

Vzdrževanje državnega koordinatnega sistema Slovenije: stanje 2024

Oskar Sterle¹, Klemen Ritlop¹, Bojan Stopar¹, Sandi Berk², Klemen Medved², Polona Pavlovčič Prešeren¹

Povzetek

Omrežja stalno delujočih postaj GNSS predstavljajo osnovno ogrodje sodobnih referenčnih sistemov v geodeziji. Z obdelavo opazovanj GNSS na dnevni osnovi pridobivamo kakovostne koordinate, kar nam omogoča vzpostavitev časovnih vrst koordinat. Na območju Slovenije deluje državno omrežje postaj GNSS SIGNAL že skoraj 20 let, skoraj 10 let pa tudi stalno delujoče postaje GNSS v okviru Kombinirane geodetske mreže 0. reda. Pridobljene časovne vrste koordinat postaj GNSS omogočajo zaznavanje in možnost odpravljanja težav, povezanih s koordinatami postaj GNSS, kot so pravi in navidezni nenadni premiki, počasni in zvezni premiki postaj in prisotni periodični signali, ki nam lahko slabšajo točnost in natančnost uradno določenih koordinat postaj GNSS. Z analizo in modeliranjem časovnih vrst, iz katerih odstranimo nezveznosti, modeliramo periodične in druge vplive, pridobimo nize koordinat, kjer se vsak nanaša na časovni interval, za katerega predpostavljamo stabilnost koordinat. Na tak način lahko dobimo koordinate, ki ustrezajo stanju v naravi. V prispevku prikazujemo postopek pridobitve in obravnave koordinat in časovnih vrst koordinat postaj GNSS v Sloveniji. Pridobljeni rezultati kažejo visoko skladnost z rezultati obdelav opazovanj GNSS v omrežja EPN. Po drugi strani pa rezultati kažejo tudi na slabšanje kakovosti uradnih koordinat postaj omrežja SIGNAL in Kombinirane državne geodetske mreže 0. reda, ki jih, za zdaj, obravnavamo kot konstantne v času.

Ključne besede: državni horizontalni koordinatni sistem D96, časovne vrste koordinat GNSS, omrežje GNSS SIGNAL, Kombinirana geodetska mreža . reda, geokinematski model

Key words: national coordinate system D96, GNSS coordinate time series, SIGNAL GNSS network, Combined geodetic network of 0th order, geokinematic model

Uvod

Temeljna geodetska infrastruktura za pridobitev, vodenje in obravnavo prostorskih podatkov na območju Slovenije je državni koordinatni sistem, ki ga delimo na horizontalno komponento (oznaka D96) in višinsko komponento (oznaka SVS2010). Začetek vzpostavljanja horizontalnega koordinatnega sistema sega v leto 1994, od tedaj pa tudi potekajo dela za vzdrževanje koordinatnega sistema: Dela v zvezi s horizontalnim koordinatnim sistemom lahko razvrstimo v štiri faze. Prvo fazo predstavlja vzpostavitev koordinatnega sistema D96 na osnovi izmer EUREF pasivne GNSS mreže EUREF točk v letih 1994, -95 in -96 in izračuna koordinat, ki je bil zaključen leta 2003 (Berk, Komadina, Marjanović, Radovan, & Stopar, 2003a; Berk, Komadina, Marjanović, Radovan, & Stopar, 2003b). Drugo fazo predstavlja vzpostavitev omrežja SIGNAL (Berk, Kozmus, Radovan, & Stopar, 2006) in njegova vključitev v državni koordinatni sistem z izmero mini-EUREF na petih točkah pasivne mreže EUREF (Sterle & Stopar, 2007). Z vključitvijo omrežja SIGNAL v državni koordinatni sistem D96 je le-ta postal enostavno dostopen za vse geodetsko

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

² Geodetska uprava RS, Zemljemerska 12, 1000 Ljubljana

inženirske potrebe v praksi. V okviru tretje faze se začne aktivno vključevanje časovne komponente v državni koordinatni sistem. Analize ponovljenih kampanjskih izmer na geodinamičnih točkah GNSS in pridobitev prvih časovnih vrst koordinat postaj omrežja SIGNAL (Sterle O., 2015) so nakazale na dokaj pestro geodinamično dogajanje na območju Slovenije (Weber, in drugi, 2010). V letu 2016 se zato ponovi GNSS izmera EUREF 2016 (Medved, 2016), začne se vzpostavitev Kombinirane geodetske mreže 0. reda (Oven, in drugi, 2019), postavijo se tudi temelji obdelave opazovanj GNSS vseh državnih stalnih postaj GNSS na območju Slovenije na dnevni osnovi (Sterle & Stopar, 2017). Rezultati tretje faze so bile nove uradne koordinate vseh postaj omrežja SIGNAL (Berk, Sterle, Medved, & Stopar, 2020) in začnemo pridobivati prve časovne vrste koordinat v skoraj realnem času (Sterle, Stopar, & Pavlovčič Prešeren, 2021). Rezultati kontinuirane obdelave opazovanj GNSS na dnevni osnovi so nakazali na nove izzive pri določitvi kakovostnih koordinat postaj, s pripadajočimi konstantnimi vektorji hitrosti. V časovnih vrstah so se pojavile nezveznosti, nelinearnosti in prisotnosti periodičnih vplivov, kar je imelo za posledice določitev koordinat in njihove časovne vrste slabše točnosti. V okviru trenutne, četrte, faze smo tako izvedli konceptualno prenovno obdelavo opazovanj GNSS in predvsem obravnave časovnih vrst koordinat, da korektno obravnavamo časovne vrste in pridobimo kakovostne koordinate postaj GNSS za poljuben trenutek (Sterle, Pavlovčič Prešeren, Stopar, & Ritlop, 2024). Pravilno modelirane časovne vrste nam omogočajo določitev točnih koordinat postaj, hkrati pa se ponuja možnost izračuna kakovostnih vektorjev hitrosti postaj GNSS. Le-ti bodo v prihodnosti osnova za vzpostavitev kakovostnega geokinematskega modela Slovenije, ki bodo lahko služile tudi za analize geotektonskega dogajanja na območju Slovenije, za analizo kakovosti stanja državnega sistema Slovenije in tudi za konceptualno posodobitev državnega koordinatnega sistema Slovenije z vključitvijo časovne razsežnosti v definicijo in realizacijo državnega koordinatnega sistema. V nadaljevanju prikazujemo rezultate prenovljenega koncepta obdelave opazovanj GNSS vseh stalno delujočih postaj GNSS v državni lasti in pridobljene rezultate.

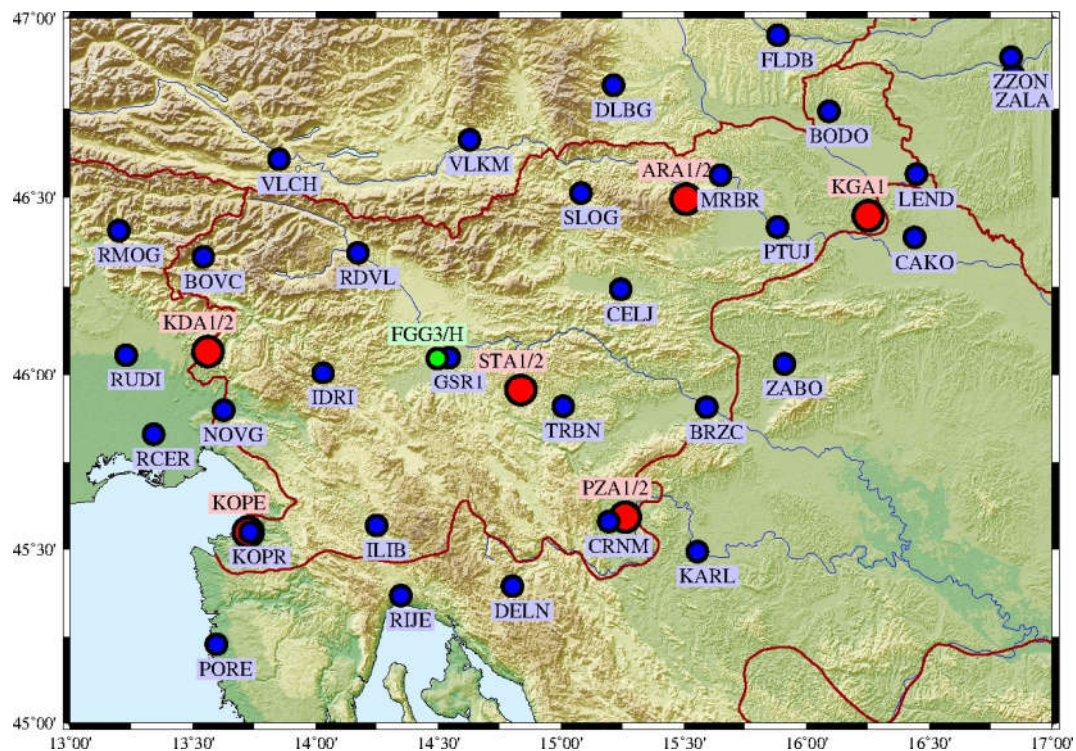
Omrežja in podatki GNSS

Na območju Slovenije sta operativni dve državni omrežji GNSS, in sicer omrežje SIGNAL (<https://gu-signal.si/>) in Kombinirana geodetska mreža 0. reda (https://gu-signal.si/0red_o_mrezi/). V okviru omrežja SIGNAL deluje na območju Slovenije 16 postaj, s sosednjimi državami pa poteka izmenjava opazovanj postaj GNSS z obmejnih območij. Tako so v omrežje SIGNAL vključene še štiri postaje GNSS iz Avstrije, tri postaje GNSS iz Italije, ena/dve postaji GNSS z Madžarske in šest postaj s Hrvaške. V omrežje SIGNAL so tako vključene:

- Na območju Slovenije: Bodonci (BODO), Bovec (BOVC), Brežice (BRZC), Celje (CELJ), Črnomelj (CRNM), Idrija (IDRI), Ilirska Bistrica (ILIB), Koper (KOPR), Ljubljana (GSR1), Lendava (LEND), Maribor (MRBR), Nova Gorica (NOVG), Ptuj (PTUJ), Radovljica (RDVL), Slovenj Gradec (SLOG) in Trebnje (TRBN).
- Na območju Avstrije: Bleiburg/Pliberk (BLEI), Deutchlandsberg/Lonč (DLBG), Feldbach/Vrbna (FLDB), Klagenfurt/Celovec (KLAG), Landskron/Vajškra (LANK), Villach/Beljak (VLCH) in Völkermarkt/Velikovec (VLKM).
- Na območju Italije: Cervignano del Friuli/Červinjan (RCER), Moggio Udinese/Možnica (RMOG) in Udine/Videm (RUDI).
- Na območju Hrvaške: Čakovec (CAKO), Delnice (DELN), Karlovac/Karlovec (KARL), Poreč (PORE), Rijeka/Reka (RIJE) in Zabok (ZABO).
- Na območju Madžarske: Zalaegerszeg/Jageršek (ZALA in/ali ZZON).

Državno Kombinirana geodetsko mrežo 0. reda trenutno predstavlja 6 točk/postaj, na katerih je postavljenih 10 stalno delujočih postaj GNSS, in sicer na Arehu (ARA1 in ARA2), v Kopru (KOPE), na Koradi (KDA1 in KDA2), v Prilozju (PZA1 in PZA2) in v Šentvidu pri Stični (STA1 in STA2).

Na stavbi Univerze v Ljubljani Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana je stabilizirana tudi stalno delujoča postaja, kjer signal z ene antene GNSS preko razdelilnika prenašamo na dva sprejemnika oz. postaji, FGG3 in FGGH. Lokacije vseh navedenih postaj GNSS so prikazane na sliki 1.



Slika 1: Postaje GNSS omrežja SIGNAL, Kombinirane geodetske mreže 0. reda in postaji FGG

Geodetski datum izračunanih dnevnih koordinat zagotavljajo dane/referenčne koordinate in vektorji hitrosti postaj GNSS v omrežju EPN (angl. EUREF permanent GNSS Network) (<http://www.epncb.oma.be/index.php>). Na sliki 2 prikazujemo izbrane referenčne postaje omrežja EPN, ki so vključene v našo obdelavo opazovanj GNSS.



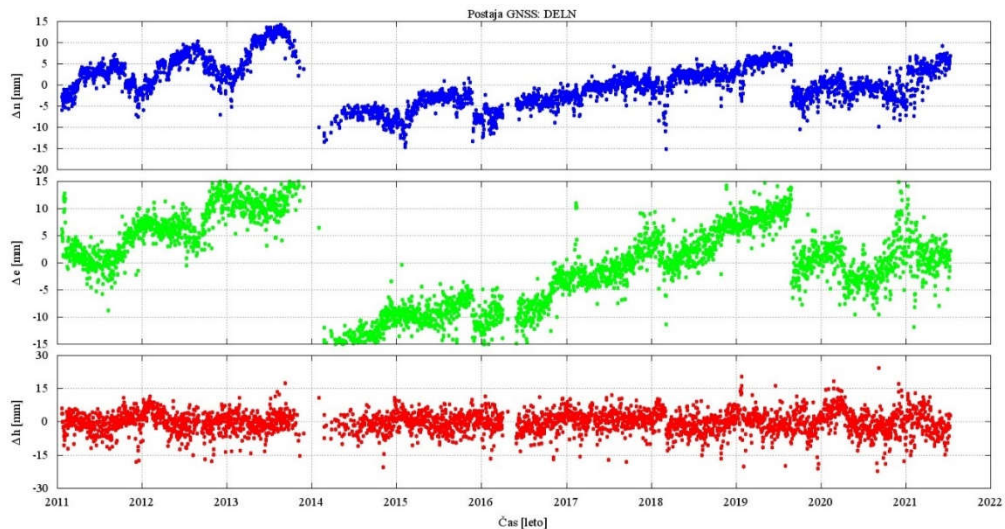
Slika 2: Referenčne postaje GNSS omrežja EPN

Na sliki 2 je prikazanih 18 referenčnih postaj GNSS na 15-ih lokacijah. Postaje, ki so označene s krogcem modre barve, so bile kot referenčne postaje izbrane v predhodnih obdelavah, medtem ko so bile postaje, označene z rdečim krogcem izbrane ob prenovi koncepta obdelave opazovanj GNSS (Sterle, Pavlovčič Prešeren, Ritlop, & Stopar, 2023).

Izbira referenčnih postaj je temeljila na rezultatih obdelave datotek dnevnih opazovanj GNSS analiznih centrov EPN. V letu 2022 so bili objavljeni rezultati obširne analize časovnih vrst koordinat vseh GNSS postaj omrežja EPN (Legrand, 2022b). Rezultat analize so bile izračunane koordinate in pripadajoči vektorji hitrosti vseh postaj EPN v IGB14 za referenčno epoho 2010,0 z oznako GPS tedna 2235 (Legrand, 2022a), datoteka nezveznosti koordinat in hitrosti posameznih postaj (EPN DISC, 2022) in spletno orodje za izbiro referenčnih postaj EPN (EPN REFP, 2022). To orodje smo uporabili tudi za izbiro referenčnih postaj GNSS v omrežju EPN za naše potrebe. Izbrali smo postaje GNSS v okolici Slovenije, ki so se v okviru analize izkazale najbolj stabilne in kakovostne, hkrati pa delujejo vse od vzpostavitve omrežja SIGNAL. Vse imajo status C0 ali C1 (najslabša ocena je C7), kar predstavlja nabor najbolj kakovostnih postaj GNSS omrežja EPN.

Metapodatki postaj GNSS

Koordinate postaj GNSS, ki so ustrezno stabilizirane in locirane tam, kjer so zelo ugodni pogoji izmere GNSS se skozi čas spreminjajo linearno, odstopanja dnevnih rešitev od linearnega trenda pa imajo slučajne lastnosti. Kakršnekoli motnje v časovnih vrstah, ki se kažejo kot nenaden skok v časovni vrsti, sprememba naklona (nelinearnost ali sprememba hitrosti), prisotnost periodičnih signalov in podobno, predstavlja problem v natančnosti in točnosti koordinat v poljubnem trenutku. Primer časovnih vrst koordinat, kjer imamo prisotne številne vplive/motnje, je pokazan na sliki 3.



Slika 3: Časovne vrste koordinat postaje GNSS Delnice (DELN) z očitno nezveznostjo, prisotnim periodičnim signalom in nelinearnostjo spreminjanja koordinat

S slike 3 lahko vidimo, da imamo nenaden premik postaje (z letom 2014), kar povzroči nezveznost časovnih vrst koordinat. Prisoten je periodičen signal s periodo približno enega leta: V pa splošnem velja, da se koordinate postaj spreminjajo linearno s časom, kar pomeni, da predpostavljamo, da so vektorji hitrosti sprememb koordinat postaj GNSS skozi čas enaki. Vse prikazane vplive, prikazane na sliki 3, je torej treba odstraniti iz časovnih vrst. Zato za vsako postajo GNSS nastavimo:

- intervale zveznosti in konstantnosti spreminjanja koordinat postaje GNSS,
- intervale zveznosti in konstantnosti vektorja hitrosti in
- intervale in periode prisotnih periodičnih signalov.

Na ta način bomo za vsako postajo dobili več trojic koordinat v izbrani referenčni epohi (za vsak interval zveznosti in konstantnosti koordinat), lahko pridobimo več trojic komponent vektorjev hitrosti (za vsak interval zveznosti in konstantnosti vektorja hitrosti) in enega ali več periodičnih signalov.

Za GNSS postaje EPN smo intervale zveznosti koordinat in hitrosti privzeli iz (EPN DISC, 2022), hkrati smo privzeli tudi njihove referenčne položaje iz (Legrand, 2022a). Za postaje omrežja SIGNAL, Kombinirane geodetske mreže 0. reda in postaji FGJ pa smo intervale zveznosti koordinat in hitrosti ter periodo sprememb koordinat nastavili z vizualno analizo časovnih vrst.

Vzroki za spremembe v obnašanju časovnih vrst so različni, od fizičnega premika antene postaje GNSS (kot npr. postaje Lendava (LEND), konec leta 2019), do vpliva zamenjave opreme GNSS (predvsem antene GNSS, lahko tudi sprejemnika – pri večini postaj se to upošteva, največji zaznan vpliv je bil pri postaji Celje (CELJ) v letu 2020), do vplivov neposredne okolice točke na stabilnost postaje GNSS (npr. mareografska postaja Koper (KOPE) v letih od 2013 do 2015), do vpliva elektromagnetnega sevanja v okolici postaje (primer take postaje je Ptuj (PTUJ)), do spremembe imena postaje (npr. preimenovanje postaj GNSS Kombinirane geodetske mreže 0. reda zaradi vključitve nekaterih postaj v EPN v našo obdelavo z istim imenom). Za vsako postajo smo tako v obdelavo časovnih vrst koordinat vključili podatke o časovnih intervalih zveznosti/linearnosti sprememb koordinat, zveznosti/konstantnosti vektorjev hitrosti in podatke o prisotnih periodah vplivov na koordinate.

Izračun dnevni koordinat postaj GNSS

Dnevne koordinate postaj GNSS smo izračunavali z dvema programskima paketoma, z Bernese GNSS Software, Version 5.4 (tudi z Version 5.2) (Dach, Lutz, Walser, & Fridez, 2015) in s programskimi rešitvami lastne izdelave, ki temeljijo na metodi PPP (angl. Precise Point Positioning) (Sterle, Stopar, & Pavlovčič Prešeren, 2014; Sterle O. , 2015).

Postopek obdelave opazovanj GNSS sledi priporočilom obdelave analiznih centrov službe EPN (EPN-STRAT, 2023), ki se nekoliko razlikujejo od predhodnih priporočil. Ključne spremembe obdelave so:

- *Podatki*: uporabi se format RINEX 3.xx ali 4.xx, uporablja se tudi dolga imena vseh produktov službe IGS in/ali EPN (npr. precizne efemeride, parametri rotacije Zemlje, model ionosfere itd.).
- *Opazovanja*: Uporabi se dvo-frekvenčna opazovanja GNSS treh satelitskih sistemov, in sicer GPS, GLONASS in Galileo.
- *Modeliranje*: Uporablja se samo še tipske (ne več individualnih) kalibracij anten sprejemnikov. Uporabi se samo tista opazovanja GNSS, za katera so podani kalibracijskih parametri, to pomeni, da se ne sme več uporabiti kalibracijskih parametrov GPS za opazovanja GLONASS ali Galileo. Model troposfere je GPT3 s projekcijsko komponento VMF3. Za modeliranje vpliva plimovanja oceanov na položaje točk se uporabi model FES2014b.
- *Referenčni sestav*: Uporabi se ITRF2020.

Ne glede na vrsto programskega orodja (Bernese GNSS Software ali programske rešitve lastne obdelave), smo za obdelavo dnevni opazovanj nastavili naslednje tri koraki:

1. Obdelava opazovanj GNSS in izračun dnevni koordinat v globalnem referenčnem sistemu, v katerem so podane tudi precizne efemeride satelitov GNSS.
2. Za vsako postajo GNSS določimo časovni interval, na katerega se nanašajo izračunane koordinate in postajo preimenujemo, da ji dodamo oznako intervala. Pri referenčnih postajah s tem zagotovimo prave vrednosti danih koordinat in s tem pravilno vključitev v referenčni koordinatni sistem, v katerem so podane koordinate referenčnih postaj GNSS.
3. Zagotovitev geodetskega datuma, kjer izračunane dnevne koordinate s 3-parametrično transformacijo (predvidevamo le translatorni premik) uskladimo z danimi koordinatami referenčnih postaj – pri tem je pomembno je, da točno vemo, kakšne so dane koordinate, da lahko pravilno upoštevamo časovne intervale izračunanih koordinat za postaje GNSS.

Časovno obdobje izračunanih dnevni rešitev je:

- *Bernese GNSS Software*: od 234. dne leta 2016 do 275. leta 2024, kar predstavlja obdobje dobrih 8 let, v katerem so določene dnevne koordinate postaj GNSS in
- *programske rešitve lastne izdelave*: od 361. dne leta 2009 do 275. dne leta 2024, kar predstavlja obdobje skoraj 15 let.

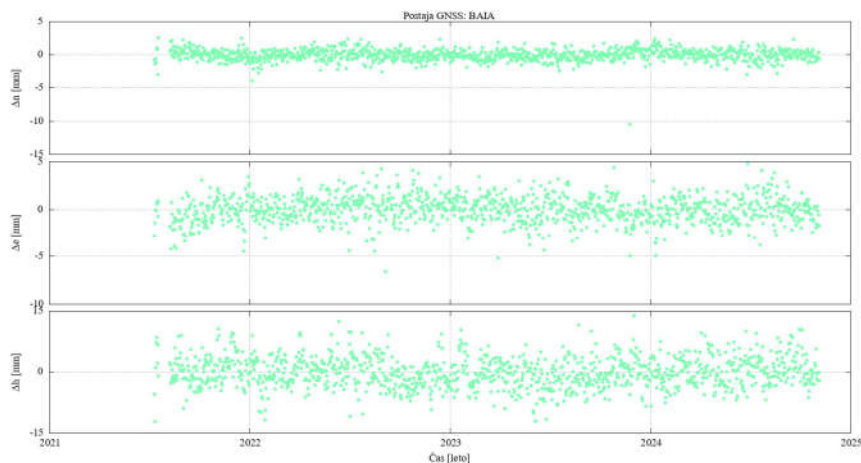
Razlika v dolžini časovnega obdobja, za katerega smo izračunali dnevne koordinate z obema programskima paketoma je posledica zgolj dolgotrajnosti izračuna dnevni koordinat s programskim paketom Bernese GNSS Software. Z metodo PPP traja obdelava opazovanj GNSS enega dne približno 15 minut, s programom Bernese GNSS Software pa se ta podaljša na več kot eno uro. Z metodo PPP smo zato z novimi smernicami obdelali opazovanja GNSS za celotno obdobje (od 2010 do konca 2024), medtem ko smo s programskim paketom Bernese GNSS Software, Version 5.4 obdelali le podatke od začetka 2021, starejši rezultati so pridobljeni z različico 5.2.

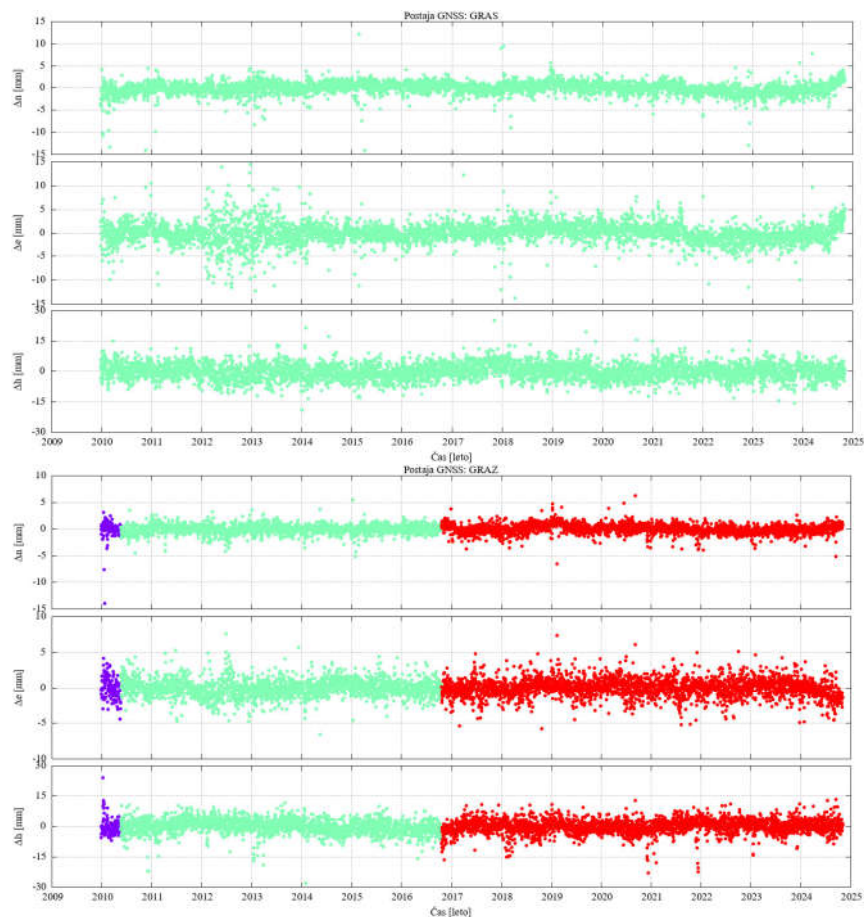
V nadaljevanju zato prikazujemo smo rezultate metode PPP (pridobljene s programsko opremo lastne izdelave). Rezultati obeh rešitev/izračunov so sicer povsem primerljivi, a imamo pri rezultatih, pridobljenih s programskim orodjem Bernese GNSS Software, Version 5.4 rezultate pridobljene za krajše časovno obdobje in dva niza postopka obdelave (do začetka leta 2021 z različico 5.2, naprej pa z različico 5.4). Rezultati, pridobljeni z metodo PPP, so zato bolj koherentni.

Izračun in analiza kakovosti časovnih vrst koordinat

Obdelava dnevni koordinat in pridobitev končnih, prečiščenih, časovnih vrst koordinat je iterativen postopek. Prvi korak predstavlja pregled surovih časovnih vrst dnevni koordinat postaj in določitev intervalov zveznosti koordinat postaj GNSS. V drugem koraku po metodi najmanjših kvadratov izravnamo dnevne koordinate in določimo koordinate v referenčnem koordinatnem sestavu za epoko 2020,0 s pripadajočimi komponentami vektorjev hitrosti, kjer upoštevamo predhodno določene intervale zveznosti koordinat. V tretjem koraku iz odstopanj dnevni koordinat od izravnanih odstranimo periodične signale ter analiziramo končna dobljena odstopanja – prečiščene časovne vrste koordinat postaj GNSS. Če v teh časovnih vrstah zaznamo dodatne vplive/motnje (nezveznosti, spremembe koordinat ali dodatne periodične signale), postopek ponovimo. Rezultat so končne prečiščene časovne vrste, v katerih naj bi bili prisotni samo še slučajni pogreški/vplivi.

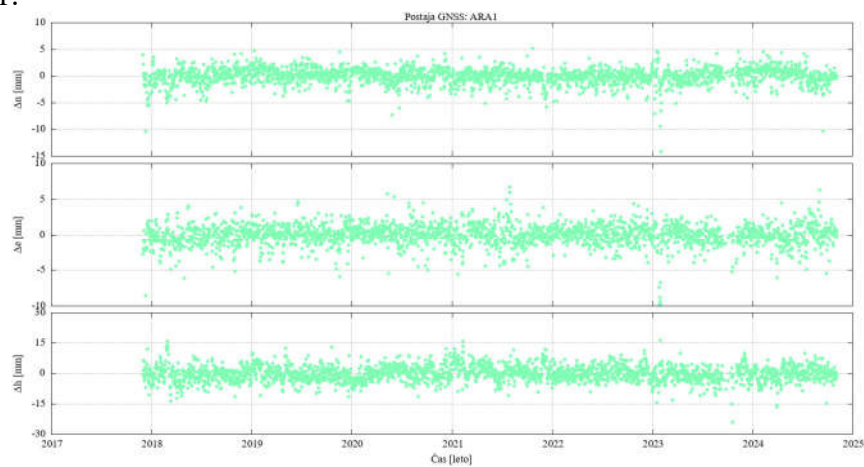
Postaje omrežja EPN so kakovostne, kar se vidi tudi s končnih časovnih vrst. Primeri časovnih vrst treh postaj omrežja GNSS EPN so prikazani na sliki 4. Zgornji sliki (za postaji BAIA in GRAS) časovnih vrst sta prikazani v eni barvi, saj za obe postaji predpostavimo stabilnost postaje skozi celotno obdobje podatkov, medtem ko so časovne vrste postaje GRAZ (zadnji trije grafi) prikazane v treh barvah, saj smo za to postajo predpostavili tri intervale zveznosti koordinat (tri trojice koordinat). S slike 4 se vidi, da časovne vrste vsebujejo v večini samo še slučajne pogreške/vplive, kar kaže na kakovost postaje GNSS. Postaja BAIA ima krajše časovno obdobje, saj je bila z letom 2021 izbrana kot referenčna postaja GNSS.

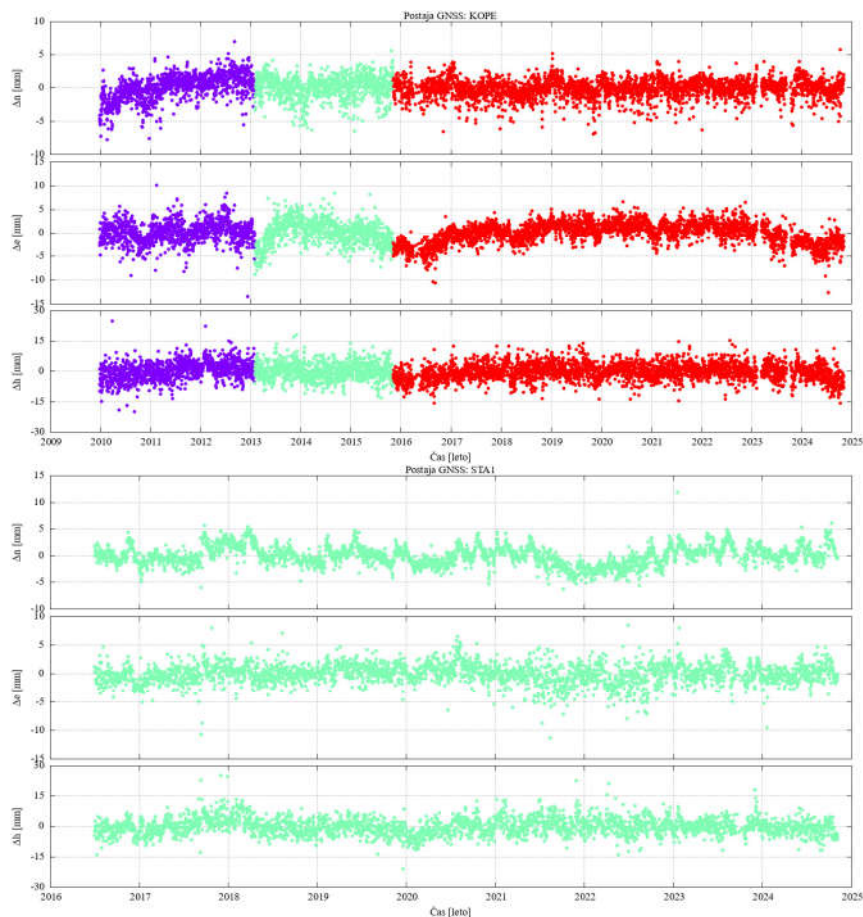




Slika 4: Končne, prečiščene, časovne vrste koordinat treh postaj GNSS EPN: BAIA (Baia Mare, Romunija), GRAS (Caussols, Francija) in GRAZ (Gradec/Graz, Avstrija)

Pri vzpostavitvi postaj GNSS Kombinirane geodetske mreže 0. reda so bile izvedene geološke in geodetske analize izbranega področja, sama izgradnja pa je sledila gradbenim smernicam čvrste in stabilne izgradnje objekta postaje. Le-to se vidi tudi na kakovostnih časovnih vrstah koordinat, kar prikazuje slika 5. Prikazane so časovne vrste postaj ARA1, KOPE in STA1.

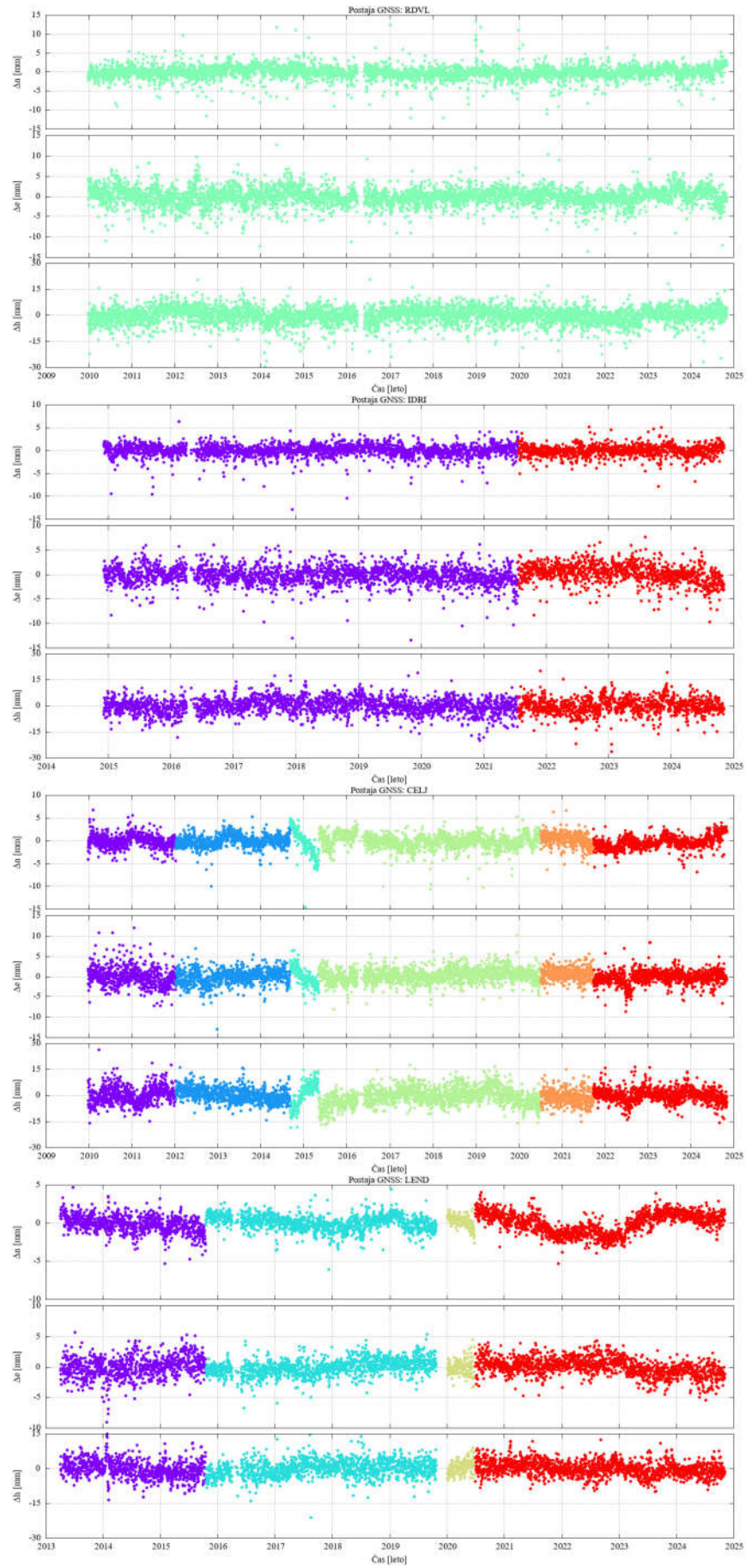




Slika 5: Končne, prečiščene, časovne vrste koordinat treh postaj GNSS Kombinirane geodetske mreže 0. reda: ARA1 (Areh na Pohorju), KOPE (Mareografska postaja Koper) in STA1 (Šentvid pri Stični)

Obe postaji GNSS na Arehu (ARA1 in ARA2) sta primera kakovostne postaje GNSS, kar se vidi tudi s slike 5. Sklepali bi lahko tudi o kakovosti postaje GNSS na mareografski postaji Koper (KOPE), vendar vemo, da so bila v letih od 2013 do 2015 obsežna gradbena dela v okolici postaje, kar je močno vplivalo na (ne)stabilnost koordinat. Koordinate se verjetno še vedno niso povsem ustalile. Vzpostaviti je bilo potrebno tri časovne intervale koordinat, predvidevamo tudi nelinearno spreminjanje koordinat skozi čas. Pri postaji Šentvid pri Stični (STA1) pa lahko vidimo prisotnost nelinearnega signala v komponenti n, za katerega pa še nimamo pojasnila/razlage.

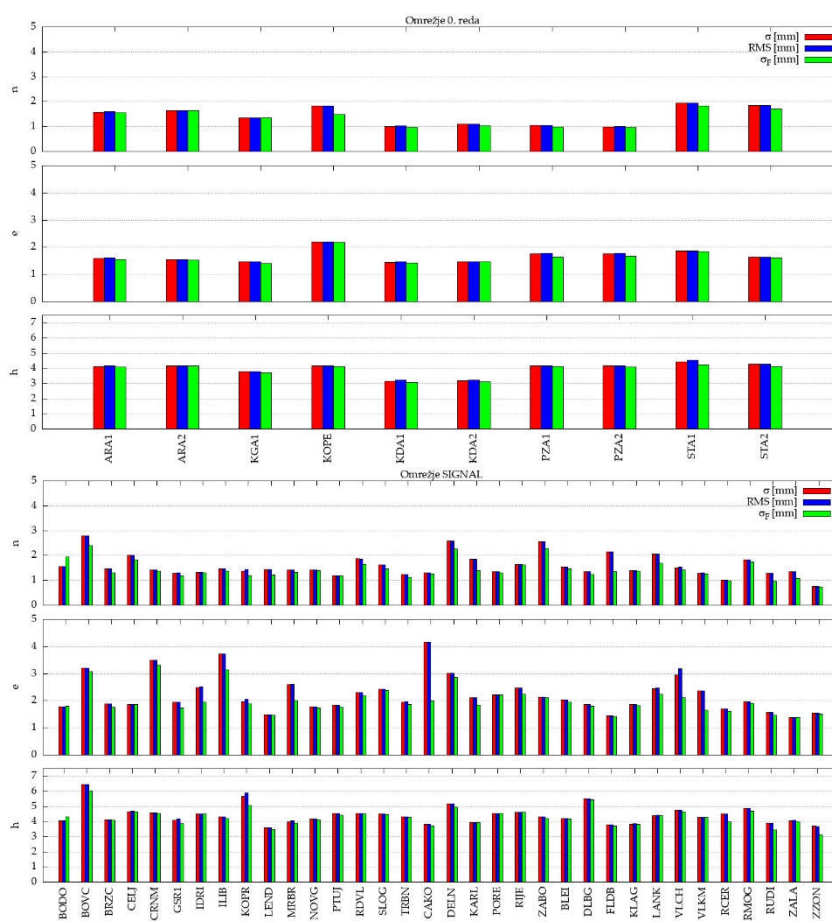
Postaje omrežja SIGNAL so bile vzpostavljene že v letih od 2004 do 2014, izbira lokacij pa je bolj kot ne pogojevala dostopnost elektro in telekomunikacijske infrastrukture. Antene GNSS so locirane na strehah stavb, kar pomeni, da niso povsem primerne za geodinamične raziskave. Primeri časovnih vrst štirih postaj GNSS, to so Radovljica (RDVL), Idrija (IDRI), Celja (CELJ) in Lendava (LEND), so prikazani na sliki 6.



Slika 6: Končne, prečiščene, časovne vrste koordinat štirih postaj GNSS SIGNAL: Radovljica (RDVL), Idrija (IDRI), Celje (CELJ) in Lendava (LEND)

Za prvi dve postaji s slike 6, Radovljica in Idrija, imamo stabilne časovne vrste koordinat, pri Radovljici imamo en niz koordinat za celotno obdobje, medtem ko imamo pri Idriji dva niza koordinat. Pri postaji Celje lahko vidimo, da imamo številne dogodke v časovnih vrstah, ki so posledica predvsem zamenjav opreme GNSS. V kratkem obdobju v letu 2015 lahko jasno vidimo povsem drugačen trend spreminjanja koordinat. Na postaji Lendava se je konec leta 2019 obnovila streha stavbe, na kateri je locirana antena GNSS, ki je bila ob obnovi fizično prestavljena. Časovne vrste koordinat se od takrat še vedno niso povsem umirile.

Časovne vrste koordinat so osnova za izračun kakovostnih koordinat v poljubnem trenutku in za analizo kakovosti delovanja postaj GNSS ter posledično tudi stabilnosti državnega koordinatnega sistema, saj kakovost dobljenega položaja postaje GNSS v poljubnem trenutku zagotavlja dostop do koordinatnega sistema. Kakovost položajev postaj GNSS oz. časovnih vrst postaj GNSS Kombinirane geodetske mreže 0. reda in omrežja SIGNAL so prikazane na sliki 7. Za vsako postajo so prikazane tri cenilke kakovosti, standardni odklon odstopanj dnevnih določitev koordinat (σ) od srednje vrednosti pred odstranitvijo periodičnega signala (rdeči stolpci), nato vrednost RMS pred odstranitvijo periodičnega signala (modri stolpci) iz koordinat in na koncu še standardni odklon (σ_F) po odstranitvi periodičnega signala (zeleni stolpci) iz koordinat.

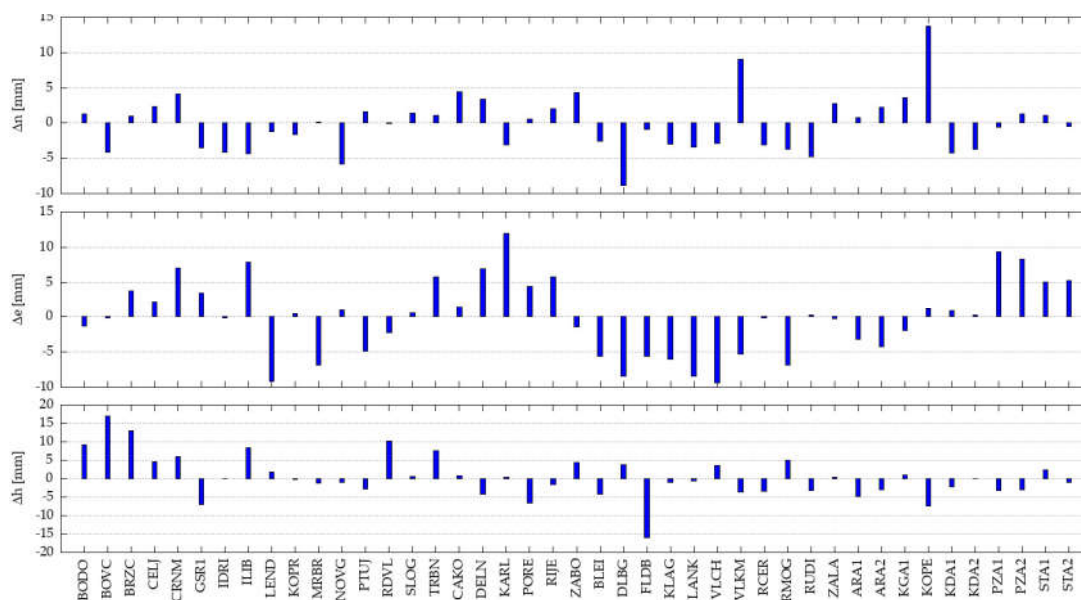


Slika 7: Kakovost časovnih vrst koordinat postaj GNSS Kombinirane geodetske mreže 0. reda in omrežja SIGNAL

S slike 7 se vidi visoka kakovost koordinat postaj Kombinirane geodetske mreže 0. reda, saj so natančnosti in točnosti na nivoju milimetra pri horizontalnih koordinatah in nekaj milimetrov pri višini. Malenkost slabše vrednosti so pri postajah omrežja SIGNAL, a še vedno na milimetrskem nivoju pri horizontalnih koordinatah in nekaj milimetrskem nivoju pri višinah.

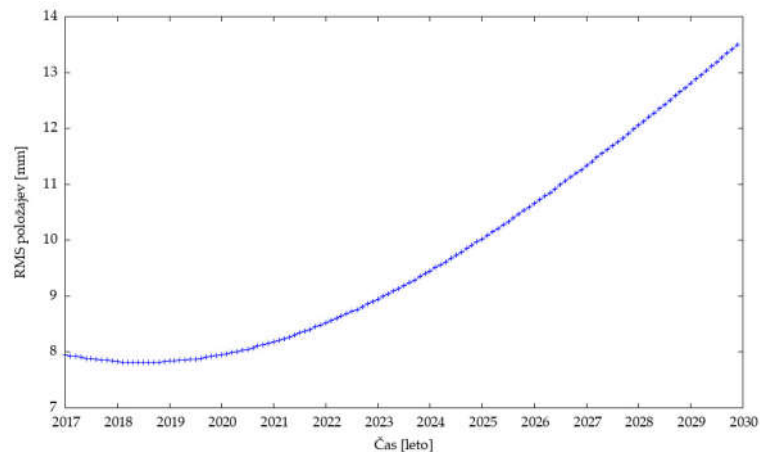
Kakovost državnega koordinatnega sistema Slovenije D96-17

Koordinate postaj omrežja SIGNAL, kot tudi Kombinirane geodetske mreže 0. reda, so bile uradno objavljene v letu 2020, na osnovi EUREF GNSS izmere leta 2016 (Berk, Sterle, Medved, & Stopar, 2020) in rezultatov obdelave leta 2017. Nova realizacija je bila zato poimenovana D96-17. V državnem koordinatnem sistemu predpostavljamo statične koordinate, premikov referenčnih postaj torej ne obravnavamo, a časovne vrste koordinat kažejo na dejstvo, da obstajajo relativni premiki postaj GNSS med seboj. Slika 8 prikazuje odstopanja izračunanih koordinat in danih koordinat postaj GNSS omrežja SIGNAL in Kombinirane geodetske mreže 0. reda za leto 2024.



Slika 8: Razlika med izračunanimi in danimi koordinatami postaj GNSS območja Slovenije v letu 2024

Slika 8 prikazuje kakovost uradnih koordinat postaj GNSS. RMS razlik/relativnih koordinat, prikazanih na sliki 8 so 4,1 mm, 5,5 mm in 6,0 mm za komponente n , e in h , kar pomeni, da so trenutno uradne koordinate postaj omrežja SIGNAL in Kombinirane geodetske mreže 0. reda še na nivoju pod-centimetske točnosti. Vendar pa, če predpostavimo, da dosežejo relativni premiki med postajami tudi do okoli 2 mm/leto, to pomeni, da lahko v petih letih dosežemo centimetske razlike med dejanskimi in danimi/uradnimi koordinatami. Vpliv geodinamičnega dogajanja na območju Slovenije na kakovost in stabilnost državnega koordinatnega sistema prikazuje slika 9.



Slika 9: Vrednosti RMS razlik med dejanskimi in uradnimi položaji postaj GNSS omrežja SIGNAL in Kombinirane geodetske mreže 0. reda v odvisnosti od časa

Slika 9 prikazuje, kako se bodo skozi čas razlikovale dejanske koordinate postaj omrežja SIGNAL in Kombinirane geodetske mreže 0. reda, če predpostavimo statične/nespremenljive koordinate postaj. Na sliki je prikazan samo vpliv geodinamike, zanemarjeni so vsi pravi in navidezni nenadni premiki postaj, počasni, spreminjajoči in zvezni premiki (različni vplivi, predvsem okolica postaj, stabilnost delovanja opreme in podobno). Če upoštevamo še te, dobimo še nekoliko slabšo sliko.

Zaključek

Izračun dnevnih koordinat postaj GNSS za celotno obdobje delovanja postaj in pridobitev časovnih vrst koordinat predstavlja osnovni pogoj za vzdrževanje natančnosti in točnosti državnega koordinatnega sistema. Kot prvo, lahko na ta način v vsakem trenutku dobimo kakovostne, koordinate vsake postaje GNSS, ki odražajo pravo geometrijo omrežja v danem trenutku. Kot drugo pa lahko zaznamo in posledično odpravimo vse dejavnike, ki povzročijo spremembe položajev/koordinat postaj. Te dejavnike se lahko zazna le v časovnih vrstah.

Območje Slovenije je tektonsko dokaj aktivno in povzroči relativne premike točk na območju do velikosti okoli 2 mm/leto. Že samo to dejstvo pomeni, da se koordinate postaj GNSS na letnem nivoju premaknejo na milimetrskem nivoju, kar v desetih letih povzroči premik centimetrskega nivoja. Ob predpostavki stabilnosti (statičnosti) koordinat referenčnih postaj, bo v prihodnosti potrebno dokaj pogosto popravljati uradne koordinate, da bo zagotovljena ustrezna kakovost državnega koordinatnega sistema. Groba ocena je, da bo to potrebno na vsakih pet do deset let.

Prečiščene končne časovne vrste koordinat omogočajo določitev tudi kakovostnih vektorjev hitrosti sprememb koordinat postaj GNSS. Predstavljeno delo predstavlja dobro osnovo za izračun teh vektorjev hitrosti in vzpostavitev geokinematskega modela površja Slovenije. S tem bomo lahko v prihodnosti zasnovali tudi novo definicijo državnega koordinatnega sistema Slovenije, ki bo vključevala tudi časovno komponento.

Zahvala

Raziskava je nastala v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2-2489 SLOKIN–Geokinematski model ozemlja Slovenije, operacije RI-SI-EPOS, IC EPOS-SI in dveh

raziskovalnih programov, to sta Dinamična Zemlja P1-0419 in Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije P2-0227, ki jih financira ARIS.

Raziskava je nastala tudi v okviru projekta »Analiza delovanja GNSS omrežij«, ki ga je financirala Geodetska uprava RS.

Literatura in viri

- Berk, S., Komadina, Ž., Marjanović, M., Radovan, D., & Stopar, B. (2003a). Kombinirani izračun EUREF GPS-kampanj na območju Slovenije. *Geodetski vestnik*, 47 (4), 414-422. Pridobljeno iz http://www.geodetski-vestnik.com/47/4/gv47-4_414-422.pdf
- Berk, S., Komadina, Ž., Marjanović, M., Radovan, D., & Stopar, B. (2003b). The Recomputation of the EUREF GPS Campaigns in Slovenia. *Report on the Symposium of the IAG Reference Frame Subcommission for Europe (EUREF)* (str. zv. 33, str. 132–149). Španija, Toledo, 4.–7. junij: Frankfurt na Majni: Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie. Pridobljeno iz <http://www.euref.eu/symposia/book2003/4-02-Berk.pdf>
- Berk, S., Kozmus, K., Radovan, D., & Stopar, B. (2006). Planning and Realization of the Slovenian Permanent GPS Network. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 11-12, 383–388. Pridobljeno iz <http://gispoint.de/artikelarchiv/avn/2006/avn-ausgabe-11-122006/2158-planning-and-realization-of-the-slovenian-permanent-gps-network.html>
- Berk, S., Sterle, O., Medved, K., & Stopar, B. (2020). ETRS89/D96-17 – Rezultat GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016. *Geodetsk vestnik*, 64 (1), 43-67. doi:10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.43-67
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). *Bernese GNSS Software Version 5.2*. Bern, Švica: Astronomski inštitut Univerze v Bernu. Pridobljeno 10. 11. 2022 iz <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf>
- EPN DISC. (1. 12. 2022). *Spletna stran*. Pridobljeno iz https://epncb.oma.be/ftp/product/referenceframe/latest/EPN_discontinuities.snx
- EPN REFP. (10. 11. 2022). *Spletna stran*. Pridobljeno iz https://www.epncb.oma.be/_productsservices/ReferenceFrame/
- EPN-STRAT. (31. 07. 2023). *Spletna stran*. Pridobljeno 21. 3. 2024 iz http://www.epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf
- Legrand, J. (2022a). EPN Multi-year Position and Velocity solution C2235. Royal Observatory of Belgium (ROB).
- Legrand, J. (2022b). EPN Multi-year Position and Velocity Solutions. Royal Observatory of Belgium (ROB). doi:10.24414/ROB-EUREF-CWWW
- Medved, K. (2016). GNSS-Kampanja »EUREF Slovenija 2016«. *Geodetski vestnik*, 60 (4), 752–758.
- Oven, K., Ritlop, K., Triglav Čekada, M., Pavlovčič Prešeren, P., Sterle, O., & Stopar, B. (2019). Vzpostavitev Kombinirane geodetske mreže v Sloveniji in analiza njenega delovanja v obdobju 2016-2018. *Geodetski vestnik*, 63 (4), 491-513. doi:10.15292/geodetski-vestnik.2019.04.491-513
- 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. (2007). *Izračun Mini EUREF GPS-kampanje 2007*. Tehnično poročilo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Slovenija, Ljubljana.
- Sterle, O., & Stopar, B. (2017). *Analitični center mreže 0. reda in njen vpliv na geodetski referenčni sistem*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Ritlop, K., & Stopar, B. (2023). *Analitični del delovanja GNSS omrežij : Končno poročilo*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.
- Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B., & Ritlop, K. (2024). *Analiza delovanja GNSS omrežij : končno poročilo*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

- Sterle, O., Stopar, B., & Pavlovčič Prešeren, P. (2014). Metoda PPP pri statični izmeri GNSS. *Geodetski vestnik*, 58 (3), 466–481. doi:<https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.03.466-481>.
- Sterle, O., Stopar, B., & Pavlovčič Prešeren, P. (2021). *Analitični del delovanja GNSS omrežij. Končno tehnično poročilo, november 2021*. Ljubljana, Slovenija: UL FGG.
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčič Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., & Stopar, B. (2010). GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 214-222. doi:10.1016/j.tecto.2009.09.001