

ITRS-SI – BREZPLAČNI PROGRAM ZA TRANSFORMACIJE MED SLOVENSKIMI IN MEDNARODNIMI TERESTRIČNIMI REFERENČNIMI SESTAVI

ITRS-SI – A FREWARE TOOL FOR TRANSFORMATIONS BETWEEN THE SLOVENIAN AND INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAMES

Sandi Berk

1 UVOD

V prejšnji številki Geodetskega vestnika je bil objavljen članek o časovno odvisnih transformacijah med slovenskimi in mednarodnimi terestričnimi referenčnimi sestavi (Berk in Medved, 2021). Na Geodetski upravi Republike Slovenije smo pripravili brezplačni program ITRS-SI, ki omogoča izvedbo teh transformacij. Program je objavljen med aplikacijami na portalu Prostor. Skupaj z uporabniškim priročnikom je dosegljiv na spletnem naslovu (https://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/DPKS/Transformacije_ETRS89/Aplikacije/ITRS-SI.zip).

Program ITRS-SI omogoča transformacije med slovenskimi realizacijami ETRS89 in realizacijami ITRS. Podpira datoteke s koordinatami točk v najpogosteje uporabljenih besedilnih formatih (*.crd, *.csv, *.txt in *.xyz). Kratka predstavitev programa, ki sledi, je povzeta po uporabniškem priročniku (Berk, 2021).

2 TERESTRIČNI REFERENČNI SESTAVI

Podprti so aktualni slovenski (ETRS89/D96-17) in mednarodni terestrični referenčni sestav (ITRF2014) ter sestavi, ki so pomembni za povezavo med njima (ETRS89/D17 in ITRF2000) oziroma kot ogrodja slovenskih realizacij ETRS89 (ITRF2005 in ITRF2008). Vsi ti terestrični referenčni sestavi temeljijo na GRS80 (Moritz, 2000).

ETRS89/D17

... je zadnja slovenska realizacija ETRS89 in temelji na EUREF GNSS-izmeri iz leta 2016 s srednjo epoho izmere 2016,75 (Berk in sod., 2018 in 2020). Izračun je bil predstavljen in potrjen na simpoziju EUREF 2018 v Amsterdamu. Ogrodje realizacije je IGB08/ETRF2000. V izračun je bilo vključenih 46 EUREF-točk, 16 stalnih postaj omrežja SIGNAL ter 7 takrat delujočih stalnih postaj kombinirane geodetske mreže 0. reda. Ta realizacija ni bila uveljavljena v praksi, saj bi prinesla prevelike spremembe

koordinat točk; namesto nje je bila uporabljena pragmatična rešitev D96-17 (spodaj). Vendar pa je D17 pomemben vezni člen med dosedanjimi statičnimi in tudi prihodnjo realizacijo ETRS89, ki bo predvidoma temeljila na (pol)kinematičnem geodetskem datumu (Medved in sod., 2018).

ETRS89/D96-17

... je pragmatična rešitev za poenotenje in izboljšanje kakovosti koordinat v obstoječih pasivnih in aktivnih GNSS-mrežah, ki temelji na vseh dosedanjih slovenskih realizacijah ETRS89. Upošteva dejanske spremembe v fizičnem prostoru in prinaša uskladitev koordinat v in med mrežami EUREF-točk, omrežjem SIGNAL in kombinirano geodetsko mrežo 0. reda, in sicer tako, da so spremembe koordinat točk, vključenih v predhodni realizaciji ETRS89 (D96 EUREF in D96 SIGNAL), najmanjše možne (Berk in sod., 2020). Koordinate v D96-17 so v omrežju SIGNAL v rabi od 1. 1. 2020.

ITRF2000

... je realizacija ITRS, ki temelji na tehnologijah vesoljske geodezije: GPS, VLBI, LLR, SLR in DORIS. Za določitev geodetskega datuma je bilo uporabljenih 50 skrbno izbranih točk, razporejenih po vsej zemeljski obli. Referenčna epoha ITRF2000 je 1997,0 (Altamimi in sod., 2002). IGS-produkti so temeljili na ITRF2000 (različica IGS00) od 2. 12. 2001 (GPS-teden 1143) do 4. 11. 2006.

ITRF2005

... je realizacija ITRS, ki temelji na GPS, VLBI, SLR in DORIS. V izračun je bilo vključenih 608 točk na 338 lokacijah, za določitev datuma pa je bilo uporabljenih skrbno izbranih 70 točk, razporejenih po vsej zemeljski obli. Referenčna epoha ITRF2005 je 2000,0 (Altamimi in sod., 2007). IGS-produkti so temeljili na ITRF2005 (različica IGS05) od 5. 11. 2006 (GPS-teden 1400) do 16. 4. 2011. V ITRF2005 je bil izveden izračun Mini EUREF GPS-izmere iz leta 2007, na katerem temeljijo prvotno določene koordinate omrežja SIGNAL – D96 SIGNAL (Berk in sod., 2020).

ITRF2008

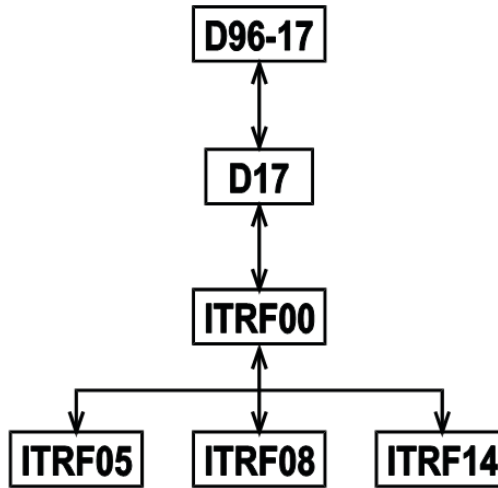
... je realizacija ITRS, ki temelji na GPS, VLBI, SLR in DORIS. V izračun je bilo vključenih 934 točk na 580 lokacijah, za določitev datuma pa je bilo uporabljenih skrbno izbranih 179 točk, razporejenih po vsej zemeljski obli. Referenčna epoha ITRF2008 je 2005,0 (Altamimi in sod., 2011). IGS-produkti so temeljili na ITRF2008 (različica IGS08) od 17. 4. 2011 (GPS-teden 1632) do 28. 1. 2017. V IGB08/ITRF2008 je bil izveden izračun EUREF GNSS-izmere iz leta 2016, na katerem temelji aktualen slovenski terestrični referenčni sestav – D96-17 (Berk in sod., 2020).

ITRF2014

... je realizacija ITRS, ki temelji na GPS, GLONASS, VLBI, SLR in DORIS. V izračun je bilo vključenih 1499 točk na 975 lokacijah, za določitev datuma pa je bilo uporabljenih skrbno izbranih 127 točk na 125 lokacijah, razporejenih po vsej zemeljski obli. Referenčna epoha ITRF2014 je 2010,0 (Altamimi in sod., 2016). IGS-produkti temeljijo na ITRF2014 (različica IGS14) od 29. 1. 2017 (GPS-teden 1934).

3 TRANSFORMACIJE KOORDINAT IN VEKTORJEV HITROSTI

Neposrednih datumskih transformacij med terestričnimi referenčnimi sestavi, na katerih temeljijo transformacije s programom ITRS-SI, je pet in so prikazane na sliki 1.



Slika 1: Datumске transformacije med terestričnimi referenčnimi sestavi.

Transformacije koordinat temeljijo na linearni različici Burša-Wolfove formule, ki jo predpisuje IERS-konvencija. Za parametre rotacijske matrice je uporabljena PV-konvencija, ki jo je skladno z ISO 19111 sprejela tudi Mednarodna zveza za geodezijo. Enačbe za transformacije naprej (praviloma v smeri iz ITRS v ETRS89) je podal EUREF (Altamimi, 2018). Poleg datumskih transformacij med terestričnimi referenčnimi sestavi se izvajajo še transformacije koordinat med različnimi epohami, tako da ločimo štiri tipe transformacij, in sicer med:

- dvema epohama iste realizacije terestričnega referenčnega sistema,
- dvema realizacijama ITRS (na primer ITRF2000 ↔ ITRF2014),
- odgovarjajočima realizacijama ETRS89 in ITRS (ETRF2000 ↔ ITRF2000) in
- dvema realizacijama ETRS89 (D96-17 ↔ D17).

Za izvedbo obratnih transformacij so uporabljeni isti (izvirni) transformacijski parametri in stroge enačbe transformacij ter po potrebi iterativni postopki, ki zagotavljajo povratnost transformacij (Berk in Medved, 2021). Tako je absolutna koordinatna napaka po transformaciji iz izvirnega v ciljni in nazaj v izvorni referenčni sestav manjša od 2 nm (0,000000002 m). Kakovost transformiranih koordinat in vektorjev hitrosti točk je torej odvisna predvsem od kakovosti njihovih izvornih koordinat in vektorjev hitrosti.

4 VHODNI PODATKI ZA TRANSFORMACIJO

Program ITRS-SI podpira naslednje oblike vhodnih datotek:

- CRD-datoteke (tudi VEL-datoteke; koordinate in vektorji hitrosti v formatu Bernese),
- CSV-datoteke (MS DOS, ločeno z vejico ali s podpičjem),
- TXT-datoteke (MS DOS, ločeno s tabulatorji ali presledki, tudi PRN-datoteke) in
- XYZ-datoteke (tudi ASC-datoteke).

Izvirne (vhodne) koordinate in pripadajoči vektorji hitrosti morajo biti v globalnem kartezičnem koordinatnem sistemu; pretvorbe koordinat iz krivočrtnih geodetskih (λ , φ , h) ali iz ravninskih koordinat, kombiniranih z elipsoidno višino (e , n , h), v geocentrične kartezične koordinate in obratno lahko izvedete na primer s programom ETRS89-SI (Berk, 2020).

Pričakovan vrstni red v vhodnih datotekah je X, Y, Z za geocentrične kartezične koordinate in vX, vY, vZ za pripadajoče komponente vektorjev hitrosti točk. Razen ko gre za formatiran zapis z vnaprej določenimi širinami stolpcev (za crd- in vel-datoteke gl. Dach in sod., 2015, str. 726–731), so ločila med koordinatami in/ali drugimi atributi točk tabulatorji in/ali presledki (txt-, prn- in xyz-datoteke) oziroma vejica in/ali podpičje (csv- in asc-datoteke). Ločilo pri koordinatah je decimalna pika, pogojno tudi decimalna vejica – če vejica ni uporabljena že kot ločilo med atributi točke. Program prepozna tudi koordinate točk, ki so podane v narekovajih, na primer '4194424.11', »4194424.11« in podobno.

Program ITRS-SI je namenjen transformacijam koordinat točk v Sloveniji, vendar je definicijsko območje transformacije v horizontalnem smislu razširjeno na območje celotne Evrope ($-32^\circ \leq \lambda \leq +70^\circ$ in $+34^\circ \leq \varphi \leq +82^\circ$), v vertikalnem smislu pa vključuje celotno Zemljino skorjo kot tudi atmosfero ($-100 \text{ km} \leq h \leq +100 \text{ km}$). Omejeno je tudi definicijsko območje pripadajočih vektorjev hitrosti točk, katerih komponente ne smejo biti manjše od -1 m/yr in ne večje od 1 m/yr . Koordinate in komponente vektorja hitrosti vsake točke program preveri pred izvedbo transformacije; morebitne točke, ki so zunaj definicijskega območja transformacije, pa v izhodno datoteko samo prepiše.

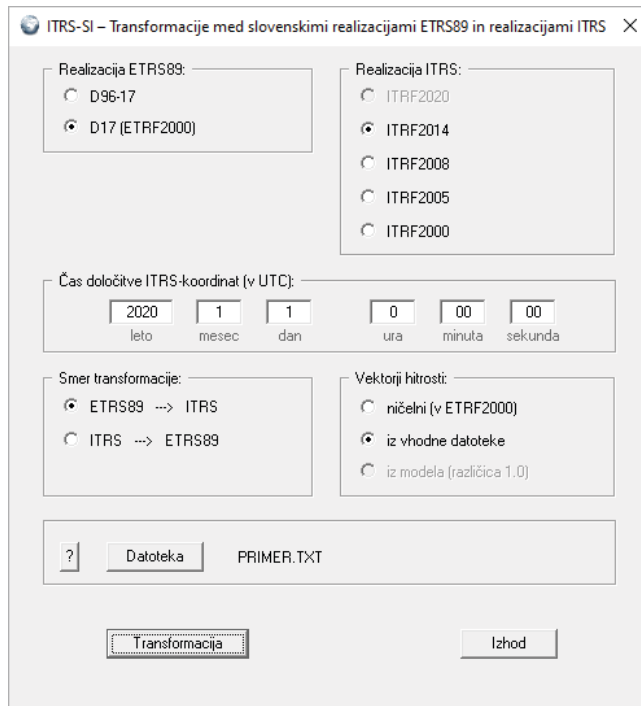
5 UPORABA PROGRAMA ITRS-SI

Program ITRS-SI je bil razvit v okolju MS Visual Studio 2017, v programskem jeziku Visual C++. Program zahteva operacijski sistem MS Windows, ki je novejši od Windows XP. Posebna namestitvev ni potrebna. Ob zagonu programa se odpre pogovorno okno (slika 2), v katerem izberete:

- realizacijo ETRS89,
- realizacijo ITRS,
- čas določitve ITRS-koordinat,
- smer transformacije,
- poreklo vektorjev hitrosti in
- vhodno datoteko za transformacijo.

Program ohrani vhodne datoteke nespremenjene. Imena izhodnih datotek sestavi iz imen vhodnih datotek, pri čemer je ime razširjeno z dodatkom, ki označuje izbrani ciljni terestrični referenčni sestav. Program tvori tudi istoimensko datoteko s poročilom o izvedeni transformaciji s pripono »rep« (iz angl. *report*). Vanjo zapiše osnovne podatke o izvedeni transformaciji/pretvorbi koordinat, in sicer:

- datum in čas izvedbe transformacije,
- imeni vhodne in izhodne datoteke koordinat,
- izvorni in ciljni terestrični referenčni sestav,
- datum in čas določitve ITRS-koordinat (univerzalni koordinirani čas),
- postopek izračuna (izvedene korake transformacije),
- poreklo vektorjev hitrosti in
- število transformiranih točk.



Slika 2: Pogovorno okno programa ITRS-SI.

Koordinate točk v izhodnih datotekah niso zaokrožene; ne glede na mesto decimalne vejice/pike so vedno podane s 16 števki; izjema so crd-datoteke, kjer je zapis koordinat formatiran in omejen s petimi decimalnimi mesti (tj. na 0,01 mm). Velja pravilo, da so rezultat izvedene transformacije v izhodni datoteki samo koordinate točk, če so bili izbrani ničelni vektorji koordinat (v ETRF2000). Da dobimo v izhodni datoteki tudi vektorje hitrosti, morajo biti ti podani tudi v vhodni datoteki. Da pa so ti pri transformaciji tudi dejansko upoštevani, programu poveste z izborom vektorjev hitrosti iz vhodne datoteke (v pogovornem oknu programa, gl. sliko 2).

Program ITRS-SI je sicer namenjen predvsem transformacijam med slovenskimi in mednarodnimi terestričnimi referenčnimi sestavi, vendar pa ga lahko uporabite tudi za transformacijo koordinat in vektorjev hitrosti med:

- dvema epohama izbrane realizacije ITRS,
- dvema epohama dveh različnih realizacij ITRS in
- zadnjima slovenskima realizacijama ETRS89.

Te transformacije izvedete v dveh korakih (slika 3), torej z dvema zaporednima izvedbama transformacije; podrobnosti so na voljo v uporabniškem priročniku programa ITRS-SI (Berk, 2021).

Med dvema slovenskima realizacijama ETRS89 in štirimi realizacijami ITRS, ki jih podpira program ITRS-SI, je 16 različnih časovno odvisnih transformacij – s poljubno epoho določitve koordinat v izbrani realizaciji ITRS. Poleg tega je s programom mogoče (v dveh korakih) izvesti še 18 različnih časovno

odvisnih transformacij, kjer sta tako izvorni kot tudi ciljni sestav ali slovenski realizaciji ETRS89 ali pa realizaciji ITRS.

Transformacija iz v → ↓	D96-17	D17	ITRF00	ITRF05	ITRF08	ITRF14
D96-17	–	2	1	1	1	1
D17	2	–	1	1	1	1
ITRF00	1	1	2	2	2	2
ITRF05	1	1	2	2	2	2
ITRF08	1	1	2	2	2	2
ITRF14	1	1	2	2	2	2

Slika 3: Število korakov transformacije s programom ITRS-SI.

6 SKLEP

Aktualni slovenski terestrični referenčni sestav (D96-17) je realizacija evropskega terestričnega referenčnega sistema (ETRS89), ki je vpet na Zemljo kot planet v geodetskih točkah na območju Evrope. Mednarodni terestrični referenčni sistem (ITRS) je seveda realiziran z vpetjem v geodetskih točkah po vsej zemeljski obli. Oba sistema sovpadata v epohi 1989,0. Zaradi delovanja tektonike pa se odnosi med njima s časom spreminjajo. Ker so tirnice GNSS-satelitov določene v aktualni realizaciji ITRS (trenutno ITRF2014), moramo za določitev položaja točke z GNSS-tehnologijo poznati odnose med aktualnima državnim in mednarodnim terestričnim referenčnim sestavom. Prav tako je to (vse bolj) pomembno pri natančni navigaciji, koordinatne razlike v obeh sestavih se namreč s časom povečujejo. Na območju Ljubljane bodo v letu 2037 te razlike presegle en meter (Berk in Medved, 2021). Glede na to, da se aktualna realizacija ITRS (ITRF2014) in aktualna realizacija WGS84 (G1762) ujemata s centimetrsko točnostjo, lahko program ITRS-SI uporabljate tudi za transformacije med slovenskim terestričnim referenčnim sistemom in WGS84.

Transformiramo koordinate točk in pripadajoče vektorje hitrosti. Ker slednjih običajno ne poznamo – izjema so več let delujoče GNSS-postaje –, lahko transformacijo izvedemo tudi ob privzemu ničelnih vektorjev hitrosti v ETRF2000. To v praksi pomeni, da ozemlje Slovenije geotektonsko obravnavamo kot stabilen del Evrope. Takšna predpostavka bi pri transformaciji koordinat, določenih z metodo PPP, prinesla napake, ki na območju Ljubljane trenutno (konec leta 2021) znašajo okoli enega centimetra (Berk in Medved, 2021).

Program ITRS-SI omogoča izvedbo transformacij med dvema slovenskima (D96-17 in D17) in štirimi mednarodnimi terestričnimi referenčnimi sestavi (ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 in ITRF2014). Slednje povezujejo časovno odvisne transformacije za 34 različnih parov izvirnega in ciljnega sestava (slika 3). S program ITRS-SI so vse te transformacije dostopne za ceno nekaj klikov.

Literatura in viri:

Altamimi, Z. (2018). Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. EUREF Technical Note 1, Version June 28, 2018. IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF), 11 str. <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1.pdf>, pridobljeno 2. 11. 2021.

Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., Boucher, C. (2007). ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112 (B9), B09401. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JB004949>

Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L. (2011). ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, 85 (8), 457–473. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121 (8), 6109–6131. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>

Altamimi, Z., Sillard, P., Boucher, C. (2002). ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107 (B10), 2214. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001JB000561>

Berk, S. (2020). Program ETRS89-SI: Transformacije koordinat med slovenskimi realizacijami ETRS89. Uporabniški priročnik. Različica 1.0. Ljubljana: Geodetska uprava Republike Slovenije. https://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/DPKS/Transformacije_ETRS89/Aplikacije/ETRS89-SI_prirocnik.pdf, pridobljeno 2. 11. 2021.

Berk, S. (2021). Program ITRS-SI: Transformacije med slovenskimi realizacijami ETRS89 in realizacijami ITRS. Uporabniški priročnik. Različica 1.0. Ljubljana: Geodetska uprava Republike Slovenije. https://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/DPKS/Transformacije_ETRS89/Aplikacije/ITRS-SI_prirocnik.pdf, pridobljeno 2. 11. 2021.

Berk, S., Medved, K. (2021). Transformacije med slovenskimi in mednarodnimi terestričnimi referenčnimi sestavi. *Geodetski vestnik*, 65 (3), 361–384. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2021.03.361-384>

Berk, S., Sterle, O., Medved, K., Komadina, Ž., Stopar, B. (2018). Computation of the EUREF Slovenia 2016 GNSS Campaign. Symposium of the IAG Reference Frame Subcommittee for Europe (EUREF 2018, Amsterdam), letn. 28. <http://www.euref.eu/symposia/2018Amsterdam/01-03-p-Berk.pdf>, pridobljeno 2. 11. 2021.

Berk, S., Sterle, O., Medved, K., Stopar, B. (2020). ETRS89/D96-17 – rezultat GNSS-izmere EUREF Slovenija 2016. *Geodetski vestnik*, 64 (1), 43–67. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.01.43-67>

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. (2015). Bernese GNSS Software. Version 5.2. User manual. Bern: Astronomski inštitut Univerze v Bernu. <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCUS2.pdf>, pridobljeno 2. 11. 2021.

Medved, K., Berk, S., Sterle, O., Stopar, B. (2018). Izzivi in dejavnosti v zvezi z državnim horizontalnim koordinatnim sistemom Slovenije. *Geodetski vestnik*, 62 (4), 567–586. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2018.04.567-586>

Moritz, H. (2000). Geodetic Reference System 1980. *Journal of Geodesy*, 74 (1), 128–133. DOI: <https://doi.org/10.1007/S001900050278>

Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.

*Geodetska uprava Republike Slovenije, Urad za geodezijo
Zemljemerska ulica 12, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: sandi.berk@gov.si*