

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Bohanec, J., 2016. Analiza točnosti in natančnosti zenitne troposferske refrakcije GNSS. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Stopar, B., somentor Sterle, O.): 45 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5873/>

Datum arhiviranja: 12-10-2016

University
of Ljubljana
Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Bohanec, J., 2016. Analiza točnosti in natančnosti zenitne troposferske refrakcije GNSS. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Stopar, B., co-supervisor Sterle, O.): 45 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5873/>

Archiving Date: 12-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GEODEZIJA
SMER GEODEZIJA V
INŽENIRSTVU**

Kandidat:

JURE BOHANEC

**ANALIZA TOČNOSTI IN NATANČNOSTI ZENITNE
TROPOSFERSKE REFRAKCIJE GNSS**

Diplomska naloga št.: 447/GI

**ANALYSIS OF ACCURACY AND PRECISION OF GNSS
ZENITH TROPOSPHERIC DELAY**

Graduation thesis No.: 447/GI

Mentor:

prof. dr. Bojan Stopar

Somentor:

asist. dr. Oskar Sterle

Ljubljana, 19. 09. 2016

»Ta stran je namenoma prazna«

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani/-a študent/-ka **JURE BOHANEK**, vpisna številka **26202997** avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Analiza točnosti in natančnosti zenitne troposferske refrakcije GNSS**

IZJAVLJAM

1. Obkrožite eno od variant a) ali b)

a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: LJUBLJANI

Datum: 23.8.2016

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.2:551.5(497.4)(043.2)
Avtor:	Jure Bohanec
Mentor:	prof. dr. Bojan Stopar
Somentor:	asist. dr. Oskar Sterle
Naslov:	Analiza točnosti in natančnosti zenitne troposferske refrakcije GNSS
Tip dokumenta:	Dipl. nal.–VSŠ
Obseg in oprema:	45 str., 5 pregl., 1. sl., 10 graf., 8. en.
Ključne besede:	zenitna troposferska refrakcija, GNSS meteorologija, metoda PPP, Bernese GNSS Software, omrežje SIGNAL, meteorološki model ALADIN

Izvleček

V diplomski nalogi primerjamo izračun zenitne troposferske refrakcije v meteorološkem modelu z neodvisnim izračunom s tremi geodetskimi metodami obdelave statičnih GNSS opazovanj in analiziramo podatke v absolutnem in relativnem načinu določitve.

V absolutnem načinu smo izračunali razlike med izračunom zenitne troposferske refrakcije z meteorološkim modelom ALADIN, ki ga vzamemo za referenco, z obdelavo opazovanj GNSS z geodetskimi metodami (PPP, Bernese GNSS Software, omrežje SIGNAL). Vrednost absolutne zenitne troposferske refrakcije izbrane referenčne postaje smo uporabili za določitev relativne troposferske refrakcije, ter pridobljene diferencialne vrednosti primerjali z vrednostmi pridobljenimi iz meteorološkega modela. Na osnovi pridobljenih razlik smo izračunali srednje vrednosti ter standardne odklone razlik troposferske refrakcije ter ovrednotili pridobljene rezultate.

Rezultati v diplomski nalogi kažejo na visoko skladnost vrednosti zenitne troposferske refrakcije določene z geodetskimi metodami z meteorološkim modelom, predvsem v relativnem načinu določitve z metodo PPP in Bernese GNSS Software.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.2:551.5(497.4)(043.2)
Author: Jure Bohanec
Supervisor: Prof. Bojan Stopar, Ph. D.
Co-advisor: Assist. Oskar Sterle, Ph. D.
Title: Analysis of accuracy and precision of GNSS zenith tropospheric delay
Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes: 45 p., 5 tab., 1. fig., 10 graph., 8. eq.
Key words: zenith tropospheric delay, GNSS meteorology, method PPP, Bernese GNSS Software, network SIGNAL, meteorological model ALADIN

Abstract:

The aim of the thesis was to compare the calculations of zenith tropospheric delay, computed within the meteorological model, with an independently acquired calculation of three GNSS data processing methods. Data analysis was done in the absolute and relative mode of determination.

Using absolute mode of zenith tropospheric delay computation we computed the differences between the computed zenith tropospheric delay with the meteorological model ALADIN, taken as a reference, and results of zenith tropospheric delay computation on the basis of GNSS observations processing with geodetic methods (PPP, Bernese GNSS Software, network SIGNAL). The absolute zenith tropospheric delays values of chosen reference station we used for calculation of the relative tropospheric delay. Thus obtained values of differential zenith tropospheric delay we compared with the values obtained from the meteorological model. On the basis of calculated differences the mean value of the differential tropospheric delay and the standard deviations were calculated. These data were then evaluated.

The obtained values of zenith tropospheric refraction show a high level of conformity between values obtained on the basis of GNSS data processing with the meteorological model, particularly in the relative mode using with PPP method and Bernese GNSS Software.

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi omogočili dokončanje študija, od staršev predvsem očetu in mami. Hvala za vso podporo, potrebno je bilo veliko požrtih živcev in razjedenih želodcev. Hvala puncu za sladek objem. Hvala babici za dobra kosila ter žal že pokojnemu dedku za dobro družbo. Žal mi je da tega dne nisi dočakal. Hvala kužku za preganjanje dolgčasa, hvala sestri za pivo in prijateljem, da so ga spili z mano.

Zahvaljujem se tudi vsem na fakulteti za strpnost in pomoč pri študiju. Ogromna zahvala gre Prof. Stoparju, ki je bedel nad mojo diplomsko nalogo. Posebej se zahvaljujem Oskarju, ki mi je omogočil, da je bila izdelava diplomske naloge izvedljiva in da je ta ne najbolj enostavna naloga postala zabavna.

HVALA VAM!

KAZALO VSEBINE

Izjave	IV
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček	V
Bibliographic – documentalistic information and abstract	VI
Zahvala	VII
1 UVOD	1
2 SISTEMI GNSS	3
2.1 Osnove o GNSS	3
2.2 Tipi GNSS opazovanj	3
2.2.1 Kodna opazovanja	4
2.2.2 Fazna opazovanja	4
2.2.2.1 Fazne razlike	5
2.3 Metode GNSS izmere glede na način določitve položaja	5
2.3.1 Absolutna določitev položaja	5
2.3.2 Relativna določitev položaja	6
2.4 Vplivi na opazovanja GNSS	6
3 VPLIVI NA GNSS-OPAZOVANJA Z IZVOROM V ATMOSFERI	8
3.1 Atmosfera	8
3.2 Troposfera	8
3.2.1 Troposferska refrakcija	8
3.2.1.1 Zenitna troposferska refrakcija	11
3.2.1.2 Relativna in absolutna troposferska refrakcija	11
4 MODELI ZENITNE TROPOSFERSKE REFRAKCIJE	13
4.1 Meteorološki model ALADIN	13
4.2 Geodetske metode GNSS za določitev zenitne troposferske refrakcije	14
4.2.1 Metoda PPP	14
4.2.2 Programski paket Bernese	14
4.2.3 Omrežje stalno delujočih postaj SIGNAL	15
5 OPIS PRIMERA	16
5.1 Izbor in priprava podatkov	17

5.1.1	Podatki meteorološkega modela ALADIN	19
5.1.2	Podatki metod GNSS za določitev zenitne troposferske refrakcije	20
5.1.2.1	Podatki metode PPP	20
5.1.2.2	Podatki omrežja SIGNAL	21
5.1.2.3	Programski paket Bernese	21
5.2	Rezultati in ovrednotenje	22
5.2.1	Analize absolutnega načina	22
5.2.1.1	Absolutne vrednosti zenitne troposferske refrakcije	22
5.2.1.2	Absolutne razlike med geodetskimi metodami izračuna glede na meteorološki model ALADIN	24
5.2.1.3	Srednja vrednost in standardni odklon razlik pri absolutnem načinu	26
5.2.2	Analize relativnega načina	30
5.2.2.1	Relativne vrednosti zenitne troposferske refrakcije	30
5.2.2.2	Razlike relativne zenitne troposferske refrakcije, določene z geodetskimi metodami glede na vrednosti določene z meteorološkim modelom ALADIN	32
5.2.2.3	Srednja vrednost in standardni odklon razlik pri relativnem načinu	34
5.2.3	Podvojen izračun zenitne troposferske refrakcije z metodo Bernese	37
5.2.4	Podvojen izračun zenitne troposferske refrakcije z metodo PPP	38
6	ZAKLJUČEK	41
	VIRI	44

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Seznam uporabljenih stalno delujočih GNSS-postaj omrežja SIGNAL	19
Preglednica 2: Statistike razlik vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom	28
Preglednica 3: Statistike razlik vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod in meteorološkega modela ALADIN glede na GNSS-postajo Lendava	36
Preglednica 4: Dvojne vrednosti zenitne troposferske refrakcije določene s programskim paketom Bernese za GNSS-postajo Koper ob koncu obravnavanega dne (24:00:00) in ob začetku naslednjega dne (00:00:00) za celotno obravnavano obdobje	38
Preglednica 5: Dvojni vrednosti zenitne troposferske refrakcije določene z metodo PPP za GNSS-postajo Koper ob skoraj identičnem trenutku ob zadnjem podatku obravnavanega dne in začetku naslednjega dne celotno obravnavano obdobje	39

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1:	Izračunane vrednosti zenitne troposferske refrakcije za stalno delujočo GNSS-postajo Koper	23
Grafikon 2:	Izračunane vrednosti zenitne troposferske refrakcije za nekatere stalno delujoče postaje GNSS	24
Grafikon 3:	Razlike izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije za stalno delujočo GNSS-postajo Koper glede na vrednosti določene z modelom ALADIN	25
Grafikon 4:	Razlike izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije za nekatere stalno delujoče GNSS-postaje glede na vrednosti določene z modelom ALADIN	26
Grafikon 5:	Aritmetična sredina in standardni odklon razlik izračunane vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije za obravnavane merilne postaje glede na vrednosti določene z modelom ALADIN	28
Grafikon 6:	Relativna zenitna troposferska refrakcija med stalno delujočo GNSS-postajo Koper in stalno delujočo GNSS-postajo Lendava	31
Grafikon 7:	Relativna zenitna troposferska refrakcija med nekaterimi stalno delujočimi GNSS-postajami in stalno delujočo GNSS postajo Lendava	32
Grafikon 8:	Razlike vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod glede na vrednost izračunane z modelom ALADIN stalno delujoče GNSS-postaje Koper glede na stalno delujočo GNSS-postajo Lendava	33
Grafikon 9:	Razlike vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod glede na vrednost izračunane z modelom ALADIN nekaterih stalno delujočih GNSS-postaj glede na stalno delujočo GNSS-postajo Lendava	34
Grafikon 10:	Vrednosti aritmetične sredine in standardnega odklona razlik relativne zenitne troposferske refrakcije glede na izračun z modelom ALADIN v relativnem načinu za obravnavane GNSS-postaje glede na GNSS-postajo Lendava	35

KAZALO SLIK

Slika 1: Mreža stalno delujočih GNSS-postaj SIGNAL

18

OKRAJŠAVE, SIMBOLI

ALADIN – fra. Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Développement International

APOS – angl. Austrian POSitioning Servise

ARSO – Agencija Republike Slovenije za Okolje

BDS – angl. BleiDou Navigation Satellite System

CROPOS; – angl. CROatian POSitioning

D96/TM - Geodetski datum 1996, transverzalna Mercatorjeva projekcija

ETRS89 – angl. European Terrestrial Reference System 1989

GLONASS – rus. GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema; ang. GLObal NAVigation Satellite System

GNSS – angl. Global Navigation Satellite system

GNSSNet.hu – omrežje stalno delujočih GNSS-postaj madžarske državne službe

GPS – angl. Global Positioning System

ITRF – angl: International Terrestrial Reference Frame

PPP – Precise Point Positioning

r.m.s. – angl. root mean square

SIGNAL – SlovenIja – Geodezija – Navigacija – Lokacija

UTC – angl. Coordinated Universal

VMF – angl. Vienna Mapping Function

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Cilj meteorologov je izdelati čim boljši meteorološki model, ki bi omogočal optimalno prognozo vremena, zato ga nenehno želijo izboljševati. Pri tem sodelujejo z nekaterimi drugimi strokami, med njimi tudi geodetsko.

Zemljina atmosfera je sestavljena iz več slojev, od katerih obravnavamo na potovanje signala GNSS skozi atmosfero le vpliv ionosfere in troposfere. Ionosfero lahko s postopkom meritev v veliki večini odstranimo, vpliva troposfere na signal GNSS pa ne moremo odstraniti z metodo dela, zato je edini način za njegovo odstranitev modeliranje (Sterle, 2015). Troposfera vsebuje velik del celotne mase atmosfere in skoraj vso vodno paro. V troposferi nastaja vreme z oblaki in padavinami (Stopar in sod. 2008).

Poleg temperature zraka in zračnega tlaka v troposferi je ena glavnih meteoroloških parametrov tudi vlažnost zraka. Zrak vsebuje tudi določeno količino vodne pare, ki prehaja v ozračje z izhlapevanjem iz oceanov, gozdov, tekočih in stoječih voda. Vlažnost podaja količino vodnih hlapov v zraku. Zrak vedno vsebuje večjo ali manjšo količino vodne pare, zato pravimo, da je zrak vlažen in ga obravnavamo kot zmes suhega zraka in vodne pare (Kogoj, 2000). Ker se količina vodne pare v ozračju nenehno spreminja v odvisnosti od položaja in časa, jo je izjemno težko modelsko ovrednotiti (Sterle, 2015). Količina vodne pare je odvisna predvsem od temperature zraka, delno tudi od zračnega tlaka.

Skupen vpliv zakasnitve dolžine signala od satelita do sprejemnika zaradi atmosfere imenujemo zenitna troposferska refrakcija. Meteorologi zbirajo podatke o zenitni troposferski refrakciji. Ta popravek vključijo v meteorološki model in tako izboljšajo modelske predstavitve vodne pare. Zenitno troposfersko refrakcijo pridobimo na podlagi izračuna s podatki meteorološkega modela ALADIN. Ta predstavlja najboljši profil ozračja v tistem trenutku na lokaciji opazovanj. Za meteorologe predstavlja vhodni podatek v model troposfere.

Pri merjenju opazovanj za določitev položaja z GNSS nastopa več pogreškov, ki jih je potrebno odstraniti pri obdelavi meritev GNSS. En od pogreškov je zenitna troposferska refrakcija. Ko odstranimo ostale pogreške lahko določimo velikost pogreška zenitne troposferske refrakcije. Ta se kaže kot povečanje dolžine satelit – sprejemnik. Vrednost zenitne troposferske refrakcije znaša približno 2,1 do 2,5 metra in se deli na mokro in suho komponento zenitne troposferske refrakcije.

V okviru diplomski nalogi poizkušamo primerjati izračun zenitne troposferske refrakcije v meteorološkem modelu z neodvisnim izračunom s tremi geodetskimi metodami pri statični GNSS-izmeri in poizkušamo analizirati podatke v absolutnem in relativnem načinu določitve.

2 SISTEMI GNSS

2.1 Osnove o GNSS

Globalni navigacijski satelitski sistemi – GNSS je skupek satelitskih sistemov, ki omogočajo določitev položaja kjer koli na Zemlji na podlagi opazovanih razdalj med sprejemniki in sateliti ob poznanih položajih satelitov. Na podlagi časovnega intervala med trenutkom oddaje signala s satelita in trenutkom sprejema signala v sprejemniku se izračuna razdalja satelit - sprejemnik. Tako izračunana razdalja predstavlja osnovo za določitev položaja sprejemnika.

Globalni satelitski navigacijski sistemi so globalno dostopni. Med nje spadajo ameriški sistem GPS, ruski vesoljski sistem GLONASS, kitajski sistem BDS oz. Compass in evropski sistem Galileo. Od naštetih sta polno operativna le prva dva sistema. Galileo je edini med naštetimi sistemi, ki je civilni sistem.

GNSS sistem je sestavljen iz treh segmentov (Stopar, Kogoj, 2005):

- Vesoljski segment predstavlja konstelacija navigacijskih satelitov, ki uporabnikom nepreklicno oddaja signal, kateri vsebuje informacije za določitev položaja.
- Kontrolni oz. zemeljski segment, ki upravlja s sistemom in ga sestavljajo kontrolne postaje na Zemlji. Njegova glavna naloga je ugotavljanje stanja sistema in satelitov na osnovi sprejetih signalov satelitov, določanje parametrov tirnic satelitov, ugotavljanje urinega teka satelitskih ur ter periodično obnavljanje navigacijskega sporočila.
- Uporabniški segment, katerega sestavljajo uporabniki sistema, ki opazujejo, shranjujejo in obdelujejo sprejeti signal, ki omogoča določitev časa, položaja in hitrosti.

Določitev položaja GNSS opazovanj temelji na prenosu obsežnih količin informacij s satelita do sprejemnika. Pri tem pa mora signal vsebovati podatke za identifikacijo posameznega satelita, podatke o času satelita, trenutni položaj satelita in informacijo o stanju Zemljine atmosfere. Informacije oddane iz satelitov do sprejemnikov so številne, zato je njihov prenos možen le s pomočjo ustreznih kod (Stopar, Kogoj, 2005).

2.2 Tipi GNSS opazovanj

Časovni interval potovanja GNSS-signalov od satelita do sprejemnika se lahko določi na podlagi opazovanj kode ali faze nosilnega valovanja, zato glede na tip opazovanj ločimo kodna in fazna opazovanja.

2.2.1 Kodna opazovanja

Kodna opazovanja razumemo kot opazovanja časovnega intervala med trenutkom oddaje in trenutkom sprejema kode. Satelit in sprejemnik generirata vsak svojo kodo ob istem času. Časovni zamik nastanka obeh kod dobimo s korelacijo s satelita oddane, s kodo, ki se generira v sprejemniku. Geometrijsko razdaljo med satelitom in sprejemnikom dobimo nato tako, da časovni interval potovanja elektromagnetnega valovanja od satelita do sprejemnika pomnožimo s svetlobno hitrostjo. Če bi bili uri satelita in sprejemnika popolnoma usklajeni, bi neposredno določili razdaljo med satelitom in sprejemnikom, kar pa je fizično nemogoče. Posledica je, da izmerjeni časovni interval vsebuje napake satelitove in sprejemnikove ure. Napake tako določenega časovnega intervala se izražajo v geometrijski razdalji med satelitom in anteno sprejemnika, od koder izhaja tudi ime za na ta način pridobljeno razdaljo – psevdorazdalja. Psevdorazdalje niso prave razdalje, ker so obremenjene z neodstranjenimi vplivi, so pa mera za razdalje (Stopar, Kogoj, 2005).

Na osnovi kodnih opazovanj lahko določimo absolutni položaj z natančnostjo 10 do 30 m, relativni položaj dveh sprejemnikov pa je mogoče določiti z natančnostjo 2-3 m. Ta natančnost ne omogoča pridobitev položaja s točnostjo, ki ustreza potrebam geodezije. Tako so glavni tip opazovanj za potrebe geodezije fazna opazovanja.

2.2.2 Fazna opazovanja

Razdaljo med satelitom in sprejemnikom izračunamo tako kot pri kodnih opazovanjih na osnovi časa potovanja signala med satelitom in sprejemnikom. Fazna opazovanja temeljijo na nemonuliranih nosilnih valovanjih L1 in L2. Pri faznih opazovanjih se primerja faza sprejetega valovanja s satelita s fazo valovanja, vzpostavljenega v sprejemniku, med katerima se meri razlika v vrednosti faze (Stopar, Kogoj, 2005).

Za določitev položaja točk z geodetsko natančnostjo na osnovi faznih opazovanj temelji na uporabi faznih razlik, s čimer pridobimo le relativni položaj. Sestavimo lahko enojne, dvojne in trojne fazne razlike, ko imamo na voljo fazna opazovanja dveh sprejemnikov do istih satelitov, izvedena v istih trenutkih.

Fazni način določitve položaja z GNSS zagotavlja bistveno bolj natančno določitev položaja od kodnega.

2.2.2.1 Fazne razlike

Za določitev položaja točk z geodetsko natančnostjo so fazne razlike ključne količine in predstavljajo osnovo za določitev relativnega položaja med dvema ali več sprejemniki.

Enojne fazne razlike so razlike faznih opazovanj enega ali dveh sprejemnikov, opazovanih z istega satelita. S sestavo enojnih faznih razlik odstranimo pogrešek ure satelita. Razlike enojnih faznih razlik oddanih z dveh satelitov, imenujemo dvojne fazne razlike. Z uporabo dvojnih faznih razlik odstranimo pogrešek ure sprejemnika.

Trojne fazne razlike so razlike dvojnih faznih razlik, sestavljene za dva različna trenutka opazovanj. Uporabljajo se za odstranitev neznanega začetnega števila celih valov (fazne nedoločenosti), ki je konstanten v času (Stopar in sod., 2008).

2.3 Metode GNSS izmere glede na način določitve položaja

V GNSS lahko pridobimo absolutni ali relativni položaj sprejemnika na osnovi faznih ali kodnih opazovanj. Osnova za določitev položaja je v obeh primerih geometrijska razdalja med satelitom in sprejemnikom (Stopar in sod., 2008).

2.3.1 Absolutna določitev položaja

Absolutni položaj določimo samo na podlagi danih položajev satelitov v izbranem koordinatnem sistemu v času opazovanj ter opazovanj psevdorazdalj med satelitom in sprejemnikom (Stopar in sod., 2008). Določitev absolutnega položaja je vezana zgolj na določitev položaja nove točke glede na znan položaj satelitov. Posledično je ključnega pomena pri absolutnem načinu določitve položaja upoštevanje vseh znanih vplivov na opazovanja z izvorom v sprejemniku oziroma satelitu, saj se nemodelirani vplivi neposredno prenesejo na položaj sprejemnika.

V preteklosti se absolutnemu načinu določitve položaja v geodeziji ni posvečalo veliko pozornosti, razlog pa je bil doseganje preslabe natančnosti položaja. Z razvojem metode PPP, ki vse bolj prihaja v uporabo, ker omogoča doseganje veliko boljše natančnosti kot prej in trenutno omogoča določitev položaja z nekaj mm oziroma nekaj cm natančnostjo.

2.3.2 Relativna določitev položaja

Relativni položaj določimo relativno glede na znani položaj ene ali več točk v izbranem koordinatnem sistemu ob danih položajih satelitov in opazovanih psevdorazdaljah med satelitom in sprejemnikom (Stopar in sod., 2008). Pri tem se uporabljajo fazna opazovanja ter dvojne fazne razlike, ki so temelj za določitev relativnega položaja z zadostno natančnostjo za potrebe geodezije.

Položaj se določi s tvorjenjem faznih razlik ter uporabo najbolj točnih podatkov o tirnicah satelitov, medtem ko se vpliv ionosfere odstrani s kombinacijo opazovanj na frekvencah L1 in L2 (Kozmus, Stopar, 2003). Pri določitvi relativnega položaja na osnovi faznih opazovanj je ključnega pomena za določitev položaja visoke kakovosti uspešna določitev neznanega števila celih valov (fazne nedoločenosti).

Metodo relativne oz. diferencialne določitve položaja naprej delimo na dva načina. Primarno jih delimo glede na čas določitve položaja sprejemnika in sicer na določitev položaja v dejanskem času in z naknadno obdelavo opazovanj. Delimo jih tudi glede na to ali sprejemnik med izmero miruje ali se premika oziroma na statične in kinematične metode izmere (Stopar, Kogoj, 2005).

Z relativno metodo določitve položaja GNSS-opazovanj lahko ob uporabi primerne instrumentarije in algoritmov obdelave opazovanj dosežemo milimetrsko natančnost, ki je primerna za večino nalog geodezije (Kozmus, Stopar, 2003).

Slabost relativnega načina določitve položaja je v uporabi vsaj dveh sprejemnikov, kjer je eden lociran na točki z znanim položajem, drugi pa na točki, katere položaj določamo.

2.4 Vplivi na opazovanja GNSS

Natančnost določitve položaja na osnovi opazovanj GNSS temelji na geometrijski razporeditvi opazovanih satelitov in na kakovosti opravljenih opazovanj. Poleg kakovosti sprejemnika je kakovost opravljenih opazovanj odvisna tudi od kakovosti modeliranja oziroma odstranitve vplivov na opazovanja. Glede na izvor delimo vplive na GNSS-opazovanja v tri skupine (Sterle in sod. 2014, Stopar in sod., 2008):

- vplivi z izvorom v satelitih, ki vključujejo pogreške satelitove ure, pogreške tirnice satelita, pogreške faznega centra antene satelita, vpliv splošne in posebne relativnosti, kodne zamike, preskoke faze ter pogrešek konca faze,

- vplivi z izvorom v sprejemniku vključujejo pogrešek ure sprejemnika, odboj signala (angl. multipath), spreminjanje položaja faznega centra antene in šum sprejemnika,
- vplivi z izvorom v mediju, v katerem potuje signal, ta pa vključuje vpliv ionosferske in troposferske refrakcije
- poleg tega so tu še vplivi z izvorom v Zemlji, ki vključujejo plimovanje trdne zemlje, plimovanje oceanov, gibanje Zemljinih polov ter parametrov vrtenja Zemlje.

Zgoraj naštetih vplivov so bodisi sistematični bodisi slučajni, od katerih je v postopku določitve položaja potrebno oceniti, odstraniti ali zmanjšati sistematične vplive na opazovanja. Odstranimo jih lahko z uporabo ustreznih matematičnih modelov, lahko pa jih s primernimi kombinacijami opazovanj ali z ustrezno opravljeno geodetsko GNSS-izmero zmanjšamo oz. v celoti odstranimo (Stopar in sod., 2008).

3 VPLIVI NA GNSS-OPAZOVANJA Z IZVOROM V ATMOSFERI

3.1 Atmosfera

Zemljina atmosfera je sestavljena iz slojev, ki jih imenujemo ionosfera, termosfera, mezosfera, stratosfera, in troposfera, ter vmesnih slojev tropopavza, stratopavza in mezopavza, od katerih obravnavamo na potovanje signala GNSS skozi atmosfero le vpliv ionosfere in troposfere. Pri opazovanjih z dvofrekvenčnimi sprejemniki GNSS lahko tvorimo kombinacije faznih in/ali kodnih opazovanj, s čimer odstranimo večji del vpliva ionosfere - ionosferske refrakcije. Tako lahko odstranimo približno 99,9% vpliva, preostanek pa je v splošnem zanemarljiv (Sterle, 2015). Vpliva troposfere na signal GNSS ne moremo odstraniti s tvorjenjem linearnih kombinacij opazovanj, saj vpliv troposfere ni frekvenčno odvisen in je zato na vse opazovane količine enak. Edini način za odstranitev vpliva troposfere je njegovo modeliranje (Sterle, 2015).

3.2 Troposfera

Troposfero predstavlja del nevtralne atmosfere, ki ni ionizirana. Je najnižji del atmosfere, debelina sloja ni konstantna in se spreminja od pola do ekvatorja. Sega od Zemljinega površja do višine 18 km nad ekvatorjem in do 9 km nad zemeljskima poloma (Stopar in sod., 2008). Na razširjanje signala GNSS vplivajo razmere v troposferi, oziroma temperatura, zračni tlak in vlažnost zraka. V troposferi temperatura pada z višino in sicer znaša temperaturni gradient v povprečju $-6,5$ °C/km (Witchayangkoon, 2000). Troposfera vsebuje 75% celotne mase atmosfere in približno 99% vse vodne pare. V tem sloju nastaja vreme z oblaki in padavinami (Stopar in sod., 2008).

3.2.1 Troposferska refrakcija

Vpliv nevtralnega dela atmosfere na širjenje elektromagnetnega valovanja imenujemo troposferska refrakcija. Ker je največji delež nevtralne atmosfere troposfera, upoštevamo le njen prispevek pri določitvi vpliva nevtralnega dela troposfere na opazovanja GNSS.

Troposferska refrakcija Δ^{TROP} predstavlja optično podaljšanje poti signala, je dolžinska količina in je definirana kot (Dach in sod., 2015):

$$\Delta^{TROP} = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N ds \quad (1)$$

n - troposferski refrakcijski koeficient

N - refraktivnost troposfere

Povezava med troposferskim refrakcijskim koeficientom in refraktivnostjo troposfere je torej (Xu, 2007):

$$N = 10^6 (n - 1) \quad (2)$$

Refraktivnost troposfere N lahko razstavimo na suho komponento N_s in mokro komponento N_m :

$$N = N_s + N_m \quad (3)$$

kjer se suha komponenta nanaša na suho atmosfero, mokra pa na vodno paro v atmosferi (Xu, 2007).

Enačbe (1), (2) in (3) skupaj zapišemo kot:

$$\Delta^{TROP} = \Delta_s^{TROP} + \Delta_m^{TROP} = 10^{-6} \int N_s ds + 10^{-6} \int N_m ds \quad (4)$$

Δ_s^{TROP} - suha komponenta zenitne troposferske refrakcije

Δ_m^{TROP} - mokra komponenta zenitne troposferske refrakcije

Povezava med parametri atmosfere in troposfersko refraktivnostjo opisujeta enačbi (5) in (6):

$$N_s = 77,64 \frac{p}{T} \quad (5)$$

$$N_m = -12,96 \frac{e}{T} + 3,718 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

p - zračni tlak atmosfere [mB]

T - temperatura [K]

e - delni tlak vodne pare [mB]

Koeficienti v enačbah (5) in (6) so bili določeni empirično in uporaba enačb (5) in (6) v obdelavi opazovanj GNSS ni priporočena, saj vpliva troposfere ne odstrani z zadostno točnostjo (Dach in sod., 2015).

Pri obdelavi opazovanj GNSS postopamo zato drugače. Vpliv troposfere na določeni točki lahko predstavimo z zakasnitvijo signala s smeri zenita (zenitna troposferska refrakcija Δ_{ZEN}^{TROP}) in projekcijo zakasnitve signala iz zenita na signal v odvisnosti od zenitne razdalje z (projekcijska komponenta troposferske zenitne razdalje $M(z)$). Zakasnitev signala (troposfersko refrakcijo) pri poljubni zenitni razdalji z lahko zapišemo kot (Dach in sod, 2015, Sterle, 2015):

$$\Delta^{TROP} = M(z) \Delta_{ZEN}^{TROP} \quad (7)$$

Tudi v tem primeru lahko troposfersko refrakcijo razdelimo na suho in mokro komponento, kjer dobimo končno obliko kot (Sterle, 2015):

$$\Delta^{TROP} = M_s(z) \Delta_{ZEN,s}^{TROP} + M_m(z) \Delta_{ZEN,m}^{TROP} + M_g(z) (G_N \cos a + G_E \sin a) \quad (8)$$

V enačbi (8) so količine definirane kot:

$M_s(z), M_m(z), M_g(z)$ - projekcijska komponenta zenitne troposferske refrakcije za suho in mokro komponento ter za gradiente troposfere,

$\Delta_{ZEN,s}^{TROP}, \Delta_{ZEN,m}^{TROP}$ - zenitna troposferska refrakcija suhe in mokre komponente troposfere in

G_N, G_E - gradienta troposfere v smeri S-J (G_N) in V-Z (G_E), kjer je a azimut satelita v lokalnem geodetskem koordinatnem sistemu sprejemnika GNSS.

Suha komponenta modelira vpliv suhega zraka, mokra komponenta vpliv vodne pare v ozračju na zakasnitev signala GNSS, medtem ko gradienta modelirata azimutalno nesimetričnost mokre komponente troposfere.

V postopku obdelave faznih in kodnih opazovanj GNSS, se v izravnavi kot neznanke določajo $\Delta_{ZEN,m}^{TROP}$, G_N in G_E (Sterle, 2015).

3.2.1.1 Zenitna troposferska refrakcija

Ko se satelit nahaja v zenitu glede na sprejemnik, je velikost troposferske refrakcije najmanjša, takrat govorimo o zenitni troposferski refrakciji. Z manjšanjem višinskega kota satelita se troposferska refrakcija naglo povečuje (Stopar in sod., 2008, Witchayangkoon, 2000).

Suha komponenta zenitne troposferske refrakcije je velikostnega reda med 2,1 in 2,3 m, medtem ko je velikost mokre komponente zenitne troposferske refrakcije od nekaj centimetrov do 30 centimetrov. Večino troposferske refrakcije, okoli 90% predstavlja suha komponenta, medtem ko mokra komponenta predstavlja preostanek, to je okoli 10% celotne troposferske refrakcije. Pomembno je omeniti, da se suho komponento zenitne troposferske refrakcije modelira z relativno natančnostjo 2-5% oziroma do centimetrskimi vrednostmi. Pri tem uporabimo izmerjene vrednosti temperature in zračnega tlaka na površini Zemlje. Čeprav mokra komponenta zenitne troposferske refrakcije predstavlja le okoli 10% celotne zenitne troposferske refrakcije, je njena nenatančnost običajno predstavljena kot celotna nenatančnost troposferske refrakcije. Razlog za to tiči v velikem časovnem in prostorskem spreminjanju vodne pare, zaradi česar je mokra komponenta zenitne troposferske refrakcije težavna za modeliranje (Stopar in sod., 2008).

Z modeliranjem troposferske refrakcije pridobimo popravke opazovanih razdalj med satelitom in sprejemnikom v dolžinskih enotah. Pridobljeno vrednost dolžine moramo vedno odšteti od opazovane razdalje. To pomeni, da je popravek troposferske refrakcije negativen oziroma izmerjene dolžine so vedno predolge. Neupoštevanje vpliva troposfere na GNSS-opazovanja bi privedlo do povečanja merila mreže (Stopar in sod., 2008).

Ob poznavanju vrednosti zenitne troposferske refrakcije, lahko vpliv troposfere za poljubno vrednost zenitne razdalje preračunamo preko projekcijske komponente troposferske refrakcije (enačba (8)). Modeli za izračun zenitne troposferske refrakcije so npr. Saastamoinen, Hopfield, modificiran Hopfield (Stopar in sod., 2008), medtem ko so primeri projekcijske komponente troposferske refrakcije Niell, Marini, VMF (Witchayangkoon, 2000, Dach in sod., 2015).

3.2.1.2 Relativna in absolutna troposferska refrakcija

Možna je tudi delitev troposferske refrakcije na relativno in absolutno troposfersko refrakcijo. Relativna troposferska refrakcija ima največji vpliv na višinsko razliko med točkama. Relativni pogrešek v zenitni troposferski refrakciji za 1 mm pomeni pogrešek višinske razlike med točkama za 3-4 mm (Stopar in sod., 2008).

Absolutna troposferska refrakcija vpliva na merilo GNSS-mreže. Absolutni pogrešek v zenitni troposferski refrakciji za 2,5 m povzroči pogrešek v merilu mreže za 0,4 ppm. V nasprotju z pogreškom relativne troposferske refrakcije je pogrešek absolutne troposferske refrakcije proporcionalen dolžini baznega vektorja (Stopar in sod., 2008).

Pri absolutni določitvi položaja imamo možnost določitve celotne vrednosti troposferske refrakcije, tako absolutne kot relativne troposferske refrakcije, pri relativni določitvi položaja pa imamo dostop samo do relativne razlike troposfere, absolutni vpliv pa se izniči. Torej absolutna troposferska refrakcija s tvorjenjem enojnih in nato še dvojnih faznih razlik pri določitvi relativnega položaja odpade.

4 MODELI ZENITNE TROPOSFERSKE REFRAKCIJE

4.1 Meteorološki model ALADIN

V skupini ALADIN, kot je ime meteorološkega modela za omenjeno območje, katerega razvoj usmerja Francija, je poleg francoske državne meteorološke službe prisotnih še 14 drugih evropskih meteoroloških služb, pri tem pa aktivno sodeluje tudi slovenska meteorološka služba (Pristov, Cedilnik, 2012).

Regionalni model ALADIN je numerični meteorološki model, ki ga uporabljamo za računanje bodočega stanja ozračja nad določenim omejenim geografskim območjem za vsakodnevno operativno uporabo (Pristov in sod., 2012). Meteorološki model je skupek matematičnih enačb, ki opisujejo gibanje zraka in vodne pare v atmosferi (MOP, ARSO, 2016).

Lahko bi rekli, da je model ALADIN v slovenskem prostoru sopomenka za numerično napovedovanje vremena. Predstavlja primarni meteorološki model za kratkoročno napoved vremena na območju Slovenije, ki ga uporabljajo na ARSO pri pripravi meteorološke in hidrološke napovedi (Pristov in sod., 2012).

Za napoved vremena je pomembna tudi asimilacija meritev, tako imenovan proces, ki meritve in modelsko informacijo združuje v analizo, to je začetno stanje numerične vremenske napovedi (Strajnar, 2012). Za asimilacijo so uporabne skoraj vse vrste meteoroloških meritev. Pri analizi vremena uporabljajo na ARSO meritve prizemnih meteoroloških postaj, maloštevilne točkovne radarske meritve vertikalnih profilov vetra ter radiosondažne, letalske in satelitske meritve. Med vrstami meritev, katere ARSO še ne uporablja, spadajo tudi geodetske meritve zakasnitve signala GNSS zaradi vpliva ozračja, natančnejše troposfere, iz katerega se da sklepati na porazdelitev vlažnosti po višini (Strajnar, 2012).

Izračun zenitne troposferske refrakcije za asimilacijo pa pridobimo na podlagi meteoroloških meritev modela ALADIN z uporabo enačb (5) in (6).

4.2 Geodetske metode GNSS za določitev zenitne troposferske refrakcije

4.2.1 Metoda PPP

Metoda PPP omogoča določitev koordinat na osnovi opazovanj GNSS enega samega sprejemnika. To je največja prednost metode, ki omogoča pridobitev najvišje dosegljive natančnosti in točnosti uporabimo opazovanja dvofrekvenčnih geodetskih sprejemnikov GNSS (Sterle, 2015), tako faznih kot tudi kodnih opazovanj.

Položaji točk določeni z metodo PPP so pridobljeni v globalnem koordinatnem sestavu ITRF in s centimetrovsko točnostjo (Sterle in sod., 2014).

Za zagotovitev koordinat najvišje kakovosti, določenih z metodo PPP, je potrebno odstraniti oziroma modelirati vse vplive, ki se pojavijo pri opravljanju meritev in so po velikosti večji od milimetra (Sterle in sod., 2014). Ti vplivi so predstavljeni v poglavju 2.4.

Vrednost zenitne troposferske refrakcije pridobimo v postopku obdelave faznih in kodnih opazovanj s posredno izravnavo po metodi najmanjših kvadratov, temelječi na enačbi (8). (Sterle, 2015)

4.2.2 Programski paket Bernese

Programski paket Bernese (Bernese GNSS Software Version 5.2) zagotavlja rezultate obdelave opazovanj GNSS z največjo točnostjo in natančnostjo, visoko zmogljivostjo procesiranja in fleksibilnostjo (Dach in sod., 2015) Ta znanstveni program konstantno razvija in izboljšuje Astronomski Inštitut Univerze v Bernu, ki ga razvija do najvišje kvalitete za geodetska in druga področja uporabe, ki temeljijo na opazovanjih GNSS in podpira oba polno operativna GNSS-sistema GPS in GLONASS (Dach in sod., 2015).

Bernese temelji na obdelavi dvojnih faznih razlik, torej deluje na relativni način. V postopku obdelave se na osnovi opazovanj na posameznih točkah sestavijo enojne in dvojne fazne razlike, s čimer se ocenijo bazni vektorji, oz. relativni položaji med točkami. Ker obdelava temelji na faznih razlikah, je program zmožen oceniti le relativno troposfersko refrakcijo med točkami. Absolutna troposferska refrakcija med točkami je zaradi sestave dvojnih faznih razlik iz opazovanj odstranjena.

Modeliranje troposferske refrakcije pri programu Bernese je predstavljeno v enačbi (8), ki opisuje izračun zenitne troposferske refrakcije med enim satelitom in enim sprejemnikom. Ker pa Bernese

temelji na dvojnih faznih razlikah, v postopku obdelave za vsako dvojno fazno razliko nastopajo štiri troposferske refrakcije, to so vse možne kombinacije troposferske refrakcije iz enačbe (8) med dvema satelitoma in dvema sprejemnikoma

4.2.3 Omrežje stalno delujočih postaj SIGNAL

SIGNAL je slovensko državno omrežje stalno delujočih GNSS-postaj, katerega tvori 16 enakomerno razporejenih postaj po celotni državi. Postaje so locirane tako, da so približno enakomerno razporejene po območju države in da je oddaljenost med postajami manjše od 70 kilometrov (MOP, GURS, 2016a)

Omrežje dopolnjujejo stalno delujoče postaje sosednjih držav, od katerih v omrežju SIGNAL pridobivajo podatke petih postaj avstrijskega omrežja APOS, šestih postaj hrvaškega omrežja CROPOS in ene postaje madžarskega omrežja GNSSNet.hu.

Omrežje SIGNAL je temeljna državna geoinformacijska infrastruktura za določanje natančnega položaja s sodobno satelitsko tehnologijo GNSS in predstavlja ogrodje novega slovenskega državnega koordinatnega sistema D96/TM (MOP, GURS, 2016a). Položajni koordinatni sistem D96/TM je realiziran s koordinatami postaj omrežja SIGNAL in temelji na skupnem evropskem koordinatnem sistemu ETRS89.

Geodetska uprava Republike Slovenije je vzpostavila omrežje SIGNAL, hkrati pa skrbi za vzdrževanje in delovanje omrežja ter stroške njegovega upravljanja, omrežje pa operativno upravlja Geodetski inštitut Slovenije oz. njegova služba za GNSS (Režek in sod., 2016)

Omrežje SIGNAL vodi in upravlja služba za GNSS iz centra omrežja, kateri s pomočjo programskega paketa za upravljanje centralno vodenih omrežij zbira in obdeluje opazovanja iz vseh GNSS postaj v omrežju, ki se stekajo v center v realnem času (MOP, GURS, 2016a). Ker deluje programski paket v realnem času, uporablja s satelita oddane efemeride (t.i. »broadcast efemeride«), ki so slabše natančnosti. Program ne vsebuje tako dovršene obdelave, saj je njegova naloga upravljanje z opazovanji GNSS in zagotavljanje korekcij signala za uporabnike v realnem času.

Podatki zenitne troposferske refrakcije v okviru omrežja SIGNAL so pridobljeni na relativni način, to je na osnovi baznih vektorjev med točkami, ki temeljijo na dvojnih faznih razlikah. Problem ocenjene vrednosti zenitne troposferske refrakcije v okviru omrežja SIGNAL je enaka kot v primeru programskega paketa Bernese.

5 OPIS PRIMERA

Meteorologi zbirajo podatke o zenitni troposferski refrakciji, ki predstavlja skupen vpliv zakasnitve dolžine signala od satelita do sprejemnika zaradi atmosfere, z namenom vključitve popravka v meteorološki model za izboljšanje modelske predstavitve vodne pare, ki jo je težko modelsko ovrednotiti. Zenitna troposferska refrakcija je pridobljena na podlagi izračuna s podatki meteorološkega modela ALADIN, ki predstavlja najboljši profil ozračja v tistem trenutku na lokaciji opazovanj in za meteorologe predstavlja vhodni podatek v model troposfere.

Pri obdelavi meritev GNSS se zenitna troposferska refrakcija pojavi kot pogrešek, ki ga je potrebno odstraniti. Ko odstranimo ostale pogreške, ki nastanejo pri merjenju opazovanj za določitev položaja z GNSS, lahko določimo velikost pogreška zenitne troposferske refrakcije, katere vpliv je izražen kot povečanje dolžine satelit – sprejemnik.

Cilj naše naloge je, da podatke zenitne troposferske refrakcije, pridobljene iz meteorološkega modela primerjamo s podatki, izračunanimi z različnimi metodami obdelave podatkov stalno delujočih GNSS-postaj.

Naloga je sestavljena iz dveh vrst primerjav. V prvem smo izračunali primerjavo zenitne troposferske refrakcije, pridobljene z geodetskimi metodami (PPP, Bernese, omrežje SIGNAL) z zenitno troposfersko refrakcijo, ki jo določi meteorološki model ALADIN. Te primerjave smo naredili za vsako postajo posebej in jih obravnavamo kot absolutne. Rezultate smo statistično analizirali in ovrednotili.

V drugem delu praktičnega dela naloge smo primerjali relativne vrednosti zenitne troposferske refrakcije. Le-te smo dobili tako, da smo vsem absolutnim vrednostim zenitne troposferske refrakcije, t.j. za vsako postajo posebej, odšteli zenitno troposfersko refrakcijo izbrane, referenčne postaje (izbrali smo si postajo Lendava). Nadaljnja primerjava, ki smo jo naredili, je bila primerjava relativnih zenitnih troposferskih refrakcij (glede na postajo Lendava), kjer smo primerjali le-te iz izračunov geodetskih metod z relativno troposfersko refrakcijo modela ALADIN. Tudi tu smo rezultate statistično analizirali in ovrednotili.

V sklepni fazi smo za obe vrsti izračuna izdelali grafične predstavitve rezultatov. Prikazali smo vrednosti zenitne troposferske refrakcije, razlike določitve troposferske refrakcije z geodetskimi metodami glede na določitve zenitne troposferske refrakcije z meteorološkim modelom, srednje vrednosti razlik, standardne odklone (std. odk.) ter vrednosti korena srednjega kvadratnega pogreška r.m.s. izračuna z geodetskimi metodami glede na model ALADIN. Standardni odklon obravnavamo

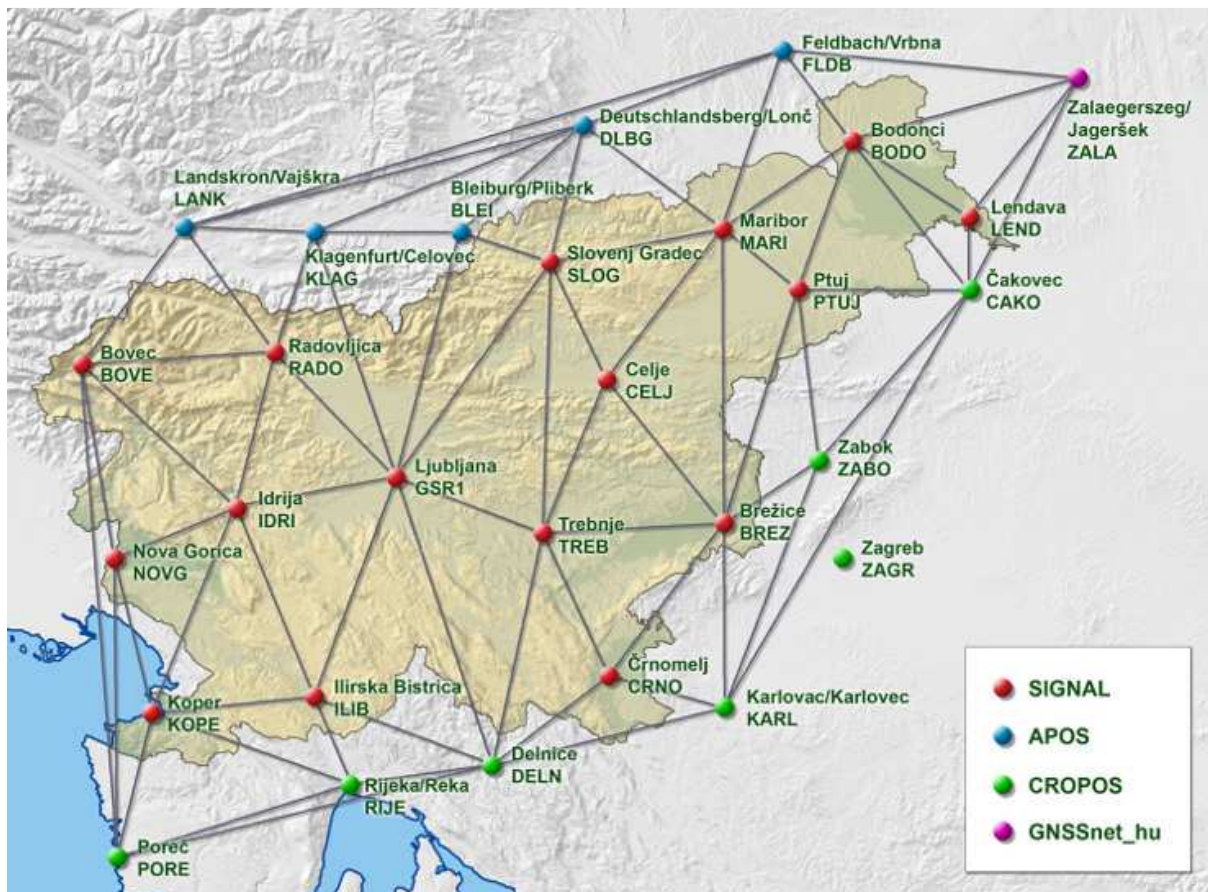
kot merilo natančnosti, r.m.s. pa kot merilo točnosti izračuna troposferske refrakcije z geodetskimi metodami obdelave opazovanj GNSS glede na izračun z meteorološkim modelom.

5.1 Izbor in priprava podatkov

Za analizo postopkov izračuna zenitne troposferske refrakcije smo uporabili opazovanja v strnjem časovnem obdobju od 15. 1. 2016 do 31. 1. 2016.

Podatke zenitne troposferske refrakcije smo pridobili na 16 stalno delujočih GNSS-postajah slovenskega državnega omrežja SIGNAL, 4 stalno delujočih GNSS-postajah avstrijskega omrežja APOS, 6 stalno delujočih GNSS-postajah hrvaškega omrežja CROPOS in od ene stalno delujoče GNSS-postaje madžarskega omrežja GNSSNet.hu.

Za 27 lokacij GNSS-opazovanj smo od agencije ARSO pridobili rezultate izračuna meteorološkega modela ALADIN in izvedli izračun zenitne troposferske refrakcije z metodo PPP in programskim paketom Bernese. Za iste lokacije smo tako pridobili tri izračune zenitne troposferske refrakcije z geodetskimi metodami in en izračun z meteorološkim modelom ALADIN, ki so nam omogočali izvedbo različnih analiz.



Slika 1: Mreža stalno delujočih GNSS-postaj SIGNAL (MOP, GURS, 2016c)

Preglednica 1: Seznam uporabljenih stalno delujočih GNSS-postaj omrežja SIGNAL (MOP, GURS, 2016b)

Oznaka	Ime postaje	Omrežje	Država
BLEI	Pliberg/Bleiburg	APOS	Avstrija
BODO	Bodonci	SIGNAL	Slovenija
BOVE	Bovec	SIGNAL	Slovenija
BREZ	Brežice	SIGNAL	Slovenija
CAKO	Čakovec	CROPOS	Hrvaška
CELJ	Celje	SIGNAL	Slovenija
CRNO	Črnomelj	SIGNAL	Slovenija
DELN	Delnice	CROPOS	Hrvaška
FLDB	Vrbna /Feldbach	APOS	Avstrija
GSR1	Ljubljana	SIGNAL	Slovenija
IDRI	Idrija	SIGNAL	Slovenija
ILIB	Ilirska Bistrica	SIGNAL	Slovenija
KARL	Karlovac/Karlovac	CROPOS	Hrvaška
KLAG	Celovec/Klagenfurt	APOS	Avstrija
KOPE	Koper	SIGNAL	Slovenija
LANK	Vajškra/Landskron	APOS	Avstrija
LEND	Lendava	SIGNAL	Slovenija
MARI	Maribor	SIGNAL	Slovenija
NOVG	Nova Gorica	SIGNAL	Slovenija
PORE	Poreč	CROPOS	Hrvaška
PTUJ	Ptuj	SIGNAL	Slovenija
RADO	Radovljica	SIGNAL	Slovenija
RIJE	Reka/Rijeka	CROPOS	Hrvaška
SLOG	Slovenj Gradec	SIGNAL	Slovenija
TREB	Trebnje	SIGNAL	Slovenija
ZABO	Zabok	CROPOS	Hrvaška
ZALA	Jageršek/Zalaegerszeg	GNSSNet.hu	Madžarska

Izrise smo izdelali v računalniškem programu za izdelavo izrisov Gnuplot (Gnuplot version 5.0., 2016).

Pri urejanju podatkov smo si pomagali s programom Gawk (Gawk, 2016).

5.1.1 Podatki meteorološkega modela ALADIN

Zaradi ločljivosti modelskega arhiva smo izbrali časovni interval v razmiku 3 ur pri izračunu zenitne troposferske refrakcije meteorološkega modela ALADIN. Izračunane vrednosti zenitne troposferske

refrakcije iz modela ALADIN se pričnejo z začetkom dneva (00:00) v univerzalnem koordinatnem času UTC in končajo ob 21:00 uri za vsak dan od 15.1.2016 do vključno z 31.1.2016, torej imamo 8. simuliranih vrednosti zenitne troposferske refrakcije za vsak izbrani dan.

Vsak izračunan podatek, to je meritev zenitne troposferske refrakcije predstavlja lomno točko v zvezni odsekoma linearni funkciji. Predpostavimo, da se vrednost zenitne troposferske refrakcije znotraj intervala spreminja linearno.

Podatki zenitne troposferske refrakcije pri meteorološkem modelu ALADIN v izbranem obdobju so z izjemo postaje Čakovec, kjer nimamo podatkov v skupnem obdobju daljšem od enega dne in postaji Poreč, kjer manjkajo podatki v skupnem obdobju daljšem od dveh dni, skoraj popolni. Manjka zgolj en sam podatek postaje Celje in še nekaj ločenih podatkov postaje Čakovec. Ob izpadu podatkov se uporabi linearna funkcija za določitev vrednosti zenitne troposferske refrakcije.

5.1.2 Podatki metod GNSS za določitev zenitne troposferske refrakcije

5.1.2.1 Podatki metode PPP

V nalogi primerjamo podatke zenitne troposferske refrakcije pridobljene iz meteorološkega modela s podatki, izračunanimi z različnimi metodami obdelave podatkov stalno delujočih GNSS-postaj.

Pri metodi PPP za vsak dan podanih opazovanj GNSS izračunamo koordinate vsake postaje, popravke ure sprejemnikov, fazne nedoločenosti in parametre zenitne troposferske refrakcije. Interval izračuna zenitne troposferske refrakcije z metodo PPP smo nastavili na vsako uro in pol, začeni ob začetku dneva (00:00) in z zaključkom ob 22:30 po času GPS. Tako dobimo 16 vrednosti zenitne troposferske refrakcije za vsak opazovani dan znotraj izbranega obdobja.

Zenitno troposfersko refrakcijo modeliramo kot zvezno odsekoma linearno funkcijo (Sterle in sod., 2014), kjer vsaka lomna točka predstavlja eno določitev zenitne troposferske refrakcije.

Predpostavimo, da se vrednost zenitne troposferske refrakcije znotraj intervala spreminja linearno. V primeru izpada signala, smo za trenutek izračuna vrednosti zenitne troposferske refrakcije uporabili trenutek izpada signala in nato trenutek, ko je bil signal spet na voljo.

Na določenih postajah so bili izpadi podatkov zenitne troposferske refrakcije za celoten dan in sicer po en dan za postaje Bovec, Čakovec, Ljubljana in Idrija ter dva dneva za postaji Bleiburg in Poreč.

Kljub temu izpadu, pa to ne bo vplivalo na kakovost pridobljenih rezultatov z metodo PPP, kot tudi ne na primerjavo z ostalimi metodami.

Z metodo PPP pridobimo podatke o suhi komponenti, mokri komponenti ter skupni vrednosti zenitne troposferske refrakcije. Vrednost suhe komponente je za posamezno postajo konstantna, mokra komponenta pa se spreminja tako skozi čas kot tudi po posameznih postajah.

5.1.2.2 Podatki omrežja SIGNAL

Vrednosti zenitne troposferske refrakcije, na osnovi podatkov omrežja SIGNAL smo pridobili na vsako minuto. Zaradi skladnosti z meteorološkim modelom ALADIN smo izbrali časovni interval v velikosti 3 ur, s pričetkom ob začetku dneva (00:00) in koncem ob 21:00 za vse dni v izbranem obdobju.

Vsak podatek o vrednosti zenitne troposferske refrakcije predstavlja lomno točko odsekoma zvezne linearne funkcije, med katerimi predpostavljamo, da se vrednost zenitne troposferske refrakcije spreminja linarno.

Manjkajočih vrednosti izračunane zenitne troposferske refrakcije ni veliko, in sicer za dva celotna manjkajoča dneva za postajo Poreč, en dan za postajo Čakovec ter le nekaj podatkov za postaji Čakovec in Celje.

5.1.2.3 Programski paket Bernese

Enako kot pri modelu PPP pridobimo tudi pri uporabi programskega paketa Bernese podatke zenitne troposferske refrakcije v razmiku ure in pol, torej od začetka dneva (00:00) do 22:30 za vse dni med katerimi smo primerjali zenitno troposfersko refrakcijo.

Posebnost programa Bernese pa je ta, da vsebuje dva podatka ob začetku dneva (00:00) in sicer se en nahaja v datoteki prejšnjega dne, torej kot zadnji podatek dneva - ob polnoči, drugi pa v datoteki naslednjega dne kot prvi podatek. Ta dva podatka sta med seboj različna zaradi samega izračuna, kar nam poda dodatno možnost analize točnosti in natančnosti izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije za posamezno postajo.

Pri odločitvi, katerega od podatkov uporabiti in katerega ne, smo se zaradi manjših skokov med intervali odločili za odstranitev podatka ob koncu dneva, z izjemo zadnjega dne, ko imamo na voljo le podatek ob koncu dneva oz. 2. 1. 2016 ob 00:00.

Tudi pri rezultatih programa Bernese gre za modeliranje podatkov z linearno funkcijo, v kateri predstavljajo lomne točke vrednosti zenitne troposferske refrakcije, med njimi pa predpostavljamo, da se vrednosti spreminjajo linearno.

Kot pri ostalih metodah določitve zenitne troposferske refrakcije tudi pri programskem paketu Bernese ni šlo brez manjkajočih podatkov, je pa le teh najmanj od vseh treh geodetskih metod izračuna zenitne troposferske refrakcije in sicer zopet dva dni za postajo Poreč ter en dan za postajo Čakovec ter nekaj podatkov postaje Celje in Čakovec. Ker so manjkajoči dnevi večinoma enaki pri vseh štirih omenjenih metodah, nam to ne predstavlja večje težave pri primerjavi izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije.

5.2 Rezultati in ovrednotenje

V nalogi smo obravnavali določitev absolutne in relativne zenitne troposferske refrakcije.

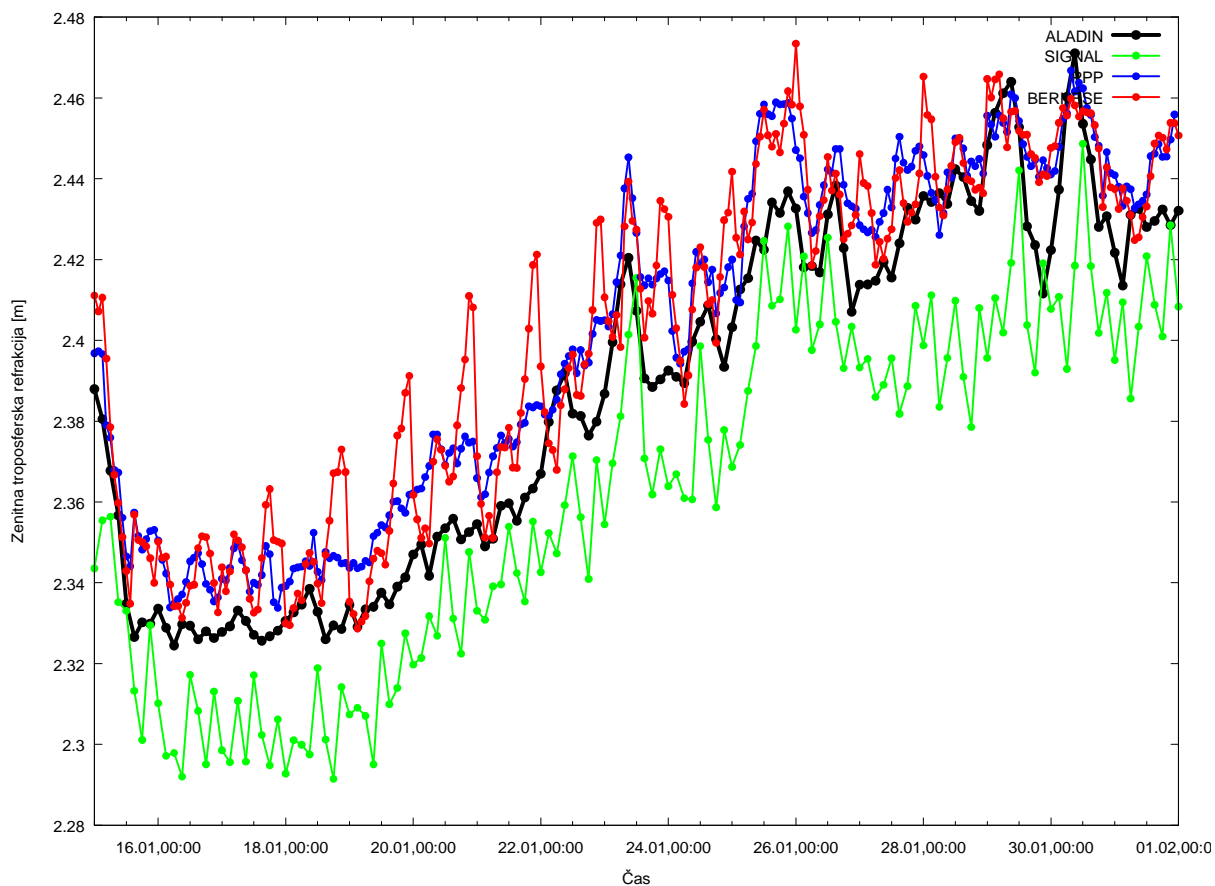
5.2.1 Analize absolutnega načina

V absolutnem načinu pridobimo rezultate zenitne troposferske refrakcije za obravnavane postaje. Izdelamo razlike vrednosti zenitne troposferske refrakcije izračunane z geodetskimi metodami glede na vrednosti zenitne troposferske refrakcije izračunane z meteorološkim modelom ALADIN. Tako pridobimo osnovne statistične količine in sicer srednje vrednosti in standardne odklone ter vrednosti r.m.s. razlik izračuna z geodetskimi metodami glede na izračun z modelom ALADIN.

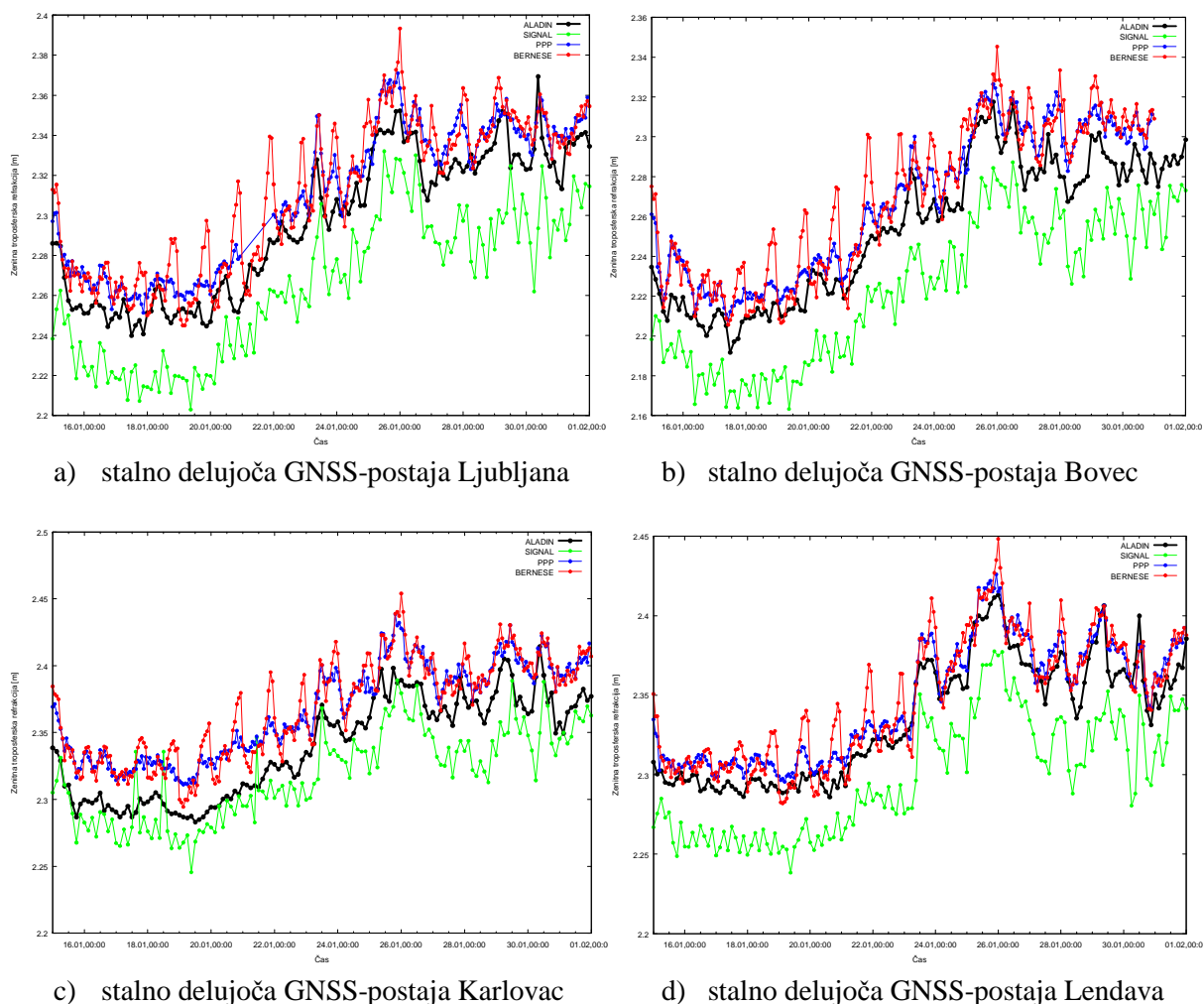
5.2.1.1 Absolutne vrednosti zenitne troposferske refrakcije

Z zgoraj omenjenimi štirimi metodami smo pridobili vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije. Iz pridobljenih rezultatov vidimo, da metode niso zagotovile popolnoma identičnih rezultatov ampak se pojavijo določena odstopanja med njimi. Najnižja vrednost zenitne troposferske refrakcije se giblje okoli 2,06 postaje Delnice pri omrežju SIGNAL, najvišja pa malo pod 2,48 pri metodi PPP na postaji Koper. Na primeru stalno delujoče postaje Koper vidimo, da se izračunane vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije gibljejo med približno 2,3 in 2,5 m za vse obravnavane metode. V splošnem je zenitna troposferska refrakcija, izračunana v omrežju SIGNAL

najmanjša, po velikosti zenitne troposferske refrakcije ji nato sledijo meteorološki model ALADIN, PPP in Bernese. To velja za praktično vse postaje GNSS.



Grafikon 1: Izračunane vrednosti zenitne troposferske refrakcije za stalno delujočo GNSS-postajo Koper



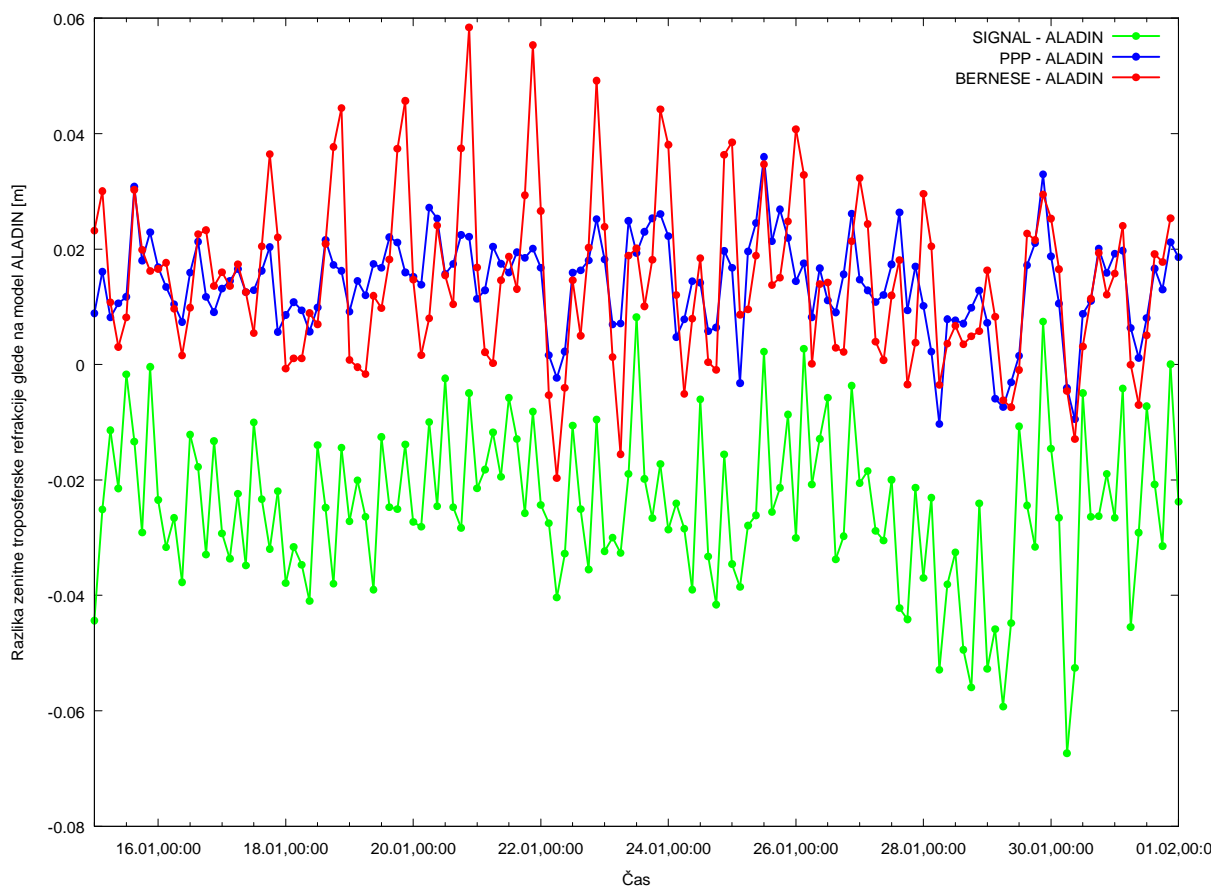
Grafikon 2: Izračunane vrednosti zenitne troposferske refrakcije za nekatere stalno delujoče postaje GNSS

5.2.1.2 Absolutne razlike med geodetskimi metodami izračuna glede na meteorološki model ALADIN

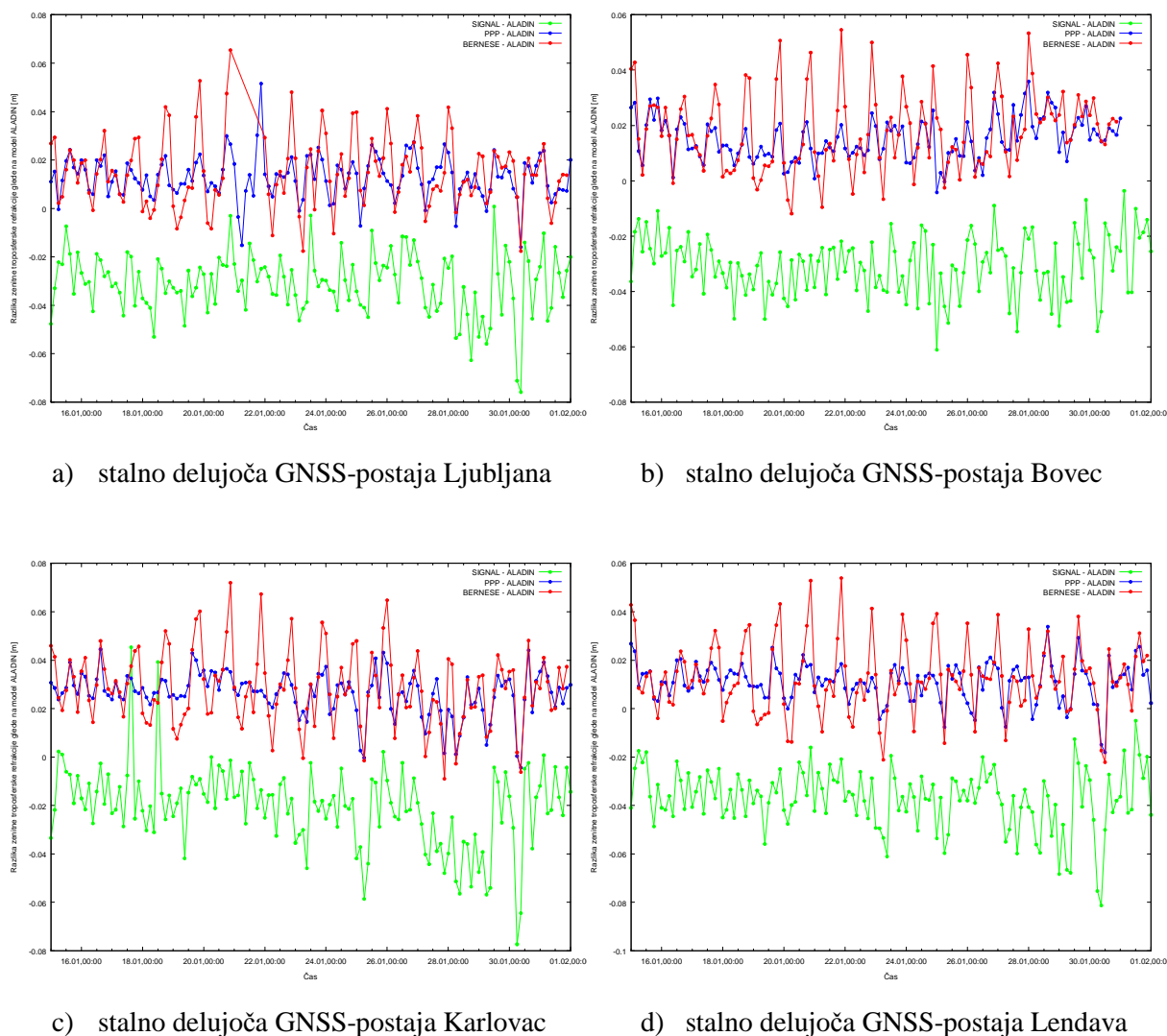
Meteorološki model ALADIN uporabimo za referenco pri določitvi zenitne troposferske refrakcije. Med seboj primerjamo vrednosti zenitne troposferske refrakcije izračunane z geodetskimi metodami na osnovi meritev GNSS in sicer tako, da tvorimo razlike med vrednostmi, pridobljenimi z geodetskimi metodami in vrednostmi, pridobljenimi z modelom ALADIN.

Rezultati so prikazani v grafikonu 3 in 4. Rezultati, pridobljeni z metodo PPP sledijo rezultatom izračuna z modelom ALADIN tekom celotnega časovnega obdobja in so v večini nekoliko večje vrednosti. Enako velja za rezultate metode Bernese, s to razliko, da vrednosti zenitne troposferske refrakcije pri tej metodi niso tako skladne. Rezultati prikazujejo velika nihanja vrednosti določene z

metodo Bernese, zato so ta odstopanja precej večja. Rezultati izračuna omrežja SIGNAL pa so skoraj v celoti manjša od rezultatov izračunih z modelom ALADIN. Tudi tu vidimo velika nihanja. Podobne podatke pridobimo za vse opazovane postaje.



Grafikon 3: Razlike izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije za stalno delujočo GNSS-postajo Koper glede na vrednosti določene z modelom ALADIN



Grafikon 4: Razlike izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije za nekatere stalno delujoče GNSS-postaje glede na vrednosti določene z modelom ALADIN

5.2.1.3 Srednja vrednost in standardni odklon razlik pri absolutnem načinu

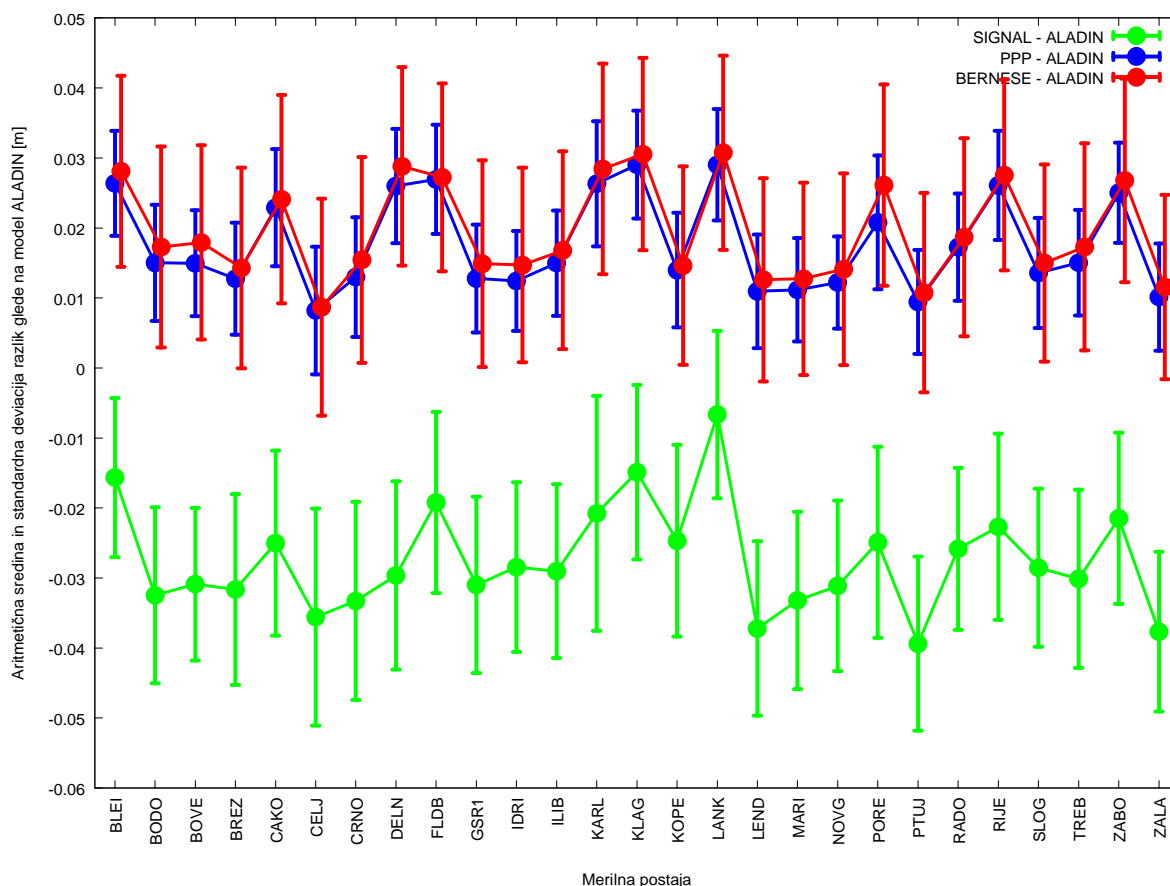
Za konkretnije ovrednotenje rezultatov uporabimo statistične metode, od katerih sta najpomembnejša statistična parametra srednja vrednost in standardni odklon.

Izračunali smo povprečje razlik vrednosti zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod in meteorološkega modela ALADIN. Razlik izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije med njimi nebi smelo biti, torej bi morala aritmetična sredina (arit. sr.) znašati nič, če bi bile spremenljivke enake. Ker pa se med seboj razlikujejo, imamo določeno odstopanje.

Aritmetična sredina razlik izračunanih vrednosti zenitnih troposferskih refrakcij z geodetskimi metodami glede na vrednosti določene z modelom ALADIN nam pove, kako se v povprečju razlikujejo vrednosti zenitne troposferske refrakcije določene z geodetskimi metodami z vrednostmi določenimi z modelom ALADIN.

Za razlago o skladnosti izračuna z meteorološkim modelom in izračunom z geodetskimi metodami zenitne troposferske refrakcije moramo poleg srednje vrednosti določiti še drug statistični parameter – standardni odklon. Ta nam pove, kako so vrednosti razlik zenitne troposferske refrakcije, določene z geodetskimi metodami glede na vrednosti določene z meteorološkim modelom ALADIN, razpršene okoli aritmetične sredine razlik obeh vrednosti. Za predstavitev razpršenosti izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije z geodetskimi metodami glede na vrednosti določene z meteorološkim modelom ALADIN pa uporabimo vrednosti korenov srednjih kvadratnih pogreškov r.m.s.

V spodnjem grafikonu imamo s krogi podane izračunane vrednosti aritmetične sredine razlik pri absolutnem načinu določitve zenitne troposferske refrakcije med geodetskimi metodami in meteorološkim modelom, medtem ko so z navpičnimi črtami prikazane njihove razpršenosti oz. standardni odkloni.



Grafikon 5: Aritmetična sredina in standardni odklon razlik izračunane vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije za obravnavane merilne postaje glede na vrednosti določene z modelom ALADIN

Zaradi boljše preglednosti smo v grafikonu 5 prikaze malo zamaknili.

Preglednica 2: Statistike razlik vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom

Statistike	PPP			BERNESE			SIGNAL		
	Povprečje [m]	Std. odk [m]	r.m.s. [m]	Povprečje [m]	Std. odk [m]	r.m.s. [m]	Povprečje [m]	Std. odk [m]	r.m.s. [m]
Minimum	0,00821	0,00658	0,01052	0,00868	0,01317	0,01577	-0,03939	0,01091	0,04087
Maksimum	0,02904	0,00956	0,03057	0,03075	0,01548	0,03443	-0,00664	0,01679	0,01806
Arit. sr.	0,01764	0,00790	0,01933	0,01947	0,01420	0,02410	-0,02745	0,01280	0,03028

Vidimo, da so povprečja razlik pri metodi PPP in Bernese glede na model ALADIN za posamezne postaje podobne. Aritmetična sredina razlik zenitne troposferske refrakcije vseh obravnavanih merilnih postaj metode PPP glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom ALADIN je nekoliko manjša kot pri metodi Bernese. Podobnost med vrednostmi izračunanimi z obema metodama

je vidna iz podatkov aritmetičnih sredin na vseh obravnavanih postajah. Od meteorološkega modela najbolj odstopa povprečje pri omrežju SIGNAL, kar kaže na slabo točnost metode glede na metodo ALADIN. Največjo točnost torej dosega metoda PPP, vendar metoda Bernese iz vidika aritmetične sredine ne zaostaja veliko. Lahko rečemo, da obe metodi dosejata dobro točnost in da so povprečne razlike glede na meteorološki model majhne.

Vrednost standardnega odklona metode PPP glede na model ALADIN se nahaja pod 8 mm, kar predstavlja nizko razpršenost rezultatov in pomeni, da metoda PPP zagotavlja vrednosti absolutne troposferske refrakcije z visoko natančnostjo oziramo so izračunane vrednosti primerljive z vrednostmi izračunanimi z meteorološkim modelom ALADIN. Pri izračunu v omrežju SIGNAL so vrednosti razlik absolutne zenitne troposferske refrakcije glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom ALADIN večje. Ocenimo, da dosegajo slabo natančnost, saj je razpršenost okoli srednje vrednosti velika. Metoda Bernese izračuna vrednosti zenitne troposferske refrakcije stalnih postaj med seboj zelo podobno, saj sta največja in najmanjša vrednost standardnega odklona razlik zenitne troposferske refrakcije vseh postaj v razmiku nekaj desetnih milimetra. Vseeno govorimo o slabi natančnosti določitve zenitne troposferske refrakcije z metodo Bernese, saj je standardni odklon razlik glede na vrednosti izračunanih z meteorološkim modelom ALADIN od izbranih metod največji.

Koren srednjega kvadratnega pogreška r.m.s., ki ga, izračunamo iz poprečnega odstopanja vrednosti izračunanih na oba načina in standardnega odklona, pove, kako točen je izračun s posamezno geodetsko metodo v primerjavi z meteorološkim modelom pri izračunu zenitne troposferske refrakcije. Iz rezultatov v preglednici 2 vidimo, da metoda PPP dosega najvišjo točnost zenitne troposferske refrakcije v primerjavi z meteorološkim modelom ALADIN, nekoliko slabšo točnost dosega programski paket Bernese, medtem ko omrežje SIGNAL dosega najslabšo točnost od omenjenih metod.

Vidimo, da je z metodo PPP izračunana absolutna troposferska refrakcija najbolj skladna z izračunom pridobljenim z meteorološkim modelom, kar se kaže tako v majhnem standardnem odklonu kot tudi majhni aritmetični sredini razlik vrednosti zenitne troposferske refrakcije metode PPP glede na izračunane vrednosti modela ALADIN. Metoda Bernese in izračun v omrežju SIGNAL ocenita absolutno troposfersko refrakcijo slabo. Metoda PPP deluje v absolutnem načinu določitve zenitne troposferske refrakcije, zato oceni absolutno troposfersko refrakcijo dobro, s tem pa zagotovi, da deluje tudi v relativnem načinu dobro.

Razlog, zakaj prihaja do odstopanj vrednosti zenitne troposferske refrakcije metode Bernese glede na izračunane vrednosti modela ALADIN, ki se kažejo kot velika spremenljivost vrednosti določene z metodo Bernese, je v tem, da v izračunu pri metodi Bernese odpade absolutna troposferska refrakcija s sestavo enojnih in dvojnih faznih razlik. Zamiki se torej pojavijo, ker metoda deluje v relativnem načinu in ne upošteva vpliva absolutne troposferske refrakcije in posledično oceni celotno absolutno troposfersko refrakcijo s slabo natančnostjo. Enako velja za izračun v omrežju SIGNAL. Zato pa lahko pričakujemo, da bodo rezultati izračuna relativne zenitne troposferske refrakcije s programom Bernese tudi v omrežju SIGNAL kvalitetnejši.

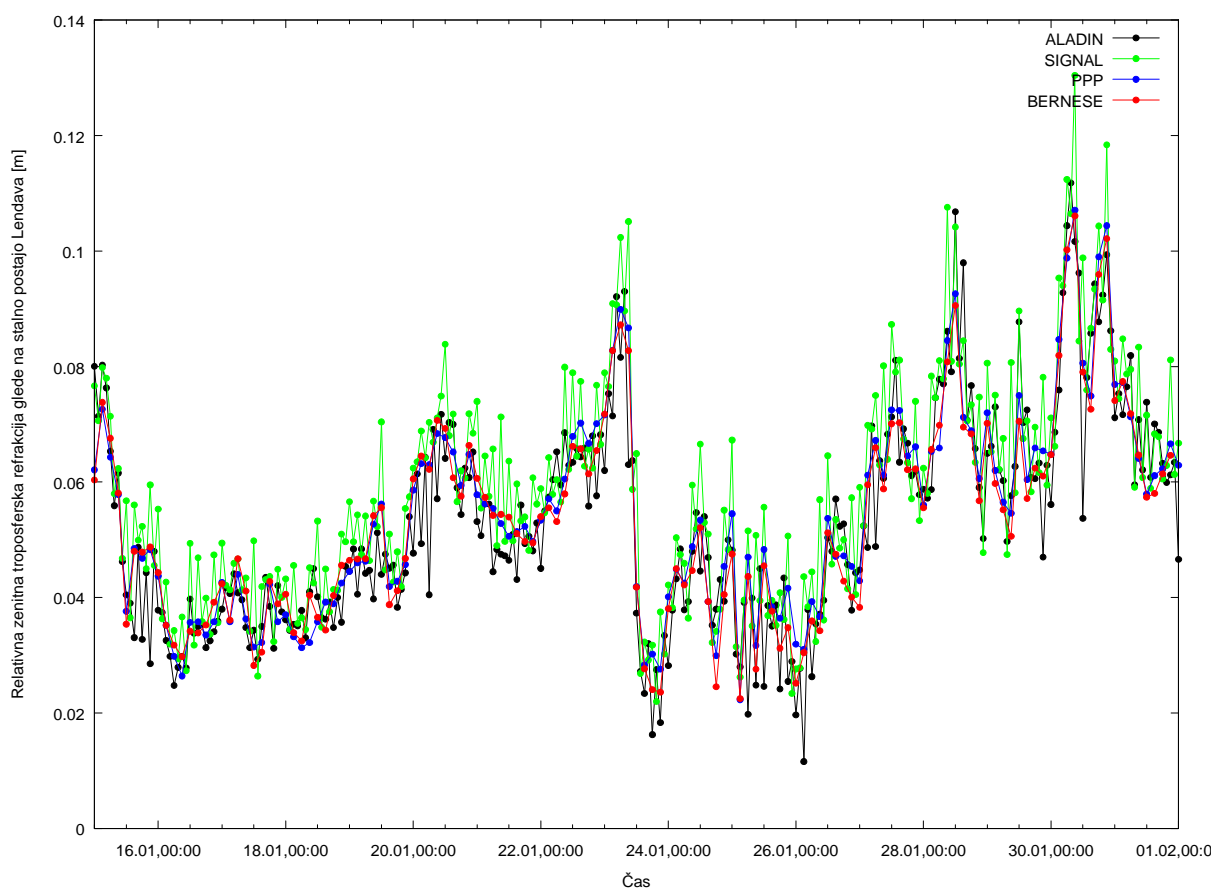
5.2.2 Analize relativnega načina

Tako kot pri izračunu absolutne zenitne troposferske refrakcije tudi pri izračunu relativne zenitne troposferske refrakcije obravnavamo pridobljene rezultate za postaje GNSS omrežja SIGNAL. Pridobimo razlike vrednosti zenitne troposferske refrakcije izračunane z geodetskimi metodami glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom ALADIN ter statistične parametre in sicer srednje vrednosti in standardni odklon razlik zenitne troposferske refrakcije. Tretji statistični parameter r.m.s. v relativnem načinu predstavlja mero točnosti izračuna relativne zenitne troposferske refrakcije, določen z geodetskimi metodami glede na vrednosti določene z meteorološkim modelom ALADIN.

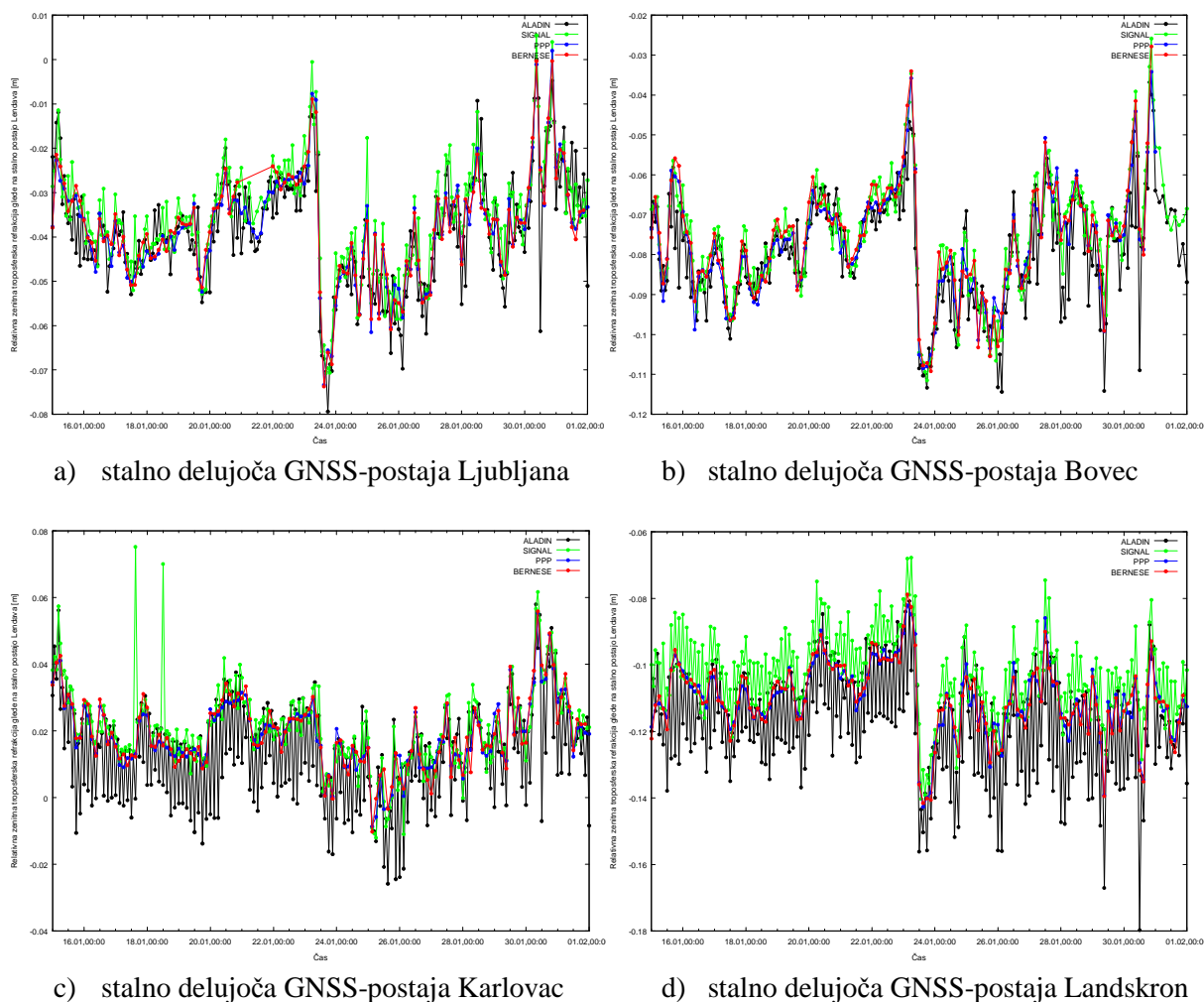
5.2.2.1 Relativne vrednosti zenitne troposferske refrakcije

Določitev položaja GNSS v geodeziji v večini primerov poteka kot določitev relativnega položaja, kar nam omogoča določitev razlike med zenitno troposfersko refrakcijo dveh postaj. Kot referenčno postajo smo si v naših izračunih izbrali postajo Lendava, ki je od večine preostalih postaj najbolj oddaljena. V izračunu relativne troposferske refrakcije smo torej izračunali razlike med vrednostmi absolutne zenitne troposferske refrakcije vseh GNSS-referenčne in GNSS-postaje Lendava.

Vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije za GNSS-postaje, za katere smo izvedli meritve, se gibljejo med $-0,21$ m za GNSS-postajo Delnice, pa do $0,13$ m za GNSS-postajo Koper. Na grafikonu 6 predstavljamo vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije za GNSS-postajo Koper. Razpon vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije se giblje od približno $0,01$ m do $0,13$ m. Za toliko so torej izračunane vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije za GNSS-postajo Koper večje od vrednosti za GNSS-postajo Lendava.



Grafikon 6: Relativna zenitna troposferska refrakcija med stalno delujočo GNSS-postajo Koper in stalno delujočo GNSS-postajo Lendava.



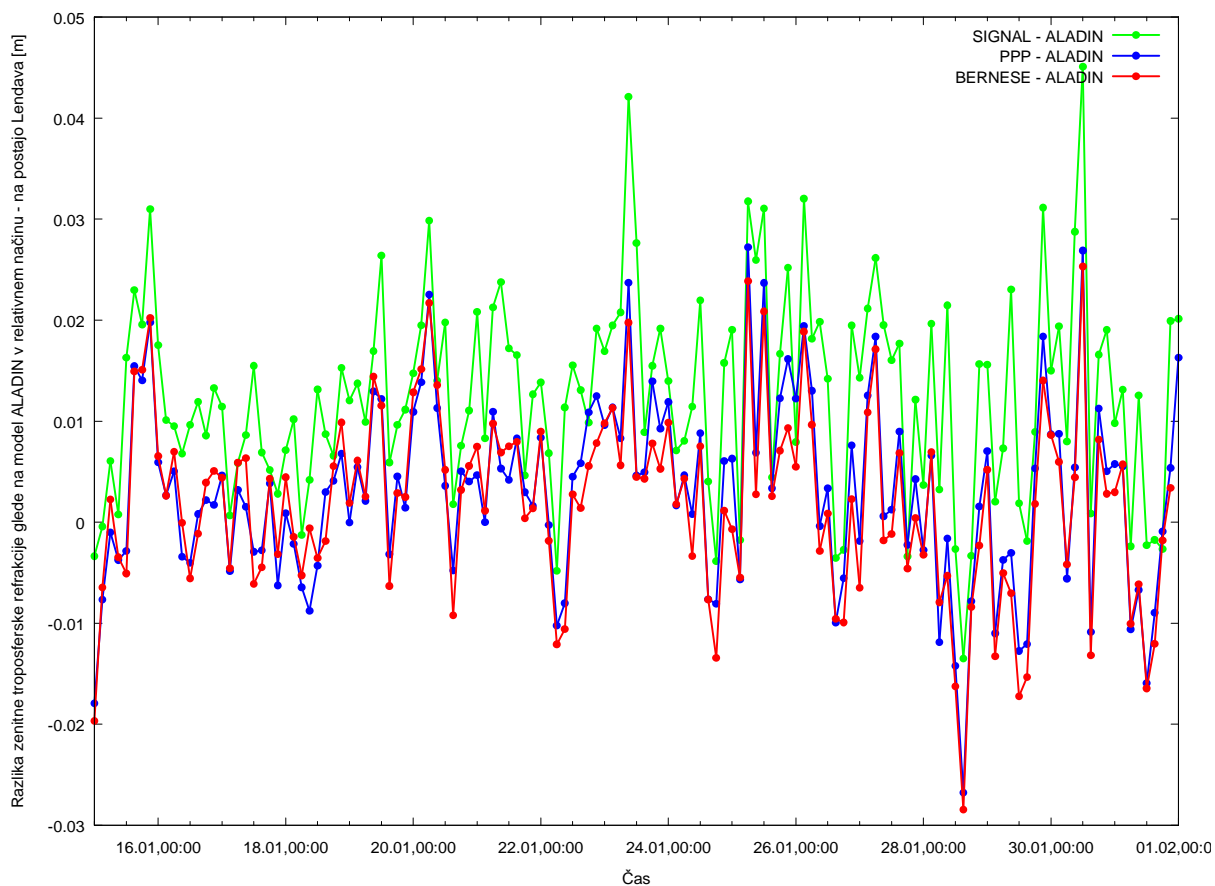
Grafikon 7: Relativna zenitna troposferska refrakcija med nekaterimi stalno delujočimi GNSS-postajami in stalno delujočo GNSS postajo Lendava

5.2.2.2 Razlike relativne zenitne troposferske refrakcije, določene z geodetskimi metodami glede na vrednosti določene z meteorološkim modelom ALADIN

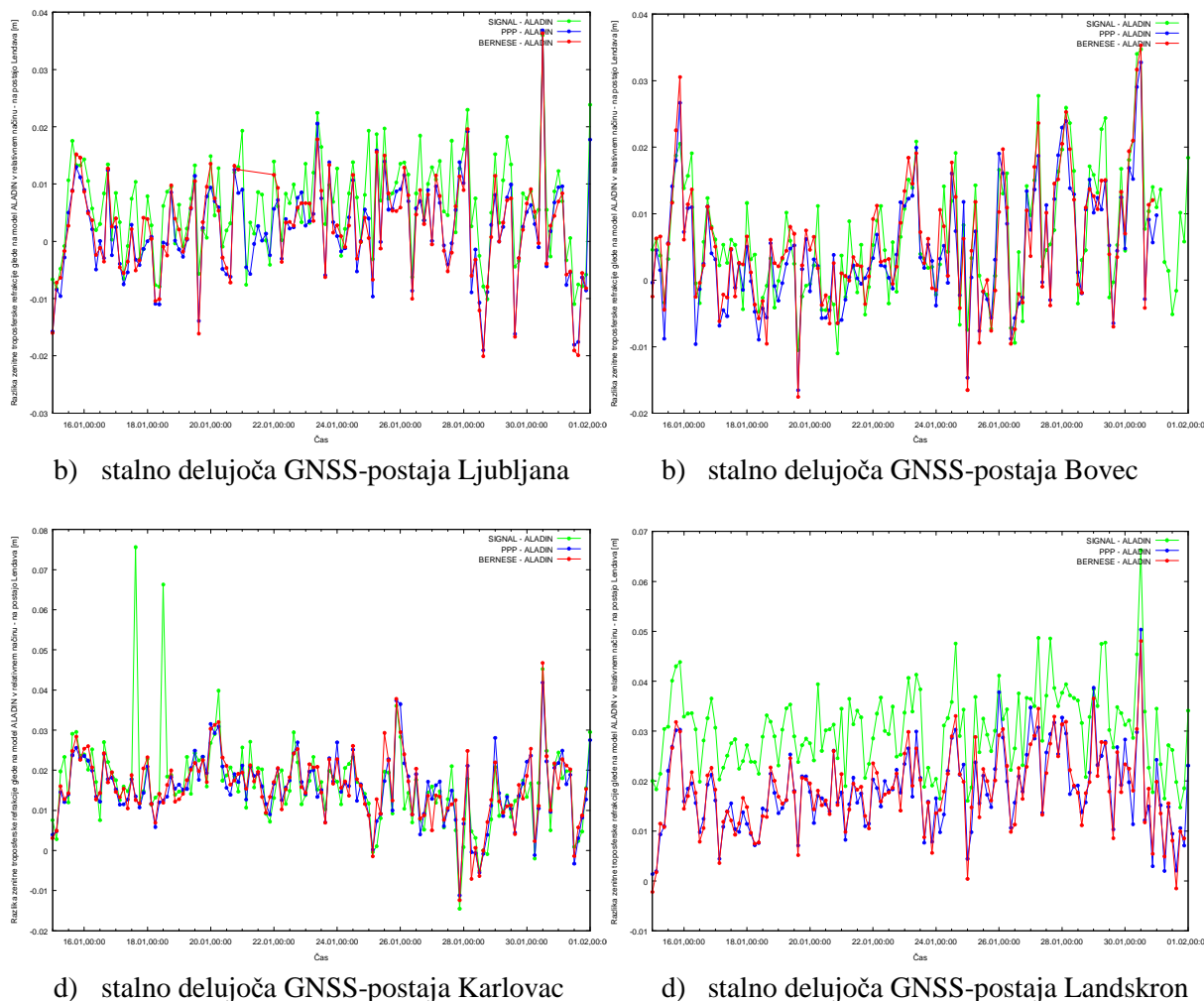
Za referenčen izračun relativne zenitne troposferske refrakcije ponovno izberemo izračun z meteorološkim modelom ALADIN. Vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije pridobljene z modelom ALADIN odštejemo od relativnih vrednosti, določenih z geodetskimi metodami zenitne troposferske refrakcije. Rezultati so predstavljeni v grafu 8 in 9.

Ob pogledu na rezultate relativne vrednosti zenitne troposferske refrakcije in relativnih razlik geodetskih metod glede na model ALADIN vidimo, da so vrednosti določitev precej skladne. Večji skoki so opazni za postajo Koper pri izračunu omrežja SIGNAL. V splošnem pa vidimo največ nihanj pri modelu ALADIN. Izračunane vrednosti metode PPP in Bernese delujeta zelo skladno. Ravno zaradi velikih nihanj pri relativnih vrednostih meteorološkega modela so relativne razlike metod glede

na model ALADIN kar opazne. Gibljejo se med vrednostjo -0,03 m za GNSS-postajo Celje do 0,08 m za GNSS-postajo Karlovac.



Grafikon 8 : Razlike vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod glede na vrednost izračunane z modelom ALADIN stalno delujoče GNSS-postaje Koper glede na stalno delujočo GNSS-postajo Lendava

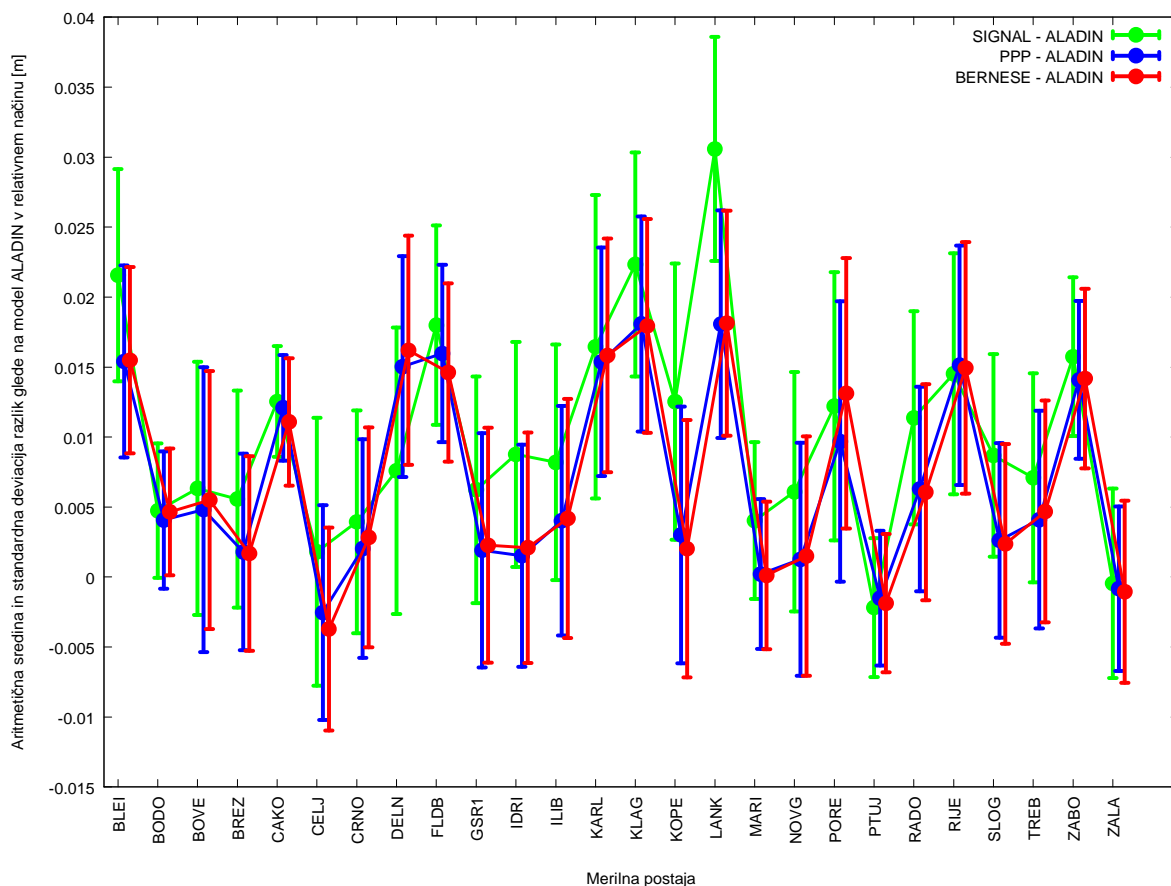


Grafikon 9 : Razlike vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod glede na vrednost izračunane z modelom ALADIN nekaterih stalno delujočih GNSS-postaj glede na stalno delujočo GNSS-postajo Lendava

5.2.2.3 Srednja vrednost in standardni odklon razlik pri relativnem načinu

Na grafikonu 10 prikazujemo izračunane aritmetične sredine in standardne odklone razlik za relativno določitev zenitne troposferske refrakcije med geodetskimi metodami in modelom ALADIN glede na GNSS-postajo Lendava. Povprečja razlik relativne zenitne troposferske refrakcije z metodama Bernese in PPP so skoraj identične za vse postaje. Odstopanja vrednosti glede na izračunane z metodo ALADIN znašajo med $-0,005$ m in $0,02$ m za obe metodi, za izračun v omrežju SIGNAL so vrednosti malenkost večje in znašajo do $0,03$ m. So pa odstopanja posameznih postaj v omrežju SIGNAL glede na ostali geodetski metodi večja. Prav tako so vrednosti standardnega odklona pri določitvi zenitne troposferske refrakcije z geodetskimi metodami med seboj izjemno skladni, kar še posebej velja za metodi Bernese in PPP. Skladnost izračunanih vrednosti je očitna tudi za izračune z geodetskimi

metodami in meteorološkimi modelom, saj se vsi standardni odkloni gibljejo med približno 0,005 in 0,01 m, torej znotraj ozkega intervala.



Grafikon 10: Vrednosti aritmetične sredine in standardnega odklona razlik relativne zenitne troposferske refrakcije glede na izračun z modelom ALADIN v relativnem načinu za obravnavane GNSS-postaje glede na GNSS-postajo Lendava

Grafikon 10 prikazuje vrednosti aritmetične sredine in standardne odklone razlik za izračunane vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije z geodetskimi metodami in meteorološkimi modelom glede na GNSS-postajo Lendava. Standardni odkloni in srednje vrednosti so označeni na enak način kot v grafikonu 5. Zaradi boljše preglednosti smo v grafikonu vrednosti izračunane z metodama PPP in Bernese zamaknili nekoliko v desno.

Preglednica 3: Statistike razlik vrednosti relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod in meteorološkega modela ALADIN glede na GNSS-postajo Lendava

Statistike	PPP			BERNESE			SIGNAL		
	Povprečje [m]	Std. odk [m]	r.m.s. [m]	Povprečje [m]	Std. odk [m]	r.m.s. [m]	Povprečje [m]	Std. odk [m]	r.m.s. [m]
Minimum	-0,00254	0,00377	0,00455	-0,00372	0,00453	0,00586	-0,00218	0,00395	0,00451
Maksimum	0,01808	0,01001	0,02067	0,01814	0,00966	0,03443	0,03058	0,01085	0,03245
Arit. sr.	0,00697	0,00728	0,01008	0,00711	0,00743	0,01028	0,01016	0,00775	0,01278

Iz preglednice 3 je dobro razvidna podobnost aritmetične sredine in standardnega odklona razlik relativne zenitne troposferske refrakcije vseh obravnavanih merilnih postaj metod PPP in Bernese glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom ALADIN, kjer je podobnost metode PPP le malenkost boljša od metode Bernese. Zelo majhno povprečje govori o visoki točnosti metod, nizek standardni odklon pa o veliki natančnosti, ki jo metodi dosežeta v načinu določitve relativne zenitne troposferske refrakcije. Izračuni omrežja SIGNAL dosežajo nekoliko slabše povprečje razlik relativne zenitne troposferske refrakcije vseh obravnavanih merilnih postaj glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom ALADIN v primerjavi z metodama Bernese in PPP. Tudi največja srednja vrednost izračunanih rezultatov posameznih GNSS-postaj pri metodi je velika. Kljub temu pa so rezultati izračunov precej boljši kot v izračunu absolutne zenitne troposferske refrakcije, tako lahko govorimo o visoki točnosti relativne zenitne troposferske refrakcije tudi pri metodi SIGNAL. Standardni odklon pa je na ravni ostalih dveh metod, zato tudi izračun s programskim paketom, ki upravlja omrežja SIGNAL dosega visoko natančnost relativne zenitne troposferske refrakcije. Izračunane vrednosti r.m.s. zenitne troposferske refrakcije z geodetskimi metodami glede na izračun z meteorološkim modelom ALADIN kažejo na veliko skladnost izračuna z metodo PPP in s programom Bernese. Nekoliko slabšo točnost pridobimo z uporabo programske opreme, ki upravlja omrežje SIGNAL. Vsi določeni statistični parametri pa kažejo na bistveno boljše ujemanje rezultatov, določenih v relativnem kot v absolutnem načinu za vse obravnavane metode.

Kot smo že omenili, je v nalogah določitve položaja visoke kakovosti z GNSS najbolj v uporabi določitev relativnega položaja, ki ga pridobimo z uporabo faznih razlik. Visoka podobnost izračunanih vrednosti relativne troposferske refrakcije na osnovi opazovanj GNSS je pričakovana, saj metoda Bernese deluje v relativnem načinu. Podobnost izračunanih vrednosti relativne troposferske refrakcije metode Bernese do PPP je tudi pričakovana, saj sta obdelavi podatkov opazovanj pri metodah PPP in Bernese dokaj podobni. Metodi poskušata modelirati in odstraniti skoraj vse sistematične pogreške, ki so prisotni v opazovanjih, v velikosti večji od milimetra. Nekoliko večje razlike nastanejo pri metodi SIGNAL, kar pa je tudi pričakovano, saj deluje v realnem času in za izračun uporablja efemeride slabše natančnosti prav tako pa tudi sama obdelava ni tako dovršena.

Pri primerjavi izračunanih vrednosti absolutne in relativne zenitne troposferske refrakcije vidimo, da se napake, ki se pojavijo v vrednostih absolutne refrakcije v vrednostih relativne refrakcije izničijo. Ker se pojavijo pri vseh postajah enako. To je tudi eden od razlogov za boljše rezultate vrednosti relativne glede na rezultate absolutne zenitne troposferske refrakcije.

5.2.3 Podvojen izračun zenitne troposferske refrakcije z metodo Bernese

Kot smo v prejšnjem poglavju že omenili imamo pri programu Bernese dva podatka ob začetku dneva (00:00:00) to je en ob koncu prejšnjega dne, kot zadnji podatek v dnevu, drugi pa v naslednjem dnevu kot prvi podatek.

V preglednici 4 podajamo primerjavo med podvojenimi izračunanimi vrednostmi zenitne troposferske refrakcije ob koncu prejšnjega in začetku naslednjega dne z modelom Bernese, izračunane za isti časovni trenutek. Standardni odklon znaša 0,01377 m, zato lahko rečemo da je razlika relativno velika. Povprečje je 0,00560 m, torej se zaradi negativno in pozitivno predznačenih podatkov razlika med njimi skoraj izniči. Ob pogledu na ostale postaje vidimo podobne rezultate.

Preglednica 4: Dvojne vrednosti zenitne troposferske refrakcije določene s programskim paketom Bernese za GNSS-postajo Koper ob koncu obravnavanega dne (24:00:00) in ob začetku naslednjega dne (00:00:00) za celotno obravnavano obdobje

Dan in ura	Konec obravnavanega dne (24:00:00) [m]	Začetek naslednjega dne (00:00:00) [m]	Razlika [m]
16. 01. 2016; 00:00:00	2,33988	2,35018	-0,01030
17. 01. 2016; 00:00:00	2,33589	2,34382	-0,00793
18. 01. 2016; 00:00:00	2,34394	2,32992	0,01402
19. 01. 2016; 00:00:00	2,36227	2,33532	0,02695
20. 01. 2016; 00:00:00	2,37835	2,36174	0,01661
21. 01. 2016; 00:00:00	2,39176	2,37134	0,02042
22. 01. 2016; 00:00:00	2,41536	2,39355	0,02181
23. 01. 2016; 00:00:00	2,43226	2,41066	0,02160
24. 01. 2016; 00:00:00	2,43931	2,43061	0,00870
25. 01. 2016; 00:00:00	2,45746	2,44175	0,01571
26. 01. 2016; 00:00:00	2,47244	2,47343	-0,00099
27. 01. 2016; 00:00:00	2,44284	2,44610	-0,00326
28. 01. 2016; 00:00:00	2,45291	2,46531	-0,01240
29. 01. 2016; 00:00:00	2,44883	2,46470	-0,01587
30. 01. 2016; 00:00:00	2,45012	2,44764	0,00248
31. 01. 2016; 00:00:00	2,42952	2,43745	-0,00793

Vidimo, da so vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije za isti časovni trenutek različne, zato nas zanimajo razlogi za takšno delovanje programa Bernese. Modeliranje zenitne troposferske refrakcije pri programu Bernese poteka na relativen način, kakor tudi določitev položaja na osnovi GNSS-opazovanj. Iz grafikonov vidimo, da se tekom dneva vrednost zenitne troposferske refrakcije povečuje ali zmanjšuje do konca dneva in doseže najvišjo oz. najnižjo vrednost ravno ob polnoči. Pri prvem podatku naslednjega dne pa pogosto opazimo večjo spremenljivost v vrednostih zenitne troposferske refrakcije. Torej gre izračunana vrednost troposferske refrakcije proti zaključku dneva v ekstrem, izven meja realnih vrednosti.

5.2.4 Podvojen izračun zenitne troposferske refrakcije z metodo PPP

Tudi pri metodi PPP imamo podvojene izračunane vrednostmi zenitne troposferske refrakcije ob koncu prejšnjega in začetku naslednjega dne. Z razliko od metode Bernese ne gre za isti časovni trenutek, pač pa za krajšo časovno razliko bodisi 10 ali 30 sekund. Torej zadnji podatek v dnevu se nanaša na (23:59:30) ali (23:59:50), začetek naslednjega dne pa ob (00:00:00).

Podvojene vrednosti izračunane zenitne troposferske refrakcije modela PPP podajamo v spodnji preglednici, ko gre za časovno skoraj identičen podatek in razlike med njima. Standardni odklon določen iz razlik podvojenih vrednosti zenitne troposferske refrakcije je velikosti 0,0059 m, zato ugotavljamo, da je razlika majhna, še posebej v primerjavi z standardnim odklonom metode Bernese. Povprečje znaša 0,0010 m, kar je majhna vrednost in kaže na podobnost obeh rezultatov. Tudi pri drugih obravnavanih postajah se kažejo zelo podobne rezultati.

Preglednica 5: Dvojni vrednosti zenitne troposferske refrakcije določene z metodo PPP za GNSS-postajo Koper ob skoraj identičnem trenutku ob zadnjem podatku obravnavanega dne in začetku naslednjega dne celotno obravnavano obdobje

Dan in ura	Konec dneva [m]	Začetek dneva [m]	Razlika [m]
16. 01. 2016; 00:00:00	2,3509	2,3505	0,0004
17. 01. 2016; 00:00:00	2,3436	2,3410	0,0026
18. 01. 2016; 00:00:00	2,3404	2,3392	0,0012
19. 01. 2016; 00:00:00	2,3478	2,3437	0,0041
20. 01. 2016; 00:00:00	2,3610	2,3622	-0,0012
21. 01. 2016; 00:00:00	2,3688	2,3659	0,0029
22. 01. 2016; 00:00:00	2,3791	2,3837	-0,0046
23. 01. 2016; 00:00:00	2,3945	2,4050	-0,0105
24. 01. 2016; 00:00:00	2,4081	2,4148	-0,0067
25. 01. 2016; 00:00:00	2,4286	2,4200	0,0086
26. 01. 2016; 00:00:00	2,4502	2,4471	0,0031
27. 01. 2016; 00:00:00	2,4373	2,4285	0,0088
28. 01. 2016; 00:00:00	2,4542	2,4459	0,0083
29. 01. 2016; 00:00:00	2,4522	2,4556	-0,0034
30. 01. 2016; 00:00:00	2,4503	2,4411	0,0092
31. 01. 2016; 00:00:00	2,4347	2,4409	-0,0062

Podvojene vrednosti istega časovnega trenutka nam prikazujejo kakovost metod določenih zenitnih troposferskih refrakcij, tako v smislu natančnosti, s katero lahko zenitno troposfersko refrakcijo ocenimo, kot tudi v smislu kakovosti modela, s katerim aproksimiramo zenitno troposfersko refrakcijo skozi čas kot odsekoma zvezno funkcijo.

Iz podobnosti dvojnih izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije z metodo PPP lahko zaključimo, da lahko s to metodo natančno ocenimo absolutno troposfersko refrakcijo. To se kaže v

nizkem standardnem odklonu in srednji vrednosti določeni iz razlik podvojenih zenitnih troposferskih refrakcij, katerih razmik je minimalen. To pa ne velja za programski paket Bernese, ki tudi na osnovi podvojenih rezultatov sodeč ne zagotavlja kakovostne vrednosti absolutne zenitne troposferske refrakcije. To opisuje res velik standardni odklon dveh časovno enakih podatkov.

Pri uporabi programskega paketa Bernese in programske opreme v omrežju SIGNAL ne pridobimo absolutne vrednosti zenitne troposferske refrakcije, saj je ta odstranjena s sestavo enojnih in dvojnih faznih razlik v relativnem načinu. Zato se pojavijo nenadni skoki, ki se prikažejo ob koncu oz. začetku dneva. Standardni odklon pri postaji Koper znaša skoraj 1,4 cm, pri nekaterih postajah pa so posamezni skoki še precej večji. Metoda PPP deluje v absolutnem načinu in upošteva vrednost absolutne troposferske refrakcije, zato so skoki ob skoraj istem časovnem trenutku bistveno manjši.

6 ZAKLJUČEK

V nalogi smo pokazali, da se da tudi z geodetskimi metodami, podrobneje z obdelavo GNSS-meritev, pridobljenih v omrežju stalno delujočih postaj GNSS, kakovostno izračunati zenitno troposfersko refrakcijo. Če upoštevamo še dejstvo, da je z geodetskimi metodami na osnovi troposferske refrakcije mogoče določiti količino vodne pare v atmosferi na bistveno cenejši način kot z meteorološkimi načini, lahko pričakujemo dodaten razvoj tega področja.

Zenitno troposfersko refrakcijo izračunano z meteorološkim modelom ALADIN smo primerjali s tremi različnimi geodetskimi metodami oziramo programsko opremo Bernese, PPP in v omrežju SIGNAL v izbranem časovnem obdobju. Pridobili smo zadostno količino podatkov, za sklepanje o podobnosti rezultatov pridobljenih z različnimi metodami določitve zenitne troposferske refrakcije.

Izvedli smo izračune in pripravili grafično predstavitev absolutne in relativne zenitne troposferske refrakcije. Za absolutno troposfersko refrakcijo smo za referenčne vrednosti uporabili vrednosti pridobljene z meteorološkim modelom ALADIN in izračunali razlike vrednosti pridobljenimi z geodetskimi metodami in modelom ALADIN. Izračunali smo aritmetično sredino, standardni odklon ter r.m.s. izračunanih vrednosti zenitne troposferske refrakcije z geodetskimi metodami glede na izračun z modelom ALADIN. Zenitno troposfersko refrakcijo postaje Lendava smo odšteli od vrednosti določene za ostale stalne postaje GNSS ter tako izračunali relativno zenitno troposfersko refrakcijo. Tudi tukaj smo izračunali razlike vrednosti določene z geodetskimi metodami glede na vrednosti pridobljene z modelom ALADIN, povprečne vrednosti odstopanj ter standardne odklone in vrednosti r.m.s. določene z geodetskimi metodami glede na vrednosti izračunane z meteorološkim modelom.

Iz vrednosti razlik metod glede na izračunane vrednosti z meteorološkim modelom v absolutnem načinu vidimo, da so vrednosti zenitne troposferske refrakcije metode PPP in Bernese v splošnem večje od zenitne troposferske refrakcije meteorološkega modela. Izračun omrežja SIGNAL pa v splošnem obsega manjše vrednosti zenitne troposferske refrakcije. Prav tako vidimo velike spremenljivosti v vrednosti zenitne troposferske refrakcije, določene s programskim paketom Bernese. V manjši meri vidimo spremenljivosti tudi v vrednosti zenitne troposferske refrakcije izračunane z omrežjem SIGNAL. To je posledica načina delovanja obeh metod, ki delujeta v relativnem načinu in kot taka izgubita podatek o absolutni troposferski refrakciji. Pri primerjavi zenitne troposferske refrakcije določene s programskim paketom Bernese in predvsem s programsko opremo, ki upravlja omrežje SIGNAL glede na vrednosti zenitne troposferske refrakcije določene z modelom ALADIN nastanejo velike razlike srednje vrednosti in velik standardni odklon razlik ter posledično velike

vrednosti r.m.s. Iz pridobljenih rezultatov zaključimo, da s programsko opremo, ki upravlja omrežje SIGNAL in s programskim paketom Bernese slabše ocenimo absolutno troposfersko refrakcijo in sicer v smislu točnosti kot natančnosti.

Da program Bernese slabo oceni absolutno troposfersko refrakcijo potrdijo tudi visoka odstopanja podvojenih podatkov zenitne troposferske refrakcije ob koncu obravnavanega dne in začetku naslednjega dne. Imamo dva podatka, ki se nanašata na časovno identičen trenutek, po velikosti pa sta si različna. Standardni odklon določen iz razlik podvojenih vrednosti zenitne troposferske refrakcije znaša skoraj 1,4 cm pri postaji Koper. To kaže na slabo natančnost programa Bernese pri določitvi absolutne troposferske refrakcije. Ravno obratno velja za metodo PPP, ki dobro oceni absolutno troposfersko refrakcijo, predvsem v smislu natančnosti, saj je standardni odklon vrednosti zenitne troposferske refrakcije majhen. To pomeni da ima vrednost zenitne troposferske refrakcije majhno razpršenost. Metoda najbolje od omenjenih metod oceni absolutno troposfersko refrakcijo tudi iz vidika točnosti, saj je r.m.s. pri metodi najmanjši. Odstopanja podvojenih podatkov zenitne troposferske refrakcije, ki nastanejo pri programu PPP v skoraj dveh časovno enakih trenutkih ob koncu obravnavanega dne in začetku naslednjega dne so majhna. Majhen je tudi standardni odklon in srednja vrednost določena iz razlik podvojenih zenitnih troposferskih refrakcij. Iz podobnosti podvojenih vrednosti zenitne troposferske refrakcije z metodo PPP lahko zaključimo, da lahko s to metodo natančno ocenimo absolutno troposfersko refrakcijo. Ker metoda PPP deluje v absolutnem načinu in upošteva absolutno troposfersko refrakcijo, so visoke spremenljivosti v vrednostih zenitne troposferske refrakcije ob skoraj istem časovnem trenutku bistveno manjši. Nekoliko manjša je tudi aritmetična sredina razlik vrednosti zenitne troposferske refrakcije pri metodi PPP in izračunane vrednosti modela ALADIN v primerjavi z aritmetično sredino razlik vrednosti zenitne troposferske refrakcije programa Bernese. Zato dosega metoda PPP boljšo točnost zenitne troposferske refrakcije od programa Bernese in je v celoti gledano v absolutnem smislu primerljiva meteorološkemu modelu ALADIN.

Pri izračunu relativne zenitne troposferske refrakcije ugotovimo, da so statistični parametri izračuna zenitne troposferske refrakcije vseh treh obravnavanih geodetskih metod v skladu z izračuni zenitne troposferske refrakcije meteorološkega modela ALADIN. Povprečja in standardni odkloni razlik relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod glede na izračunane vrednosti modela ALADIN so majhne vrednosti saj se v večini gibljejo med 0,7 in 0,8 cm. Od tega odstopa le povprečje razlike izračuna zenitne troposferske refrakcije omrežja SIGNAL glede na izračunane vrednosti modela ALADIN, ki znaša dober centimeter. Tudi vrednosti r.m.s. so manjše kot pri absolutnem načinu, in to za vseh tri metode. Razpršenost okrog srednje vrednosti in sama srednja vrednost relativne zenitne troposferske refrakcije geodetskih metod so manjše kot pri absolutni troposferski refrakciji, torej govorimo o visoki točnosti in natančnosti vseh omenjenih metod. Malenkost boljše

rezultate relativne zenitne troposferske refrakcije dosega metoda PPP, sledi ji program Bernese in izračun omrežja SIGNAL. Visoka podobnost rezultatov relativne troposferske refrakcije programa Bernese in izračunanih vrednosti modela ALADIN je pričakovana, saj Bernese deluje v relativnem načinu določitve zenitne troposferske refrakcije. Pričakovana je tudi podobnost rezultatov relativne troposferske refrakcije metode PPP in Bernese, saj sta obe podobni pri obdelavi podatkov opazovanj, pri obeh se poskuša modelirati in odstraniti skoraj vse sistematične pogoške, prisotne v opazovanjih, večjih od milimetra. Izračun relativne troposferske refrakcije omrežja SIGNAL dosega nekoliko slabše rezultate, ker deluje v realnem času in za izračun uporablja efemeride slabše natančnosti. Prav tako pa metoda ne vsebuje dovršene obdelave. Iz rezultatov izračunanih vrednosti absolutne in relativne zenitne troposferske refrakcije je vidno, da se napake, ki se pojavijo pri vseh postajah in se pojavijo v vrednostih absolutne refrakcije v vrednostih relativne refrakcije izničijo. To je razlog za boljše rezultate vrednosti relativne glede na rezultate absolutne zenitne troposferske refrakcije v smislu točnosti in natančnosti.

Pri absolutni določitvi položaja razpolagamo z celotno vrednostjo troposferske refrakcije, tako absolutno kot relativno troposfersko refrakcijo. Metode, ki delujejo v absolutnem načinu (PPP), v izračunih upoštevajo tako absolutno kot relativno troposfersko refrakcijo. Zato dobro ocenijo absolutno in relativno troposfersko refrakcijo. Pri metodah, ki delujejo v relativnem načinu (program Bernese, omrežje SIGNAL), podatka o absolutni vrednosti zenitne troposferske refrakcije ne pridobimo. Ta je bil odstranjen s sestavo enojnih in dvojnih faznih razlik v relativnem načinu. Posledica tega je, da relativne metode slabo ocenijo absolutno troposfersko refrakcijo. V relativnem načinu, kjer se absolutna troposferska refrakcija izniči za vse metode, pa ocenijo relativno troposfersko refrakcijo dobro.

Nadejamo se, da bodo rezultati pridobljeni v okviru te diplomske naloge koristna informacija meteorološki stroki. Prav tako se nadejamo, da se bo v prihodnosti z vključitvijo geodetskih metod določitve zenitne troposferske refrakcije na osnovi GNSS-opazovanj prispevalo k izboljšavi meteorološkega modela za določitev prognoze vremena.

VIRI

Dolar, M. (ur.). 2012. Vetrnica 0412: 4

URL: http://www.meteo-drustvo.si/data/upload/Vetrnica_0412.pdf (pridobljeno 9. 5. 2016)

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P., (2015). Bernese GPS Software, Version 5.2. Bern, Švica, Astronomski Inštitut Univerze v Bernu: 1, 297–203

Gawk, Free Software Foundation. 2016.

URL: <https://www.gnu.org/software/gawk/> (pridobljeno 20. 4. 2016)

Gnuplot version 5.0. 2016.

URL: <http://www.gnuplot.info/> (pridobljeno 21. 4. 2016)

Kogoj, D., 2000. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 53–54

Kozmus, K., Stopar, B. 2003. Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami. Geodetski vestnik 47, 4: 408–410

URL: http://www.geodetski-vestnik.com/47/4/gv47-4_404-413.pdf (pridobljeno 16. 5. 2016)

Pristov, N., Cedilnik, J. 2012. ALADIN in RC LACE – predstavitev, nastanek in kratka zgodovina mednarodnega sodelovanja. Vetrnica 0412: 5–11

URL: http://www.meteo-drustvo.si/data/upload/Vetrnica_0412.pdf (pridobljeno 9. 5. 2016)

Pristov, N., Cedilnik, J., Jerman, J., Strajnar, B. 2012. Priprava numerične meteorološke napovedi ALADIN – SI. Vetrnica 0412: 17–22

URL: http://www.meteo-drustvo.si/data/upload/Vetrnica_0412.pdf (pridobljeno 9. 5. 2016)

MOP – Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje. 2016.

URL: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/faq/> (pridobljeno 13. 5. 2016)

MOP – Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije. 2016a.

URL: <http://www.gu-signal.si/node/1> (pridobljeno 12. 5. 2016)

MOP – Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije. 2016b.

URL: <http://www.gu-signal.si/node/6> (pridobljeno 12. 5. 2016)

MOP – Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava Republike Slovenije. 2016c.

URL: <http://www.gu-signal.si/sites/default/files/omrezje.jpg> (pridobljeno 12. 5. 2016)

Režek J., Perko, K., Fabiani, N. 2016. Nove storitve omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL. Geodetski vestnik 60, 1: 114 str

URL: http://www.geodetski-vestnik.com/60/1/gv60-1_rezek.pdf (pridobljeno 10. 7. 2016)

Sterle, O. 2015. Časovno odvisne geodetske mreže in koordinatni sistemi. Doktorska dizertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 13–35

Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. 2014. Metoda PPP pri statični izmeri GNSS. Geodetski vestnik 58, 3: 467–472

URL: http://www.geodetski-vestnik.com/58/3/gv58-3_sterle.pdf (pridobljeno 9. 5. 2016)

Stopar, B. Kogoj, D. 2005. Programska zasnova in priprava gradiv za izvedbo strokovnega dela izpita iz geodetske stroke: Geodetska izmera. Ljubljana, Geodetski inštitut: 17–22

URL: http://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/ogs/GEODETSKA_IZMERA.pdf (pridobljeno 26. 5. 2016)

Stopar, B., Pavlovič Prešeren, P., Kozmus Trajkovski, K., 2008. GPS v geodeziji, študijsko gradivo za visoki strokovni študij geodezije: 13–21

Strajnar, B. 2012. Analiza vremena z lokalno asimilacijo opazovanj. Vetrnica 0412: 80–90

URL: http://www.meteo-drustvo.si/data/upload/Vetrnica_0412.pdf (pridobljeno 9. 5. 2016)

Witchayangkoon, B. 2000. Elements of GPS Precise Point Positioning. Doktorska disertacija. Orono, Maine, ZDA, Univerza Maine (samozaložba: B. Witchayangkoon): 20–73

URL: http://www.cnavgNSS.com/Files/Articles/167_0.pdf (pridobljeno 23. 5. 2016)

Xu, G. 2007. Theory, Algorithms and Applications. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag: 55 str.