

UDK 528.2
Pregledni rad

ROTACIJA ZEMLJE I ODREĐIVANJE PARAMETARA ZEMLJINE ORIJENTACIJE

ROTATION OF EARTH AND DETERMINATION OF EARTH ORIENTATION PARAMETERS

Mirko Borisov, Miro Govedarica, Maja Orihan

SAŽETAK

Zemljina orijentacija i rotacija Zemlje sa akcentom na određivanju parametara Zemljine orijentacije su opisani. Tehnika koja je korištena za određivanje parametara naziva se tehnika dugobazisne interferometrije. Nakon određivanja parametara Zemljine orijentacije, upoređivani su dobiveni rezultati koristeći različite referentne okvire i analizirani su faktori koji utiču na njihove promene. Za poređenje su korišćeni viefstTrf i vtrf2008 referentni okviri. Obrada podataka je obavljena u softveru VieVS (Vienna VLBI Software). Podaci koji su korišćeni pripadaju programu različitih serija koji se u kontinuitetu opažaju na svake tri godine.

Ključne riječi: rotacija Zemlje, parametri Zemljine orijentacije, dugobazisna interferometrija, VLBI, EOP.

ABSTRACT

Earth's rotation and elements of the Earth's orientation, with emphasis on the determination of the parameters of the Earth's orientation were described. The technique that was used for the determination of the parameters is called very long baseline interferometry, VLBI. After determining the parameters of the Earth's orientation, the obtained results were compared using different reference frames, and the factors that have influence on their changes were also analyzed. For comparison were used viefstTrf and vtrf2008 reference frames. Data processing is performed in software VieVS (Vienna VLBI Software). The data used belong to program different series that are continuously observed every three years.

Keywords: rotation of Earth, parameters of Earth orientation, very long baseline interferometry, VLBI, EOP.

1. UVOD

Rotacija Zemlje i elementi Zemljine orijentacije su predmet mnogih aktuelnih istraživanja. Akcenat u ovom radu dat je na određivanju parametara Zemljine orijentacije koristeći tehniku dugobazisne interferometrije - VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Dugobazisna interferometrija je svemirsko-geodetska tehnika pomoću koje se posmatraju veoma udaljeni, svijetli, tačkasti radio izvori, kvazari ili radio galaksije (Schuh, i dr., 2013). Takođe, dugobazisna interferometrija predstavlja skup međusobno povezanih radio teleskopa koji se nalaze na velikim udaljenostima. Udaljenost između teleskopa se računa pomoću razlike u dolaznom vremenu signala na dva ili više radio teleskopa koji istovremeno posmatraju isti radio

izvor (Herring, 2009). Upoređujući jednu grupu podataka sa podacima ostalih radio teleskopa, dolazi se do vremenske razlike a time i prečnika interferometra.

Naime, dugobazisna interferometrija doprinosi realizaciji internacionalnog terestričkog referentnog okvira (*International Terrestrial Reference Frame - ITRF*) i to je za sada jedina tehnika koja se koristi za realizaciju internacionalnog nebeskog referentnog okvira (*International Celestial Reference Frame - ICRF*). Pri tome, *VLBI* je važan za određivanje parametara Zemljine orijentacije (*Earth's Orientation Parameters - EOP*), koji su neophodni za transformaciju između terestričkog i nebeskog referentnog okvira. Parametri Zemljine orijentacije se odnose na polarno kretanje (*x-pol* i *y-pol*), svjetsko vrijeme (*UTI - Universal Time 1*) i *UTC (Universal Time Coordinated)* i nebesko kretanje pola (precesija i nutacija, dX i dY) (Schuh i dr., 2013). Nakon određivanja parametara Zemljine orijentacije, obavlja se poređenje rezultata dobivenih koristeći različite referentne sisteme i analiza različitih faktora koji utiču na njihove promjene. Za upoređivanje rezultata u ovom radu korišćeni su *viewsTrf* i *vtrf2008* referentni sistemi. Obrada podataka je obavljena u softveru *VieVS (Vienna VLBI Software)* koji je razvijan i održavan od strane Istraživačke grupe Svemirska geodezija na Departmanu za Geodeziju i Geoinformacije, na Tehničkom Univerzitetu u Beču. Pritom, podaci koji su korišćeni, pripadaju programu različitih serija koji se u kontinuitetu opažaju na svake 3 godine. Serija koja se koristi u eksperimentu u okviru ovog rada, nosi naslov *CONT14 (Continuous VLBI Campaign 2014)*.

2. GEODETSKI REFERENTNI SISTEMI I OKVIRI

Da bi uopšte koordinatni sistem bio definisan u trodimenzionalnom prostoru, neophodno je propisati koordinatni početak sistema-ishodište (tri elementa), orijentaciju koordinatnih osa (tri elementa) i razmjeru (obično jedan element). Tako osnovna ideja (koncept) zajedno sa neophodnim konstantama, datumskim parametrima i konvencijama, naziva se referentnim koordinatnim sistemom. Pritom, fizička i matematička realizacija referentnog sistema predstavlja referentni okvir. Referentni okvir u fizičkom smislu odnosi se na čvrstu materijalizaciju tačaka, dok se u matematičkom smislu odnosi na određivanje samih parametara, na primjer, geometrijskih koordinata. Osnovna podjela referentnih sistema i referentnih okvira:

- nebeski referentni sistemi /okviri i
- terestrički referentni sistemi /okviri.

Pritom, orijentacija Zemljine ose ima određene varijacije u prostoru, kao i u odnosu na Zemljino tijelo. Precizno praćenje ovih efekata se zasniva upravo na konceptu svemirsko-fiksni koordinatnih sistema, odnosno realizacije u vidu Nebeskog referentnog okvira i Terestričkog referentnog okvira. Oni se održavaju pod pokroviteljstvom Internacionalnog servisa za Zemljinu rotaciju i Referentne sisteme (*IERS - International Earth Rotation and Reference Systems Service*), Internacionalne astronomske unije (*IAU - International Astronomical Union*) i Internacionalne Unije za Geodeziju i Geofiziku (*IUGG - International Union of Geodesy and Geophysics*). Ustvari, referentni sistem je definisan skupom konvencija - skupom fizičkih i matematičkih svojstava i karakteristika (Altamimi i dr., 2011). Okvir je realizacija sistema. Geodetski datum je skup parametara: ishodište, koordinatni početak, razmjera, orijentacija i vremenska evolucija (Schindelegger, 2014).

2.1. Nebeski referentni okvir

Internacionalni Nebeski Referentni Okvir 2 - *ICRF2*, predstavlja aktuelni konvencionalni za svemir fiksirani koordinatni okvir, koji je realizovan na konceptu *ICRS* (*International Celestial Reference Frame*). U skladu sa preporukama *IAU*, koncept *ICRS* se odnosi na ekvatorijalni sistem. Njegov početak (centar) je postavljen u baricentar solarnog sistema, pol poravnat sa J2000.0 (standardna epoha), a smjer kao odbijene *VLBI* korekcije prethodnih *IAU* modela standarda precesije i nutacije (Schindelegger, 2014).

2.2. Terestrički referentni okvir

Specifikacije Terestričkog referentnog sistema se zasnivaju na teorijskom konceptu *ITRS* (*International Terrestrial Reference System*) koji je po konvenciji usvojen kao geocentrični Kartezijanski koordinatni sistem. On je korotirajući sa Zemljom u svom dnevnom kretanju i ima svoj početak (centar) definisan u centru mase Zemlje, uključujući atmosferu i okeane (Petit&Luzum, 2010). Prema konvenciji, *ITRS* orijentacija se poklapa sa prethodnim *BIH* (*Bureau International de l'Heure*) sistemom u epohi 1984.0, implicirajući da početni meridijan sistema od kojeg se broji geodetska dužina ili longituda, grubo odgovara Griničkom meridijanu, dok je *ITRS* kolociran u blizini glavnog pola rotacije na početku 20. vijeka (Böhm, 2012).

Realizacija *ITRS*-a naziva se okvir, koji se sastoji od procenjenih koordinata fundamentalnih stanica globalno distribuiranih, kao i brzina istih stanica. Fundamentalne stanice su opažane svemirsko-geodetskim tehnikama. Posljednja objavljena *ITRS* realizacija, zvana *ITRS2008*, određena je pomoću 943 stanice na 580 različitih mjesta (Altamimi i dr., 2011). Tačnosti položaja su na nivou od 1 cm i 1,2 ppb (8 mm na ekvatoru). Pozicije *ITRS2008* se navode u epohi 2005.0 i mogu biti formulisane u odnosu na druge *TRF* verzije pomoću transformacija, uključujući sedam parametarsku transformaciju, odnosno tri rotacije, tri translacije i razmjera (Schindelegger, 2014).

3. ELEMENTI ROTACIJE ZEMLJE

Zemljina rotacija ili rotacija Zemlje jeste okretanje Zemlje oko svoje zamišljene ose u toku od 23 sata 56 minuta i 4 sekunde, u pravcu od zapada ka istoku (Schmitt, Calculating Sidereal Time, URL1). Vremenski period za koji se Zemlja okrene oko svoje ose, naziva se solarni dan ili noć. Do relativne promjene vektora Zemljine rotacije u odnosu na tijelo Zemlje ili inercijalni prostor, dolazi usljed određenih faktora:

- gravitacionog privlačenja Mjeseca, Sunca i planeta,
- neravnomjernog rasporeda masa unutar Zemlje i
- drugih uzroka različitog porijekla.

Oscilacije u Zemljinoj rotaciji se mogu mjeriti i objasniti sljedećim pojavama:

- elastičnošću Zemljine kore,
- spljoštenošću Zemlje,
- strukturom i osobinama graničnog područja omotača i
- atmosferskim promjenama vremena i klime.

Mjerenja Zemljine orijentacije se vrše u formi vremenskih serija pod nazivom Zemljini orijentacioni parametri, koje čine sljedeće komponente:

- svjetsko vrijeme UT ,
- polarno kretanje i
- nebesko kretanje polova (precesija/nutacija).

Svjetsko vrijeme i polarno kretanje određuju se dugobazisnom interferometrijom dok se brze promjene UT (*Universal Time*) određuju tehnikama globalno pozicionirajućih sistema - GPS (*Global Positioning System*), tehnikom laserskog mjerenja dužina do satelita - SLR (*Satellite Laser Ranging*) i $DORIS$ (*Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite*). Ova mjerenja se vrše u okviru Međunarodnog servisa za Zemljinu rotaciju i referentne sisteme - $IERS$ (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Parametri Zemljine orijentacije opisuju nepravilnosti Zemljine rotacije (URL 8). Pet parametara Zemljine orijentacije, izvedeni iz opažanja, daju popravke jedinstvenoj dnevnoj rotaciji Zemlje po uzoru na precesiju-nutaciju, odnosno:

- $UTI-UTC$ ili $UTI-TAI$ (*Time Atomic International*) iz kojih se mogu izvesti varijacije dužina srednjeg sunčanog dana, u odnosu na njegove nominalne vrijednosti 86400 s *Time Atomic International*,
- polarno kretanje (x,y) i
- pomjeranje nebeskog pola $(\Delta\psi, \Delta\varepsilon)$ ili $(\Delta X, \Delta Y)$ sa maksimalnom vremenskom rezolucijom od dva dana (URL2).

3.1. Određivanje Svjetskog vremena

Svjetsko vrijeme UTI je vezano za Griničko srednje zvjezdano vrijeme ($GMST$ - *Greenwich*), vezom:

$$S = S_0 + (1 + \mu) UTI, \quad (1)$$

gde je S_0 srednje vrijeme u ponoć u Griniču i računa se iz sljedeće jednačine (URL 8):

$$S_0 = 6^{\text{h}}41^{\text{min}}50^{\text{s}},54841 + 8640184,812866 \cdot T + 0^{\text{s}},093104 \cdot T^2 - 6^{\text{s}},2 \cdot 10^{-6} \cdot T^3. \quad (2)$$

Koristeći oznake Griničkog srednjeg zvjezdanog vremena kao i oznake iz jednačine (1), ova veza se može napisati i na sljedeći način:

$$GMST = S_0 + (1 + \mu) \cdot UTI. \quad (3)$$

Naime, Svjetsko vrijeme određuje pravac $IERS$ referentnog meridijana unutar $ICRS$ u odnosu na osu nebeskog efemeridskog pola CEP (*Celestial Ephemeris Pole*). Izražava se kao razlika $UTI - UTC$ ili $UTI - TAI$. Razlika između astronomski određene dužine dana 86400 SI sekundi naziva se dužinom dana, odnosno LOD (*Length of Day*). Veza između ugaone brzine kretanja Zemlje ω sa dužinom dana je (URL 8):

$$\omega = 72\,921\,151,467\,064 - 0,843\,994\,803 \cdot LOD \quad (4)$$

gde je ω izraženo u picorad/s, a LOD u μs .

Do razlike između Svjetskog univerzalnog i atomskog vremena i promjene u dužini dana dolazi se usljed sljedećih uzroka:

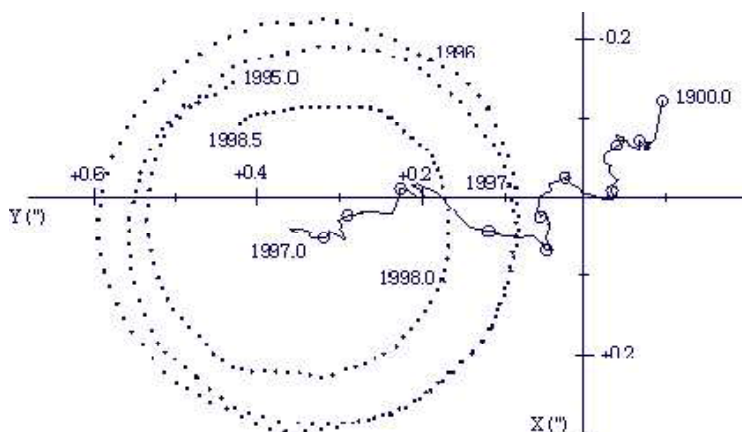
- varijacija u zonalnim plimama (< 2,5 ms u apsolutnom iznosu),
- okeanskih plima (< 0,03 ms u apsolutnom iznosu),
- cirkulacija u Zemljinoj atmosferi,
- unutrašnjih efekata (kretanje kontinenata, topljenje leda, promjene u atmosferi i okeanima) i
- prenosa ugaonog momenta Mjesečevog orbitalnog kretanja.

Promjena dužine dana ΔLOD , može se podijeliti u nekoliko komponenti, odnosno saglasno uzrocima nastajanja. Prije svega to su oscilacije uzrokovane plimom Zemljine kore i okeana, dinamički uticaj tečne kore okeana kao i klimatske promjene u atmosferi, odnosno velike anomalije uzrokovane klimatskim poremećajima u obliku uragana i cunamija, itd.

3.2. Komponente polarnog kretanja

Relativno kretanje ose Zemljine rotacije u odnosu na koru Zemlje, prema izvoru (*IERS*), (slika 1) se sastoji iz tri glavne komponente polarnog kretanja, odnosno:

- slobodne oscilacije sa periodom od oko 435 dana, tzv. *Chandlerov* period,
- godišnje oscilacije pod uticajem sezonskih premještaja vazdušnih i vodenih masa, te
- nepravilno sekularno pomjeranje.

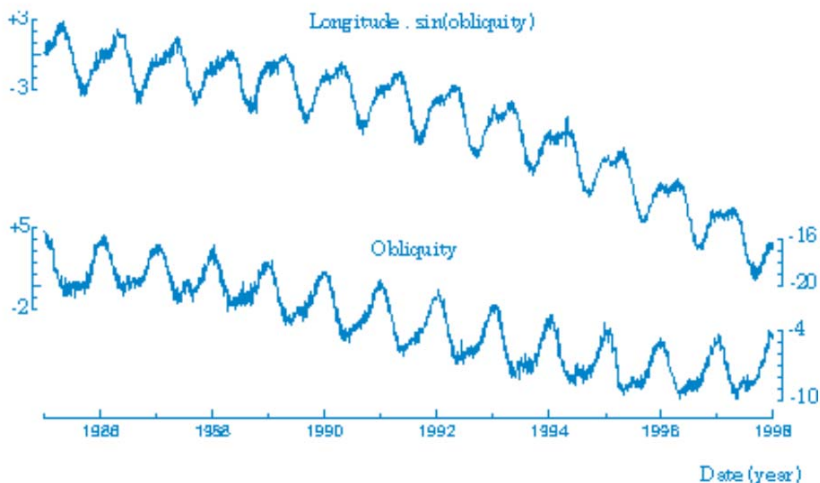


Slika 1: Kretanje Zemljinog pola (URL3)

Na slici 2 prikazano je kretanje Zemljine ose rotacije za period 1900 - 1997. godine. Tačkama su prikazani položaji pravog pola na petodnevni intervalima. Odstupanje od *Chandlerov*-og perioda se uočava iz karakterističnih oscilacija u tačkastoj liniji, a sekularno pomjeranje pola od 1900. do 1996. godine je prikazano punom linijom.

3.3. Nebesko kretanje pola

Kretanje nebeskog pola opisano je precesiono-nutacionim modelom (URL 8), što za rezultat daje nutaciju u longitudi $\Delta\psi$ i nutaciju u nagibu ekliptike $\Delta\varepsilon$. Razlike u odnosu na precesiono-nutacioni model su prikazani na slici 2, gdje gornji grafikon ilustruje razliku nutacije u longitudi, a donji nutaciju u nagibu ekliptike.



Slika 2: Nebesko kretanje pola (URL4)

3.4. Svemirsko-geodetska opažanja rotacije Zemlje

Moderne svemirsko-geodetske tehnike obezbjeđuju pristup punom spektru Zemljine rotacije pokrivajući posebno iregularne fluktuacije koje nisu predvidljive kroz teorijske ili polu-empirijske modele. Osjetljivost tih tehnika kod precesije-nutacije, polarnog kretanja i promjena kod brzine rotacije, očigledna je iz prelaza između svemirsko-fiksnog i terestičko-fiksnog referentnog sistema na Zemlji, koji je sastavni dio jednačina opažanja (Böhm, 2012).

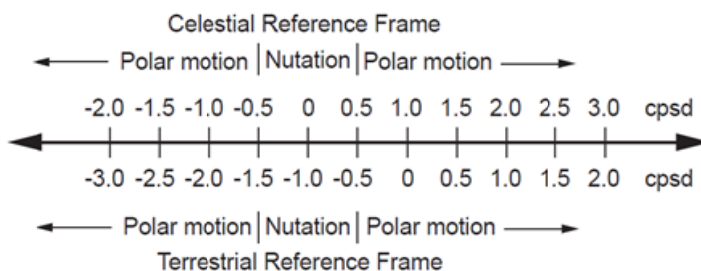
Dugobazisna interferometrija je svemirsko-geodetska tehnika sposobna da nezavisno određuje sve parametre Zemljine orijentacije: polarno kretanje, svjetsko vrijeme i precesiju-nutaciju (nebesko kretanje polova). Za sada to je jedina tehnika za praćenje nebeskog kretanja polova i dugoročne varijacije *UTI* (Brzezinski, 2006).

4. PARAMETRI ZEMLJINE ORIJENTACIJE

Promjene u orijentaciji geocentričnog terestričkog referentnog sistema u odnosu na geocentrični nebeski referentni sistem opisuje se sa tri vremensko zavisna Ojlerova ugla. Međutim, zbog tradicije i praktičnosti, astronomija ostvaruje ovu transformaciju preko srednjeg referentnog sistema i pet rotirajućih elemenata koji su nazvani parametrima Zemljine orijentacije - *EOP*. Pritom, tri *EOP* kategorije su:

- precesija i nutacija, koja obuhvata dugo - periodična kretanja unaprijed dobijene referentne ose (na primjer osa rotacije) u *CRF*,
- polarno kretanje, predstavljajući pravac promjena referentne ose u *TRF* i
- uglovna veličina, opisujući aktuelnu fazu *TRF* rotacije u odnosu na *CRF*.

Neuniformni dio dnevne rotacije može biti računat u promjenama dužine dana (*length of day - LOD*) ili, $dUTI=UTI-UTC$ odstupanje od *UTI* (*Universal Time1*) od uniformnog atomskog vremena *UTC* (*Universal Time Coordinated*).



Slika 3: Frekvencije kretanja i posmatranja sa aspekta TRF i CRF (URL5)

Prateći rezoluciju B1.7, usvojenu od strane IAU 2000. godine, referentni pravac je osa nebeskog srednjeg pola, tj. *CIP* (*Celestial Intermediate Pole*). U praksi, sve geodetske tehnike koriste konvencionalni, trenutno preporučeni model precesije-nutacije (*IAU 2006/2000 precession-nutation model*, Petit i Luzum, 2010), i njihova opažanja se odnose na *CIP* (Schindelegger, 2014). Aktuelna procedura transformacije prema sadašnjoj IAU rezoluciji je specificirana između *ITRS* i Geocentričnog nebeskog referentnog sistema (*GCRS - Geocentric Celestial Reference System*) koji odgovara *ICRS* u orijentaciji. Zbog „beskonačno velikog“ radijusa nebeske sfere moguće je zanemariti rastojanje između centra Sunca i centra Zemlje, te je ishodište *ICRS*-a pomjereno iz baricentra u geocentar. Za bilo koju poziciju vektora r u vremenu t (Petit i Luzum, 2010), prelaz *ITRS* \rightarrow *GCRS* (ili obrnuto) može biti izražen kao serija vremenski-zavisnih matrica rotacije:

$$r_{GCRS}(t) = Q(t) R(t) W(t) r_{ITRS}(t) \quad (5)$$

Naime, u jednačini (5), funkcija $W(t)$ opisuje Zemljino kretanje srednjeg referentnog pola sistema (*CIP*), kroz koordinate pola x_p i y_p . Argument rotirajuće komponente matrice $R(t)$ je nazvan uglom Zemljine rotacije - *ERA* (*Earth Rotation Angle*) i direktno se odnosi na *UTI*. Takođe, precesija i nutacija su obračunate preko $Q(t)$ koja se bazira na uglovima X i Y , a koji označavaju koordinate *CIP* u odnosu na *GCRS*. U okviru ove transformacije set veličina $\{x_p, y_p, dUTI, X, Y\}$ se odnosi i predstavlja *EOP* (Petit i Luzum, 2010). Pritom, uglovi nutacije zauzimaju posebno mjesto u parametrima datuma, i kao njihov glavni dio u odnosu na

geofizičke, planetarne i mjesečno-sunčane efekte, jeste dobro predvidljiv. Zato je i pokriven konvencionalnim nutacionim modelom. Preostali dijelovi kretanja *CIP* u *GCRS*, mjereni su pomoću *VLBI* i nazvani odstupanje nebeskog pola-CPO (*Celestial Pole Offsets*).

Na slici 3, data je veza između frekvencija kretanja posmatranih sa nebeskog referentnog okvira, gornji dio slike, i odgovarajuće frekvencije istog kretanja posmatranog sa terestričkog referentnog okvira, tj. donji dio slike. Terestrička *EOP* podkategorija polarnog kretanja i *UTI*, ili takođe *LOD*, predstavlja parametre Zemljine rotacije - *ERP*. Kontinuirane vremenske serije *ERP* i *CPO* su objavljene od strane *IERS* u dnevnim intervalima.

Kao posljedica upotrebe srednjeg referentnog sistema, svako kretanje *CIP* u *ITRS* implicira odgovarajuću pozicionu promjenu *CIP* u *GCRS*, tj. polarno kretanje i nutacija su povezani kinematički (Gross, 2007). Da bi se riješila ova dvosmislenost, definicija *CIP* bila je podijeljena konvencionalnom frekvencijom, odnosno sve dugoperiodične nebeske *CIP* varijacije u rangu $\sigma_c \in (-0.5, 0.5)$ cpsd (krugova po zvijezdanom danu) dodijeljene su precesiji i nutaciji. Kada se posmatra sa strane *ITRS*, onda se σ_c pomjera frekvencijom dnevne rotacije (1 cpsd) za $\sigma_c \in (-0.5, 0.5)$ cpsd. Terestričke *CIP* varijacije van ovog retrogradnog dnevnog opsega su tako dodijeljene polarnom kretanju. Retrogradna frekvencija (znak minus) računa pomjeranje suprotno smjeru Zemljine rotacije, dok suprotno (znak plus) u smjeru Zemljine rotacije (Schindelegger, 2014).

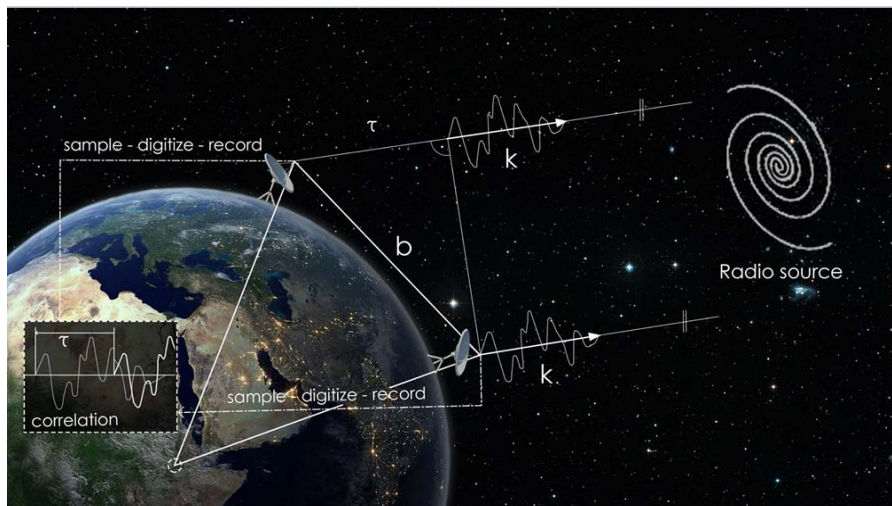
4.1. Određivanje parametara Zemljine orijentacije

Redovna određivanja parametara Zemljine rotacije su počela 1899. godine sa osnivanjem Međunarodne službe za dužine (*ILS - International Latitude Service*). Sve do 1970-tih godina određivanje je bilo zasnovano na opservacijama sa optičkom astrometrijom. Ona su bila pod uticajem mnogih sistematskih grešaka koje su bile vezane za datu tehniku. Kasnih 1970-tih, počelo je da se koristi sve veći broj novih metoda praćenja promjena u Zemljinoj rotaciji sa većom tačnošću. To su svemirsko-geodetske tehnike:

- dugobazisna interferometrija (*VLBI*),
- lasersko mjerenje dužina do satelita i do Mjeseca (*SLR, LLR*),
- globalni sistem za pozicioniranje (*GPS*) i
- Dopplerova orbitografija radiopozicioniranjem integrisanim na satelitu (*DORIS*).

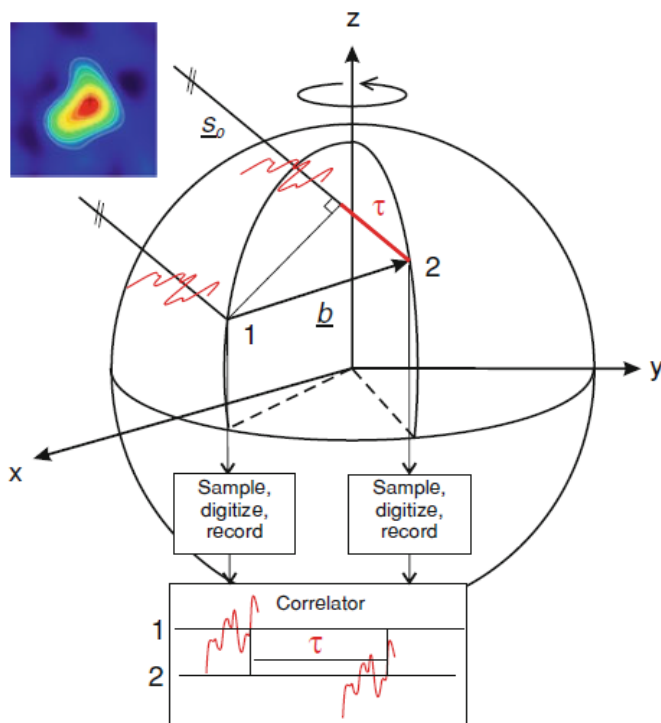
Takođe, značajna činjenica jeste poboljšanje optičkih opažanja od polovine 19. veka, pa sve do 1970-tih godina, što je vodilo do redukcije greške određivanja polarnog kretanja za jedan red veličine. Dok napredak postignut tokom naredne dvije decenije je rezultirao poboljšanjem tačnosti opažanja za dva reda, a poboljšana je uglovna tačnost i vremenska rezolucija parametara Zemljine orijentacije.

Među tehnikama svemirske geodezije, *VLBI* igra posebno važnu ulogu u praćenju promjena u Zemljinoj rotaciji. Dugobazisna interferometrija je svemirsko-geodetska tehnika bazirana na mikrotalasima koja mjeri razlike u vremenu dolazećeg signala od udaljenih radio izvora pomoću unakrsne korelacije. Osnovni princip *VLBI* pozicioniranja odnosi se na simultanu detekciju signala sa više radio izvora primjenom nekoliko radio-teleskopa i postupak računanja vremenskog kašnjenja signala između različitih stanica (slika 4).



Slika 4: Princip rada VLBI

U osnovi VLBI je geometrijska metoda određivanja rastojanja i orijentacije veoma duge bazne linije, mjerenjem razlike vremena dolaska talasnog fronta na dvije VLBI radio antene na krajevima duge baze. Prikaz geometrijskog modela dat je na slici 5.



Slika 5: Geometrijski model VLBI (URL6)

Opservacije *VLBI* su bile korištene da se ustanovi vangalaktički referentni sistem koji je primarni cilj ICRS - Internacionalnog nebeskog referentnog sistema. Takođe, *VLBI* se koristi za praćenje vremenskih promjena parametara Zemljine orijentacije od 1979. godine. Međutim, kvalitet *VLBI* nebeskog pomjeranja polova prije 1984. godine, bio je nizak zbog nedovoljne pokrivenosti podataka kao i konfiguracije osnova. Iz tih razloga bolje je ne koristiti opservacije prije tog datuma, odnosno kada se vrše neka detaljna ispitivanja (Schindelegger, 2014).

5. EKSPERIMENT I ANALIZA REZULTATA

Osnovni cilj istraživanja u radu i realizacija eksperimenta, podrazumijeva postupak određivanja parametara Zemljine orijentacije. Dobijeni rezultati se upoređuju u zavisnosti od referentnih okvira, tj., na osnovu dva različita referentna okvira: *viewsTrf* i *vtrf2008*. Pritom, uključujući i isključujući korekcije za uticaj okeanske plime i poređenjem rezultata treba doći do razlika između njih. Ukoliko one postoje, onda treba odrediti koliki uticaj imaju na parametre Zemljine orijentacije.

Seriya veoma uspješnih kontinuiranih *VLBI* kampanja nosi naziv *CONT14*. Period opservacije je bio početkom maja 2014. godine, tokom 15 dana (6. maj 2014. 00:00 *UT* do 20. maja 2014 24:00 *UT*). Od 1994. godine *VLBI* kampanje su opažane u neregularnim vremenskim intervalima, a najnovije su opažane na svake tri godine *CONT05* (septembar 2005), *CONT08* (avgust 2008), *CONT11* (septembar 2011) i *CONT14* (maj 2014) je nastavak ove uspješne kontinuirane *VLBI* kampanje. Mreža se sastoji od sedamnaest stanica u šesnaest gradova po cijelom svijetu (deset na sjevernoj hemisferi i sedam na južnoj hemisferi, slika 6), opservacioni režim zavisi od mogućnosti stanica, medijskih resursa, *e-transfer* kapaciteta, i korelatorskih resursa.



Slika 6: Stanice korišćene u kampanji *CONT14* (URL7)

Obrada i procesiranje podataka je obavljeno u softveru *VieVS*. Sam koncept i softverska rješenja su urađena od strane istraživačke grupe Svemirska geodezija na Institutu za geodeziju i geoinformacije, na Tehničkom univerzitetu u Beču (URL5). Pritom, softverski moduli i algoritmi su napisani u programskom jeziku Matlab-a, a sama programska rešenja se poklapaju sa najnovijim konvencijama Internacionalnog servisa Zemljine rotacije.

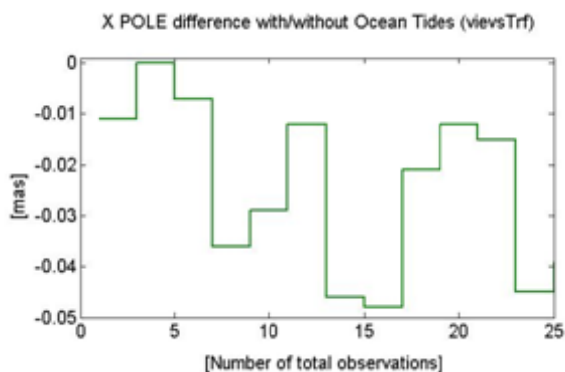
5.1. Analiza rezultata i procjena parametara Zemljine orijentacije

Analizom rezultata se prikazuju procjene parametara Zemljine orijentacije u zavisnosti od različitih referentnih okvira. Pritom metode određivanja parametara Zemljine orijentacije *EOP* odnose se na određivanje na dnevnom nivou, određivanje *EOP* na svakih sat vremena i određivanje *EOP* pomoću globalnog rješenja. Ovdje će biti analizirani i prikazani rezultati koji se odnose na prvi dio eksperimenta, odnosno na određivanje parametara Zemljine orijentacije na dnevnom nivou. Parametri koji se pritom određuju, odnose se na:

- polarno kretanje,
- svjetsko vrijeme i
- nebesko kretanje pola.

a) *X POLE*

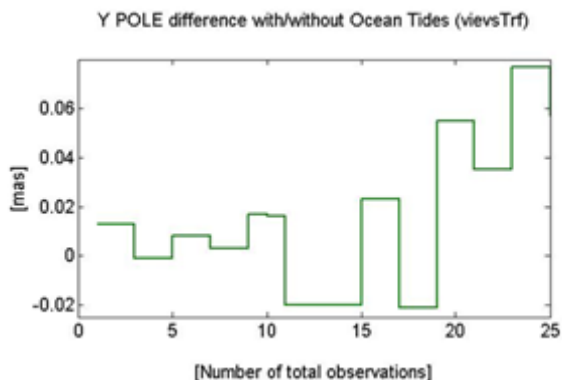
Prilikom procjene parametra *X POLE* upoređuju se rezultati, odnosno rješenja sa i bez uticaja okeanskih plima. Na slici 7 prikazana je razlika između ta dva rješenja. Razlika je minimalna i iznosi oko 0,05 μ s što odgovara 0,15 cm na površini Zemlje.



Slika 7: Procjena razlike u koordinati *X* pola na dnevnoj bazi, koristeći *viewsTrf* referentni okvir, uključujući i isključujući okeanske plime

b) *Y POLE*

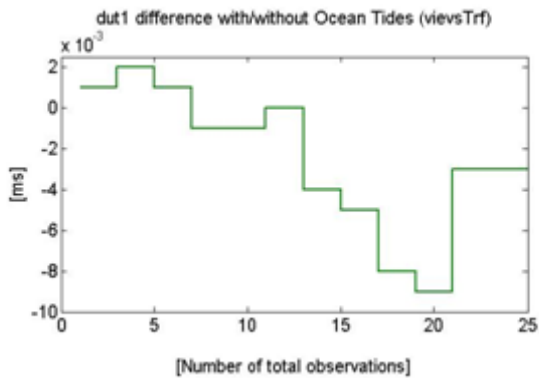
Prilikom procjene vrijednosti koordinate *Y POLE* upoređuju se rješenja sa i bez uticaja okeanskih plima. Na slici 8 prikazana je razlika između ta dva rješenja. Razlika je minimalna i iznosi oko 0,09 μ s što odgovara 0,27 cm na Zemljinoj površini.



Slika 8: Procjena Y pola na dnevnoj bazi koristeći **viewsTrf** referentni okvir uključujući i isključujući okeanske plime

c) **DUTI**

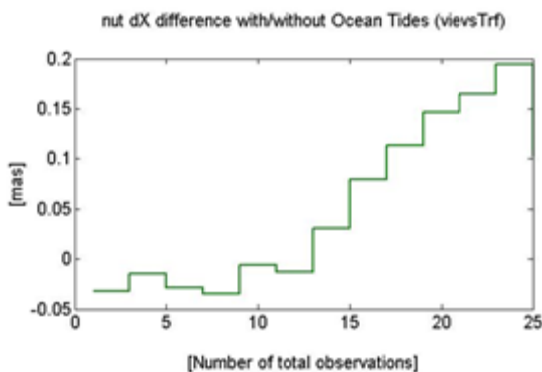
Prilikom procjene **DUTI** upoređuju se rješenja sa i bez uticaja okeanskih plima. Na slici 9 prikazana je razlika između ta dva rješenja. Razlika je minimalna i iznosi oko $0,007 \mu\text{s}$ što odgovara $0,021 \text{ cm}$ na Zemlji.



Slika 9. Procjena **dut1** na dnevnoj bazi koristeći **viewsTrf** referentni okvir uključujući i isključujući okeanske plime

d) **nut dX**

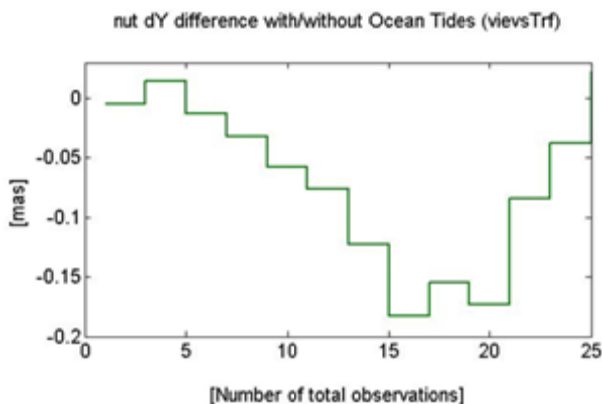
Prilikom procjene **nut dX** upoređuju se rješenja sa i bez uticaja okeanskih plima. Na slici 10 prikazana je razlika između njih. Razlika između ta dva rješenja je minimalna i iznosi oko $0,25 \mu\text{s}$ što odgovara $0,75 \text{ cm}$ na Zemlji.



Slika 10: Procjena nut dX na dnevnoj bazi koristeći **viewsTrf** referentni okvir uključujući i isključujući okeanske plime

e) nut dY

Prilikom procjene nut dY upoređuju se rješenja sa i bez uticaja okeanskih plima. Na slici 11 prikazana je razlika između njih. Razlika između ta dva rješenja je minimalna i iznosi oko $0,20 \mu\text{as}$ što odgovara $0,60 \text{ cm}$ na Zemlji.



Slika 11: Procjena nut dY na dnevnoj bazi koristeći **viewsTrf** referentni okvir uključujući i isključujući okeanske plime

U tabeli 1 prikazane su vrijednosti opažanih parametara na dnevnom nivou. Naime, date su srednje kvadratne greške, odnosno *RMS* (*RMS* – *Root Mean Square*) vrijednosti svih parametara Zemljine orijentacije, kroz numerički prikaz uticaja različitih referentnih okvira i okeanskih plima.

Tabela 1: RMS vrijednosti opaženih parametara na dnevnom nivou

RMS	<i>viewsTrf OT</i>	<i>viewsTrf nOT</i>	<i>Vtrf2008 OT</i>	<i>Vtrf2008 nOT</i>
<i>X pole</i> [μ as]	96,374	96,398	96,350	96,387
<i>Y pole</i> [μ as]	447,303	447,287	447,457	447,438
<i>dut I</i> [μ s]	261,756	261,754	261,766	261,765
<i>nut dX</i> [μ as]	0,279	0,252	0,220	0,203
<i>nut dY</i> [μ as]	0,215	0,153	0,223	0,161

6. ZAKLJUČAK

Imajući u vidu teorijska razmatranja i analize na osnovu dobivenih rezultata u eksperimentu, mogu se izvesti određeni zaključci. Naime, cilj istraživanja u ovom radu i jeste da se procjenom parametara Zemljine orijentacije dođe do rezultata koji će se u narednim istraživanjima upoređivati sa rezultatima koji se dobijaju pomoću drugih svemirsko-geodetskih tehnika ili njihovom kombinacijom. Naime, parametri Zemljine orijentacije su određeni, odnosno dobiveni koristeći softver *VieVS*. Pritom, određenim opažanjima i uključivanjem/isključivanjem uticaja okeanskih plima, uočava se razlika koja se kreće za:

- *X pole* od 0,05 μ as do 0,17 μ as što odgovara od 0,15 cm do 0,51 cm na Zemlji,
- *Y pole* od 0,09 μ as do 0,10 μ as što odgovara od 0,27 cm do 0,30 cm na Zemlji,
- *DUTI* od 0,007 μ s do 0,11 μ s što odgovara od 0,021 cm do 0,033 cm na Zemlji,
- *nut dX* od 0,25 μ as što odgovara 0,75 cm na Zemlji i
- *nut dY* od 0,20 μ as do 0,25 μ as što odgovara od 0,60 cm do 0,75 cm na Zemlji.

Dakle, na osnovu dobivenih rezultata, analize i procjene može se zaključiti da okeanske plime imaju uticaj na procjenjene vrijednosti parametara Zemljine orijentacije, pa se ukupne vrijednosti (rezultati) moraju korigovati. Takođe, upotreba različitih referentnih okvira pokazala je da *viewsTrf* referentni okvir pruža kvalitetnije informacije i rezultate, što se i očekivalo, s obzirom da je baziran na *vtrf2008* referentnom okviru koji od 2008. godine nije ažuriran.

LITERATURA

Altamimi, Z., Collilieux, X., Metivier, L. (2011): ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy* (2011) 85, pp. 457-473.

Böhm, S., (2012): Tidal excitation of Earth rotation observed by VLBI and GNSS. *Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Heft Nr 90.*

Brzezinski, A. (2006): Role of VLBI for Investigating Earth Rotation. *IVS 2006 General Meeting Proceedings*, pp. 20-29.

Gross, R. (2007): Earth rotation variations - long period. In: Herring, T. ed. Treatise on geophysics, Vol. 3, Geodesy, Elsevier, Amsterdam, pp. 239-294.

Herring, T., Schubert, G. (2009): Geodesy, Volume 3 of Treatise on geophysics. Elsevier, Amsterdam.

Petit, G., Luzum, B. (2010): IERS Conventions 2010, IERS Technical Note No.36. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

Schuh, H., Böhm, J. (2013): Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry. In: Xu, G. ed. Sciences of Geodesy II, Innovations and Future Developments, Springer Verlag, pp. 339-376

Schindelegger, M. (2014): Atmosphere-induced short period variations of Earth rotation. In: Böhm, J. ed. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 96, Department für Geodäsie und Geoinformation; Geowissenschaftliche Mitteilungen.

[URL 1] Schmitt, Calculating Sidereal Time
www.abecedarical.com (18.10.2015.)

[URL 2] International Earth Rotation & Reference Systems Service
www.hpiers.obspm.fr (25.02.2015.)

[URL 3] Kretanje Zemljinog pola
<http://www.iers.org> (25.02. 2015.)

[URL 4] Nebesko kretanje pola
<http://www.iers.org> (25.02. 2015.)

[URL 5] Frekvencije kretanja i posmatranja sa aspekta TRF i CRF, Gross, R. S., Earth Rotation Variations – Long Period, in Physical Geodesy, edited by T. A. Herring, Treatise on Geophysics, Vol. 11, Elsevier, Amsterdam, in press, 2007.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.395.210&rep=rep1&type=pdf>
(12.11. 2015.)

[URL 6] Geometrijski model VLBI, Schuh, H., Böhm, J. (2013) Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry
<http://views.hg.tuwien.ac.at/> (20.01. 2015.)

[URL 7] Stanice korišćene u kampanji CONT14
<http://ivs.nict.go.jp/mirror/program/cont14> (12.10. 2015.)

[URL 8] Ogrizović, V. (2007): Geodetska astronomija, Beograd.
http://www.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Zalozba/GA_Ogrizovic.pdf (25.02. 2015.)

Autori:***Doc. dr.sc. Mirko Borisov, dipl.inž.geod.***

Fakultet tehničkih nauka
Univerzitet u Novom Sadu
Trg Dositej Obradović 6, 21000 Novi Sad
Republika Srbija
E-mail: mirkoborisov@gmail.com

Prof. dr.sc. Miro Govedarica, dipl.inž.geod.

Fakultet tehničkih nauka
Univerzitet u Novom Sadu
Trg Dositej Obradović 6, 21000 Novi Sad
Republika Srbija
E-mail: miro.govedarica@icloud.com

Mr.sc. Maja Orihan, dipl.inž.geod.

Fakultet tehničkih nauka
Univerzitet u Novom Sadu
Trg Dositej Obradović 6, 21000 Novi Sad
Republika Srbija
E-mail: orihan.maja@gmail.com