNR ostalih instrumentov.



Slika 10: Sprememba CNR v odvisnosti od trenutka izmere za satelit G21 za: Trimble 4000 SSi, Trimble R10, Javad Triumph-LSA in Leica GS18 (kinematične motnje). CNR-območje je izbrano za vsak instrument posebej.

Padci vrednosti CNR kinematičnega motenja v odvisnosti od višinskega kota satelitov so značilni za posamezne sprejemnike GNSS in skupine satelitov. Vrednost CNR za satelite GLONASS izrazito manj upade na enakih višinskih kotih kot za satelite GPS (slika 11).

Kinematične motnje niso tako izrazito učinkovale na sprejemnik Trimble R10, kot smo zabeležili med statičnimi motnjami. Tedaj se je sprejemnik Trimble R10 obnašal zelo podobno kot sprejemnik Leica GS18.



Slika 11: Sprememba CNR v odvisnosti od višinskega kota za vse satelite, ki jih je sprejemnik uspel sprejeti. Primerjava za stari instrument Trimble 4000 SSI, ki je sprejemal le opazovanja GPS, in instrument zadnje generacije Leica GS18 (kinematične motnje). CNR-območji med instrumentoma se zaradi večje preglednosti slike za posamezna instrumenta razlikujeta.

4.2 Kakovost pozicioniranja

Kakovost pozicioniranja ob prisotnosti motilnika opišemo z deležem uspešne določitve položaja:

- a) na kodni ali fazni način in
- b) le s faznimi opazovanji.

Iz rezultatov (preglednica 2) lahko potrdimo, da je bil instrument Trimble R10 najbolj občutljiv za umetno povzročene motnje, saj mu je med meritvami uspelo določiti položaj le v 52 %. Izmed teh je bilo v 49 % mogoče položaj določiti na fazni način. Pri instrumentu Trimble R8S je bilo položaj s kodo ali fazo mogoče določiti v 81 %, pri čemer je bilo le v 55 % mogoče položaj določiti bolj kakovostno, torej na fazni način.

Preglednica 2: Delež uspešne določitve položaja za instrumente GNSS, vključene v test, v 90-minutnem testu, kjer je bil interval registracije 1 s.

Instrument GNSS	Delež uspešne določitve položaja s kodo ali fazo	Delež uspešne določitve položaja s fazo
Trimble 4000 SSI	88 %	83 %
Trimble R8	99 %	98 %
Trimble R10	52 %	49 %
Trimble R8S	81 %	55 %
Javad Triumph-VS	100 %	89 %
Javad Triumph-LSA	100 %	91 %
Leica GS18	99 %	99 %
Leica GS07	94 %	94 %
Leica GS15	91 %	89 %

Poleg instrumenta Trimble R10, ki je med statičnimi motnjami povsem odpovedal, tudi instrument Trimble R8S ni bil najbolj učinkovit. Delež uspešne določitve položaja na fazni način je znašal 55 % (preglednica 1). Čeprav je instrument kazal uspešno določitev položaja, smo preverili razlike v vsakem trenutku registracije glede na znane prave vrednosti. Največje razlike v horizontalnem položaju so pri večini instrumentov znašale nekaj centimetrov, izrazito pa izstopa nepravilna določitev položaja s spre-

jemnikom Trimble R8 (razlika več kot 2 metra) in nekoliko manj z instrumentom Trimble R8S, kjer je bila razlika 23,7 centimetra. Podobno lahko ugotovimo za razlike v določitvi višin. Instrument Trimble R8S je zaradi motenj višino določil nepravilno za 48,3 centimetra, podobno Javad Triumph-LSA (49,6 centimetra), medtem ko je instrument Trimble R8 višino določil nepravilno za več kot 3 metre (preglednica 3). Avtorji prispevka smo prepričani, da so bile te razlike vezane izključno na intervale motenja signala L1 in jih ni izzval kakšen nenadzorovan pojav. Izguba sprejema signala s sprejemnikom Trimble R10 v času motenja je sicer moteča, vendar uporabnik lažje prenese izgubo signala in možnost pozicioniranja, kot pa da instrument brez opozorila nepravilno določi položaj.

Preglednica 3: Največje razlike od pravega položaja, ko je instrument kazal uspešno rešitev (angl. carrier-phase fixed).

instrument GNSS	Največje razlike v horizontalnem položaju [m]	Največje razlike v višini [m]
Trimble 4000 SSI	0,025	0,060
Trimble R8	2,251	3,128
Trimble R10	0,036	0,085
Trimble R8S	0,237	0,483
Javad Triumph-VS	0,096	0,127
Javad Triumph-LSA	0,092	0,496
Leica GS18	0,057	0,077
Leica GS07	0,066	0,163
Leica GS15	0,070	0,095

5 ZAKLJUČEK

Odzivu geodetskih instrumentov GNSS na namerne motnje signalov v Sloveniji do sedaj ni bilo posvečene posebne pozornosti tudi zato, ker je uporaba motilnikov zakonsko prepovedana. V dani raziskavi smo prišli do ugotovitev, ki jih bo v prihodnje treba podrobneje analizirati, in sicer:

- motilnik s preletanjem signala okoli frekvenčnega področja L1/E1 lahko zmoti tako sprejem signalov GPS, Galileo kot tudi GLONASS;
- motilnik lahko povzroči delno ali popolno izgubo signala tudi po končanem motenju (primer instrumenta Trimble R10);
- kakovost določitve položaja med motenjem se izrazito poslabša, čeprav algoritmi obdelave opazovanj kažejo na uspešno določitev faznih neznank, tj. inicializacijo.

V prispevku smo kakovost sprejetega signala določali s statičnimi opazovanji in ugotavljanjem spremembe kakovosti signala v časovni vrsti CNR (slike 7, 8, 10 in 11), podobno kot so ravnali že v drugih raziskavah (Glomsvoll in Bonenberg, 2017). Dodatno smo ugotavljali kakovost pozicioniranja med motnjami, in sicer tako, da smo položaj določali za vsako sekundo izvedbe meritve. V prispevku smo pokazali, da lahko s kontinuiranim spremljanjem vrednosti CNR hitro in enostavno sklepamo na prisotnost nameranih motenj ali ostalih vplivov na opazovanja (odboj), ko instrument GNSS deluje v statičnem načinu.

V eksperiment kinematičnih metod GNSS določanja položaja nismo vključili, saj je bil namen raziskave pokazati odziv instrumentov GNSS na motnje signala, kar je mogoče najbolje določiti s kakovostno pridobljenimi opazovanji v statičnem načinu. Znano je, da je pri kinematičnih meritvah GNSS prisotnost in izvor motenj veliko težje določiti tudi zato, ker so meritve kratkotrajne in so vezane na različne

situacije glede okolice sprejema signala GNSS. Kljub temu lahko iz izkušenj odziva sprejemnikov GNSS v statičnem načinu podamo ideje za nadaljnje delo.

V prihodnje bi veljalo razmisliti tudi o shranjevanju in arhiviranju opazovanj v kinematični določitvi položaja v realnem času (angl. *real-time kinematic* – RTK), saj lahko iz surovih opazovanj (na primer iz datotek z opazovanji RINEX, kjer imamo na voljo vrednosti SNR) naknadno sklepamo ali potrdimo, da so v določenih trenutkih nastopile anomalije sprejema signala, ki so vzrok za slabšo kakovost določitve položaja. Trenutno so namreč v situacijah, ko je določanje položaja vezano na uporabo metode RTK, glavni podatki, ki jih posreduje instrument, položaj in notranja natančnost določitve položaja ter primerna razporeditev satelitov na obzorju, kar določajo faktorji slabšanja natančnosti (angl. *dilution of precision* – DOP), medtem ko v izpisih rezultatov kakovosti sprejema signala med meritvami ni na voljo. Avtorji prispevka menijo, da bi pristop ugotavljanja kakovosti sprejema signala v kinematičnih meritvah v realnem času lahko enostavno izboljšali že tako, da bi v instrumentu beležili tudi opazovanja GNSS in jih ob rezultatih meritev z metodo RTK kot dodaten metapodatek uvrstili v arhiv terenske izvedbe meritev.

ZAHVALA

Prispevek je nastal v okviru programskih skupin Javne raziskovalne agencije Republike Slovenije, in sicer: *Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227)* in *Modeliranje in simulacije v prometu in pomorstvu (P2-0394)*.

Zahvaljujemo se *Agenciji za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije*, ki nam je omogočila izvedbo testov na prostem, in *Laboratoriju za sevanja in optiko Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani* za opravljeno meritev lastnosti motilnika. Zahvala gre tudi podjetju Geoservis d.o.o., ki nam je dal v izposojajo sprejemnik Leica GS07, in *Geodetski upravi Republike Slovenije*, od katere smo si izposodili sprejemnike Trimble R8, Trimble R8S, Trimble R10 in Javad Triumph-VS.

Literatura in viri:

- Badke, B. (2009). Measuring GNSS Signal Strength. Inside GNSS. <https://insidegnss.com/measuring-gnss-signal-strength/>, pridobljeno 17. 1. 2021.
- Bažec, M., Dimc, F., Pavlovčič Prešeren, P. (2020). Evaluating the Vulnerability of Several Geodetic GNSS Receivers under Chirp Signal L1/E1 Jamming. *Sensors*, 20 (3), 814–838. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20030814>
- Borio, D., Dovis, F., Kusunniemi, H., Lo Presti, L. (2016). Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. *Proceedings of the IEEE*, 104 (6), 1233–1245. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2543266>
- Borio, D., Closas, P. (2017). A Fresh Look at GNSS Anti-Jamming. Inside GNSS. <https://insidegnss.com/a-fresh-look-at-gnss-anti-jamming/>, pridobljeno 30. 1. 2021.
- Chang, C.-L. (2011). Anti-Multipath Filter with Multiple Correlators in GNSS Receivers. *Adaptive Filtering applications*, 381–399. DOI: <https://doi.org/10.5772/16696>
- Curran, J. T., Navarro, M., Bavaro, M., Closas, P. (2017). A Look at the Threat of Systematic Jamming of GNSS. *Inside GNSS*. Inside GNSS, september-oktober, 46–53. <http://insidegnss.com/auto/sepect17-CURRAN.pdf>, pridobljeno 23. 3. 2021.
- Demyanov, V., Yasyukevich, Y., Jin, S. (2013). Effects of Solar Radio Emission and Ionospheric Irregularities on GPS/GLONASS Performance. V: *Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications*, Intech, Peking, Kitajska. DOI: <https://doi.org/10.5772/3439>
- Faletti, E. (2009). Are Carrier-to-Noise Algorithms Equivalent in All Situations? Inside GNSS. <https://insidegnss.com/are-carrier-to-noise-algorithms-equivalent-in-all-situations/>, pridobljeno 16. 1. 2021.
- Fontanella, D., Bauernfeind, R., Eissfeller, B. (2012). In-Car GNSS jammer localization with a vehicular ad-hoc network. V: *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, USA, 20–23 September 2012, str. 2885–2893.
- Glomsvoll, O., Bonenberg, L. K. (2017). GNSS Jamming Resilience for Close to Shore Navigation in the Northern Sea. *Journal of Navigation*, 70 (1), 33–48. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463316000473>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2007). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
- Jones, M. (2011). The Civilian Battlefield, Protecting GNSS Receivers from Interference

- and Jamming. Inside GNSS, april-maj, 40–49. <https://www.insidegnss.com/auto/marapr11-Jones.pdf>, pridobljeno 23. 3. 2021.
- Joseph, A. (2010). Measuring GNSS Signal Strength. Inside GNSS, november-december, 20–25. <https://insidegnss.com/measuring-gnss-signal-strength/>, pridobljeno 17. 1. 2021.
- Kraus, T., Bauernfeind, R., Eissfeller, B. (2011). Survey of In-Car Jammers – Analysis and Modeling of the RF Signals and IF Samples (Suitable for Active Signal Cancellation). V: Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, Oregon, ZDA, 20.–23. september 2011, 430–435.
- Kuusniemi, H., Airos, E., Bhuiyan, M. Z. H., Kröger, T. (2012). Effects of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers. V: Proceedings of the European Navigation Conference, Gdansk, Poljska, 25.–27. april 2012, 1–14.
- Leick, A., Rapoport, L., Tatarnikov, D. (2015). GPS Satellite Surveying, 4. izdaja. John Wiley & Sons, Inc., DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119018612>
- Medina, D., Lass, C., Marcos, E. P., Ziebold, R., Closas, P., García, J. (2019). On GNSS Jamming Threat from the Maritime Navigation Perspective. V: 22nd International Conference on Information Fusion Proceedings, Ottawa, Kanada, 2.–5. julij 2019, 1–7.
- Minetto, A., Dovis, F., Nardin, A., Falletti, E., Margaria, D., Nicola, M., Vannucchi, M. (2019). What happened when Galileo experienced a week-long service outage, Analysis of the Signal Outage, GPS – World. <https://www.gpsworld.com/why-galileo-experienced-a-week-long-service-outage/>, pridobljeno 30. 1. 2021.
- Mitch, Ryan, H., Psiaki, M. L., O'Hanlon, B. W., Powell, S. P., Bhatti, J. A. (2012). Civilian GPS Jammer Signal Tracking and Geolocation. V: Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION/GNSS), Nashville, Tennessee, ZDA, 2012, str. 2901–2920. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10469>, pridobljeno 16. 1. 2021.
- Ofcom (2021). GPS Jamming Exercises. <https://www.ofcom.org.uk/spectrum/information/gps-jamming-exercises>, pridobljeno 18. 1. 2021.
- Petrovski, I. G. (2014). GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou for Mobile Devices, From Instant to Precise Positioning, Cambridge University Press: New York, NY, US, 2014, str. 110–127.
- Pullen, S., Gao, G. G. (2012). GNSS Jamming in the Name of Privacy. Inside GNSS, 7, 34–43. <https://insidegnss.com/gnss-jamming-in-the-name-of-privacy/>, pridobljeno 16. 1. 2021.
- Reil, A. (2017). Receiving BEIDOU, GALILEO and GPS signals with ATLAB® and R&S®IQOR, R&S®TSMV, application note. Rohde in Schwartz, 2017, 27. <https://manualzz.com/doc/8859862/1ma203>, pridobljeno 8. 3. 2021.
- Rettinger, A. D., Batagelj, B. (2018). Motenje GPS sprejemnikov na osnovi blokiranja ali prevare. Avtomatika, 118, 14–18. <http://avtomatika.com/SLO/AVTOMATIKA/A125/A125-GPS.pdf>, pridobljeno 18. 1. 2021.
- Resilient Navigation and Timing Foundation, GPS Jammers Used in 85% of Cargo Truck Thefts – Mexico Has Taken Action, spletni zapis. <https://mtfnd.org/2020/10/30/gps-jammers-used-in-85-of-cargo-truck-thefts-mexico-has-taken-action>, pridobljeno 15. 3. 2021.
- Septentrio (2019). GNSS Interference, brošura, 20 strani. <https://www.septentrio.com/en/brochures/gnss-interference>, pridobljeno 15. 3. 2021.
- Španik, P., Hefty, J. (2017). Multipath detection with the combination of SNR measurements – Example from urban environment, 66, 305–315. DOI: <https://doi.org/10.1515/geocart-2017-0020>
- Thombre, S., Zahidul, H., Bhuiyan, M., Eliardsson, P., Gabrielson, B., Pattinson, M., Dumville, M., Fryganiotis, D., Hill, S., Manikundalam, V., Pölöskey, M., Lee, S., Ruotsalainen, L., Söderholm, S., Kuusniemi, H. (2018). GNSS Threat Monitoring and Reporting: Past, Present, and a Proposed Future. Journal of Navigation, 71 (3), 513–529. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463317000911>
- Vidmar, M. (2005). Radiokomunikacije. Poglavje: 2. Toplotni šum v radijskih zvezah, 1. izd. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko ter Fakulteta za računalništvo in informatiko. <http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/vt/Radiokomunikacije/> pridobljeno 8. 3. 2021.



Dimc F., Pavlovčič Prešeren P., Bažec M. (2021). Odziv geodetskih instrumentov GNSS na motenje z oddajnikom preletnega signala L1.

Geodetski vestnik, 65 (2), 189–204.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.02.189-204>

doc. dr. Franc Dimc, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet
Cesta pomorščakov 4, SI-6320 Portorož
e-naslov: franc.dimc@fpp.uni-lj.si

asist. dr. Matej Bažec, univ. dipl. fiz.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet
Cesta pomorščakov 4, SI-6320 Portorož
e-naslov: matej.bazec@fpp.uni-lj.si

doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: polona.pavlovic@fgg.uni-lj.si