

Uporabnost cenovno ugodnih inštrumentov GNSS v nalogah geodetskega monitoringa

Veton Hamza¹, Bojan Stopar¹, Polona Pavlovčič Prešeren¹, Oskar Sterle¹

Povzetek

Dvo-frekvenčni cenovno ugodni sprejemniki GNSS v kombinaciji z več-frekvenčnimi cenovno ugodnimi antenami GNSS se v zadnjih letih izkazujejo za dobro alternativo geodetskim inštrumentom GNSS. Vprašanje pa je, kakšna je dejanska kakovost opazovanj GNSS in izračunanih koordinat teh instrumentov v primerjavi z geodetskimi inštrumenti GNSS. V okviru številnih raziskav smo na UL FGG testirali dvo-frekvenčni cenovno ugodni sprejemnik u-blox ZED-F9P v kombinaciji s številnim antenami, ki so tudi del cenovno-ugodnega inštrumentarija GNSS. Analizirali smo delovanje sprejemnikov GNSS in anten GNSS ter možnost uporabe cenovno ugodnega inštrumentarija GNSS za potrebe geodetskega monitoringa. Ugotovili smo, da cenovno ugoden inštrumentarij še ne dosega kakovosti geodetskih inštrumentov GNSS, a so že uporabni na številnih področjih. Na osnovi faznih opazovanj GNSS omogočajo določitev koordinat pri statični izmeri na nivoju nekaj milimetrov za horizontalne koordinate in pod-centimetrsko natančnost za višino. Cenovno ugodni inštrumenti GNSS so se izkazali za zelo uporabno orodje pri geodetskem monitoringu, kjer so pričakovani premiki velikosti nekaj centimetrov in večji.

Ključne besede: GNSS, cenovno ugodni inštrumenti GNSS, geodetski monitoring

Keywords: GNSS, low-cost GNSS instruments, geodetic monitoring

Uvod

Osnovni cilj geodezije kot znanosti in stroke je bilo vedno določanje položaja geodetskih točk v ustrezno izbranem referenčnem sistemu (Sterle, 2015). Razvoj znanosti in tehnologije je botroval razvoju različnih merskih tehnik, ki so bile uporabljene za določanje položaja. Med vsemi tehnikami so se še posebej za uporabne izkazali sistemi GNSS (angl. Global Navigation Satellite Systems). Visoka kakovost določitve položaja je možna, ko uporabimo geodetske sprejemnike GNSS, kalibrirane geodetske antene GNSS, ko upoštevamo številne matematične in fizikalne modele, ki vplivajo na razširjanje signala GNSS (npr. modeli atmosferskih vplivov) ali na položaj geodetske točke (geofizikalni modeli), ustrezno modeliramo opazovanja GNSS in ko vse predstavimo v kakovostnem globalnem referenčnem sestavu (Teunissen & Montenbruck, 2017; Leick, Rapoport, & Tatarnikov, 2015). Kakovost vseh podatkov in modelov, ki podpirajo uporabo sistemov GNSS je privedla do stanja, ko lahko položaj točke obravnavamo v časovni odvisnosti. To pomeni, da smo sposobni določiti tudi spremembe položajev geodetskih točk skozi čas (Sterle, 2015). Geodezija tako postaja znanost, ki lahko številnim drugim znanostim kot so npr. seizmologiji, tektoniki, geofiziki, geologiji, gradbeništvu, urejanju prostora in podobnim zagotavlja kakovostne informacije o spremembah položajev točk.

Geodetski monitoring predstavlja področje geodezije, kjer poskušamo čim podrobneje predstaviti časovne spremembe lege in posledično geometrije objektov skozi čas. Pri številnih nalogah geodetskega monitoringa lahko pride do poškodbe ali celo uničenja geodetskih inštrumentov (plazovita območja), zato se v takih primerih geodetski inštrumenti

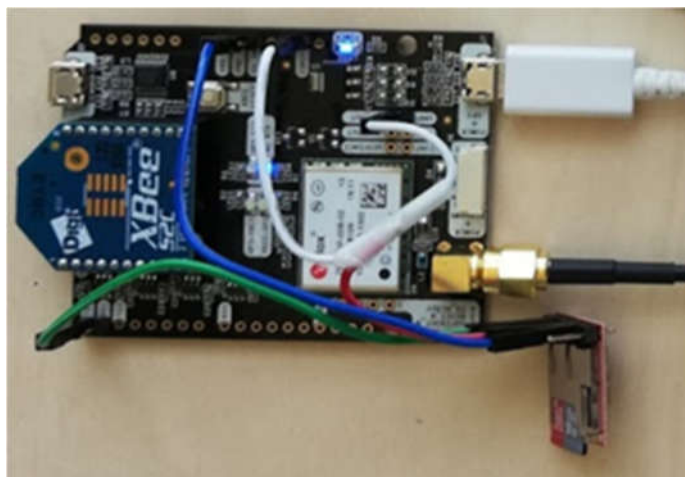
¹ Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

GNSS cenovno ne izkažejo kot optimalen senzor. Za take namene so se izkazali za uporabne t.i. cenovno ugodni (angl. low-cost, cost-effective) inštrumenti GNSS (CU-GNSS), saj so cenovno bolj dostopni, stanejo do nekaj 100 € (v primerjavi z geodetskimi, ki stanejo od nekaj tisoč do 30.000 €), so majhni, lahki in ne porabijo veliko energije. Sprva so se na tržišču pojavili eno-frekvenčni CU-GNSS-sprejemniki (Biagi, Grec, & Negretti, 2016), kasneje, v letu 2019, pa so se pojavili tudi dvo-frekvenčni CU-GNSS-sprejemniki, med katerimi tudi sprejemniki podjetja u-blox (u-blox, 2022). Ker imamo pri eno-frekvenčnih sprejemnikih na voljo le opazovanja GNSS osnovnega nosilnega valovanja L1, ne moremo sestavljati linearnih kombinacij faznih opazovanj GNSS za odpravo vpliva ionosfere (Leick, Rapoport, & Tatarnikov, 2015; Teunissen & Montenbruck, 2017), po drugi strani pa imamo težave tudi pri iskanju izpadov signala na faznih opazovanjih (Sterle, Stopar, & Pavlovčič Prešeren, 2015). Z dvo-frekvenčnimi inštrumenti CU-GNSS tako dobimo dobro alternativo dragim a kakovostnim geodetskim inštrumentom GNSS. Le-ti so bili uporabljeni v številnih aplikacijah; od določevanja relativnega položaja, absolutnega položaja – metode PPP (angl. Precise Point Positioning), za določevanje parametrov troposfere, v realnem času (RTK – angl. Real Time Kinematic), v optimalnih pogojih, kot tudi v oteženih pogojih – v urbanih področjih (Hamza V. , Stopar, Ambrožič, Turk, & Sterle, 2020; Krietemeyer, van der Marel, van de Giesen, & ten Veldhuis, 2022; Krietemeyer, van der Marel, van de Giesen, & ten Veldhuis, 2020). Dvo-frekvenčni inštrumenti CU-GNSS še ne dosegajo kakovosti geodetskih inštrumentov GNSS, problem predstavljajo predvsem ne-kalibrirane antene GNSS (Schmid, in drugi, 2016), kar pa se je delno odpravilo s pojavom zunanjih anten CU-GNSS, med katerimi so tudi kalibrirane antene GNSS (Hamza, Stopar, Ambrožič, & Sterle, 2021b).

V pričujočem prispevku prikazujemo analize uporabe dvo-frekvenčnih CU-GNSS, ki smo jih v zadnjih letih izvedli na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (UL FGG). Uporabljeni so bili sprejemniki podjetja u-blox, in sicer sprejemnika ZED-F9P v kombinaciji z različnimi antenami GNSS, od cenovno ugodne ne-kalibrirane antene GNSS u-blox ANN-MB-00, Tallysman TW3882 in Survey ter kalibrirane cenovno ugodne antene GNSS Survey Calibrated. Delovanje CU-GNSS smo primerjali z delovanjem geodetskega inštrumentarija GNSS, tako na nivoju opazovanj, kot tudi na nivoju kakovosti določitve koordinat geodetskih točk (Hamza, Stopar, Ambrožič, Turk, & Sterle, 2020; Hamza, Stopar, & Sterle, 2021a; Hamza, Stopar, Ambrožič, & Sterle, 2021b).

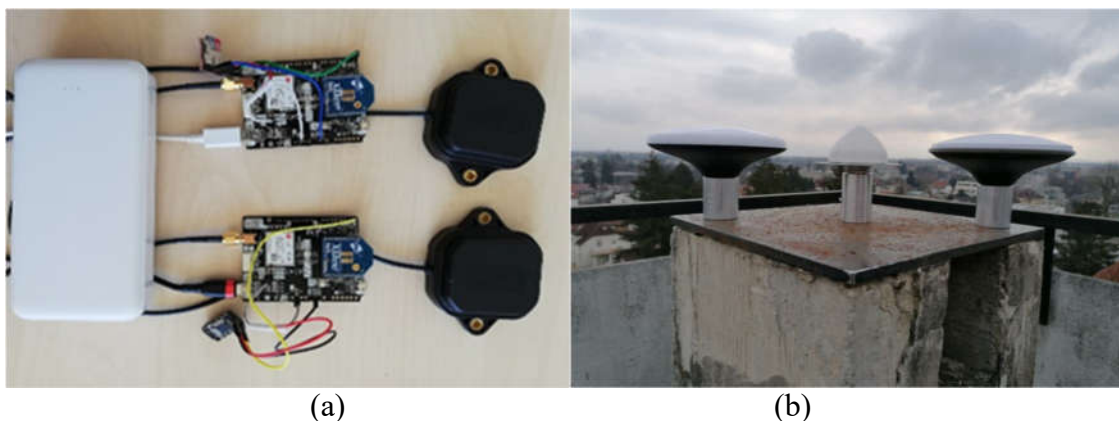
Uporabljen inštrumentarij in programska oprema

CU-GNSS sestavljata sprejemnik GNSS in antena GNSS. Podjetje u-blox ponuja sprejemnik GNSS ZED-F9P (u-blox ZED-F9P, 2022), ki sledi signalu GNSS dveh nosilnih frekvenc (L1C/A, L1OF, E1, B1I, L2C, L2OF, E5b, and B2I) vseh globalnih satelitskih sistemov (GPS (angl. Global Positioning System), GLONASS (rus. Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), Galileo in BDS (angl. BeiDou navigation System)). V sklopu opreme podjetja u-blox je sprejemnik integriran v ohišje/ploščo C099-F9P, ki lahko deluje tudi v načinu RTK in oddaja signal v formatu RTCM (angl. Radio Technical Commission for Maritime services), konfigurira pa se ga preko programske opreme u-center (u-blox u-center, 2022). Po drugi strani, pa je sprejemnik GNSS ZED-F9P integriran tudi v ploščo simpleRTK2B podjetja ArduSimple (ArduSimple simpleRTK2b, 2022). Slednja deluje podobno kot C099-F9P, prav tako se jo konfigurira s programsko opremo u-center. V vseh testih smo uporabili plošče simpleRTK2B z integriranim sprejemnikom GNSS ZED-F9P, kar prikazuje slika 1.



Slika 1. Prikaz plošče simpleRTK2B z integriranim sprejemnikom GNSS ZED-F9P, ki je povezana s komunikacijskim kablom

Antene GNSS, ki smo jih uporabili v raziskavah so bile različne. Sprejemnik GNSS ZED-F9P je v osnovi povezan z anteno ANN-MB-00, plošča simpleRTK2B pa je zasnovana tako, da se lahko uporabi tudi druge antene. V testnih izmerah smo uporabili tudi zunanjo anteno Tallysman TW 3882, Survey in Survey Calibrated. Najbolj osnovna antena je ANN-MB-00, za katero ne poznamo ne položaja faznega centra, ne geometričnega centra in ne stabilnosti faznega centra. Bolj kakovostni sta anteni Tallysman TW 3882 in Survey, kjer je položaj geometričnega centra določen, nimamo pa na voljo kalibracijskih parametrov anten, a naj bi anteni GNSS zagotavljali stabilen položaj faznega centra (Hamza, Stopar, & Sterle, 2021a). Za razliko od zadnjih dveh pa je antena Survey Calibrated podana s kalibracijskimi parametri. Uporabljene antene GNSS so prikazane na sliki 2.



Slika 2. Uporabljene antene GNSS v testnih primerih; (a) dva sistema plošč simpleRTK2B povezana z antenama ANN-MB-00 (črno, desno) in na napajalnik (belo, levo), (b) cenovno ugodne antene GNSS Survey (levo), Tallysman TW 3882 (sredina) in Survey Calibrated (desno)

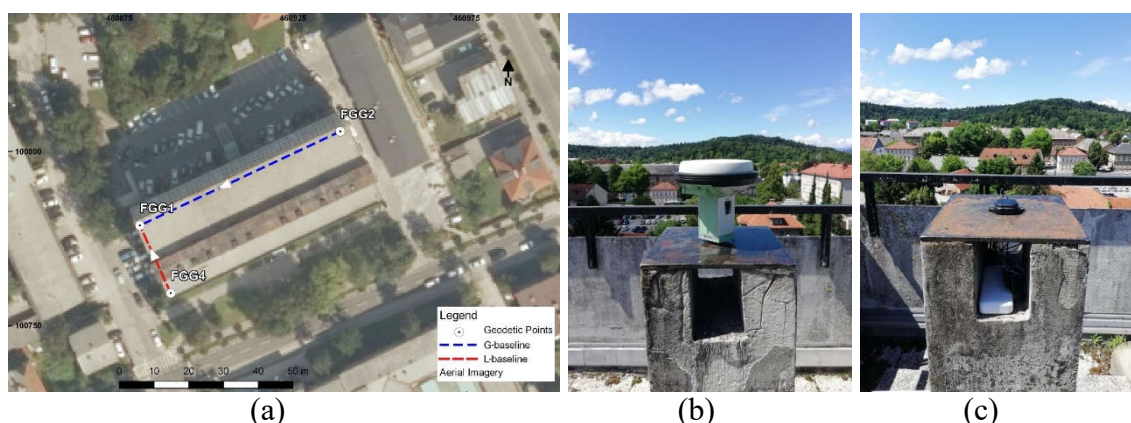
Pri vseh testnih izmerah smo za kontrolo uporabili tudi geodetski inštrumentarij GNSS z znanimi lastnostmi, ki se nanašajo tako na njihove geometrične lastnosti, kalibracijske parametre in lastnosti izmere GNSS. Uporabili smo GNSS-inštrumente Leica Viva (GS 15) in Leica GS18T podjetja Leica GeoSystems (Heerbrugg, Švica).

Za obdelavo opazovanj GNSS smo uporabili program RTKLIB (Everett, 2022). RTKLIB je odprto-kodna programska oprema, ki deluje tako v relativnem načinu, torej preko baznega vektorja, kot tudi v absolutnem načinu, po metodi PPP. Vse bazne vektorje smo izračunali s programom RTKLIB, medtem ko smo analize surovih opazovanj GNSS izvedli z lastnimi programskimi rešitvami.

Prva testna izmera s cenovno ugodnimi inštrumenti GNSS

Konec leta 2019 smo na UL FGG pridobili prva dva inštrumenta CU-GNSS ZED-F9P z antenama ANN-MB-00. Prvo, kar nas je zanimalo, je bila kakovost določevanja koordinat na osnovi CU-GNSS in njihova primerjava z geodetskimi inštrumenti GNSS. Izmero smo izvedli na betonskih stebrih na strehi UL FGG. Le-ta zagotavlja ugodne pogoje izmere GNSS, znane pa so tudi koordinate stebrov v državnem koordinatnem sistemu D96-17/TM (Hamza, Stopar, Ambrožič, Turk, & Sterle, 2020).

Izmero smo izvedli v januarju 2020 v dveh delih. V okviru izmere smo sestavili dva bazna vektorja, ki sta imela isto točko, kateri smo določevali koordinate (CU-GNSS), a različni referenčni točki. Na eni referenčni točki je bil inštrument CU-GNSS, medtem ko je bil na drugi geodetski inštrument Leica Viva.



Slika 3. Statična izmera z dvema cenovno ugodnima inštrumentoma GNSS in enim geodetskim inštrumentom GNSS; (a) prikaz strehe UL FGG in postavitev inštrumentov na stebre FGG1 in FGG4 (CU-GNSS) ter na FGG2 (geodetski), (b) postavitev inštrumenta Leica Viva na FGG2 in (c) prikaz postavitve cenovno ugodne antene GNSS ANN-MB-00 na stebrih FGG2 in FGG4

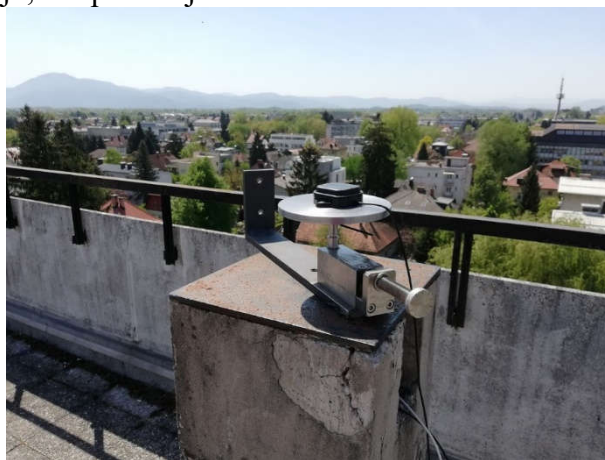
Sestavljena bazna vektorja sta označena kot G (referenčni je bil geodetski inštrument GNSS) in kot L (referenčni je bil inštrument CU-GNSS). Opazovanja GNSS smo obdelali za oba bazna vektorja v nizih opazovanj dolžine ene ure in analizirali pridobljene koordinate nove točke na osnovi obeh baznih vektorjev. Analizirali smo natančnost dobljenih koordinat v horizontalni ravnini, po višini in skupaj v 3D prostoru.

Ugotovili smo, da je natančnost horizontalnih komponent obeh baznih vektorjev primerljiva in je na nivoju 2 mm, medtem ko je pri višinski komponenti kakovost baznega vektorja L (2,9 mm) višja od višinske komponente baznega vektorja G (4,2 mm). Vendar pa je rezultat kar pričakovan, saj za geodetsko anteno Leica Viva kalibracijske parametre poznamo, medtem ko le-teh za anteni ANN-MB-00 nimamo. Predpostavljamo, da se pogrešek faznega centra pri baznem vektorju L v večji meri odstrani s sestavo enojnih faznih razlik.

Primerjava med izračunanimi koordinatami nove točke na osnovi obeh baznih vektorjev pa kaže na statistično značilne razlike. V horizontalni ravnini so razlike na nivoju nekaj mm, medtem ko so po višini okoli 1 cm. Tudi tu je rezultat kar pričakovan, saj imamo pri anteni Leica Viva kakovostno določen tako geometrični kot tudi fazni center antene (kalibracijski parametri), medtem ko imamo pri anteni ANN-MB-00 geometrični center povsem nedoločen, kar pomeni da imamo težavo pri centriranju antene, kar se vidi tudi na sliki 3 (c).

Iz rezultatov lahko sklepamo, da lahko s CU-GNSS dobimo natančnost horizontalnega položaja na nivoju milimetrov, medtem ko je pri višinski komponenti natančnost bistveno slabša. Po našem mnenju je glavna težava določitev geometričnega in faznega centra antene. Prednost kakovostne (in znane) konstrukcije geodetskih inštrumentov nam še vedno zagotavlja kakovostnejše rezultate.

Drugo izmero smo naredili za preizkus sposobnosti zaznavanja premikov s CU-GNSS. Anteno GNSS na novi točki smo postavili na nosilec, s katerim lahko premikamo anteno GNSS z visoko točnostjo, kar prikazuje slika 4.



Slika 4. Postavitev antene GNSS ANN-MB-00 na novi točki na nosilec, ki premika anteno v horizontalni ravnini z visoko točnostjo

Anteno smo premikali s korakom po 5 mm v horizontalni ravnini in za vsako postavitve pridobili 30 minut opazovanj GNSS. Skupno smo izvedli 270 premikov, ki smo jih razdelili v 10 razredov, od 5 mm do 50 mm, s korakom 5 mm.

Zmožnost zaznavanja premikov smo določili tako za horizontalno ravnino kot tudi po višini. Vsi premiki so bili opravljeni le v horizontalni ravnini, zato pri statističnem testu ne bi smeli zaznati nobenega premika v smeri višine. Pri baznem vektorju G smo tak (pravilen) rezultat dobili v 98% primerov, medtem ko smo pri baznem vektorju L tak (pravilen) rezultat dobili le v 77% primerih, v 23% primerov smo zaznali lažen premik. V horizontalni ravnini smo za oba bazna vektorja v 100% primerih pravilno zaznali premik velikosti 10 mm ali več, medtem ko premika velikosti 5 mm nismo mogli zaznati z visoko gotovostjo (večjo od 90%) pri obeh baznih vektorjih.

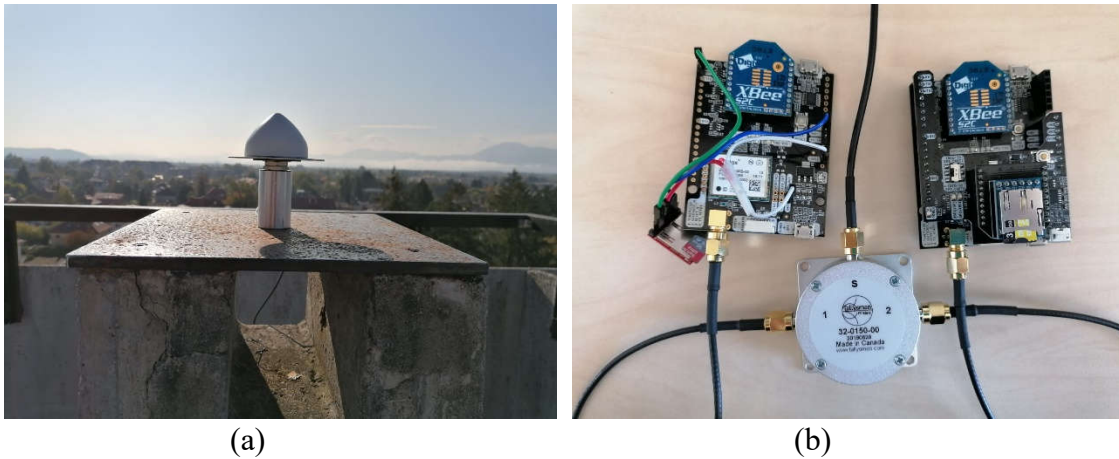
Ugotovili smo, da nepoznavanje faznega centra cenovno ugodne antene GNSS ANN-MB-00 značilno poslabša kakovost določitve koordinat GNSS in posledično zmožnost zaznavanja premikov predvsem pri višinski komponenti, a statistično značilno tudi v horizontalni ravnini. Kljub temu smo lahko pravilno zaznali premike velikosti 1 cm in več.

Kakovost delovanja cenovno ugodnih sprejemnikov in anten GNSS

Kot je razvidno iz prejšnjega poglavja, nepoznavanje geometrije in kalibracijskih parametrov anten CU-GNSS ključno vpliva na kakovost pridobljenih rezultatov. Predvsem

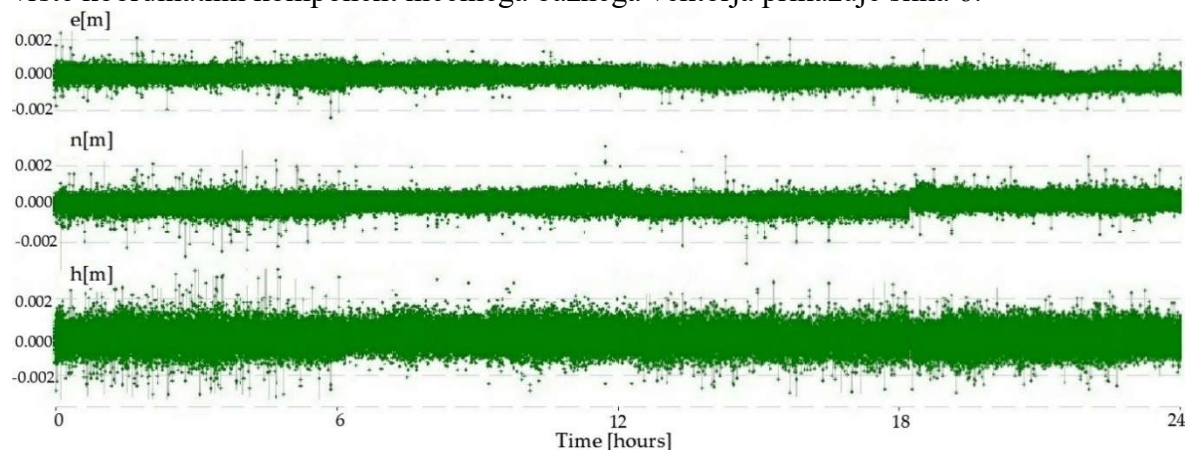
je problem točnost rezultatov, medtem ko natančnost rezultatov ostaja relativno visoka. To je bil tudi razlog, da so se dokaj kmalu po pojavu prvih anten CU-GNSS na tržišču pojavile tudi antene CU-GNSS, ki so imele dobro geometrijsko zasnovo, kar pomeni, da je bil zanje kakovostno določen geometrijski center. Primera takih anten sta Survey in Tallysman TW 3882, ki ju prikazujemo na sliki 2 (b).

Testne izmere za analizo kakovosti delovanja CU-GNSS smo zasnovali na več različnih načinov (Hamza, Stopar, & Sterle, 2021a; Hamza, Stopar, Ambrožič, & Sterle, 2021b). Za oceno kakovosti delovanja sprejemnika GNSS smo izvedli meritve na t.i. ničelnem baznem vektorju, kar praktično pomeni, da eno anteno GNSS preko razdelilnika signala povežemo na dva sprejemnika GNSS, kakor prikazujemo na sliki 5.



Slika 5. Vzpostavitev ničelnega baznega vektorja; (a) postavitev antene GNSS Tallysman TW 3882 in (b) povezava antenskega kabla na dva sprejemnika simpleRTK2B preko razdelilnika signala

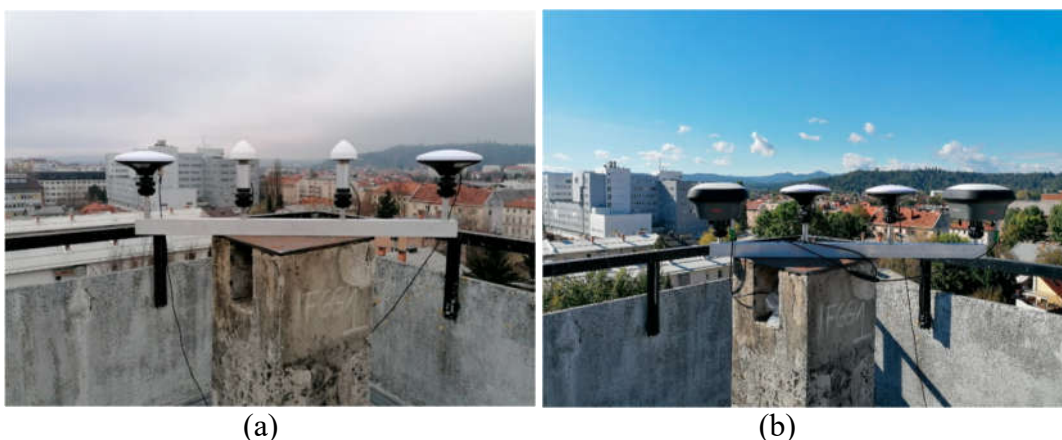
Pri sestavi enojnih faznih razlik se v okviru ničelnega baznega vektorja odstranijo vsi skupni pogreški, z izvorom v satelitih, atmosferi in antenah GNSS. Pogreški, ki se ne odstranijo, se nanašajo samo še na oba sprejemnika na krajiščih baznega vektorja in kažejo na natančnost in točnost opazovanj GNSS na posameznem sprejemniku GNSS. Časovne vrste koordinatnih komponent ničelnega baznega vektorja prikazuje slika 6.



Slika 6. Časovne vrste koordinatnih komponent ničelnega baznega vektorja, in sicer zgoraj e (angl. easting), v sredini n (angl. northing) in spodaj h (angl. height)

Časovne vrste koordinatnih komponent ničelnega baznega vektorja na sliki 6 kažejo na kakovostno delovanje sprejemnika GNSS, saj je ponovljivost koordinatnih komponent na pod-milimetrskem nivoju. To pomeni, da je natančnost faznih opazovanj visoka. Tudi točnost je visoka, saj so tudi izračunane komponente ničelnega baznega vektorja na pod-milimetrskem nivoju za horizontalni koordinati in okoli milimetra za višinsko komponento.

Testiranje kakovosti delovanja anten GNSS smo preverili tako, da smo antene GNSS postavili na kovinsko ogrodje z znano geometrijo. Testirali in primerjali smo geodetsko anteno GNSS Leica GS18T (znani kalibracijski parametri) in CU-GNSS-antene: Survey Calibrated (znani kalibracijski parametri) ter Survey in Tallysman TW 3882 (neznani kalibracijski parametri). Slika 7 prikazuje izmero z ne-kalibriranimi CU-GNSS-antenami (levo) in izmero s kalibriranimi geodetskima antenama ter kalibriranimi cenovno ugodnima antenama GNSS.



Slika 7. Testni izmeri za analizo kakovosti delovanja anten GNSS; (a) primerjava med ne-kalibriranimi antenama CU-GNSS Survey (skrajno levo in desno) in Tallysman TW 3882 (srednji dve), (b) primerjava med kalibriranimi Leica GS18T (skrajno levo in desno) in kalibriranimi Survey Calibrated (srednji dve)

Postavitev anten GNSS na nastavke ogrodja, kot prikazuje slika 7, nam omogoča sestavo šestih zelo kratkih baznih vektorjev z znanimi koordinatnimi komponentami. Pri zelo kratkem baznem vektorju se vsi pogreški opazovanj GNSS, ki imajo izvor v satelitih GNSS, atmosferi in okolici točke, odstranijo. Ostanejo le še pogreški delovanja anten in sprejemnikov GNSS. Rezultati nam tako, po predhodno opravljeni analizi kakovosti sprejemnika v okviru ničelnega baznega vektorja, omogočajo vpogled v kakovost delovanja anten GNSS.

Rezultati pri antenah CU-GNSS, za katere ne poznamo kalibracijskih parametrov (slika 7 (a)) so podane v preglednici 1. Statistike predstavljajo dobljena odstopanja od pravih vrednosti v horizontalni ravnini (dolžina) in pri višinski razliki.

Preglednica 1. Statistike pri določitvi horizontalne dolžine (d) in višine (h) baznih vektorjev za obe ne-kalibrirani anteni CU-GNSS

Antena GNSS	Tallysman TW 3882		Survey	
Geom. količina	d [mm]	h [mm]	d [mm]	h [mm]
min (mm)	-3,7	-6,3	-1,5	-3,4
max (mm)	3,2	6,8	1,6	4,5
RMSE (mm)	1,4	3,9	0,8	1,7
Razlika od prave vrednosti	-0,1	-0,6	-1,0	0,3

Iz preglednice 1 vidimo, da so numerične vrednosti odstopanj od pravih vrednosti na nivoju nekaj milimetrov, kar kaže na visoko natančnost in točnost opazovanja GNSS. Dobljeni rezultati kažejo nivo milimetrске točnosti določitve baznih vektorjev (zadnja vrstica). Je pa iz numeričnih vrednosti odstopanj razvidna boljša kakovost antene Survey v primerjavi z anteno Tallysman TW 3882.

Analiza kakovosti delovanja kalibriranih geodetskih anten GNSS Leica GS18T in kalibrirane antene GNSS Survey Calibrated prikazuje preglednica 2.

Preglednica 2. Statistike pri določitvi horizontalne dolžine (d) in višine (h) baznih vektorjev za obe kalibrirani anteni GNSS

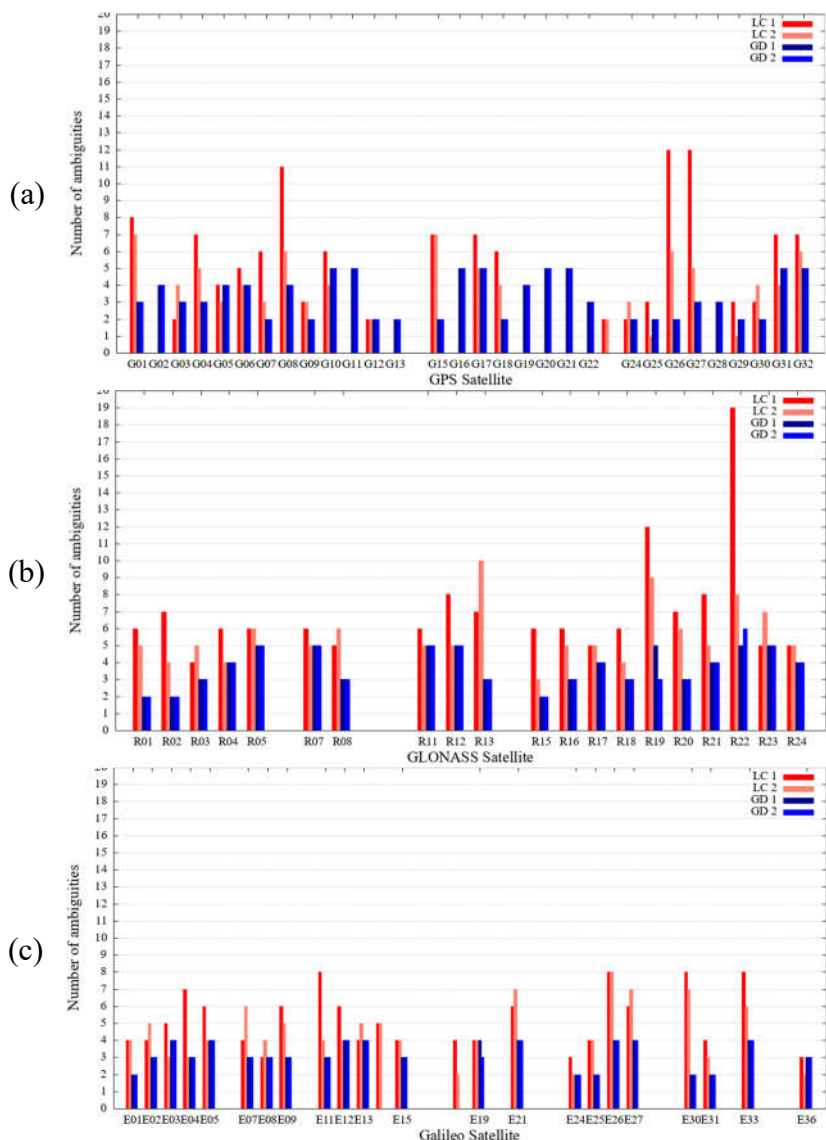
Antena GNSS	Survey Calibrated		Leica GS18T	
Geom. količina	d [mm]	h [mm]	d [mm]	h [mm]
min (mm)	-2,3	-3,3	-2,9	-5,9
max (mm)	2,8	3,1	2,7	3,5
RMSE (mm)	1,0	1,8	1,2	2,1
Razlika od prave vrednosti	-1,2	0,8	0,3	0,7

Primerjava med obema kalibriranima antenama GNSS kaže na zelo skladno natančnost obeh anten (vrstica RMSE), na nivoju milimetrov, se pa pokaže razlika v točnosti (vrstica razlike od prave vrednosti), predvsem v horizontalni ravnini se geodetska antena GNSS izkaže za točnejšo. Primerjava med kalibriranimi in ne-kalibriranimi pa pokaže na jasno višjo natančnost in točnost kalibriranih anten.

Primerjava med geodetskimi in cenovno ugodnimi inštrumenti GNSS na nivoju opazovanj GNSS

Metodologija testne izmere iz prejšnjega primera (glej sliko 7 (b)) prikazuje situacijo, ko imamo štiri inštrumente GNSS, ki se nahajajo v zelo podobnih okoliščinah. Podatke izmere smo uporabili tudi zato, da smo ugotovili razlike med delovanjem geodetskih in cenovno ugodnih inštrumentov GNSS na nivoju opazovanj GNSS (Hamza, Stopar, Ambrožič, & Sterle, 2021b). Analizirali smo kakovost faznih opazovanj preko linearne kombinacije L4 – t.i. linearne kombinacije neodvisne od vpliva geometrije (Leick, Rapoport, & Tatarnikov, 2015). Pri analizi geometrijsko neodvisne linearne kombinacije L4 pa je potrebno poiskati tudi morebitne izpade signala in določiti fazne nedoločenosti faznih opazovanj, ki se

nanašajo na število celih valov nosilnega valovanja med satelitom in sprejemnikom. Kakovosten in robusten inštrument GNSS izmeri fazna opazovanja z visoko natančnostjo, pri tem da ima v časovnih vrstah faznih opazovanj GNSS malo izpadov signala.

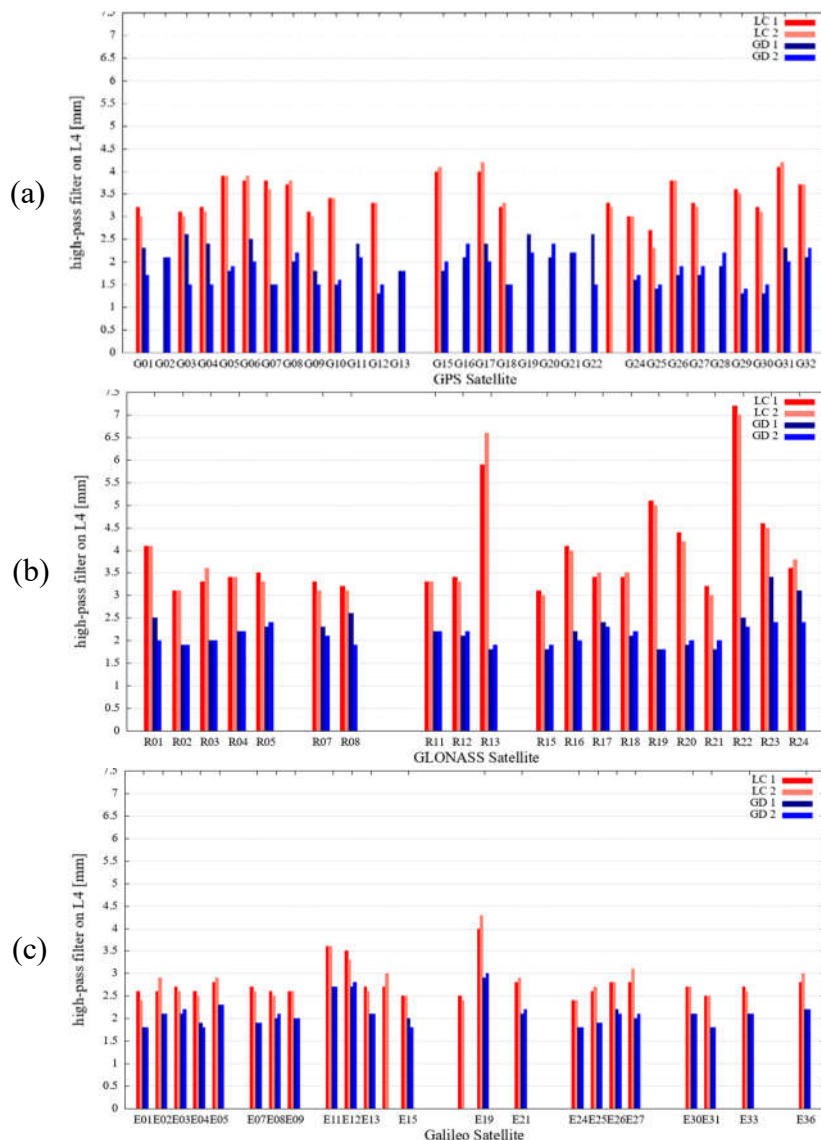


Slika 8. Število faznih nedoločenosti za satelite GPS (a), GLONASS (b) in Galileo (c) za oba geodetska inštrumenta Leica GS18T (GD1 in GD2 – modri barvi) in za oba CU-GNSS (LC1 in LC2 – rdeči barvi)

Slika 8 prikazuje število faznih nedoločenosti za čas izmere za vsak satelit posameznega satelitskega sistema ((a) GPS, (b) GLONASS in (c) Galileo). Večje število faznih nedoločenosti pomeni več izpadov signala (slabše sledenje signalu) in posledično več neznank pri izračun, kar vodi do slabših rezultatov. Vidimo lahko, da je število faznih nedoločenosti pri veliki večini satelitov za opazovanja s CU-GNSS večje kot v primeru geodetskih inštrumentov. Pri posameznih satelitih je ta razlika veliko večja (npr. G25, G26, R22, E30 ali E31), pri nekaterih satelitih sistema GPS pa faznih nedoločenosti pri cenovno ugodnih sprejemnikih sploh nimamo. Vzrok je v tem, da cenovno ugodni sprejemniki sledijo le signal nosilnih valovanj tistih satelitov, ki prenašajo le modulirano javno dostopno C-kodo. Na drugem nosilnem valovanju pri satelitih GPS starejše izdelave je modelirana le

koda P, ki ni splošno dostopna (takih je trenutno okoli 7). V primeru sistema GPS torej s cenovno ugodnimi sprejemniki GNSS trenutno ne moremo slediti (pridobiti in uporabiti opazovanj) vseh satelitov.

Slika 9 prikazuje natančnost faznih opazovanj GNSS za vsak satelit pri posameznem satelitskem sistemu ((a) GPS, (b) GLONASS in (c) Galileo), ki se jo dobi s t.i. »high-pass« filtrom linearne kombinacije L4.



Slika 9. Natančnost faznih opazovanj za satelite GPS (a), GLONASS (b) in Galileo (c) za oba geodetska inštrumenta Leica GS18T (GD1 in GD2 – modri barvi) in za oba CU-GNSS (LC1 in LC2 – rdeči barvi)

Na sliki 9 vidimo ocenjeno natančnost faznih opazovanj za vse satelite GPS, GLONASS in Galileo. V primeru geodetskih inštrumentov GNSS vidimo dokaj homogeno natančnost neglede na satelitski sistem. Natančnost faznih opazovanj je na nivoju 2 mm. V primeru cenovno ugodnih inštrumentov GNSS so opazne bolj različne ocene natančnosti, gibljejo se od okoli treh pa do 6 ali 7 milimetrov. Natančnost faznih opazovanj je pri teh inštrumentih značilno slabša, a še vedno pod centimetrskim nivojem, kar na koncu še vedno zagotavlja visoko kakovost določitve koordinat.

Zaznavanje premikov s cenovno ugodnimi inštrumenti GNSS

Zmožnost statistično značilnega zaznavanja premikov smo analizirali s pomočjo naprave, ki lahko premakne anteno GNSS z visoko točnostjo, uporabili pa smo jo za vsiljevanje znanih premikov horizontalni ravnini in po višini (Hamza, Stopar, Ambrožič, & Sterle, 2021b). Princip prikazuje slika 10 in je enak prikazanemu na sliki 4. Za razliko od slike 4, smo tu uporabili kakovostnejše zunanje antene CU-GNSS, z bolj znanim položajem geometrijskega centra in bolj kakovostno določenim faznim centrom.



Slika 10. Vsiljevanje horizontalnega premika (a) in premika po višini (b) za testiranje zmožnosti zaznavanja premikov s cenovno ugodnimi inštrumenti GNSS

Anteno GNSS smo v horizontalni ravnini premikali s korakom po 2 mm do končnega premika 12 mm, v višinski smeri s korakom 3 mm do končnega premika 15 mm, v vsaki poziciji pa so antene mirovale po eno uro. Uporabili smo tri različne antene GNSS; Survey, Tallysman TW 3882 in Survey Calibrated, premike pa smo določili preko baznega vektorja, v relativnem načinu. Zmožnost zaznavanja premikov prikazujeta preglednici 3 in 4.

Preglednica 3. Odstotek pravilno zaznanih premikov v horizontalni ravnini za vse tri testirane antene GNSS v relativnem načinu

Velikost premika	Survey Calibrated	Survey	Tallysman TW 3882
2 mm	17 %	33 %	50%
4 mm	100 %	60%	100 %
6 mm	100 %	100 %	100 %
8 mm	100 %	100 %	100 %

Preglednica 4. Odstotek pravilno zaznanih premikov po višini za vse tri testirane antene GNSS v relativnem načinu

Velikost premika	Survey Calibrated	Survey	Tallysman TW 3882
3 mm	60 %	20 %	20%
6 mm	100 %	75%	75 %
9 mm	100 %	100 %	100 %
12 mm	100 %	100 %	100 %

Iz preglednic 3 in 4 vidimo, da je odstotek zaznanih premikov največji za anteno GNSS Survey Calibrated, medtem ko sta se ostali dve anteni odrezali slabše, sta pa bili primerljivi med seboj. Rezultat je dokaj razumljiv, če vemo, da za anteno Survey Calibrated poznamo kalibracijske parametre, medtem ko jih za ostali dve ne. Ugotovili pa smo, da lahko premike velikosti 4 mm v horizontalni ravnini in 6 mm po višini zaznamo s precejšnjo zanesljivostjo.

Zmožnost zaznavanja premikov smo analizirali tudi v absolutnem načinu, preko metode PPP. Uporabili smo anteni Survey Calibrated in Tallysman TW 3882, premikali pa smo ju po 10 mm do končnega premika 60 mm, v vsakem položaju je antena mirovala 8 h. Rezultati zaznavanja premikov so prikazani v preglednici 5.

Preglednica 5. Odstotek pravilno zaznanih premikov za obe testirani anteni v absolutnem načinu

Premik [mm]	Survey Calibrated			Tallysman TW 3882		
	10	20	30	10	20	30
Zaznan premik	92 %	100 %	100 %	90 %	100 %	100 %

Iz preglednice 5 je razvidno, da lahko z visoko gotovostjo zaznamo premike velikosti enega cm in več v absolutnem smislu. Iz preglednice bi sklepali, da sta obe anteni enake kakovosti, vendar se izkaže, da je antena Tallysman TW 3882 malenkost slabša, saj je bila vrednost MAE (angl. Mean Absolute Error) za anteno Tallysman TW 3882 enaka 7,4 mm, medtem ko je bil MAE za anteno Survey Calibrated enaka 5,4 mm.

Spremljanje premikov na zemeljskem plazju Laze

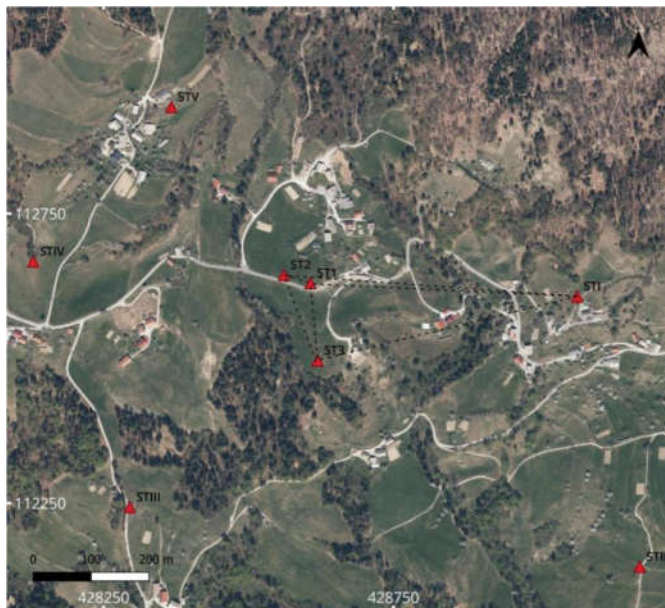
Plaz Laze je lociran med Blegošem in dolino Kopačnico v občini Gorenja vas. Zgornji del plazu je bolj aktiven, medtem ko spodnji del neposredno ogroža naselje Laze (Lazar, Beguš, & Vulič, 2020). Ključni dejavnih aktivnosti plazu pa padavine, samo lokacijo plazu na karti pa prikazuje slika 11.



Slika 11. Geološkija plazu Laze

Za potrebe nadziranja premikov plazu se je že v letu 2016 na območju plazu vzpostavila geodetska mreža sedmih betonskih stebrov. Pet stebrov se nahaja na stabilnem območju v okolici naselja Laze, med temi pa se dva stebra nahajata na lokacijah z ugodnimi razmerami za izmero z GNSS (ST I in ST II). Kasneje (2021) sta se vzpostavila še dva stebra, v izmere pa je bilo vključenih še okoli 80 geodetskih točk za določevanje premikov plazu.

Trenutno je v poteku izvedba izmere na štirih stebrih, ST I, ST1, ST 2 in ST 3, kjer smo privzeli steber ST I za referenčno geodetsko točko. Geodetsko GNSS-mrežo prikazuje slika 12.



Slika 12. Geodetska mreža GNSS na plazu Laze

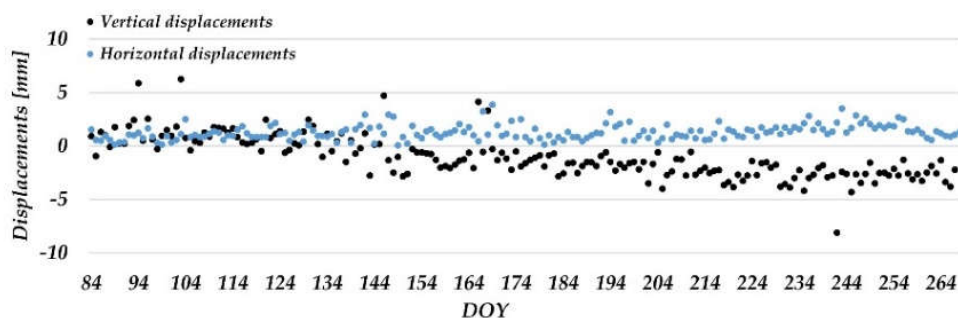
Na obravnavanih stebrih je nameščen t.i. cenovno ugodni GNSS-monitoring sistem (CUGMS), ki ga sestavlja CU-GNSS simpleRTK2B modul z integriranim sprejemnikom GNSS ZED-F9P, antena CU-GNSS Survey Calibrated, sistem za zagotavljanje električne energije (solarni panel z baterijo) in spominska enota za shranjevanje opazovanj GNSS. Celoten CUGMS na vsaki postaji stroškovno ne presega 500 €. Prikaz CUGMS na stebru ST I je prikazan na sliki 13.



Slika 13. Steber ST I in inštaliran cenovno ugoden GNSS-monitoring sistem za beleženje in shranjevanje opazovanj GNSS

Testna opazovanja GNSS so bila pridobljena preko stalnega delovanja CUGMS na vseh štirih stebrih za obdobje šestih mesecev od 25. 3. 2022 naprej. Za čas pisanja prispevka smo pridobili preliminarne rezultate obdelave opazovanj GNSS z metodo PPP na stebrih ST I in v okviru baznega vektorja ST I – ST 1.

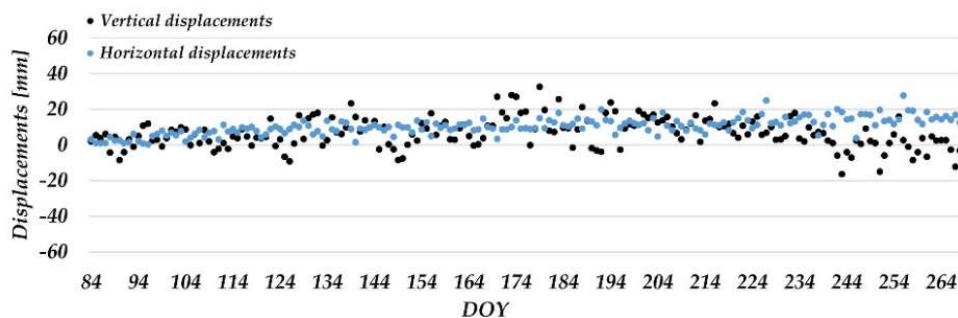
Slika 14 prikazuje premike stebra ST 1, določene preko baznega vektorja v horizontalni ravnini (modre pike) in po višini (črne pike), rezultati pa so podani na osnovi dnevnih nizov opazovanj GNSS.



Slika 14. Izračunani premiki na stebrih ST 1 na osnovi baznega vektorja ST I – ST 1 v horizontalni ravnini (modre pike) in po višini (črne pike)

Iz slike 14 je razvidno, da je ponovljivost koordinat v ravnini na nivoju nekaj milimetrov, medtem ko je po višini le-ta malenkost slabša.

Premiki, dobljeni na osnovi absolutnega določanja položaja (metoda PPP), pa so prikazani na sliki 15. Tudi v tem primeru smo koordinate določili za vsak dan posebej.



Slika 15. Izračunani premiki na stebrih ST 1 na osnovi metode PPP v horizontalni ravnini (modre pike) in po višini (črne pike)

Ponovljivost koordinat je pri metodi PPP (slika 15) slabša kot v primeru baznega vektorja (slika 14), a še vedno na pod centimetrskem nivoju.

Zaključek

Dvo-frekvenčni inštrumenti CU-GNSS, ki so se pojavili na tržišču v zadnjih nekaj letih, so se izkazali za zelo uporabne senzorje pri določevanju položaja s sistemi GNSS. V pričujočem prispevku smo prikazali nekaj rezultatov testnih izmer in analiz delovanja te vrste inštrumentarija, kjer smo se osredotočili na geodetski monitoring.

Rezultati kažejo na visoko kakovost, saj so tako fazna opazovanja GNSS kot tudi izračunan položaj na milimetrskem nivoju. Pričakovano pa se je izkazalo, da niso povsem primerljivi z geodetskimi inštrumenti GNSS. Slabši rezultati te opreme so razvidni tako za

sprejemnike GNSS, kot tudi za antene GNSS. Predvsem pri antenah GNSS se vidi razlika, saj v primeru CU-GNSS ne poznamo točno tako položaja geometrijskega centra anten GNSS kot tudi faznega centra anten, v večini primerov pa cenovno ugodne antene tudi niso kalibrirane. Kljub temu pa lahko s cenovno ugodnimi inštrumenti GNSS zagotovimo milimetrski do centimetrski nivo natančnosti in točnosti koordinat na osnovi statične izmere.

V okviru testnih izmer smo pokazali, da lahko pri kratkih baznih vektorjih z dvo-frekvenčnimi CU-GNSS in na osnovi statične izmere GNSS, ko imamo na voljo dolgotrajna opazovanja, zelo zanesljivo določimo premike geodetskih točk na nekaj milimetrskem nivoju v horizontalni ravnini in okoli 5 mm po višini. Zato ti inštrumenti predstavljajo zelo dobro alternativo geodetskim inštrumentom pri geodetskemu monitoringu, predvsem v primerih, kjer lahko pride do poškodb ali uničenja inštrumentov.

Zahvala

Raziskava je nastala v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2-2489 SLOKIN–Geokinematski model ozemlja Slovenije in dveh raziskovalni programov, to sta Dinamična Zemlja P1-0419 in Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije P2-0227, ki jih financira ARRS. Raziskava je nastala tudi s pomočjo projekta CRP V2-1944 Razvoj metodologije in sistema verifikacije referenčnih omrežij in postaj GNSS, ki sta ga financirala ARRS in GURS.

Literatura

- Ardusimple simpleRTK2b. (2022). *spletna stran*. Pridobljeno 1. 12 2022 iz <https://www.ardusimple.com/product/simplertk2b/>: <https://www.ardusimple.com/product/simplertk2b/>
- Biagi, L., Grec, F. C., & Negretti, M. (2016). Low-Cost GNSS Receivers for Local Monitoring: Experimental Simulation, and Analysis of Displacements. *Sensors*, *16*(12), 2140. doi:10.3390/s16122140
- Everett, T. (2022). *RTKLIB spletna stran*. Pridobljeno 1. 12 2022 iz <https://rtkexplorer.com/downloads/rtklib-code/>: <https://rtkexplorer.com/downloads/rtklib-code/>
- Hamza, V., Stopar, B., & Sterle, O. (2021a). Testing the performance of multi-frequency low-cost GNSS receivers and antennas. *Sensors*, *21*(6), 2029. doi:10.3390/s21062029
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., & Sterle, O. (2021b). Performance evaluation of low-cost multi-frequency GNSS receivers and antennas for displacement detection. *Applied sciences*, *11*(14), 1-22. doi:10.3390/app11146666
- Hamza, V., Stopar, B., Ambrožič, T., Turk, G., & Sterle, O. (2020). Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring Purposes. *Sensors*, *20*(16), 4375. doi:<https://doi.org/10.3390/s20164375>
- Krietemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., & ten Veldhuis, M.-C. (2020). High Quality Zenith Tropospheric Delay Estimation Using a Low-Cost Dual-Frequency Receiver and Relative Antenna Calibration. *Remote Sensing*, *12*(9), 1393. doi:10.3390/rs12091393
- Krietemeyer, A., van der Marel, H., van de Giesen, N., & ten Veldhuis, M.-C. (2022). A Field Calibration Solution to Achieve High-Grade-Level Performance for Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receiver and Antennas. *Sensors*, *22*(6), 2267. doi:10.3390/s22062267
- Lazar, A., Beguš, T., & Vulić, M. (2020). Integration of Measurement Techniques in Monitoring of the Laze Landslide in Slovenia. *Acta geotechnica Slovenica*, *17*(1), 33-45. doi:0.18690/actageotechslov.17.1.33-45.2020
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying, Fourth Edition*. John Wiley & Sons, Inc.

- Schmid, R., Dach, R., Collilieux, X., Jaeggi, A., Schmitz, M., & Dilssner, F. (2016). Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *Journal of Geodesy*, 90 (4), 343-364. doi:10.1007/s00190-015-0876-3
- Sterle, O. (2015). *Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi*. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Slovenija, Ljubljana. Pridobljeno iz <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=86314&lang=slv>
- Sterle, O., Stopar, B., & Pavlovčič Prešeren, P. (2015). Single-frequency precise point positioning: an analytical approach. *Journal of Geodesy*, 89, 793-810. doi:<https://doi.org/10.1007/s00190-015-0816-2>
- Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (Ured.). (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Cham, Švica: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>
- u-blox. (2022). *spletna stran*. Pridobljeno 1. 12 2022 iz <https://www.u-blox.com/en/>: <https://www.u-blox.com/en/>
- u-blox u-center. (2022). *spletna stran*. Pridobljeno 1. 12 2022 iz <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>: <https://www.u-blox.com/en/product/u-center>
- u-blox ZED-F9P. (2022). <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>. Pridobljeno 1. 12 2022 iz spletna stran: <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>