

Spremljanje ionosferskih motenj nad Slovenijo s pomočjo omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL

Sandi Berk*, Katja Bajec* in Dalibor Radovan*

Povzetek

V prispevku je predstavljeno spremljanje ionosferskih motenj nad ozemljem Slovenije, ki so predvsem posledica povečane Sončeve aktivnosti ob približevanju vrhu 24. Sončevega cikla. Uporabljeni so podatki omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL. Obravnavani so vplivi ionosferskih motenj na določanje položaja z GNSS in načini spremljanja le-teh s pomočjo samih GNSS in spremljajoče infrastrukture. Kot kazalnik ionosferskih motenj je uporabljen ionosferski indeks I95, ki temelji na modeliranju popravkov položaja, določenega z GNSS. Namen analize je bil oceniti stopnjo ogroženosti lokacijskih storitev na območju Slovenije v obdobjih povečane Sončeve aktivnosti

Ključne besede: GNSS, indeks I95, ionosfera, lokacijska storitev, Sončeve pege
Key words: GNSS, I95 index, ionosphere, location-based service, sunspots

Uvod

Približuje se vrh 24. Sončevega cikla – cikla, ki se ponovi vsakih enajst let. Za študije vplivov povečane Sončeve aktivnosti na lokacijske storitve, ki temeljijo na satelitski tehnologiji, je to idealno obdobje. Povečana Sončeva aktivnost se med drugim kaže v povečanju števila in velikosti Sončevih peg. Spremljajoče dogodke lahko razdelimo v Sončeve blišče (angl. solar flare), Sončeve radijske izbruhe (angl. solar radio burst), koronarne masne izbruhe (angl. coronal mass ejection), protonske nevihte (angl. proton storm) in Sončev veter (angl. solar wind). Učinki teh dogodkov na Zemljo so različni – verjetnost, da se nek pojav širi ravno v njeni smeri je namreč relativno majhna (Štern in Bešter, 2012). Ena izmed posledic povečane Sončeve aktivnosti na Zemlji je pojav magnetnih neviht (Čop in sod., 2008).

Globalni navigacijski satelitski sistemi (v nadaljevanju: GNSS) – osnova za množico lokacijskih storitev – temeljijo na radijskih signalih, ki jih sateliti pošiljajo sprejemnikom na Zemlji. Vplivi povečane Sončeve aktivnosti na kakovost lokacijskih storitev se odražajo predvsem kot (Skone, 2001):

- motnje v ionosferi, ki so posledica magnetnih neviht in ki vplivajo na širjenje GNSS-signalov (tj. na njihovo hitrost in pot), ter
- motnje zaradi radijskih izbruhov in njihovih vplivov na kakovost GNSS-signalov v obliki razmerja signal/šum (angl. signal-to-noise ratio – SNR).

Motnje v ionosferi otežujejo njeno kakovostno modeliranje, kar se odraža predvsem v slabši natančnosti in zanesljivosti določanja položaja, povečani šum pa povzroča slabši sprejem signalov in prav tako tako zmanjšuje zanesljivost lokacijskih storitev ali celo onemogoča njihovo delovanje. Medtem ko so motnje zaradi radijskih izbruhov časovno usklajene z dogodki na Soncu (z zamikom 8,3 minute), nastopijo motnje v ionosferi z zamiki, ki so odvisni od tipa dogodka na Soncu: od 15 minut do 6 ur za protonske nevihte,

* Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

pa tudi 3 do 4 dni za koronarne masne izbruhe in Sončev veter (Štern in Bešter, 2012). Dogodki različnih tipov so večkrat tudi sočasni, njihovi vplivi na Zemlji pa torej zaznani z različnimi zakasnitvami.

RTK-storitve temeljijo na tehnologiji, ki odpravi večji del napak zaradi motenj v ionosferi, in sicer z njenim kakovostnim modeliranjem nad območjem, na katerem se nahaja uporabnik storitev. Vendar pa lahko ionosferske motnje povzročijo težave pri navezavi na posamezno referenčno postajo, kot tudi pri omrežnih storitvah (Wanninger, 2004). Še večja težava pa so ionosferske motnje – posebej nenadne – za enofrekvenčne kodne GNSS-sprejemnike, kjer modeliranje ionosfere temelji na parametrih iz navigacijskega sporočila (npr. za Klobucharjev model). Ocenjeno je, da lahko s takim modelom odpravimo zgolj med 50 % in 60 % vplivov (Sterle in sod., 2012).

V prispevku je predstavljena analiza ionosferskih motenj za območje Slovenije, ki temelji na podatkih državnega omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL, in sicer za preteklo poldrugo leto. Namen analize je bil oceniti stopnjo ogroženosti na GNSS temelječih lokacijskih storitev na območju Slovenije v obdobjih povečane Sončeve aktivnosti. Cilj raziskovalnega projekta, v okviru katerega je bila analiza izvedena, je zasnova opozorilnega sistema za uporabnike lokacijskih storitev (Štern in Bešter, 2012).

Spremljanje vplivov Sončevih aktivnosti na/z GNSS

Ionosfera je danes največji vir napak pri določitvi položaja z GNSS. Vpliv ionosfere na GNSS-signal je sorazmeren s številom prostih elektronov vzdolž poti širjenja signala (angl. total electron content – **TEC**). Običajno se upošteva stolpec s prerezom površine 1 m^2 ; v rabi je enota TECU – 1 TECU pomeni 10^{16} elektronov na m^2 . Vpliv ionosfere na GNSS-signal se kaže v njegovi zakasnitvi, in sicer zaradi sprememb njegove hitrosti in poti. Po drugi strani se sami GNSS uvrščajo med najbolj pomembne sisteme zaznavanja in spremljanja posledic dogodkov na Soncu – t. i. vesoljskega vremena. Karte VTEC (angl. vertical TEC), torej vrednosti TEC za navpične stolpce nad točkami na Zemlji, so klasični proizvodi, ki jih nudi GNSS-tehnologija za globalno modeliranje ionosfere (Coster in Komjathy, 2008).

Lokalno spremljanje ionosferskih motenj (angl. ionospheric disturbance) omogočajo lokalni GBAS – omrežja stalnih GNSS-postaj na Zemlji, ki v realnem času zagotavljajo popravke dobljenega položaja. Najbolj uporabljan kazalnik ionosferskih motenj je danes **ionosferski indeks I95**, ki temelji na modeliranju popravkov položaja, določenega z GNSS. Uveden je bil leta 1998 in se je uveljavil posebej v aktivnih GNSS-omrežjih v Srednji Evropi (Wanninger, 2004). Z njim torej ne merimo samih fizikalnih parametrov ionosfere, ampak gre za indeks povprečne ionosferske aktivnosti na določenem zemljepisnem območju, določen za krajše časovne intervale. Osnova za določitev indeksa I95 so koeficienti modela, ki predstavljajo geometrijske popravke zaradi vpliva ionosfere, – po dva za vsak GNSS-signal za vsak satelit, in sicer v smereh jug-sever (ΔI_{LAT}) in zahod-vzhod (ΔI_{LON}). Ti koeficienti se določajo s kratkim časovnim intervalom, tako da jih dobimo po nekaj sto na vsako uro. Ionosferski indeks temelji na teh koeficientih, pri čemer so informacije vsakega posameznega para združene v skalarno mero:

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{LAT}^2 + \Delta I_{LON}^2}$$

Ionosferski indeks I95 je določen kot vrednost, ki je 95-odstotkov ocenjenih ΔI ne presega (angl. 95 % margin) – seveda znotraj izbranega (običajno urnega) časovnega intervala

(Wanninger, 2004). Ionosferski indeks I95 sicer ni odvisen zgolj od razmer v ionosferi. Nanj vplivajo npr. tudi:

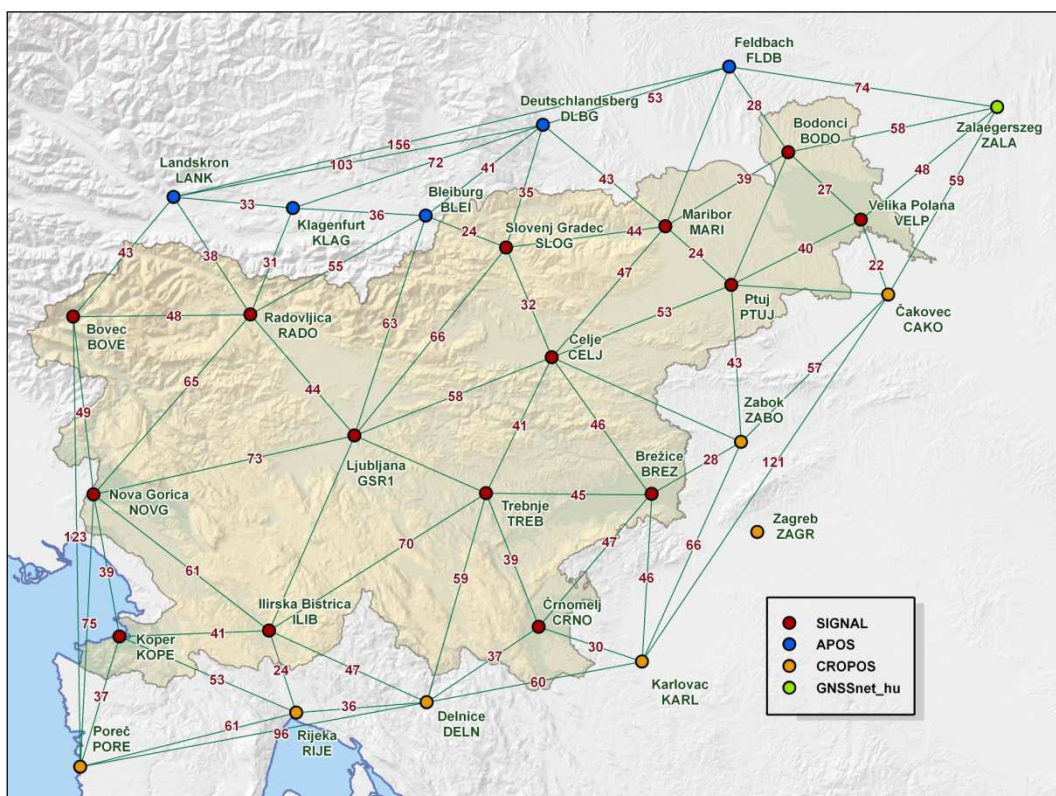
- razdalje med referenčnimi GNSS-postajami v omrežju in
- omejitev najmanjšega višinskega kota spremljanja satelitov (angl. elevation mask).

Za običajno konfiguracijo omrežja z medsebojnimi razdaljami referenčnih GNSS-postaj med 50 in 80 km in za najmanjši višinski kot spremljanja satelitov, omejen na 10 ločnih stopinj, so tipične vrednosti ionosferskega indeksa (v [ppm] za L1) na območju Srednje Evrope (Wanninger, 2004):

- 2 ali manj v času nizkih vrednosti VTEC in za normalne razmere,
- 5 ali manj v času povečanih vrednosti VTEC, vendar brez večjih ionosferskih motenj,
- 10 in več v času intenzivnejših ionosferskih motenj.

Spremljanje ionosferskega indeksa I95 za območje Slovenije

Za spremljanje ionosferskih motenj nad ozemljem Slovenije, ki so predvsem posledica povečane Sončeve aktivnosti ob približevanju vrhu 24. Sončevega cikla, je bila uporabljena infrastruktura državnega omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL (GURS, 2012).



Slika 1: Omrežje stalnih GNSS-postaj SIGNAL.

Omrežje SIGNAL je postavila Geodetska uprava Republike Slovenije kot del temeljne državne geoinformacijske infrastrukture. Prva postaja omrežja (v Ljubljani) deluje od leta 2000, v sedanjem obsegu (15 postaj) pa deluje omrežje od leta 2006. Dodatnih 12 postaj je

v omrežje vključenih z dogovori o sodelovanju s sosednjimi državami (slika 1). Z omrežjem upravlja Služba za GPS, ki deluje na Geodetskem inštitutu Slovenije. V zadnjem času je med lokacijskimi storitvami v realnem času, ki so na voljo le registriranim uporabnikom, največ povpraševanja po omrežnih RTK-storitvah, sledijo RTK-storitve z navezavo na posamezno referenčno postajo ter DGPS-storitve (Berk in sod., 2011).

Od sredine leta 2011 deluje omrežje s podporo programske opreme Trimble VRS³Net, ki med drugim omogoča tudi spremljanje ionosferske aktivnosti nad ozemljem Slovenije. Prvotno je bil indeks I95 mera za napovedovanje ionosferskih vplivov na določanje položaja z navezavo na uporabniku najbližjo postajo omrežja (angl. single-baseline RTK). Kasneje je bila ista mera uvedena tudi za omrežne lokacijske storitve (kot so VRS, FKP, Mac), in sicer z uporabo:

- IRIM (ionospheric residual integrity monitoring) ter
- IRIU (ionospheric residual interpolation uncertainty).

Prvi pristop temelji na neupoštevanju posamezne referenčne postaje pri modeliranju ionosfere in primerjavi rezultatov interpolacije za njeno lokacijo z dejanskimi merjenji. Drugi pristop temelji na določitvi negotovosti v omrežju modeliranih parametrov ionosfere – torej standardnih odklonov interpoliranih vrednosti. Oba pristopa sta bila uvedena tudi v programske rešitve Trimble Terrasat (Chen in sod., 2003). Glede na to, da sta v omrežju stalnih GNSS-postaj pri modeliranju popravkov ključna dva vpliva:

- vpliv geometrijske razporeditve satelitov in
- vpliv ionosfere,

sta v primeru programske opreme Trimble VRS³Net uporabljeni rešitvi (Trimble, 2010):

- GRIM (geometric residual integrity monitoring) in že omenjeni
- IRIM (ionospheric residual integrity monitoring).

Ločeno ocenjena deleža obeh ključnih vplivov omogočata določitev vrednosti indeksa I95 ob eliminaciji vpliva geometrijske razporeditve satelitov. Referenčne vrednosti indeksa I95, ki so označene na grafičnih prikazih programskega modula, so:

- 2 ... nizka vrednost (zelena barva),
- 4 ... srednja vrednost (rumena barva) in
- 8 ... visoka vrednost (rdeča barva).

V nadaljevanju je predstavljena analiza arhiviranih urnih vrednosti ionosferskega indeksa I95 za Slovenijo, in sicer za obdobje od julija 2011 do decembra 2012.

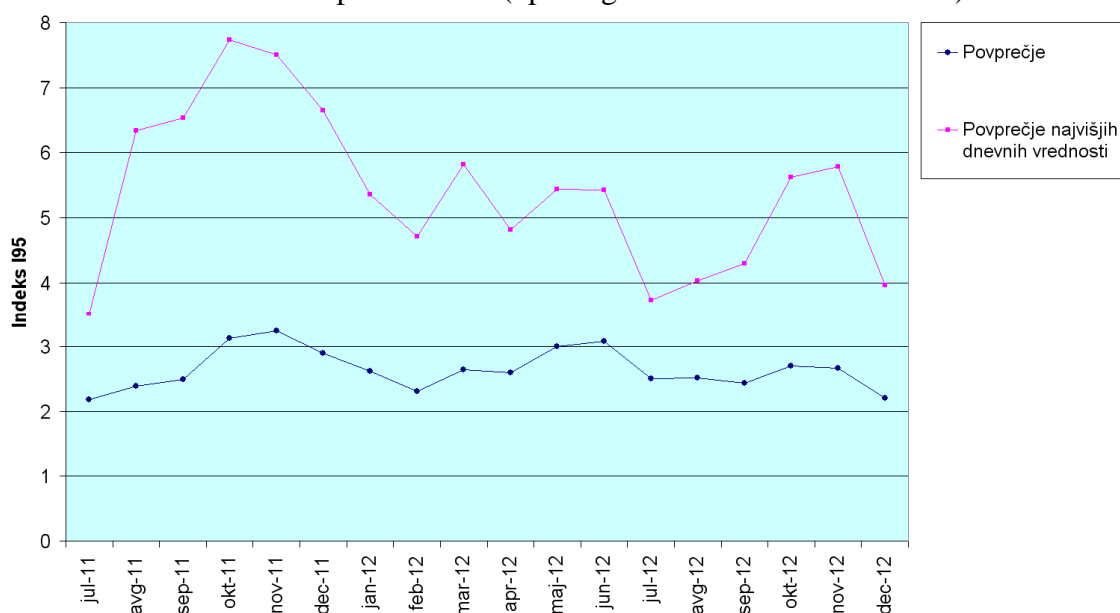
Rezultati analize ionosferskega indeksa I95 (julij 2011 – december 2012)

Absolutni urni maksimum – vrednost 21,8 – doseže indeks I95 v analiziranem obdobju na 16. november 2011. Vrednost 20 sicer preseže le trikrat; poleg že omenjenega datuma še na 18. avgust 2011 in 7. oktober 2011.

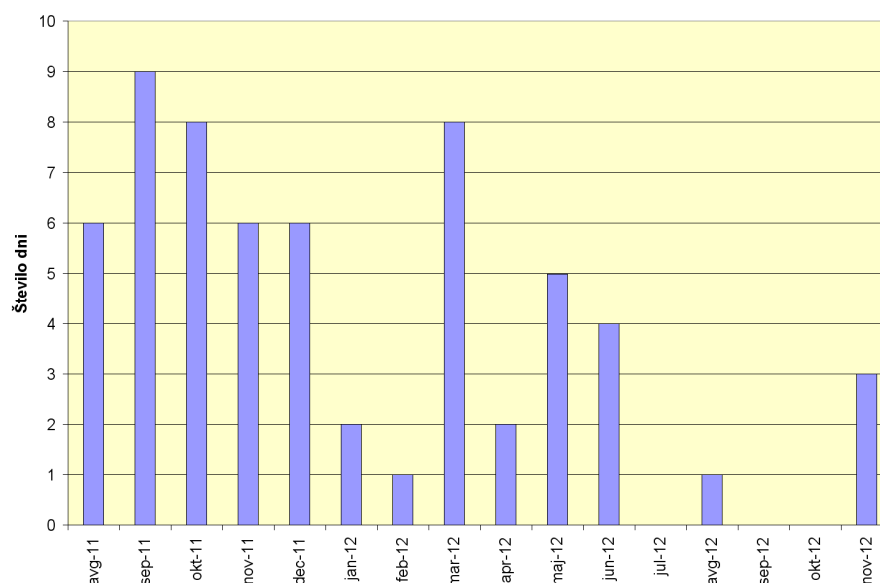
Iz prikaza najvišjih zabeleženih urnih vrednosti indeksa I95 po dnevih (slika 2) je videti, da so vplivi povečane Sončeve aktivnosti najbolj zaznavni med avgustom 2011 in decembrom 2011. Samo v tem obdobju so mesečna povprečja najvišjih zabeleženih dnevnih vrednosti indeksa I95 višja od 6 (slika 3). Podobno sledi iz ugotavljanja števila dni v mesecu, ko je bila najvišja zabeležena urna vrednost indeksa I95 višja od 8 (tj. visoka vrednost); v obdobju od avgusta 2011 do decembra 2011 je takšnih dni vsakič po več kot

pet na mesec, med ostalimi meseci analiziranega obdobja pa to velja le še za marec 2012 (slika 4).

Zanimivo je, da analiza mesečnih povprečij indeksa I95 (ne zgolj največjih dnevnih vrednosti, ampak vseh 24-ih urnih vrednosti na dan) ne pove praktično ničesar (slika 3). Praviloma so namreč izrazito povečane vrednosti kratkotrajne – običajno uro do dve na dan. Iz prikaza dnevnih nihanj (urnih) vrednosti indeksa I95 po mesecih (slika 5) lahko vidimo, da se (če sploh) pojavljajo povišane vrednosti indeksa I95 zgolj podnevi – najvišje nekje sredi dneva. Ugotovljeni splošni trend povečanja vrednosti indeksa I95 v zimskih mesecih, z najvišjimi vrednostmi okoli 12. ure po lokalnem času (slika 5), se ujema z že objavljenimi rezultati raziskav za območje Srednje Evrope (Wanninger, 2004). Vendar pa splošni trend povečanja vrednosti indeksa ne sovпада s povečanjem števila posameznih res ekstremnih urnih vrednosti preko dneva (npr. avgust 2011 – december 2011).

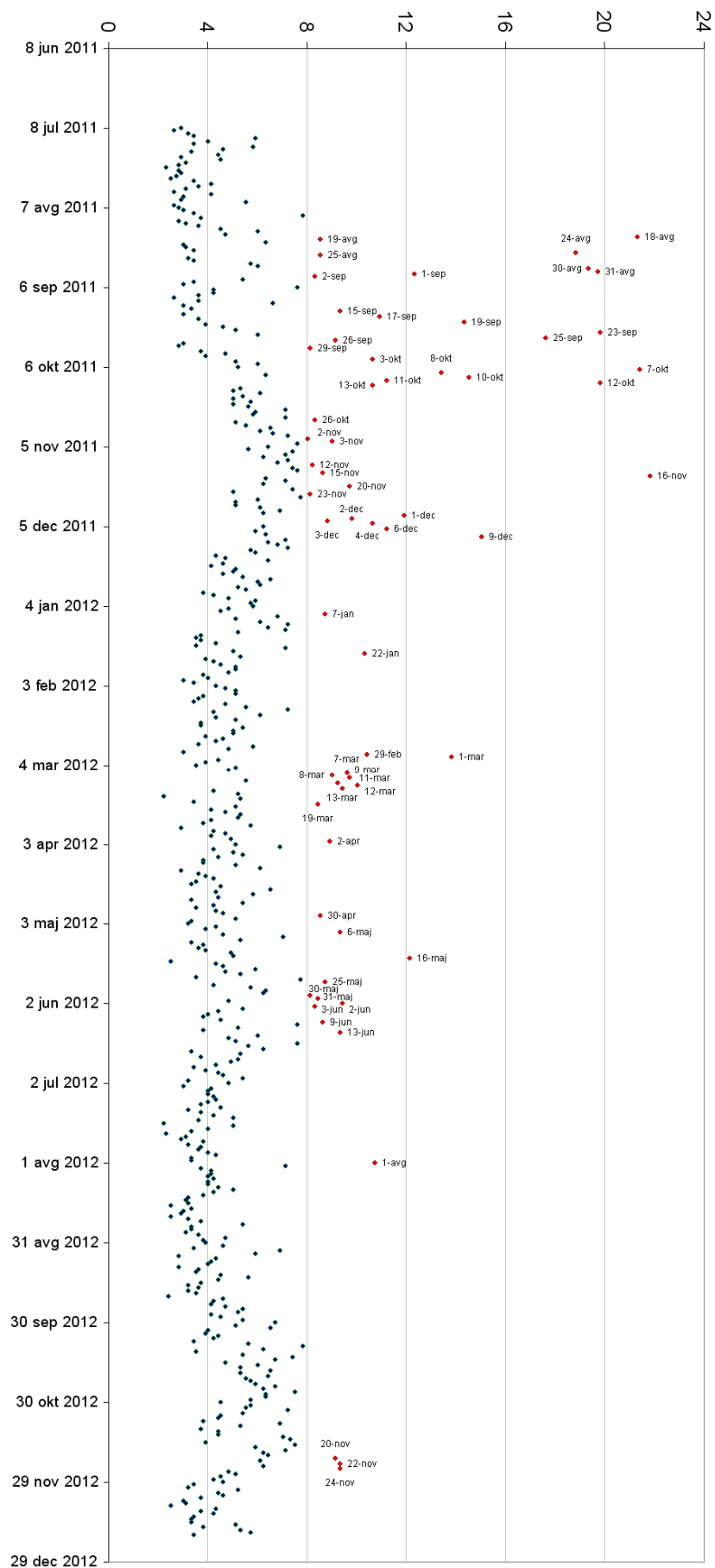


Slika 3: Mesečna povprečja vrednosti indeksa I95 in mesečna povprečja najvišjih zabeleženih dnevnih vrednosti indeksa I95.

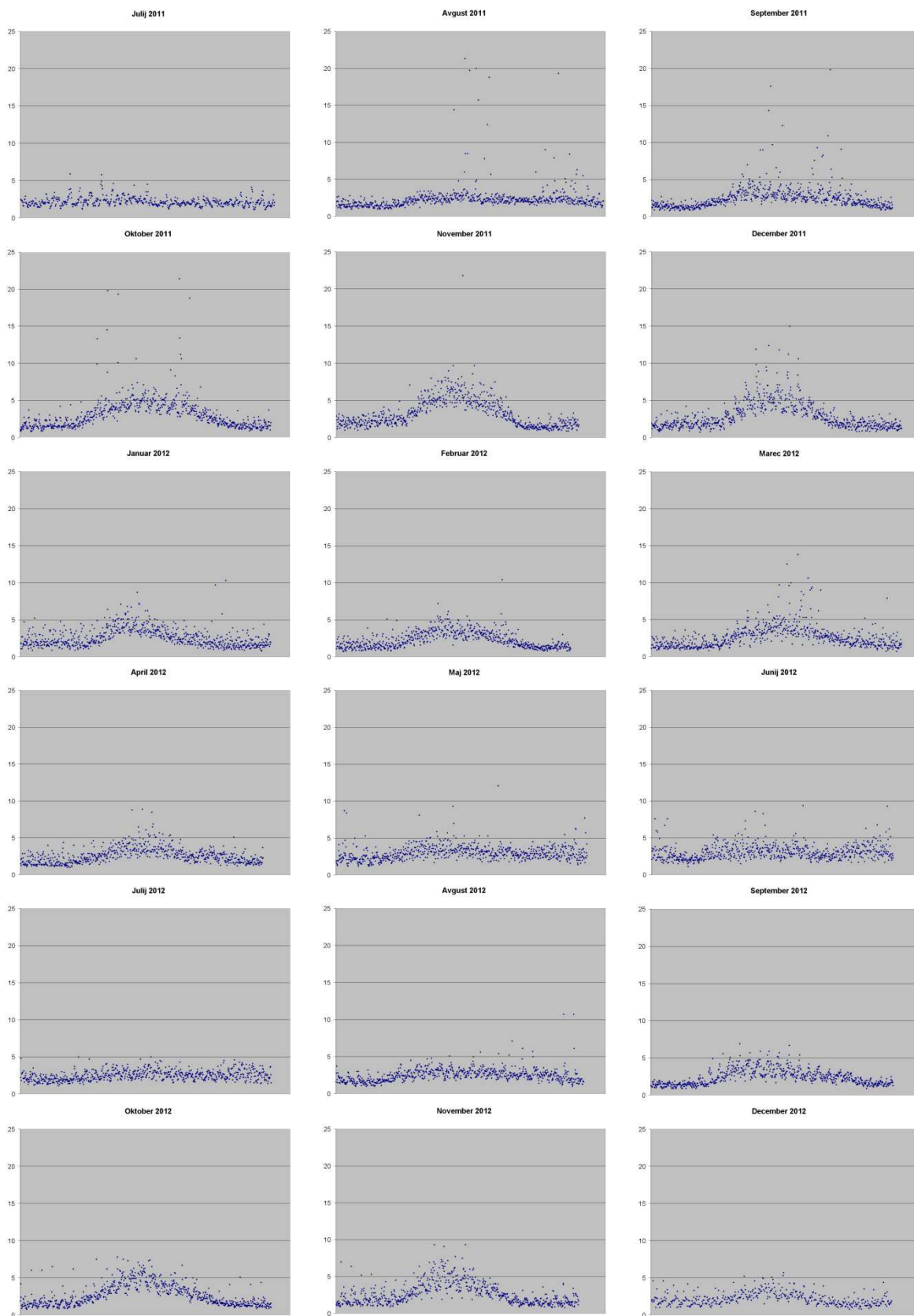


Slika 4: Števila dni v mesecu, ko je bila najvišja zabeležena urna vrednost indeksa I95 višja od 8.

Indeks I95



Slika 2: Najvišje zabeležene urne vrednosti indeksa I95 za Slovenijo po dnevih.



Slika 5: Dnevna nihanja urnih vrednosti indeksa I95, prikazana po mesecih.

V obravnavanih 16-ih mesecih (tj. 488 dneh), za katere so podatki o indeksu I95 popolni (slika 4), je bila za 61 dni najvišja zabeležena urna vrednost indeksa višja od 8. Težave pri lokacijskih storitvah zaradi visoke vrednosti indeksa I95 bi torej lahko (vsaj glede na merila proizvajalca programske opreme) v krajših časovnih intervalih nastopile v 12,5 % dni oziroma v povprečju vsak osmi dan. V najbolj aktivnem mesecu (tj. september 2011) je bilo takšnih dni 9, kar je 30 % vseh dni v mesecu.

Zaključek

Predstavljena je analiza ionosferskih motenj nad ozemljem Slovenije, ki so predvsem posledica povečane Sončeve aktivnosti ob približevanju vrhu 24. Sončevega cikla. Analizirani so podatki državnega omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL, in sicer za drugo polovico leta 2011 in skoraj celotno leto 2012. Kot kazalnik ionosferskih motenj je uporabljen ionosferski indeks I95, ki temelji na modeliranju popravkov položaja, določenega z GNSS. Namen analize je bil oceniti stopnjo ogroženosti lokacijskih storitev na območju Slovenije v obdobjih povečane Sončeve aktivnosti.

V obravnavanem obdobju so visoke vrednosti indeksa I95 (vrednosti nad 8) v krajših časovnih intervalih zabeležene v 12,5 % vseh dni oziroma v povprečju vsak osmi dan. Najbolj aktiven mesec je bil september 2011, ko je bilo takšnih dni kar 30 %. Največ dni z zabeleženimi visokimi urnimi vrednostmi indeksa I95 je bilo v obdobju od avgusta 2011 do decembra 2011.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru temeljnega raziskovalnega projekta Določitev in ocena vplivov izrednih Sončevih aktivnosti na satelitsko določanje lokacije (J2-3625), katerega naročnik je Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

- Berk, S., Bajec, K., Kozmus Trajkovski, K., Stopar, B. (2011). Status of the SIGNAL Positioning Service and Transformation between the Local and ETRS89 Coordinates in Slovenia. 2. CROPOS konferencija. Zagreb, Hrvaška, 8. april 2011. Zbornik radova, str. 73–82. Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Chen, X., Landau, H., Vollath, U. (2003). New Tools for Network RTK Integrity Monitoring. 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland, Oregon, 9.–12. september 2003. Proceedings of ION GPS/GNSS 2003, str. 1355–1360. The Institute of Navigation, Manassas, Virginija.
- Coster, A., Komjathy, A. (2008). Space Weather and the Global Positioning System. Space Weather, 6, S06D04. DOI: 10.1029/2008SW000400.
- Čop, R., Bilc, A., Beguš, S., Fefer, D., Radovan, D. (2008). Magnetne nevihte in njihov vpliv na navigacijo. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2007. 13. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana, 17. januar 2008. Zbornik predavanj, str. 71–80. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- GURS (2012). Omrežje SIGNAL. Služba za GPS. Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana. <http://www.gu-signal.si/> (dostop 28. 12. 2012).
- Skone, S. H. (2001). The Impact of Magnetic Storms on GPS Receiver Performance. Journal of Geodesy, 75 (9–10), 457–468. DOI: 10.1007/S001900100198.

- Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. (2012). Vplivi dogajanj na Soncu na določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi GNSS-instrumenti: priprava na vrh 24. Sončevega cikla. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. 17. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana, 26. januar 2012. Zbornik predavanj, str. 79–90. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Štern, A., Bešter, J. (2012). Zasnova opozorilnega sistema na odstopanje storitev GNSS. 21. mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca ERK 2012. Portorož, 17.–19. september 2012. Zbornik IEEE, reg. 8, zv. A, str. 57–60. Slovenska sekcija IEEE, Ljubljana.
- Trimble (2010). Trimble VRS³Net App. Technical Notes. Trimble Navigation Ltd.
- Wanninger, L. (2004). Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning. 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Long Beach, Kalifornija, 21.–24. september 2004. Proceedings of ION GNSS 2004, str. 2849–2854. The Institute of Navigation, Manassas, Virginija.