

Prilog unaprjeđenju modeliranja zenitne komponente troposferskog kašnjenja satelitskih signala za određivanje korisničkog položaja sustava GLONASS

Bakota, Mario

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:367377>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

Mario Bakota

**PRILOG UNAPRJEĐENJU
MODELIRANJA ZENITNE KOMPONENTE
TROPOSFERSKOG KAŠNENJA
SATELITSKIH SIGNALA ZA
ODREĐIVANJE KORISNIČKOG
POLOŽAJA SUSTAVA GLONASS**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

Mario Bakota

**PRILOG UNAPRJEĐENJU
MODELIRANJA ZENITNE KOMPONENTE
TROPOSFERSKOG KAŠNJENJA
SATELITSKIH SIGNALA ZA
ODREĐIVANJE KORISNIČKOG
POLOŽAJA SUSTAVA GLONASS**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: dr. sc. Serđo Kos, prof.

Komentor: dr. sc. David Brčić, izv. prof.

Rijeka, travanj 2022.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MARITIME STUDIES

Mario Bakota

**CONTRIBUTION TO THE
MODELLING OF THE TROPOSPHERIC
DELAY ZENITH COMPONENT IN
GLONASS SATELLITE POSITIONING**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2022.

Mentor: dr. sc. Serđo Kos, prof.

Komentor: dr. sc. David Brčić, izv. prof.

Doktorska disertacija obranjena je dana _____
u/na _____
_____ pred povjerenstvom u
sastavu:

1. dr. sc. Irena Jurdana, izv. prof.
2. dr. sc. Danko Kezić, prof.
3. dr. sc. Jasmin Ćelić, izv. prof.
4. dr. sc. Sanjin Valčić, doc.

ZAHVALE

Mnogo ljudi sudjelovalo je u ovom putovanju čiji je cilj pred vama. Neki su bili tek usputni kratkotrajni suputnici bez poznavanja promatranog područja, ali poznavali su i razumjeli mene i iscjeljujući utjecaj iskrenog i poticajnog razgovora. Drugi su pak bili stalni suputnici koji su posvetili svoje vrijeme i strpljenje te pritom odgovorili potporom donoseći impuls motivacije, razumijevanja i usmjerenja.

Ipak, uz objektivan rizik od neobjektivne procjene (jer kako usporediti blagotvorni učinak poticajnog razgovora s dostavom nužnih podataka, kako odrediti važnost zametka u odnosu na plod), osjećam se dužnim najiskrenije zahvaliti nekolicini suradnika.

Mojem mentoru, profesoru Serđu Kosu najiskrenija hvala na vođenju, poticajnim komentarima te pruženom uvidu u ključnim trenucima. Komentoru, izvanrednom profesoru Davidu Brčiću hvala na povjerenju, iskrenosti i nesebičnosti. Obojici zahvaljujem na uloženom vremenu, strpljenju i vjeri u mene.

Zahvaljujem i članovima Povjerenstva za obranu doktorske disertacije na savjetima te poticajnim komentarima: izvanrednoj profesorici Ireni Jurdani, profesoru Danku Keziću, izvanrednom profesoru Jasminu Čeliću te docentu Sanjini Valčiću.

Zahvalu upućujem i profesoru Ustinovu, umirovljenom profesoru Akademije *Makarov* iz Sankt-Petersburga te jednom od razvojnih inženjera sustava GLONASS koji mi je velikodušno izišao u susret i pružio tražene odgovore.

Na koncu, zahvaljujem Ivanu i Igoru, dvojici nesebičnih kolega, na pomoći i strpljenju. Hvala vam obojici!

SAŽETAK

U ukupnoj greški položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima atmosfera sudjeluje s greškama uzrokovanim slojevima ionosfere i troposfere. Troposfera se smatra neutralnim medijem zbog istog učinka na faze signala vala nosioca i signala informacije. Greška položaja uzrokovana troposferskim djelovanjem (zajedničkog naziva troposfersko kašnjenje) mora se procijeniti prilikom određivanja položaja ili naknadno odrediti upotrebom vanjskih troposferskih popravaka. Najvažniji elementi koji uzrokuju troposfersko kašnjenje jesu atmosferski plinovi, tlak, temperatura te količina vode u atmosferi. Učinak troposferskog kašnjenja odvojeno se promatra u zenitnom smjeru te u nagibnom smjeru dolaznog satelitskog navigacijskog signala. Dodatno, troposfersko kašnjenje može se promatrati i s obzirom na atmosferske uzroke pri čemu se odvojeno promatraju hidrostatski (suhi) i nehidrostatski (mokri) uzroci. Kretanje troposferskog kašnjenja pokazuje dnevne, sezonske i godišnje zakonitosti. Na tim spoznajama razvijen je niz modela popravaka troposferskog kašnjenja različitog pristupa: samo u zenitnom smjeru po suhim i/ili mokrim uzrocima, odvojena funkcija mapiranja za nagibne smjerove po suhim i/ili mokrim uzrocima ili zajednički cjeloviti model. U disertaciji je predložen model temeljen na Saastamoinenovu modelu zenitnog troposferskog kašnjenja. Model je razvijen na temelju položajnih zapisa satelitskog navigacijskog sustava GLONASS te odgovarajućih meteoroloških ulaznih podataka unutar jedne godine s trima lokacijama. Predloženi model definira troposfersko odstupanje odvojeno za svaku položajnu os. Rezultati pokazuju da je predloženim modelom ostvarena statistička ravnoteža položajnih odstupanja GLONASS-a u funkciji zenitne komponente troposferskog kašnjenja. Provedenog verifikacija (na trima lokacijama u Republici Hrvatskoj unutar dvogodišnjeg razdoblja) pokazuje da predloženi model smanjuje zenitnu komponentu troposferskog kašnjenja čime poboljšava točnost položaja. Time je potvrđena prikladnost upotrebe predloženog modela na promatranom području te na širim područjima sličnog klimatskog profila. Vrednovanju predloženog modela pristupilo se s obzirom na početna ograničenja, polučene rezultate točnosti te na ostvarene spoznaje o troposferskoj dinamici promatranog područja. Uputilo se na potencijal praktične i znanstvene primjene ukupnih rezultata istraživanja. Prilagodljivost predloženog modela, uz istovremeno smanjivanje početnih ograničenja, predstavlja osnovu za buduća istraživanja troposferskog kašnjenja.

KLJUČNE RIJEČI: hidrostatsko kašnjenje, nehidrostatsko kašnjenje, funkcija preslikavanja, standardna atmosfera, statistička ravnoteža, Saastamoinenov model zenitnog troposferskog kašnjenja, radionavigacijski satelitski sustav GLONASS

ABSTRACT

In the overall position error determined by the satellite navigation systems, the atmosphere participates with errors caused by the ionosphere and troposphere layers. The troposphere is considered to be a neutral medium due to the same effect on the carrier phase and information signal phase. The position error caused by tropospheric effect (commonly called tropospheric delay) must be assessed while determining the position or subsequently determined using external tropospheric corrections. The most important elements that cause tropospheric delay are atmospheric gases, pressure, temperature and the amount of water in the atmosphere. The effect of tropospheric delay is observed separately in the zenith direction and in the slant direction of the incoming satellite navigation signal. Additionally, tropospheric delay can also be observed with regard to atmospheric causes, with hydrostatic (dry) and non-hydrostatic (wet) causes being observed separately. The movement of tropospheric delays shows daily, seasonal and annual regularities. Based on these findings, a number of tropospheric delay models of different approaches have been developed in the zenith direction only for dry and / or wet causes, a separate mapping function for slant directions for dry and / or wet causes, or a common overall model. In the dissertation, a model based on the Saastamoinen model of zenith tropospheric delay has been proposed. The model was developed based on the position records of the GLONASS satellite navigation system and appropriate meteorological input records within one year with three locations. The proposed model defines the tropospheric deviation separately for each position coordinate. The results show that the statistical equilibrium of positional GLONASS deviations in a function of the zenith component of the tropospheric delay has been achieved by the proposed model. The verification carried out (at three locations in the Republic of Croatia within a two-year period) shows that the proposed model reduces the zenith component of the tropospheric delay and thus improves the accuracy of the position. This confirmed the suitability of using the proposed model in the observed area and in wider areas of similar climate profile. The evaluation of the proposed model has been approached in the view of the initial limitations, the obtained accuracy results and the realized knowledge about the tropospheric dynamics of the observed area. The potential of practical and scientific application of the overall research results has been pointed out. The adaptability of the proposed model while reducing initial restrictions represents the basis for future tropospheric delay researches.

KEYWORDS: hydrostatic delay, non-hydrostatic delay, mapping function, standard atmosphere, statistical equilibrium, Saastamoinen model of zenith tropospheric delay, GLONASS radionavigation satellite system

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
	1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA	1
	1.2. ZNANSTVENA HIPOTEZA I POMOĆNE HIPOTEZE.....	2
	1.3. SVRHA I CILJ ISTRAŽIVANJA	3
	1.4. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	4
	1.5. PRIKAZ KORIŠTENIH ZNANSTVENIH METODA.....	6
	1.6. OPIS STRUKTURE DOKTORSKE DISERTACIJE	7
2.	TEMELJNE ODREDNICE SATELITSKOG ODREĐIVANJA KORISNIČKOG POLOŽAJA	9
	2.1. PRINCIP ODREĐIVANJA KORISNIČKOG POLOŽAJA SUSTAVIMA GNSS-A.....	10
	2.2. STRUKTURA SUSTAVA GLONASS.....	14
	2.3. KARAKTERISTIKE GLONASS-OVIH RADIONAVIGACIJSKIH SIGNALA.....	17
	2.4. RADIONAVIGACIJSKI PARAMETRI SUSTAVA.....	22
	2.5. IZVORI GREŠKE POLOŽAJA U SUSTAVU GLONASS	24
	2.5.1. Greške satelitskog segmenta	25
	2.5.1.1. Greška međusobne sinkronizacije satelita	25
	2.5.1.2. Greške efemerida	25
	2.5.2. Greške prijenosnog medija	26
	2.5.2.1. Greška ionosfere	28
	2.5.2.2. Greška troposfere	32
	2.5.3. Greške korisničkog segmenta i mikrokoliša	33
	2.5.3.1. Greška uzrokovana šumom radionavigacijskog signala	34
	2.5.3.2. Greška višestazne putanje radionavigacijskih signala	34
	2.5.4. Greška geometrijske razdiobe točnosti	39
3.	MORFOLOGIJA TROPOSFERE	42
	3.1. ELEMENTI DINAMIKE TROPOSFERE	44
	3.2. ELEMENTI TROPOSFERE I NJIHOV UTJECAJ NA TROPOSFERSKO KAŠNJENJE	45
	3.2.1. Jednadžba stanja suhoga zraka	46
	3.2.2. Jednadžba stanja vodene pare	48
	3.2.3. Vlažni zrak – udio vodene pare	49
	3.2.4. Homogena atmosfera	52

3.2.5. Standardna atmosfera.....	53
3.2.6. Oboriva voda.....	56
3.3. UTJECAJ TROPOSFERE NA ŠIRENJE RADIOSIGNALA	57
3.4. NEUTRALNA ATMOSFERA – STRUKTURA TROPOSFERSKOG KAŠNJENJA GNSS- OVA RADIONAVIGACIJSKOG SIGNALA.....	64
3.4.1. Kašnjenje radionavigacijskog signala u neutralnoj atmosferi	65
3.4.2. Ukupno zenitno kašnjenje.....	66
3.4.3. Struktura troposferskog kašnjenja – zenitno kašnjenje i funkcija mapiranja	67
3.4.4. Hidrostatski (suhi) uzroci refrakcije radionavigacijskih signala	68
3.4.5. Nehidrostatski (mokri) uzroci refrakcije radionavigacijskih signala.....	69
4. POSTOJEĆI MODELI ZA ISPRAVKU TROPOSFERSKOG KAŠNJENJA	72
4.1. GEODETSKI ORIJENTIRANI TROPOSFERSKI MODELI	73
4.1.1. Saastamoinenov model	73
4.1.2. Hopfieldov model	76
4.1.3. Modificirani Hopfieldov model	77
4.1.4. Ifadisov model	80
4.1.5. Askneov i Nordiusov model	80
4.1.6. Model Babyja i sur.....	81
4.1.7. Model Davisa i sur.....	83
4.1.8. Chaov model	83
4.1.9. Callahanov model	84
4.1.10. Bermanov modeli.....	84
4.2. NAVIGACIJSKI ORIJENTIRANI MODELI.....	86
4.2.1. Troposferski model MOPS	86
4.2.2. Niellov troposferski model	88
4.2.3. Troposferski model PPP	89
4.3. MODELI FUNKCIJE MAPIRANJA TROPOSFERSKOG KAŠNJENJA	90
4.3.1. Saastamoinenov model funkcije mapiranja	92
4.3.2. Hopfieldov model funkcije mapiranja	92
4.3.3. Ifadisov model funkcije mapiranja	93
4.3.4. Model funkcije mapiranja MOPS	94
4.3.5. Model funkcije mapiranja Babyja i sur.....	95
4.3.6. Model funkcije mapiranja Daviesa i sur.....	95

4.3.7. Chaov model funkcije mapiranja	96
4.3.8. Blackov model	96
4.3.9. Blackov i Eisnerov model.....	97
4.3.10. Marinijev model.....	97
4.3.11. Moffetov model	98
4.3.12. Marinijev i Murrayev model.....	98
4.3.13. Herringov model	99
4.3.14. Model Vienna	99
4.4. FUNKCIJE MAPIRANJA – ZNAČAJ I PRIMJENA.....	100
5. METODOLOŠKE ODREDNICE ISTRAŽIVANJA.....	102
5.1. GEOGRAFSKE ZNAČAJKE PROMATRANA PODRUČJA ISTRAŽIVANJA.....	103
5.2. IZBOR MJERNIH POSTAJA GNSS-A.....	104
5.3. IZBOR METEOROLOŠKIH PODATAKA	105
5.4. RAZDOBLJE ISTRAŽIVANJA	106
5.5. PROGRAMSKA OBRADA EUREF-OVIH GNSS-OVIH I METEOROLOŠKIH PODATAKA	106
5.6. IZRADA MATEMATIČKOG MODELA ZENITNE KOMPONENTE TROPOSFERSKE REFRAKCIJE GLONASS-OVIH SATELITSKIH RADIONAVIGACIJSKIH SIGNALA	113
5.7. VALIDACIJA RAZVIJENOG MODELA ZENITNE KOMPONENTE TROPOSFERSKE REFRAKCIJE GLONASS-OVIH SATELITSKIH RADIONAVIGACIJSKIH SIGNALA	119
6. VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG TROPOSFERSKOG MODELA.....	122
6.1. ANALIZA TOČNOSTI POLOŽAJA ZA ODABRANE REFERENTNE POSTAJE.....	123
6.1.1. Parametri točnosti položaja za postaju u Čakovcu, 2014. i 2015. godina 125	
6.1.2. Parametri točnosti položaja za postaju u Zadru, 2014. i 2015. godina	127
6.1.3. Parametri točnosti položaja za postaju u Dubrovniku, 2014. i 2015. godina	129
6.2. DODATNE OSOBINE KRETANJA TOČNOSTI PREDLOŽENOG MODELA.....	134
7. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I ANALITIČKA RAZMATRANJA	142

7.1. RAZMATRANJA I PRIMJENE PREDLOŽENOG MODELA TROPOSFERSKE GREŠKE ZENITNE KOMPONENTE U SATELITSKOM ODREĐIVANJU POLOŽAJA.....	143
7.2. MOGUĆNOSTI PRIMJENE PREDLOŽENOG MODELA U POMORSKOJ NAVIGACIJI	144
7.2.1. Mogućnosti primjene predloženog modela integracijom u primarno pozicioniranje sustava ECDIS	145
7.2.2. Mogućnosti primjene predloženog modela u razvoju autonomnih plovila	145
7.3. PROSTORNA OGRANIČENJA PREDLOŽENOG MODELA	146
7.4. PRIMJENA REZULTATA ISTRAŽIVANJA	147
8. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA	148
POPIS LITERATURE	151
POPIS KRATICA	158
POPIS VAŽNIJIH OZNAKA I SIMBOLA.....	161
POPIS SLIKA	167
POPIS TABLICA.....	169
PRILOG	I

1. UVOD

Navigacijski satelitski sustavi za određivanje korisničkih parametara (položaja, brzine, ubrzanja, ljestvice vremena) razvili su se od sustava isključivo vojne namjene do sustava čije su usluge prisutne u mnogim društvenim institucijama te područjima i aspektima života i rada [1]. Razvoj satelitskih komunikacija i tehnologija doveo je do prisutnosti nekoliko sustava satelitske navigacije različitih tehničkih parametara, koji svi ostvaruju svoje zadaće po istim temeljnim načelima – određenim pseudoudaljenostima (korištenjem modulirane komponente radionavigacijskog signala) (engl. *code phase*) te određivanjem pomaka faza primljenog i odaslanog signala (korištenjem signala vala nosioca) (engl. *carrier phase*). U zajednički sustav GNSS (engl. *Global Navigation Satellite System* – GNSS) s globalnom i regionalnom dostupnošću ubrajaju se satelitski navigacijski sustavi GPS (eng. *Global Positioning System* – GPS), ruski GLONASS (rus. *GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* – GLONASS), europski Galileo te kineski BeiDou. Osim njih, sustavi regionalne dostupnosti jesu japanski sustav QZSS (engl. *Quasi – Zenith Satellite System*), dostupan u azijsko-pacifičkom području, te indijski sustav IRNSS-NAVIC (engl. *Indian Regional Navigation Satellite System – Navigation with Indian Constellation*). Na točnost ostvarenih položajnih podataka utječu greške čiji se izvori mogu ubrojiti u tri pojedinačna segmenta sustava GNSS, a odnose se na korisničku razdiobu točnosti (engl. *User Equivalent Range Error* – UERE): satelitski segment, grešku prijenosnog medija te grešku korisničkog segmenta i mikrokoliša. Dodatno, uslijed promjenjivog prostornog rasporeda satelita, dolazi do varijacija u broju i geometrijskom rasporedu dostupnih satelita, izražena koeficijentom razdiobe točnosti položaja (engl. *Dilution of Precision* – DOP). Ukupni proračun greške nastupa kao umnožak komponenata UERE i DOP.

1.1. Problem, predmet i objekti istraživanja

Jedna od prisutnih grešaka jest troposferska greška koja nastaje prilikom širenja radionavigacijskog signala kroz sloj neutralne atmosfere te njezino kretanje ovisi o dinamici meteoroloških parametara unutar sloja troposfere. Najvažnija je značajka utjecaja neutralne troposfere na propagaciju radionavigacijskih signala to što se greške uzrokovane disperzijom (uključujući i refrakciju) ne mogu otkloniti upotrebom dvofrekvencijskih ili trofrecvencijskih GNSS-ovih prijamnika (kao u slučaju ionosfere). Zbog toga se troposferska greška može smanjiti primjenom empirijskih modela, odnosno procjenjivati na osnovu primljenih GNSS-

ovih podataka, uključujući i meteorološke podatke. Troposferska greška posljedica je dvaju osnovnih učinaka troposfere na širenje radionavigacijskog signala: kašnjenje zbog smanjenja brzine i povećanje putanje. Atmosferski uzroci troposferske greške dijele se na hidrostatske (tzv. suhe) i nehidrostatske (tzv. mokre) uzroke, pri čemu u prvu skupinu spadaju atmosferski suhi plinovi i pojedine komponente vodene pare, a hidrostatske uzroke čini vodena para u svojim pojavnim oblicima. Dodatno, troposferska greška ovisi o dolaznom kutu radionavigacijskog signala, tako da se, ovisno o pristupu, ukupna troposferska greška može promatrati odvojeno po četirima komponentama.

Sukladno navedenom, određen je **znanstveni problem istraživanja** ove disertacije: predviđanje pogreške pseudoudaljenosti, odnosno položaja određenog sustavom GLONASS, a uzrokovanom zenitnom komponentom troposferske refrakcije GLONASS-ovih satelitskih radionavigacijskih signala za određivanje položaja.

Temeljem postavljenog znanstvenog problema, u **predmet znanstvenog istraživanja** spadaju meteorološka dinamika troposferskog sloja atmosfere te dinamika odstupanja položaja određenog sustavom GLONASS na području srednjih geografskih širina s obzirom na dinamiku kretanja zenitne komponente troposferske refrakcije GLONASS-ova satelitskog radionavigacijskog signala.

Objekti istraživanja jesu uzorci sezonskog i dnevnog hoda troposferskog kašnjenja GLONASS-ovih radionavigacijskih signala na promatranom području, dinamika meteoroloških troposferih pojava, utjecaj troposferskih meteoroloških pojava na grešku položaja ostvarenu sustavom GLONASS i vremensko-prostorna dinamika promatrane zenitne komponente troposferske greške pseudoudaljenosti i korisničkog položaja.

1.2. Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze

Temeljem definiranog problema, predmeta i objekata istraživanja postavljena je **osnovna znanstvena hipoteza:**

Troposferska refrakcija koja se sastoji od nekoliko strukturnih komponenata i koja dovodi do kašnjenja satelitskog radionavigacijskog signala uzrokuje grešku koja je definirana meteorološkim parametrima promatrana područja te se njihovim poznavanjem u stvarnom vremenu može preciznije odrediti njihov utjecaj na određivanje pseudoudaljenosti, odnosno konačnog položaja korisnika. Preciznijim definiranjem utjecaja na određenu pseudoudaljenost, točnost korisničkog položaja moguće je povećati odgovarajućim modeliranjem zenitne

komponente troposferske refrakcije, odnosno troposferskog kašnjenja satelitskog radionavigacijskog signala za određivanje položaja sustava GLONASS.

Iz cilja dokazivanja osnovne hipoteze proizlaze i sljedeće **pomoćne hipoteze**:

- hidrostatska komponenta troposferske greške proporcionalna je površinskom tlaku zraka
- nehidrostatska komponenta troposferske greške u korelaciji je s površinskom temperaturom i relativnom vlažnošću zraka
- troposferska greška ima dnevni karakter pri čemu se povećava tijekom jutarnjih sati i smanjuje u večernjim satima
- troposferska je greška sezonskog karaktera.

Statistički parametri uspješnosti predloženog modela kojima se dokazala opravdanost postavljenih hipoteza srednja su kvadratna greška odstupanja korisničkog položaja, apsolutna vrijednost odstupanja korisničkog položaja te ostvarene vrijednosti standardne devijacije ostvarene točnosti korisničkog položaja. Vremenski je okvir procjene uspješnosti navedenih parametara dvogodišnji period unutar kojih će se obaviti odgovarajuća vremenska podjela.

1.3. Svrha i cilj istraživanja

Svrha je **istraživanja** ove disertacije doprinijeti povećanju točnosti satelitskog određivanja položaja korištenjem radionavigacijskih satelitskih signala GLONASS u segmentu modeliranja troposferskog kašnjenja satelitskih radionavigacijskih signala.

Postavljeni **ciljevi istraživanja** obuhvaćaju:

- ispitati uspješnost odabranih i dostupnih modela ispravke troposferskog kašnjenja odgovarajućom statističkom metodologijom
- analizirati, ustanoviti i definirati relevantne značajne meteorološke parametre koji izravno utječu na širenje satelitskih radionavigacijskih signala, određivanje pseudoudaljenosti i posljedično određivanje korisničkog položaja
- detaljno analizirati povezanost troposferskog kašnjenja, pseudoudaljenosti i satelitski određenog položaja korisnika na području srednjih geografskih širina
- ustanoviti zakonitosti odnosa između zenitne komponente troposferskog kašnjenja, pseudoudaljenosti i satelitski određenog položaja korisnika na području srednjih geografskih širina
- ostvariti povećanje točnosti satelitskog određivanja položaja korištenjem radionavigacijskih signala GLONASS u segmentu zenitne komponente troposferske

refrakcije (troposferskog kašnjenja) i GLONASS-ovih satelitskih signala za određivanje položaja

- ustanoviti zakonitosti kretanja odstupanja točnosti položaja u odgovarajućem koordinatnom sustavu tijekom reprezentativnog razdoblja na više referentnih postaja mreže EUREF (engl. *Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe* – EUREF, udruženje europskih agencija, sveučilišta i istraživačkih ustanova koje djeluje kao poveznica između operatera GNSS-ovih postaja, podatkovnih centara i centara za analizu) na području kontinentalnog i obalnog dijela Republike Hrvatske
- statistički korelirati i modelirati povezanost zenitne komponente troposferskog kašnjenja radionavigacijskog signala, geodetskog položaja, godišnjeg doba, meteoroloških podataka, pseudoudaljenosti i, u konačnici, korisničkog položaja
- ustvrditi statističku ravnotežu položajnih odstupanja GLONASS-ova korisničkog položaja u funkciji zenitne komponente troposferskog kašnjenja određenog Saastamoinenovim modelom.

Ispunjenjem postavljenih ciljeva potvrđuje se svrha provedenog istraživanja te ostvaruje znanstveni i praktični doprinos. Predloženim modelom, temeljenim na Saastamoinenovu modelu, s unaprijeđenom zenitnom komponentom troposferske refrakcije, poboljšava se pouzdanost i preciznost dostupnog satelitskog određivanja korisničkog položaja (s obzirom na troposfersku grešku). Time se otvara mogućnost, uz potrebu dodatne provjere uspješnosti za šira zemljopisna područja, za njegovu primjenu u postojećim GNSS-ovim prijamnicima u segmentu pomorske navigacije. Ostvareni rezultati istraživanja s metodološkog aspekta predstavljaju teorijski doprinos potencijalnom poboljšanju postojećih modela troposferskog kašnjenja neovisno o sustavu GNSS.

1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja

Danas je prisutan niz modela za korekciju troposferske greške različitih obuhvata s različitim ulaznim parametrima i različitim stupnjem ostvarene točnosti. Uočivši negativne posljedice utjecaja troposfere na širenje radiosignala, razvoj troposferskih modela počeo je znatno prije razvoja satelitskih navigacijskih sustava. Poznavajući interakciju elemenata troposfere s radiosignalom koja se ogleda (s različitim stupnjem intenziteta) u učincima refrakcije, refleksije, difrakcije, disperzije te apsorpcije, razvijeni su različiti pristupi s ciljem smanjenja učinaka troposfere na elektromagnetski radiosignal. Posljedice navedenih učinaka uobičajeno se zajednički smatraju *troposferskim kašnjenjem*. Troposferski atmosferski

parametri koji utječu na širenje radiosignala mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine: hidrostatski i nehidrostatski. Pritom se njihov učinak može promatrati i s obzirom na dolazni kut radiosignala: u zenitnom kutu te pod bilo kojim drugim kutom nagiba putanje. S obzirom na usvojeni pristup, pojedini modeli ispravke troposferskog kašnjenja uključuju ispravku temeljenu na jednoj ili objema skupinama atmosferskih čimbenika koje se procjenjuju u zenitnom ili svim dolaznim smjerovima. Dodatno, s obzirom na promatrani smjer dolaznog radionavigacijskog signala, matematički oblici modela mogu imati zajednički oblik ili sadržavati odvojene komponente za ispravku troposferskog kašnjenja. Detaljan prikaz najvažnijih postojećih modela ispravke troposferskog kašnjenja donosi se u četvrtome poglavlju. Prikazana je njihova podjela na geodetski orijentirane troposferske modele [2]–[10], navigacijski orijentirane troposferske modele [11]–[14] te posebno na modele temeljene na funkciji preslikavanja (mapiranja) (engl. *mapping function*) troposferskog zenitnog kašnjenja u kašnjenje pod drugim dolaznim kutom [15]–[19]. Posebna pažnja posvećena je Saastamoinenovu modelu, odvojeno prikazanu po svojim komponentama (hidrostatskoj, nehidrostatskoj te funkciji mapiranja) zato što se ostvareni i predloženi model temelji na Saastamoinenovu modelu. Budući da je uključena u proces programske obrade verificiranja uspješnosti predloženog modela kao jedan od zadanih parametara, detaljno je prikazan razvoj i doseg primjenjivosti Niellove funkcije mapiranja [11], [20].

Područja istraživanja uspješnosti i prikladnosti pojedinih troposferskih modela uključuju i područja pozicioniranja svemirskih objekata visokih orbita, radiometeorologiju (engl. *radiometeorology*) temeljenu na površinskim radioopažanjima (uključujući i GNSS), području geodinamičkih istraživanja unutarnje strukture Zemlje te primjenu u području dugobazične interferometrije (engl. *Very Long Base Interferometry* – VLBI). Uz ostale radove, posebno se ističu prikazana istraživanja [21]–[25]. Uvid u primjenu troposferskih modela te posebno funkciju mapiranja donosi se u završnom dijelu četvrtog poglavlja. Zajedničko svim navedenim područjima jest, osim upotrebe GNSS-ova radionavigacijskog signala za određivanje troposferskog kašnjenja, istovremena upotreba i podataka dobivenih radiosondama i/ili laserski određenim udaljenostima.

Osim prikaza postojećih modela s njihovom razinom točnosti i globalne primjenjivosti, u disertaciji su prikazana i istraživanja troposferskog kašnjenja (koje dovodi do troposferske greške korisničkog položaja) temeljem mjerenja pseudoudaljenosti, što predstavlja i pristup usvojen u provedenom istraživanju. Rezultati istraživanja [26]–[31] s dobivenim rezultatima troposferske greške položaja predstavljeni su u petom poglavlju, pri čemu ostvareni rezultati

kvantitativno odgovaraju rezultatima ostvarenim u provedenu istraživanju. Posebno je važno istraživanje [32] temeljeno na istovremenoj primjeni više metoda određivanja troposferskog kašnjenja, uključujući i mjerenjem pseudoudaljenosti. Ostvareni rezultati navedena istraživanja potvrđuju svrsishodnost primijenjena pristupa u ovoj disertaciji i predloženog modela.

1.5. Prikaz korištenih znanstvenih metoda

U ovoj disertaciji predložen je novi model troposferske korekcije u zenitnom smjeru temeljen na Saastamoinenovu modelu s kojim čini integralnu cjelinu. Saastamoinenov model jedan je od najzastupljenijih modela u korisnički adekvatno promatranim područjima upotrebe, koji zasebno modelira troposfersko kašnjenje u zenitnom smjeru te za ostale kutove nagiba putanje dolaznog radionavigacijskog signala. Razvoj predloženog modela temelji se na položajnim zapisima ostvarenim navigacijskim satelitskim sustavom GLONASS te izabranim meteorološkim parametrima za promatrane postaje unutar trogodišnjeg razdoblja. Da bi se mogla promatrati i modelirati troposferska komponenta greške položaja, preduvjet je uskladiti položajne i meteorološke zapise različitih protokola. Manipulacija položajnim zapisima obavljena je dostupnim pripadajućim programskim paketom te potom vremenski i prostorno usklađena s meteorološkim ulaznim podacima. Konačan je rezultat zajedničke programske obrade matrica položajnih zapisa promatranih lokacija s izoliranom zenitnom komponentom troposferske greške, ispravljene Saastamoinenovim modelom, koja predstavlja osnovu razvoja novog modela.

Na ulazne prediktore predloženog modela primijenjeni su adekvatni deskriptivni statistički pokazatelji: aritmetička sredina, srednja kvadratna greška, standardna devijacija, koeficijent varijacije, koeficijent korelacije, medijan vrijednost te dodatni statistički parametri. Izrada predloženog modela troposferske greške obuhvatila je regresijsko modeliranje u nekoliko koraka. Prvo su ustanovljeni, postavljeni i optimizirani modeli povezanosti greške (zavisne varijable) te promatranih parametra (meteoroloških prediktora). Određena je statistička značajnost pojedine prostorne komponente predloženog modela te statistička značajnost pojedine ulazne varijable unutar svake komponente. Pritom je međusobni odnos statističke značajnosti modela i njegovih ulaznih parametara za os y iskazao kvantitativnu neusuglašenost s obzirom na postavljeni parametar p . Međutim, iskazana kvalitativna povezanost utjecaja meteoroloških prediktora i troposferske greške (iskazana preko mogućnosti postojanja modela povezanosti kao takva) rezultirala je daljnjom optimizacijom komponente

osi y predloženog modela te time potvrdila ispravnost obuhvatnijeg pristupa stohastičkim procesima mimo aproksimacijskih matematičkih modela.

Osnovni je pokazatelj uspješnosti predloženog modela smanjena srednja kvadratna greška promatranih položaja te kretanje grešaka aproksimacije (koja se očituje u ostvarenoj varijaciji, odnosno standardnoj devijaciji). Rezultati uspješnosti potvrđuju poboljšanje ukupne troposferske greške za promatrano područje. Premda kreiran na ulaznim podacima lokalne prostorne rezolucije, nespecifičnost razvojnog klimatskog profila čini predloženi model primjenjivim na širim područjima sličnih klimatskih obilježja.

1.6. Opis strukture doktorske disertacije

Doktorska disertacija organizirana je na sljedeći način.

U uvodnom poglavlju objedinjeni su elementi znanstvenog istraživanja provedenog u sklopu tekućeg projekta Sveučilišta u Rijeci „Istraživanje okolišnih utjecaja na rad satelitskih navigacijskih sustava u pomorskoj navigaciji“ - Uniri-tehnic-18-66. Prikazana je i opisana struktura dokorskog rada.

Drugim se poglavljem, naslovljenim *Temeljne odrednice satelitskog određivanja korisničkog položaja*, daje uvid i razmatranje znanstvenog problema. Poglavlje sadrži prikaz tehničkih karakteristika satelitskog sustava pozicioniranja GLONASS sa svojim posebnostima orbitalnog rasporeda i kodiranja radionavigacijskog signala. Pritom se po obuhvatnosti ističu [33], [34] te dostupni službeni izvori [35]–[39].

Treće poglavlje, naslovljeno *Morfologija troposfere*, sadrži razmatranja objekata istraživanja uključujući elemente troposfere te njihovu dinamiku i mehanizme utjecaja na širenje radionavigacijskog signala. Definirani su hidrostatski i nehidrostatski troposferski elementi. Od prikazanih istraživanja, po doseg i sustavnom pristupu elementima i dinamici troposfere ističu se [40], [41]. U središnjem dijelu poglavlja, koje obrađuje međudjelovanje troposfere i radionavigacijskog signala, prikazan je niz istraživanja od kojih se posebno izdvajaju radovi [42]–[45] na području refrakcijskih konstantā i indeksa atmosfere te korelaciji refrakcijskih indeksa s meteorološkim parametrima.

Četvrtim se poglavljem, naslovljenim *Postojeći modeli za ispravku troposferskog kašnjenja*, daje uvid u razvoj postojećih troposferskih modela te njihov stupanj uspješnosti. Prikazana je potencijalna podjela postojećih modela s obzirom na tip ulaznih parametara,

sadržane komponente modela (hidrostatska i nehidrostatska) te funkciju mapiranja. U poglavlju su prikazana istraživanja povezanosti i podobnosti primjene troposferskih modela i u drugim područjima, osim terestričkih zahtjeva za određivanju parametara položaja i vremena. U tom pogledu, vrijedan izvor raznovrsnosti primjene upotrebe usluga GNSS-a predstavlja izvještaj s međunarodnog skupa [1] u organizaciji Ujedinjenih Naroda (engl. *United Nations* – UN).

U petom poglavlju, naslovljenom *Metodološke odrednice istraživanja*, detaljno je obrazložen vremensko-prostorni izvor korištenih podataka za razvoj modela, prikazani su postupci njihove obrade, međusobnog usklađivanja te pripreme za programsku statističku obradu. Prikazan je metodološki tijek razvoja predloženog modela te je obavljena validacija predloženog modela.

Unutar šestog poglavlja, pod naslovom *Verifikacija predloženog troposferskog modela*, prikazan je matematički izraz predloženog modela te je proveden postupak verifikacije. Ostvareni rezultati verifikacije potvrđuju točnost pomoćnih hipoteza.

U sedmom poglavlju, naslovljenom *Rezultati istraživanja i analitička razmatranja*, prikazani su rezultati modela s obzirom na kretanje točnosti položaja GLONASS-a te se upućuje na okvir razvojnih ograničenja predloženog modela. Dodatno se osvrće na moguća područja primjene predloženog modela te komentar općih rezultata ostvarenih u provedenom istraživanju.

Posljednjim se poglavljem sažimaju ostvareni rezultata istraživanja s osvrtom na rezultate verifikacije predloženog modela, ostvarene znanstvene doprinose te mogućnosti daljnjeg istraživanja u navedenom području troposferskih ispravaka.

2. TEMELJNE ODREDNICE SATELITSKOG ODREĐIVANJA KORISNIČKOG POLOŽAJA

Satelitsko određivanje korisničkog položaja oslanja se na metodu trilateracije kojom se rješava elementarni geometrijski problem nepoznatog korisničkog položaja. Pritom se mjeri udaljenost do izvora signala s poznatim koordinatama, uz nužni istovremeni prijam signala trima ili više satelitima. Organizacija je UN-a, posredstvom svoje agencije Međunarodne telekomunikacijske unije (engl. *International Telecommunication Union* – ITU), dodijelila spektar radiofrekvencija za Radionavigacijsku satelitsku službu (engl. *Radio Navigation Satellite Service* – RNSS), pri čemu se radiofrekvencije koje se upotrebljavaju i u zračnom prometu moraju istovremeno dijeliti¹ i s Aeronautičkom radionavigacijskom službom (engl. *Aeronautical Radio Navigation Service* – ARNS) [46]. Frekvencije GNSS-a smještene su na nižem i srednjem dijelu spektra valnog područja L (1 – 2 GHz). Osnovne karakteristike GNSS-ova signala jesu [36], [46],[47]:

- modulacija (engl. *binary phase shift keying* – BPSK)
- signalne informacije (engl. *pseudocode*): za mjerenje pseudoudaljenosti (engl. *pseudorange*); redosljed signala 0 i 1 koji omogućavaju GNSS-ovu prijammiku mjerenje pseudoudaljenosti do izvora signala
- navigacijska poruka (engl. *navigation data*): binarno kodirana poruka koja sadrži informacija efemerida, satelitskih satova, almanaha, radnog statusa i druge dodatne informacije
- tehnike višestrukog pristupa (engl. *multiple access scheme*): primijenjena tehnologija kodiranja GNSS-ova radionavigacijskog signala s ciljem omogućavanja upotrebe istovremene višestruke satelitske primjene jedinstvene frekvencije vala nosioca uz različite frekvencije signala za mjerenje udaljenosti ili obrnuto.

Vrijeme putovanja primljena signala pomnoženo brzinom širenja (ekvivalentno brzini širenja svjetlosti) omogućava mjerenje prividne udaljenosti između izvora odaslana signala i prijammika, što predstavlja osnovno načelo određivanja položaja mjerenjem pseudoudaljenosti. Udaljenosti i koordinate satelita određuju se prijammom navigacijskih poruka demoduliranih satelitskih signala i obradom u korisničkom prijammiku. Korisnički položaj određen tom

¹ Samo L1/E1 te L5/E5 upotrebljavaju frekvencije dodijeljene Aeronautičkoj radionavigacijskoj službi.

metodom omogućava točnost od nekoliko metara, a centimetarska se točnost može postići korištenjem drugim naprednijim tehnikama prijama i obrade satelitskog signala.

2.1. Princip određivanja korisničkog položaja sustavima GNSS-a

Osim navedenih globalnih i regionalnih sustava satelitske navigacije, u sustav GNSS-a spadaju i) satelitski sustavi za poboljšanje točnosti SBAS (engl. *Satellite-Based Augmentation Systems* – SBAS). U sustave SBAS-a spada WAAS (engl. *Wide Area Augmentation System* – WAAS), sustav za povećanje točnosti i stabilnosti sustava GPS-a (prvenstveno na području Sjeverne Amerike) [48]. Sustav WAAS upotrebljava geostacionarni sustav satelita za prijam podataka primljenih od zemaljskih postaja te ih prosljeđuje korisnicima GPS-a na upotrebu u procesu korekcije korisničkog položaja. Međusobno kretanje geostacionarnih satelita i GNSS-ovih satelita te posljedični Dopplerov frekvencijski pomak niskih je vrijednosti te se WAAS-ov signal (1575,42 MHz) može upotrijebiti za usklađivanje frekvencije uzorkovanja GPS-prijamnika u frekvencijskim područjima L1 (1575,42 MHz) i L5 (1176,45 MHz) [49].

EGNOS (engl. *European Geostationary Navigation Overlay Service* – EGNOS), sustav koji je razvila Europska Svemirska Agencija (engl. *European Space Agency* – ESA), podržava sustave Galileo [50], GPS i GLONASS na području Europe. Sustav se sastoji od triju odašiljača na satelitima geostacionarnog rasporeda te zemaljske grupe od 34 postaje za pozicioniranje i četiriju nadzornih centara pružajući korisnicima uslugu diferencijske korekcije [47], [49].

Sustav SDCM (GLONASS) (rus. *Система Дифференциальной Коррекции и Мониторинга* – SDCM) jest sustav SBAS dostupan na području Ruske Federacije [33]. Tu još spadaju i japanski sustav MSAS (engl. *Multi-functional Satellite Augmentation System* – MSAS) te indijski sustav GAGAN (engl. *GPS Aided GEO Augmented Navigation* – GAGAN). Visine orbita satelita pojedinih sustava globalne dostupnosti iznose između 19100 kilometara (GLONASS) do 36000 kilometara (BeiDou), pri čemu pojedini sustavi koriste više orbita za smještaj satelita. Pokrivenost prijama radionavigacijskog signala emitirana sa satelita smještena unutar geostacionarne putanje iznosi približno 45 posto Zemljine površine.

U odnosu na navedeni princip određivanja korisničkog položaja mjerenjem pseudoudaljenosti, određivanje korisničkog položaja mjerenjem faznog pomaka primljenog i odaslanog signala vala nosioca znatno je preciznije. Ono predstavlja osnovu novijih metoda preciznog određivanja položaja (engl. *Precise Point Positioning* – PPP) te određivanjem kinematike u stvarnom vremenu (engl. *Real-Time Kinematics* – RTK) koji svoju primjenu

nalaze i u SBAS-u. Osnovu sustava PPP i RTK čine zemaljske referentne postaje koje emitiraju korekcije za greške satelitskih satova te za greške uzrokovane širenjem radionavigacijskog vala kroz slojeve atmosfere (ionosferu i troposferu). Greška uzrokovana atomskim satovima pojedinog sustava GNSS-a konstantna je za sve satelite tog sustava, a atmosferske su greške lokalnog karaktera i specifične su za lokaciju pojedine referentne postaje. Svaka referentna postaja ima poznati geodetski položaj odakle odašilje navedene GNSS-ove korekcije korisnicima (Slika 2.1.). Korekcija grešaka uzrokovanih aparaturom prijmnika obavlja se unutar prijmnika te su stupanj točnosti korisničkog položaja i vrijeme potrebno da se odredi korisnički položaj ovisni o karakteristikama prijmnika.

Određivanje položaja PPP uključuje referentnu postaju kao izvor korekcija grešaka satelitskih satova i efemerida [51], bez korekcija atmosferskih grešaka čime je značajno smanjen potreban broj referentnih postaja. Vrijeme potrebno da se odredi korisnički položaj jest do 30 minuta, ostvaruje se decimetarska točnost korisničkog položaja uz prostorni raspored referentnih postaja do 1000 km [52]. Ograničenje se ogleda u nemogućnosti ostvarivanja tražene točnosti u ekstremno nepovoljnim vremenskim uvjetima kada dolazi do prekida ili blokade signala.

Referentne postaje sustava RTK dodatno odašilju i korekcije atmosferskih grešaka, stoga je njihov prostorni raspored znatno gušći (do 40 km). Budući da se atmosferske korekcije obavljaju s obzirom na atmosferske podatke lokacije referentne postaje te na ograničenu udaljenost korisnika, ostvaruje se centimetarska točnost. Ujedno je znatno smanjeno vrijeme potrebno za dobivanje korisničkog položaja RTK-prijamnikom [52].



Slika 2.1.: Određivanje korisničkog položaja upotrebom referentnih zemaljskih postaja [53]

Povišenu točnost određivanja korisničkog položaja moguće je postići i postojećim diferencijskim uslugama sustava GPS (engl. *Differential GPS* – DGPS), što je princip koji se najčešće i koristi na trgovačkim brodovima. Istovremeno pozicioniranje PPP svoju primjenu nalazi u odobalnim (engl. *offshore*) aktivnostima. Treća mogućnost određivanja korisničkog položaja jest frekvencijsko mjerenje Dopplerova pomaka [33], koje ne nalazi primjenu u sustavima povišene točnosti. Ipak, sukladno postavljenom predmetu i ciljevima istraživanja, metode koje omogućavaju određivanje korisničkog položaja povišene točnosti nisu objekti ovog istraživanja koje se ograničava na određivanje korisničkog položaja temeljem određivanja pseudoudaljenosti.

Da bi se principom trilateracije mogao odrediti položaj korisnika potrebno je poznavati osnovne parametre: koordinate izvora signala (položaj satelita) u trenutku odašiljanja radiosignala, izmjeriti udaljenost (pseudoudaljenost) te postići odgovarajuću međusobnu sinkronizaciju satova. Informacije o koordinatama satelita sadržane su u navigacijskim porukama (efemeridama) primljenim sa satelita. Pseudoudaljenost računa se razlikom vremena odašiljanja i prijama radiosignala pri stalnoj brzini širenja radiosignala. Sinkronizacija satova podrazumijeva usklađenost sata izvora signala (satelita) te sata korisničkog prijamnika nužnu za točno određivanje pseudoudaljenosti te predstavlja tehnički nerješiv problem. Iako je

stabilizacija frekvencije atomskih satova u GLONASS satelitima² dostigla relativnu dnevnu vrijednost od $\Delta f/f \leq 3 \cdot 10^{-14}$ (S/dan)[33], protekom vremena akumuliraju se odstupanja koja se usklađuju dva puta na dan komunikacijom s kontrolnim segmentom sustava. Točnost je sata u komercijalnim GNSS-ovim prijamnicima koji u pravilu koriste kvarcne oscilatore između $10^{-6} - 10^{-9}$ [47], stoga se prilikom izračuna korisničkog položaja procjenjuje odstupanje sata, a time i korisnički položaj.

U pojednostavljenom prikazu određivanja dvodimenzionalnog korisničkog položaja minimalna konfiguracija podrazumijeva istovremeni prijam radiosignala trima satelitima, pri čemu se korisnički položaj nalazi u sjecištu kružnica (koje zbog nemogućnosti sinkronizacije satova postaju hiperbole) pseudoudaljenosti. Ako se želi odrediti trodimenzionalni korisnički položaj, potreban je prijam i s četvrtog satelita, zato što vertikalna komponenta korisničkog položaja tada može biti (na brodskom prijarnika ili kopnenom na razini površine Zemlje) ili na razini Zemlje ili u svemiru. Glavni razlog dodatnog satelita leži u potrebi istovremenog određivanja i četvrtog parametra – vremena. Budući da se istovremeno trebaju odrediti četiri nepoznata parametra (koordinate X, Y i Z te vrijeme) potrebno je imati ulazne signale s četiriju satelita te formirati sustav s četirima jednadžbama. Ovaj nelinearni problem obično se rješava iteracijom prethodno lineariziranih jednadžbā [47]. Prilikom određivanja trodimenzionalnog korisničkog položaja, pseudovremenski i pseudoprostorni odnos satelita i Zemlje stajnice transformira se u sfere (Slika 2.2.) i hiperboloide. Sjecište četiriju sfera jesu četiri nekolinearne točke kojima je zadan prostor, za razliku od ravnine koja je zadana trima nekolinearnim točkama, odnosno pravca koji je zadan dvjema nekolinearnim točkama.

Osim navedenih minimalnih zahtjeva vezanih za određivanje pseudoudaljenosti, za određivanje korisničkog položaja i drugih parametara (brzinu kretanja i ubrzanje, smjer kretanja i vrijeme) sa standardnim stupnjem projektirane točnosti koje omogućavaju pojedini sustavi GNSS (prikladnim za većinu komercijalnih potreba uključujući i pomorsku navigaciju), potrebno je odrediti i/ili procijeniti niz grešaka koje se javljaju u pojedinim segmentima sustava GNSS. Dio grešaka (prvenstveno greške uzrokovane prijenosnim medijem) zajednički je svim sustavima GNSS i načini su rješavanja opće primjenjivi. Drugom se dijelu grešaka može

² Odnosi se na GLONASS-ovu M-generaciju satelita s cezijem kao elementom upotrijebljenim za određivanje oscilacija atomskog sata. Za GLONASS-ovu K2-generaciju očekuje se primjena pasivnog vodikova lasera u kombinaciji s cezijem, što bi trebalo rezultirati točnošću od $5 \cdot 10^{-15}$ [38].

pristupiti na više načina, ovisno o općim parametrima sustava i tehničkim osobinama korištena sustava GNSS i prijavnika.

Točna geometrijska pseudoudaljenost ρ bez prisutnih grešaka određena je izrazom [54], [55]:

$$\rho = \sqrt{(X^j - x_i)^2 + (Y^j - y_i)^2 + (Z^j - z_i)^2} \quad (1.1)$$

pri čemu su: X^j, Y^j i Z^j ...koordinate vidljivih satelita ($j = 1, 2, 3...$), x_i, y_i i z_i ... koordinate korisničkog prijavnika.



Slika 2.2.: Sjecište sfera određuje položaj GNSS-ovih prijavnika

U nastavku poglavlja prikazuje se sustav GLONASS te načini pristupa greškama s ciljem postizanja optimalnih korisničkih rezultata.

2.2. Struktura sustava GLONASS

Razvoj satelitske tehnologije pokrenuo je razvoj visoko preciznih globalnih satelitskih sustava navigacije koji su predstavljali prekretnicu s obzirom na dotadašnje zemaljske sustave. Postojeći sustavi razlikovali su se po dometu i točnosti: (sustavi Alfa i Omega imali su domet oko 10 – 15 tisuća km uz točnost 3 – 10 km, a sustavi su Loran C i Čajka imali domet do 3 tisuće km uz preciznost 100 – 300 metara) [33]. Dodatno, noću se zbog ionosferskog utjecaja na frekvenciju nosećeg vala (dolazi do višekratne promjene perioda vala), pogrešnost položaja povećavala za prosječno 6 – 8 %. Optimalnim izborom frekvencija za niskoorbitalne satelitske sustave (150 – 300 MHz) te za satelitske sustave na srednjim orbitama (1200 – 1600 MHz) smanjen je noćni utjecaj ionosfere na određivanje točnosti položaja te je omogućena globalna

pokrivenost satelitskim signalima. Postavljeni su i dodatni zahtjevi koji su trebali biti ostvareni prilikom razvoja budućeg satelitskog sustava navigacije [33]:

- razvoj referentnog dvoosnog rotacijskog elipsoidnog matematičkog modela ukupne Zemljine površine
- određivanje trenutnih koordinata satelita s greškom od približno jedan metar
- usvajanje visoko stabilnih frekvencijskih atomskih satova s relativnom stabilnošću $10^{-12} - 10^{-14}$ sekunda
- izrada opreme za satelite s mogućnošću pouzdanog funkcioniranja bez tehničkog održavanja tijekom nekoliko godina
- masovna proizvodnja potrebne prateće opreme.

Razvojem sovjetskog/ruskog sustava satelitske navigacije GLONASS uspješno su ostvareni postavljeni ciljevi. Uobičajena podjela sustava GNSS u načelu je prisutna i u sustavu GLONASS te se on sastoji od sljedećih segmenata [33], [36], [47]:

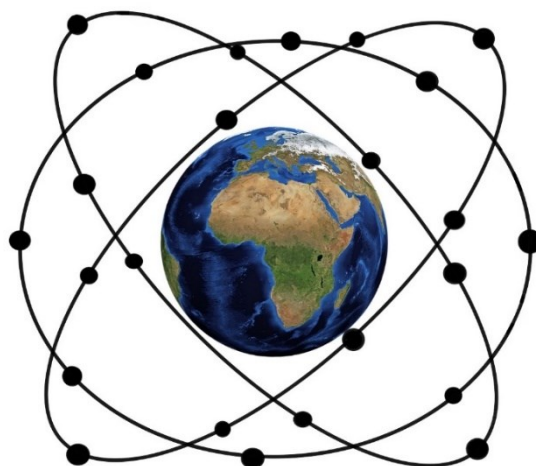
- nadzemno-kontrolni kompleks
- lansirni reketno-svemirski kompleks
- srednje orbitalni satelitski kompleks
- korisnički segment – oprema za prijam i obradu.

Nadzemno-kontrolni kompleks omogućava:

- radio-telemetrijski nadzor i upravljanje satelita
- nadzor i korekciju efemerida, almanaha te vremensko-frekvencijske korekcije
- nadzor radionavigacijskog polja.

Satelitski se kompleks trenutno (2021. godine) sastoji od 26 satelita od kojih su 23 operativna te su razmješteni u trima orbitama po osam satelita, s nagibom orbite na ravninu ekvatora od $64,8^\circ (\pm 0,3^\circ)$ na prosječnoj³ visini 19100 km. Orbitalni period satelita iznosi 11 sati 15 minuta i 44 sekunde (± 5 sekundi). Orbita je satelita približno kružnog oblika ($e = 0 \pm 0,01$) [36] (Slika 2.3.).

³ Visina je orbite satelita unutar granica od 18840 do 19440 km.



Slika 2.3.: Orbitalni prikaz grupiranja GLONASS-ova satelita

Satelite sustava GLONASS čine dvije generacije satelita – starija generacija, GLONASS-M te sateliti posljednje generacije, GLONASS-K/K2⁴, čije su osnovne karakteristike prikazane u Tablici 2.1.

Tablica 2.1.: Dostupne tehničke karakteristike satelita sustava GLONASS u trenutačnoj upotrebi

Karakteristike	GLONASS-M	GLONASS-K	GLONASS-K2
Masa [kg]	1415	935	1600
Predviđeni radni vijek [godina]	7	10	10
Broj satelita po orbiti	8		
Masa korisnog tereta [kg]	260	–	–
Površina solarnih panela [m ²]	30	–	–
Potrošnja energije ugrađene opreme [W]	650	–	–
Greška orijentacije na centar Zemlje [grad]	0,5	–	–
Greška orijentacije na Sunce [grad]	2	–	–
Vrsta višestrukog pristupa	FDMA (+ CDMA za SVs 755-761)	FDMA CDMA	FDMA CDMA
Valna područja za civilnu upotrebu	L1 _{OF} (1602 MHz) L2 _{OF} (1246 MHz) L3 _{OC} (1202 MHz) za SVs 755+	L1 _{OF} (1602 MHz) L2 _{OF} (1246 MHz) L3 _{OC} (1202 MHz) L2 _{OC} (1248 MHz) za SVs 17L+	L1 _{OF} (1602 MHz) L2 _{OF} (1246 MHz) L1 _{OC} (1600 MHz) L2 _{OC} (1248 MHz) L3 _{OC} (1202 MHz)

⁴ Generacija K2 u razvoju je te su ovdje prikazane dostupne karakteristike.

Signali s ograničenim pristupom	L1 _{SF} (1592 MHz) L2 _{SF} (1237 MHz)	L1 _{SF} (1592 MHz) L2 _{SF} (1237 MHz) L2 _{SC} (1248 MHz) za SVs 17L+	L1 _{SF} (1592 MHz) L2 _{SF} (1237 MHz) L1 _{SC} (1600 MHz) L2 _{SC} (1248 MHz)
---------------------------------	--	--	--

Pritom su: L1_{OF}...usluga otvorena višestrukog pristupa FDMA u frekvencijskom pojasu L1, L2_{OF}...usluga otvorena višestrukog pristupa FDMA u frekvencijskom pojasu L2, L1_{OC}... usluga otvorena višestrukog pristupa CDMA u frekvencijskom pojasu L1, L2_{OC}...usluga otvorena višestrukog pristupa CDMA u frekvencijskom pojasu L2, L3_{OC}...usluga otvorena višestrukog pristupa CDMA u frekvencijskom pojasu L3, L1_{SF}...usluga zaštićena višestrukog pristupa FDMA u frekvencijskom pojasu L1, L2_{SF}...usluga zaštićena višestrukog pristupa FDMA u frekvencijskom pojasu L2, L1_{SC}...usluga zaštićena višestrukog pristupa CDMA u frekvencijskom pojasu L1, L2_{SC}...usluga zaštićena višestrukog pristupa CDMA u frekvencijskom pojasu L2.

Izvor: [33], [36], [37]

Mogućnosti korisničkog segmenta obuhvaćaju [33], [36]:

- određivanje koordiniranog svjetskog vremena (engl. *Universal Time Coordinated* – UTC)
- određivanje geodetskih koordinata s mogućnošću transformacije u bilo koji geodetski sustav
- određivanje linearne i kutne brzine, ubrzanja
- određivanje smjera gibanja
- određivanje bočnog i uzdužnog nagiba.

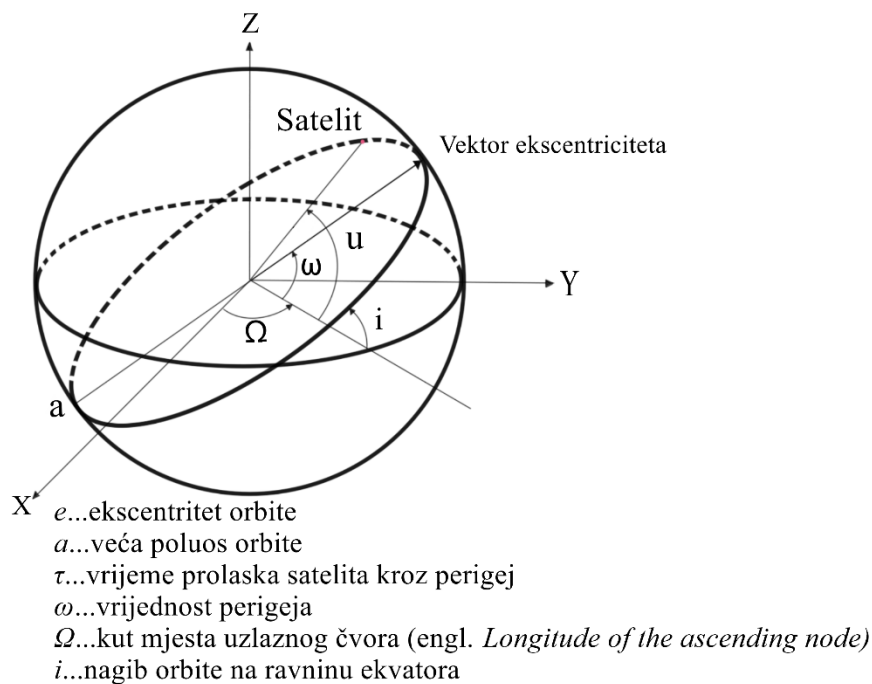
Dostava navigacijskih satelita raketom nosačem traje četiri sata i deset minuta, pozicioniranje satelita unutar predviđene orbite obavi se u razdoblju do najviše mjesec dan te operativna testiranja traju dodatna dva do tri mjeseca [33],[37].

2.3. Karakteristike GLONASS-ovih radionavigacijskih signala

Sustav GLONASS odašilje tri komponente radionavigacijskih signala: efemeride, navigacijske oznake vremena i almanah. Navigacijske oznake vremena jesu periodički (jedna ms) signali koji omogućavaju određivanje pseudoudaljenosti do satelita. Obavljajući inverziju slijeda od 20 signala, formira se binarni kod za emitiranje ostalih navigacijskih informacija – efemerida i almanaha. Emitiranje je signala vremenski podijeljeno na okvire (period 30 sekundā) (engl. *frame*) i superokvire (period 2,5 minuta) (engl. *superframe*) [36].

Efemeride jesu zapisi koji sadrže precizne vrijednosti pravokutnih koordinata položaja satelita, pri čemu svaki satelit emitira vrijednosti samo svojeg položaja svakih 30 sekunda. Programiranim rješavanjem sustava diferencijalnih jednačina GNSS-ovi prijammnici računaju položaj satelita svake sekunde [33]. Posebnost GLONASS-ova sustava jest to što se efemeride određuju po položaju i brzini s obzirom na referentni geodetski datum PZ-90 (engl. *Parametry Zemli 1990 goda*), (rus. *Параметры Земли 1990 года*) koji spada u skupinu rotacijskih zemaljskih referentnih sustava (engl. *Earth Centered and Earth Fixed – ECEF*).

Almanah sadrži podatke o približnim pravokutnim koordinatama položaja satelita koji su sadržani u memoriji upravljačkog sustava satelita, pri čemu almanah sadrži istovremene položaje svih satelita. Prijamom signala almanaha (s greškom do 500 km) identificiraju se vidljivi sateliti čime se značajno skraćuje potrebno vrijeme za određivanje točnih navigacijskih parametara [33], [34]. Određivanje položaja satelita unutar zadane orbite određuje se pomoću šest Keplerovih parametara (Slika 2.4.).



Slika 2.4.: Keplerovi parametri položaja GLONASS-ovih navigacijskih satelita [33]

Ishodište koordinata geocentričnog sustava odgovara središtu mase Zemlje. Određivanje korisničkog položaja ovisi o sustavu koji se promatra. U dalekometnim sustavima (engl. *long-range*) određivanje korisničkog položaja određuje se mjerenjem udaljenosti, u Dopplerovim sustavima mjeri se Dopplerov pomak. U sustavima u kojima se aktivno određuje pomoću parametra udaljenosti (engl. *range-finding systems*), metoda mjerenja udaljenosti zahtijeva

postojanje referentnog objekta koji mora odašiljati signal. U pseudodimenzionalnom sustavu određivanje udaljenosti obavlja se pasivnim mjerenjem udaljenosti između zabilježenih gornjih i donjih vrijednosti na vremenskoj ljestvici. Budući da vremenska ljestvica nije reducirana, u sustavu pseudoudaljenosti ne mjeri se udaljenost već pseudoudaljenost [47], [50], [56] po sljedećem izrazu:

$$R_{pri} = \Delta t_{pri} \cdot c \quad (2.1)$$

pri čemu je: R_{pri} ... geometrijska udaljenost do i -tog satelita, Δt_{pri} ...izmjereni vremenski period do i -tog satelita, c ...brzina širenja radiovala u vakuumu.

Stalna greška mjerenja udaljenosti određuje se izrazom:

$$R_o = \Delta t_o \cdot c \quad (2.2)$$

pri čemu Δt_o predstavlja veličinu vremenske nesinkroniziranosti.

Da bi se odredio korisnički položaj mjerenjem pseudoudaljenosti triju ili četiriju satelita te sveo u geocentrični koordinatni sustav, potrebno je riješiti sustav triju/četiriju jednadžbā pseudoudaljenosti, odnosno onoliko jednadžbā koliko je primljeno setova informacija sa satelita. Primjer sustava jednadžbā primljenih signala s četitima satelitima prikazan je izrazima (2.3):

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_{sat1} - x_c)^2 + (y_{sat1} - y_c)^2 + (z_{sat1} - z_c)^2} &= R_{pr1} + R_o \\ \sqrt{(x_{sat2} - x_c)^2 + (y_{sat2} - y_c)^2 + (z_{sat2} - z_c)^2} &= R_{pr2} + R_o \\ \sqrt{(x_{sat3} - x_c)^2 + (y_{sat3} - y_c)^2 + (z_{sat3} - z_c)^2} &= R_{pr3} + R_o \\ \sqrt{(x_{sat4} - x_c)^2 + (y_{sat4} - y_c)^2 + (z_{sat4} - z_c)^2} &= R_{pr4} + R_o \end{aligned} \quad (2.3)$$

pri čemu su: x_c, y_c, z_c ...nepoznate koordinate korisničkog položaja, R_o ...stalna greška mjerenja udaljenosti, $x_{sati}, y_{sati}, z_{sati}$ ($i = 1, 2, 3, 4$)...koordinate satelita dobivene iz podataka efemerida, R_{pri} ...rezultati mjerenja GLONASS prijammika.

Rezultat su trenutačne koordinate x_c, y_c i z_c te popravak vrijednosti vremenske nesinkroniziranosti $\Delta t_o = R_o/c$. Ukoliko se prima signal s većeg broja satelita, utoliko će broj jednadžbā biti veći, čime se postiže veća preciznost ostvarenog korisničkog položaja.

Ako se određuje pokretni korisnički položaj te se dodatno određuje i brzina, potrebno je odrediti brzinu međusobnog približavanja pokretnog korisničkog položaja/objekta i satelita, što se obavlja mjerenjem odašiljane Dopplerove frekvencije. Budući da, kao i u slučaju mjerenja međusobnih udaljenosti, nominalne gornje i donje vrijednosti frekvencija odašiljača nisu reducirane na vremenskoj ljestvici, mjeri se pseudobrzina međusobnog približavanja po sljedećem izrazu [33], [34]:

$$V_{ps} = \Delta f_{KPD} \cdot \lambda \quad (2.4)$$

pri čemu je: V_{ps} ...izmjerena pseudobrzina, Δf_{KPD} ...izmjerena pseudodoplerova frekvencija, $\lambda = c/f$...valna duljina, f ...frekvencija vala nosioca.

Stalna greška mjerenja brzine određena je izrazom:

$$\Delta V = \Delta f_{det} \cdot \lambda \quad (2.5)$$

pri čemu je f_{det} ...iznos neusklađenosti frekvencija odašiljača.

Da bi se odredila brzina kretanja pokretnog korisničkog položaja/objekta, potrebno je derivirati izraz (2.3) [36] te se dobiva novi sustav jednadžbi (primjer za četiri vidljiva satelita):

$$\begin{aligned} \frac{(x_{sat1} - x_c) \cdot (\dot{x}_{sat1} - \dot{x}_c) + (y_{sat1} - y_c) \cdot (\dot{y}_{sat1} - \dot{y}_c) + (z_{sat1} - z_c) \cdot (\dot{z}_{sat1} - \dot{z}_c)}{\sqrt{(x_{sat1} - x_c)^2 + (y_{sat1} - y_c)^2 + (z_{sat1} - z_c)^2}} &= \lambda \cdot (\Delta f_{KDP1} + \Delta f_{det}) \\ \frac{(x_{sat2} - x_c) \cdot (\dot{x}_{sat2} - \dot{x}_c) + (y_{sat2} - y_c) \cdot (\dot{y}_{sat2} - \dot{y}_c) + (z_{sat2} - z_c) \cdot (\dot{z}_{sat2} - \dot{z}_c)}{\sqrt{(x_{sat2} - x_c)^2 + (y_{sat2} - y_c)^2 + (z_{sat2} - z_c)^2}} &= \lambda \cdot (\Delta f_{KDP2} + \Delta f_{det}) \\ \frac{(x_{sat3} - x_c) \cdot (\dot{x}_{sat3} - \dot{x}_c) + (y_{sat3} - y_c) \cdot (\dot{y}_{sat3} - \dot{y}_c) + (z_{sat3} - z_c) \cdot (\dot{z}_{sat3} - \dot{z}_c)}{\sqrt{(x_{sat3} - x_c)^2 + (y_{sat3} - y_c)^2 + (z_{sat3} - z_c)^2}} &= \lambda \cdot (\Delta f_{KDP3} + \Delta f_{det}) \\ \frac{(x_{sat4} - x_c) \cdot (\dot{x}_{sat4} - \dot{x}_c) + (y_{sat4} - y_c) \cdot (\dot{y}_{sat4} - \dot{y}_c) + (z_{sat4} - z_c) \cdot (\dot{z}_{sat4} - \dot{z}_c)}{\sqrt{(x_{sat4} - x_c)^2 + (y_{sat4} - y_c)^2 + (z_{sat4} - z_c)^2}} &= \lambda \cdot (\Delta f_{KDP4} + \Delta f_{det}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

pri čemu su \dot{x}, \dot{y} i \dot{z} ...nepoznate vrijednosti brzina promjena koordinata korisničkog položaja/objekta.

Geometrija satelita u određenom je trenutku fiksna kovarijacijska matrica. Da bi se moglo obaviti prebacivanje grešaka pseudoudaljenosti u kovarijancu položajnih grešaka sustava GNSS, potrebna su dva preduvjeta. Prvi je preduvjet početna pretpostavka da je vrijednost DOP-koeficijenta razdiobe točnosti položaja identična i jednako raspodijeljena za sve satelite koji sudjeluju u određivanju korisničkog položaja. Drugi je uvjet pretpostavka da je varijanca jednaka drugom korijenu UERE-ove korisničke razdiobe točnosti.

Rješavanjem prikazana sustava određuje se trenutačna brzina pokretnog korisničkog položaja/objekta s obzirom na sve prostorne koordinate i vrijednosti neusklađenosti frekvencija odašiljača. Ukoliko se razmatra mogućnost u kojem je pokretni korisnički položaj plovila, utoliko se prati kretanje samo s obzirom na ravninu xy te se smatra da je vrijednost $\dot{z} = 0$. Tada je dovoljno primati i obrađivati signale trima satelitima. Brzina plovila s obzirom na ravninu xy određena je relacijom:

$$V_r = \sqrt{\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2} \quad (2.7)$$

pri čemu je V_r ... brzina kretanja plovila u ravnini xy .

Označivši $\dot{x}_c = V_x$, $\dot{y}_c = V_y$, slijedi:

$$V_r = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (2.8)$$

Određivanje smjera kretanja plovila θ obavlja se temeljem određivanja brzine kretanja plovila po koordinatama x i y [34], [36]:

$$\theta = \arctg \frac{V_x}{V_y} \quad (2.9)$$

Pretpostavivši da je iznos srednje kvadratne greške (SKP) (engl. *Root Mean Square Error* – RMS) σ pri mjerenju jednak po koordinatnim osima x i y : $\sigma(V_x) = \sigma(V_y) = \sigma_{SKP}$, slučajna greška određivanja smjera ovisi o greškama ΔV_x te ΔV_y , i može se odrediti kao rezultat deriviranja izraza (2.9) iz čega slijedi:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta V_x V_y - \Delta V_y V_x}{V_y^2 \left(1 + \frac{V_x^2}{V_y^2}\right)} = \frac{\Delta V_x V_y - \Delta V_y V_x}{V_r^2} \quad (2.10)$$

Budući da su slučajne greške ΔV_x i ΔV_y neovisne, i greške varijacije jednake su:

$$\Delta\bar{V}_x^2 = \Delta\bar{V}_y^2 = \sigma_{SKP}^2 \quad (2.11)$$

Tada slijedi:

$$\overline{\Delta\theta^2} = \frac{\Delta\bar{V}_x^2 V_y^2 + \Delta\bar{V}_y^2 V_x^2}{V_r^2} = \frac{\sigma_{SKP}^2}{V_r^2}, \quad [\text{rad}^2] \quad (2.12)$$

čime je izmjerena SKP obrnuto proporcionalna brzini kretanja plovila.

2.4. Radionavigacijski parametri sustava

Sateliti sustava GLONASS odašilju navigacijske radiosignale u tri valna područja: L1, L2 i L3, s pripadajućim rasponima nosećih frekvencija:

- L1: 1598,0625 – 1604,25 MHz
- L2: 1242,9375 – 1247,75 MHz
- L3: 1202,025 MHz (nominalna vrijednost).

Upotrebljava se ukupno 14 primarnih frekvencija međusobno odijeljenih frekvencijskim korakom (engl. *frequency step*) Δf , koji je jedinstven i konstantan za svako navedeno valno područje. Stoga se nominalna vrijednost noseće frekvencije valnog područja L1, L2 i L3 određuje po izrazu [33], [36]:

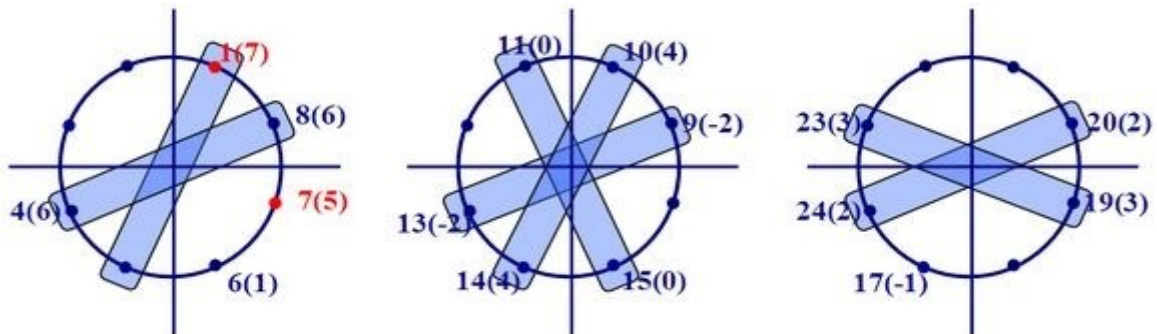
$$f_1 = f_{10} + k\Delta f_1 \quad (2.13)$$

$$f_2 = f_{20} + k\Delta f_2 \quad (2.14)$$

$$f_3 = f_{30} + k\Delta f_3 \quad (2.15)$$

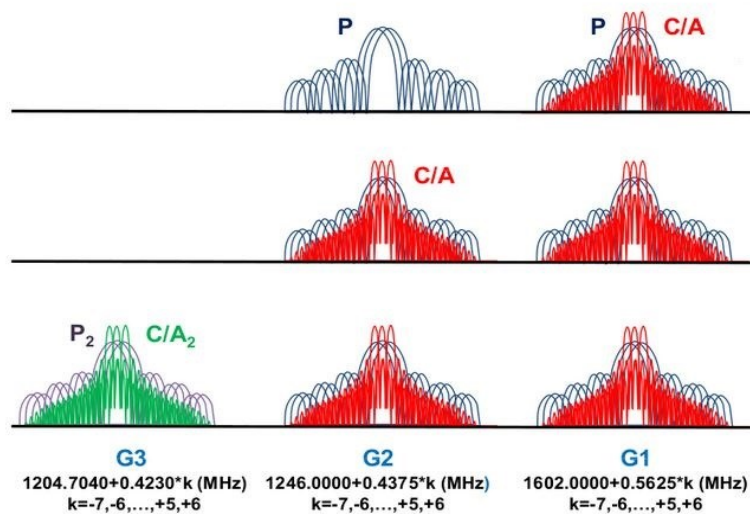
pri čemu je: f_{10} ...1602 MHz, f_{20} ...1246 MHz, f_{30} ...1202 MHz. k ... dodijeljeni serijski broj noseće frekvencije f_1 , f_2 i f_3 . Indeks k u rasponu je od -7 do +4 (+6) [33], [36], [57]. Vrijednosti frekvencijskih koraka jesu: $\Delta f_1 = 0,5625$ MHz, $\Delta f_2 = 0,4375$ MHz te je za valno područje L3 vrijednost $\Delta f_3 = 0,4375$ MHz.

Raspon indeksa k daje ukupno 14 frekvencijskih kanala, od kojih se dva upotrebljavaju za testiranje. Da bi 23 operativna satelita mogla istovremeno emitirati na 12 frekvencija, sateliti imaju antipodni raspored, pri čemu međusobno antipodni sateliti upotrebljavaju istu frekvenciju (Slika 2.5.).



Slika 2.5.: Međusobni raspored satelita po orbitama. Vrijednost parametra $i(k)$ označava da se satelit s indeksom almanah koristi frekvencijskim korakom k [57]

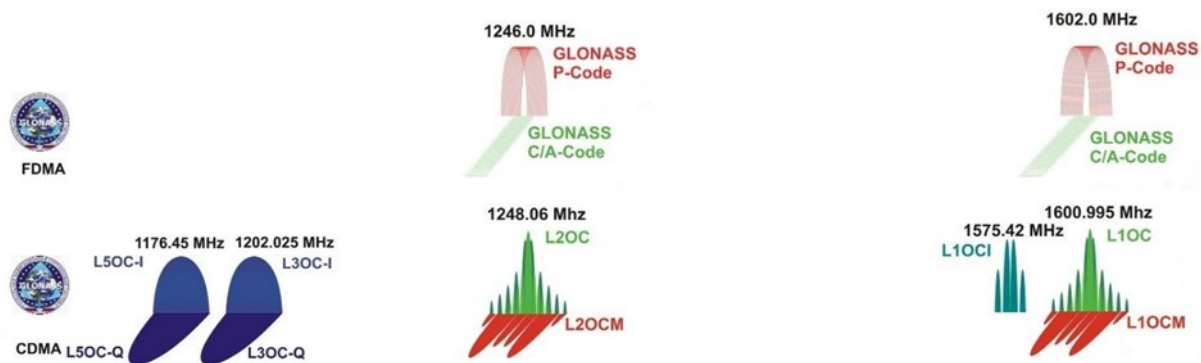
Generacijski prikaz frekvencijā i namjene odašiljanih signala prikazani su na Slici 2.6. Izvorna je bila vojna namjena s dvama signalima P za vojnu upotrebu, a nova K-generacija emitira G1-C/A, G2-C/A te G3-C/A2 signale za civilnu upotrebu uz novi vojni signal P2. Prikazana je i raspršenost signala oko nominalnih frekvencijā. Posebnost sustava GLONASS, s obzirom na druge sustave GNSS, proizlazi iz koncepcije sustava koji je razvijan uz primjenu višestrukog pristupa s raspodjelom frekvencijā (engl. *Frequency Division Multiple Access – FDMA*). Ova metoda odvajanja pruža veću otpornost signala na šum [3], [6], što je omogućilo da svi sateliti emitiraju istu navigacijsku poruku (engl. *code*) na različitim frekvencijama bez potrebe za kodiranjem signala s ciljem njihova međusobnog odvajanja.



Slika 2.6.: Prikaz namjene i rasporeda odašiljanih GLONASS-ovih frekvencija [57]

Novija generacija GLONASS satelita (serija K) uvela je u upotrebu i metodu višestrukog pristupa s kodnim odvajanjem frekvencijā (engl. *Code Division Multiple Access – CDMA*), za sada samo za vojnu upotrebu (Slika 2.7.) [33], [57]. Metoda CDMA omogućava da svi sateliti upotrebljavaju istu frekvenciju vala nosioca (puni frekventni opseg). Pritom je nužno provesti pojedinačno odvajanje (kodiranjem) signala vala nosioca sa svakog pojedinačnog satelita zato što svi sateliti istovremeno upotrebljavaju puni frekvencijski opseg kanala vala nosioca.

Primjenom tehnologije FDMA svi sateliti istovremeno upotrebljavaju istu frekvenciju signala pseudoudaljenosti pri čemu je frekvencija vala nosioca podijeljena na pod pojaseve (engl. *sub-channels*) koja je jedinstvena za svaki satelit [46].



Slika 2.7.: Prikaz primijenjenih tehnika odvajanja frekvencija po valnim područjima GLONASS-ovih frekvencija s tipom navigacijske poruke [57]

2.5. Izvori greške položaja u sustavu GLONASS

Određivanje korisničkog položaja temeljem radionavigacijskih satelitskih signala predstavlja teorijski i praktični problem mjerenja i interpretacije podataka. Ovdje spadaju vremensko-prostorno određivanje položaja satelita, mjerenja okultacije (engl. *occultation measurement*), gibanje elektromagnetskog vala u nehomogenom mediju, nehomogeno gibanje nehomogenog medija i dr. [58], koji su zajednički svim sustavima GNSS. Greške položaja određenog sustavom GLONASS mogu se podijeliti u tri skupine: greške satelitskog segmenta sustava, greške prijenosnog medija te greške korisničkog segmenta i mikrookoliša, pri čemu su greške prijenosnog medija (s obzirom na svojstva ionosfere) prikazane posebno za jednofrekvencijske i dvofrekvencijske prijavnike (Tablica 2.2.). Radionavigacijski signal osim navedenih sistemskih grešaka grupiranih u navedene cjeline, podložan je i nizu dodatnih grešaka. Ovdje se ubrajaju greške uzrokovane plimama izazvanih korom Zemlje (engl. *Solid Earth tides*), polovima, kretanjem oceana te atmosferskom plimom i gibanjem tektonskih ploča koja utječu na točnost geodetskih koordinata prijavnika [56]. Veličina greške korisničkog položaja uzrokovana navedenim gibanjima antene korisničkog prijavnika mogu iznositi nekoliko desetaka centimetara za gibanja tektonskih ploča i plima izazvanih pomacima kore Zemlje. Plime izazvane polovima mogu uzrokovati grešku korisničkog položaja do nekoliko centimetra, kao i oceanska gibanja s greškom do jednog centimetra koja trebaju biti uzeta u obzir na pojedinim područjima [59]. Budući da su iznosi ovih grešaka značajni u područjima primjene gdje se zahtijeva visoka točnost korisničkog položaja te s obzirom na temeljne odrednice ovog istraživanja, navedeni uzroci greške korisničkog položaja nisu uključene u disertaciju.

Osim određivanja korisničkog položaja određivanjem pseudoudaljenosti, prikazano je i određivanje pseudobrzine s pratećim greškama. Tako određene greške mjerenja pseudoudaljenosti multipliciraju se za koeficijent(e) geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Geometric Dilution of Precision* – GDOP) specifičnih vrijednosti za sustav GLONASS [34], [36], [47].

2.5.1. Greške satelitskog segmenta

Greška satelitske komponente sustava GLONASS sadrži greške međusobne sinkronizacije satelita s obzirom na mogućnosti usklađivanja satelitskih vremenskih oscilatora s centralnim vremenskim oscilatorom nadzemno-kontrolnog kompleksa te greške određivanja predviđenog satelitskog položaja efemeridima i stvarnim položajem satelita. Budući da je nemoguće uskladiti atomske satove na objektima koji se kreću signalom koji ima iste karakteristike i ograničenja kao i signal GNSS-a, usklađivanje atomskih satova uključuje i relativističku korekciju.

2.5.1.1. Greška međusobne sinkronizacije satelita

Greška međusobne sinkronizacije satelita ovisi o uzajamnoj stabilnosti i usklađenosti atomskih satova smještenih na satelitima, centralnog vremensko-frekvencijskog sinkronizatora smještenog u Nadzemno-kontrolnom kompleksu te o točnosti prognoze položaja satelita određenog efemeridom satelita. Atomske satove prve generacije satelita sustava GLONASS omogućavali su relativnu točnost od $2 - 4 \cdot 10^{-13}$, a GLONASS-ova M-generacija satelita s cezijevim atomskim satovima dostiže relativnu točnost od 10^{-13} . Akumulirana odstupanja vremenske sinkronizacije usklađuju se svakih 12 sati. Srednja kvadratna greška uzajamne sinkronizacije vremenskih ljestvica satelita iznosi približno devet ns [33], [49]. S obzirom na to da vremensko odstupanje od jednog ns uzrokuje grešku korisničkog položaja od 0,3 metra, SKP međusobne sinkronizacije satelita sudjeluje u ukupnoj greški određivanja pseudoudaljenosti s 2,7 metara (Tablica 2.2.) [33].

2.5.1.2. Greške efemerida

Iznos greške efemeride satelita ovisi o karakteristikama i točnosti opreme korištene na satelitu, točnosti opreme korištene za nadzor i korekciju efemerida u nadzemno-kontrolnom kompleksu te o broju takvih kontrolno-upravljačkih centara [36]. Podatci efemerida osvježavaju se jednom dnevno. Greške efemeride mijenjaju se ovisno o trenutnom položaju satelita unutar orbite,

pri čemu se javljaju ekstremno nepovoljni položaji u kojima se greška efemeride ne može modelirati. Promatrajući prostorno kretanje satelita, najveća odstupanja položaja satelita iznose [33]:

- po visinskom pomaku pet metara
- po transverzalnom pomaku do 20 metara
- po bočnom pomaku deset metara.

Promatrajući položaje satelita izvan ekstremnih položaja vrijednosti, odstupanja grešaka efemeride iznose:

- po visinskom pomaku četiri metara
- po transverzalnom pomaku do 15 metara
- po bočnom pomaku deset metara.

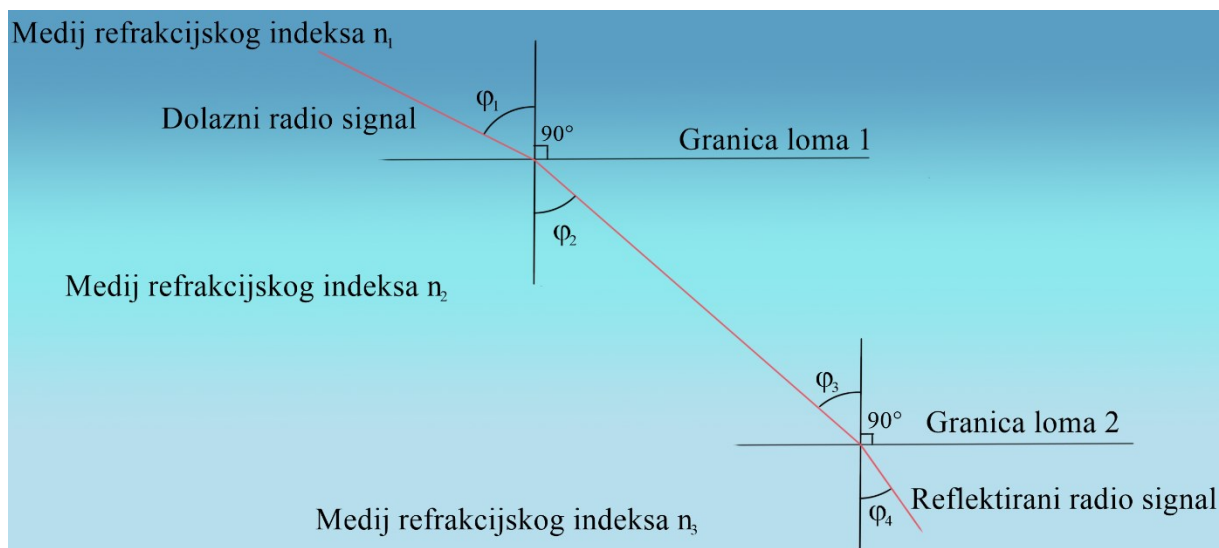
Ovisno o međusobnom položaju prijarnika i satelita, u ukupnoj točnosti pseudoudaljenosti (koje ovisi o točnosti efemeride) SKP efemeride sudjeluje s 1,5 metara (Tablica 2.2.).

2.5.2. Greške prijenosnog medija

Greške prijenosnog medija uključuju povećanje putanje širenja GLONASS-ova radionavigacijskog signala zbog promjena indeksa refrakcije, apsorpcije i disperzije kroz pojedine slojeve atmosfere [60] te promjenu brzine širenja radionavigacijskog signala ovisno o elektromagnetskim aktivnostima atmosfere. Pritom se odvojeno pristupa učincima i rješavanju utjecaja ionosfere i troposfere. Budući da je razdioba plinova i plazme u atmosferi prostorno i vremenski neujednačena, javlja se prostorna i vremenska neujednačenost refrakcijskih gradijenata na putanji radionavigacijskog signala. Prolaz radionavigacijskog signala kroz područja s različitim refrakcijskim gradijentima dovodi do promjene kuta gibanja radionavigacijskog signala kako ga definira Snellov zakon loma (engl. *Snell's law of refraction*) [47]:

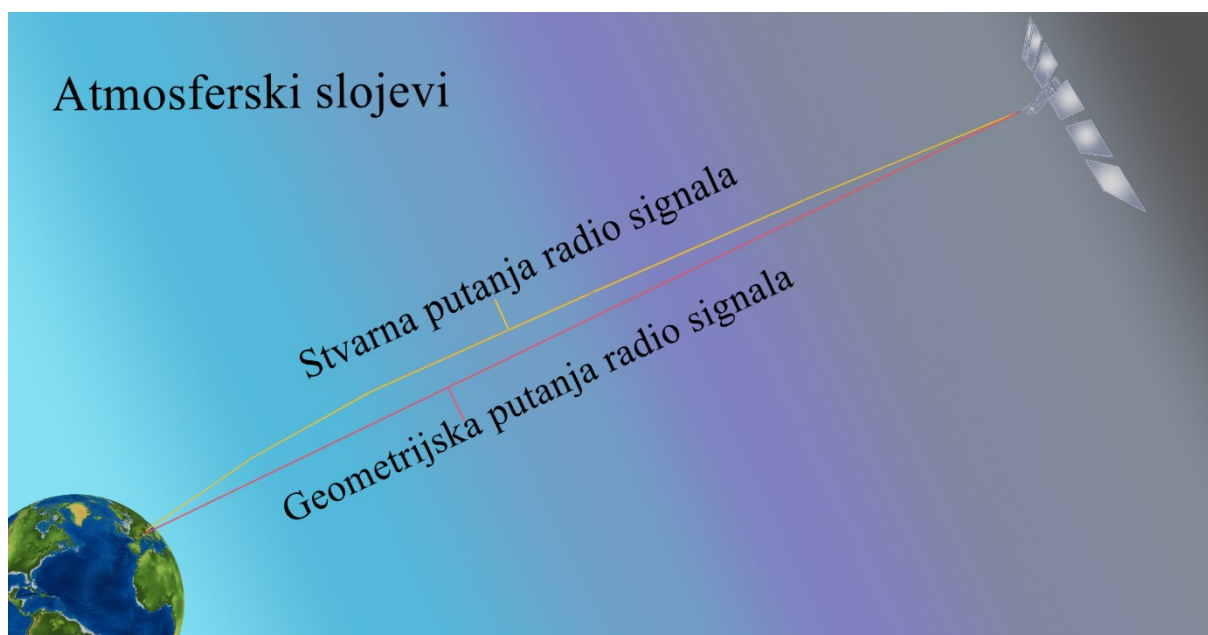
$$n_1 \cdot \sin\varphi_1 = n_2 \cdot \sin\varphi_2 \quad (2.16)$$

pri čemu trenutni medij širenja elektromagnetskog vala ima refrakcijski indeks n_1 i u njemu se elektromagnetski val širi pod kutom φ_1 (kut između smjera širenja i okomice na graničnu plohu susjednog medija različitog refrakcijskog indeksa). Susjedni medij ima refrakcijski indeks n_2 i na dodirnoj plohi elektromagnetski će val zauzeti kut širenja φ_2 (Slika 2.8.).



Slika 2.8.: Prikaz Snellova zakona loma

Osnovni je aksiom navedena fenomena odnos promjene kutova širenja, pri čemu vrijedi: $\varphi_2 < \varphi_1$ zato jer je $n_2 > n_1$, te širenje elektromagnetskog signala kroz slojeve s različitim elektrodinamičkim svojstvima (dielektrična permitivnost, magnetska permeabilnost) za posljedicu ima promjenu otklona od geometrijske putanje. Elektromagnetski se val pri prolasku kroz medij širi u smjeru gradijenta brzine širenja te nailaskom na medij s manjim indeksom refrakcije dolazi do otklona od dotadašnjeg smjera širenja, pri čemu sa putanja elektromagnetskog vala povija te time i povećava, ilustrirano na Slici 2.9.



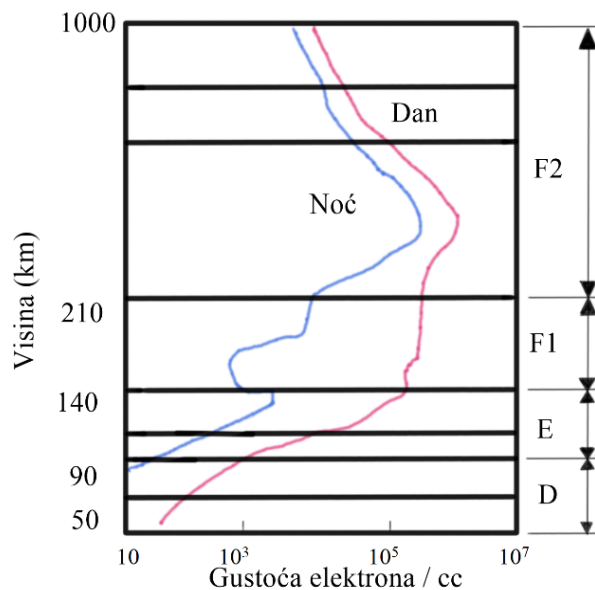
Slika 2.9.: Prikaz otklona stvarne putanje elektromagnetskog vala u odnosu na geometrijsku putanju pri širenju kroz različite slojeve atmosfere

Uzroci refrakcije različiti su ovisno o tome širi li se elektromagnetski val slojem ionosfere ili troposfere, stoga se i pristupi greškama ionosferskog i troposferskog kašnjenja razlikuju unutar GLONASS-ova sustava, pri čemu se u troposferi javljaju i dodatni učinci koji utječu na širenje elektromagnetskog vala.

2.5.2.1. Greška ionosfere

Ionosfera je vanjski električno-vodljivi sloj Zemljine atmosfere, predstavlja složen i promjenjiv sustav te je jedan od najznačajnijih izvora grešaka određivanja korisničkog položaja GNSS-ovim sustavom (uključujući i navigaciju te određivanje vremena) [61]. Donja granica počinje na visinama 60 – 80 km [61], [62], odnosno 100 km [34] te se prostire do iznad 1000 km visine. Premda je u ionosferi sadržano manje od 0,1 % ukupne mase Zemljine atmosfere [61], ona ima značajan utjecaj na ukupno širenje elektromagnetskog zračenja. Ionosferu sačinjava razrijeđena plinovita plazma, tj. uz molekule i ione plina prisutni su i slobodni elektroni. Sunčevo zračenje, ultraljubičasto (u najvećoj mjeri) te rendgensko i korpuskularno [62] zračenje dovodi do ionizacije plina i otpuštanja elektrona. U ionosferi na različitim visinama postoje nekoliko relativnih maksimuma ionizacije, koji nemaju čvrsto određene granice te se područja takvih maksimuma uvjetno nazivaju *slojevima ionosfere*. Pritom se razlikuje više slojeva [62] (Slika 2.10.):

- sloj D: prostire se u području 60 – 90 km visine te nastupa samo danju (noću nestaje); na elektromagnetske valove srednjih i visokih frekvencija djeluje apsorpiranjem, a valove niskih frekvencija reflektira
- sloj E: zauzima područje 100 – 150 km visine, proces ionizacije je slabiji, ali stabilniji nego u sloju D, dolazi do refleksije valova srednjih frekvencija (noću se javlja refleksija valova i niskih frekvencija)
- sloj F: u ljetnom periodu danju se razdvaja na dva sloja F1 i F2, tj. kada postoji proces ionizacije i proces rekombinacije, formiraju se dva ravnotežna maksimuma koncentracije elektrona; Nosioči električnog naboja u sloju F2 uglavnom su elektroni te sloj ima jasno definiranu donju granicu i predstavlja sloj koji se uzima u obzir u ionosferskoj korekciji.



Slika 2.10.: Visinski raspored slojeva ionosfere [63]

Ukupno promatrajući, maksimalna koncentracija elektrona je u visinskom sloju ionosfere između 300 i 400 km te se povećanjem visine koncentracija ukupnog sadržaja slobodnih elektrona (engl. *Total Electron Content* – TEC) približno eksponencijalno smanjuje, da bi se na visini od 900 km svela na približno 10 % maksimalne koncentracije [33]. Kretanje vrijednosti TEC i utjecaj na GNSS-ove radiosignale ovisi o pojedinim svojstvima ionosfere. Gustoća elektrona upravo je proporcionalna stupnju solarnog zračenja i svojstvima solarnog vjetera (u polarnim i auroralnim područjima) [63]. Solarno zračenje je visokog intenziteta tijekom dana te dovodi do stvaranja slobodnih elektrona, koji se rekombiniraju s ionima ionosfere tijekom noćnog perioda. Na vrijednost TEC utječe i godišnje doba te geografski položaj. Ostali utjecaji ionosfere na širenje radionavigacijskog signala jesu refrakcija, Dopplerov pomak, apsorpcija, promjena ravnine polarizacije te scintilacija⁵ (engl. *scintillation*) [64]. Ionosferska scintilacija predstavlja brzu oscilaciju faze i amplitude signala uzrokovanu nejednakošću elektrona u ionosferi [63] te se očituje gubitkom snage signala.

Greške mjerenja pseudoudaljenosti GLONASS-ova radionavigacijskog signala nastale djelovanjem ionosfere u svojoj osnovi ovise o stanju sunčeve aktivnosti, duljini putanje radionavigacijskog signala kroz sloj ionosfere te dobu dana. Ionosfera je disperzivni medij gdje refrakcija radionavigacijskog signala ovisi o njegovoj frekvenciji [2], [3], [16]. Povećana koncentracija elektrona stvara smetnje u brzini i smjeru širenja radionavigacijskog signala, pri

⁵ Brza promjena amplitude i faze radio vala.

čemu je učinak na komponente signala dvojak: u moduliranoj komponenti radionavigacijskog signala (koja služi za određivanje pseudoudaljenosti) javlja se vremensko kašnjenje u prijemu signala, a u vala nosioca (koje je osnova za mjerenja faznog pomaka u naprednijim tehnikama određivanja korisničkog položaja) dolazi do ubrzavanja faze proporcionalno (u negativnom iznosu) kašnjenju modulirane komponente, uz izmjenu putanje širenja radionavigacijskog vala [61]. Upotrebom jednofrekvencijskih GNSS-ovih prijamnika ne može se iskoristiti navedeni dvojni fenomen te se utjecaj ionosfere treba odvojeno modelirati. Jedan je od najčešćih u upotrebi Klobučarev model (engl. *Klobuchar model*). Klobučarev model pretpostavlja da je vrijednost ionosferskog kašnjenja noću stalna i iznosi pet ns, a danju ionosfersko kašnjenje T_g ima vrijednost funkcije kosinus te može biti prikazano sljedećim izrazom [61], [65]:

$$T_g = D_c + A \cos \frac{2\pi}{B} (t - T_p) \quad (2.17)$$

pri čemu je: D_c ... noćna vrijednost ionosferskog kašnjenja = 15 ns, t ...lokalno vrijeme za koje se računa ionosfersko kašnjenje, T_p ...konstantni fazni pomak (vrijeme pojave vršne vrijednosti ionosferskog kašnjenja) = 14^h, A ... vršna vrijednost ionosferskog kašnjenja = $\sum_{n=0}^3 \alpha_n \Phi_m^n$, B ... period kosinusne komponente = $\sum_{n=0}^3 \beta_n \Phi_m^n$. Parametri α_n i β_n sadržani su u navigacijskoj poruci, a ulazni parametar Φ_m^n predstavlja geomagnetne koordinate presjeka putanje radionavigacijskog signala i centra ionosferskog sloja.

Uspješnost Klobučareva modela u korekciji ionosferske greške, bez dodatnih ulaznih podataka, iznosi 50 – 60 % [61]. Osim navedenog, u upotrebi je i više drugih empirijskih ionosferskih modela poput Bentova modela (1972.), nove varijanta modela IRI (2007.), modela Ne-Quick i dr. Zajedničko svim empirijskim modelima jest to da se temelje na prosjecima ionosferskih varijacija dužih perioda te ne smanjuju precizno vrijednosti ionosferske greške.

Ulazni parametri koji su sadržani u GLONASS-ovoj navigacijskoj poruci i omogućavaju točniju ionosfersku korekciju kompenzirajući geofizičke i heliofizičke poremećaje su [36]:

- A: numerički koeficijent maksimalnog ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u sloju ionosfere F2
- F: indeks solarne aktivnosti
- Ap: dnevni indeks geomagnetne aktivnosti.

U jednofrekvencijskih GLONASS prijamnika za ionosfersku korekciju primjenjuju se sljedeće korekcije [36]:

- za računanje pseudoudaljenosti ΔS_{ion} (m):

$$\Delta S_{ion} = 0,40364 \cdot \frac{I_e}{f^2} \quad (2.18)$$

pri čemu je: f ... frekvencija vala nosioca (GHz), I_e ... ukupni integrirani sadržaj slobodnih elektrona na putanji širenja vala izražen u TEC jedinicama (engl. *Total Electron Content Unit* – TECU), pri čemu jedan TEC = $1 \cdot 10^{16}$ elektrona m^{-2} ;

- za računanje brzine ΔV_{ion} (m/s):

$$\Delta V_{ion} = 0,40364 \cdot \frac{\dot{I}_e}{f^2} \quad (2.19)$$

pri čemu je \dot{I}_e ...brzina promjene TECU integrirana po putanji širenja vala s jediničnom vrijednošću 10^{16} el $m^{-2}s^{-1}$.

SKP pseudoudaljenosti uzrokovana prolaskom radionavigacijskog signala kroz sloj ionosfere u jednofrekvencijskih GLONASS prijarnika pojedinačno je najveća i iznosi sedam metara (Tablica 2.2.).

Budući da je iznos ionosferske greške ΔR_{ion} obrnuto proporcionalan kvadratu frekvencije vala nosioca, pri upotrebi dvofrekvencijskih GLONASS prijarnika iznos greške može se odrediti prema sljedećem izrazu [33]:

$$\Delta R_{ion} = \frac{A}{f^2} \quad (2.20)$$

pri čemu je A ...stalni koeficijent čija se veličina ne mijenja unutar petanestminutnog perioda (period stacionarnosti ionosfere).

Dvofrekvencijski prijarnik ostvaruje dva rezultata mjerenja pseudoudaljenosti:

$$\begin{aligned} \Delta R_o &= \Delta R_{r1} + \frac{A}{f_1^2} \\ \Delta R_o &= \Delta R_{r2} + \frac{A}{f_2^2} \end{aligned} \quad (2.21)$$

pri čemu je: ΔR_o ...izračunata pseudoudaljenost bez ionosferske greške, ΔR_{r1} ...rezultati mjerenja pseudoudaljenosti na frekvenciji f_1 s uračunatom ionosferskom greškom, ΔR_{r2} ... rezultati mjerenja pseudoudaljenosti na frekvenciji f_2 s uračunatom ionosferskom greškom.

Rješavajući navedeni sustav jednadžbā, dobiva se:

$$\Delta R_o = \frac{\Delta R_{r1} \cdot f_1^2 - \Delta R_{r2} \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \Delta R_{r1} \frac{1}{1 - m^2} - \Delta R_{r2} \frac{1}{1 - m^2} \quad (2.22)$$

pri čemu je m ...odnos $f_2/f_1 = 7/9$.

Završno izračunavanje ionosferske greške pseudoudaljenosti u dvofrekvencijskih GLONASS prijarnika određuje se po izrazu:

$$\Delta R_o = 2,53R_{r1} - 1,53R_{r2} \quad (2.23)$$

Ovako izračunata ionosferska SKP pseudoudaljenosti u dvofrekvencijskih GLONASS prijarnika značajno je smanjena i iznosi sedam cm (Tablica 2.2.) [33].

Računanje brzine kretanja korisničkog položaja/objekta u dvofrekvencijskih GLONASS prijarnika temelji se na zajedničkom mjerenju pomaka Dopplerovih frekvencija:

$$\Delta V_o = \Delta V_{r1} + \frac{B}{f_1} \quad (2.24)$$

$$\Delta V_o = \Delta V_{r2} + \frac{B}{f_2}$$

pri čemu je: ΔV_o ...izračunata pseudobrzina bez ionosferske greške, ΔV_{r1} ...rezultati mjerenja pseudobrzine na frekvenciji f_1 s uračunatom ionosferskom greškom, ΔV_{r2} ...rezultati mjerenja pseudoudaljenosti na frekvenciji f_2 s uračunatom ionosferskom greškom, B ...stalni koeficijent stacionarnosti ionosfere.

Istovjetno postupku rješavanja (2.21) i vrijednosti m , konačni izraz za određivanje brzine kretanja u GLONASS prijarnika određuje se po izrazu [4], [5]:

$$\Delta V_o = 4,5\Delta V_{r1} - 3,5\Delta V_{r2} \quad (2.25)$$

2.5.2.2. Greška troposfere

Greška troposfere nastaje širenjem radionavigacijskog signala kroz najniži sloj atmosfere iznad površine Zemlje. Općenito se troposfera dijeli na dva sloja: *mokri* sloj (engl. *wet*) (visine do približno 10 km iznad površine Zemlje) i *suhi* (hidrostatski) sloj (engl. *hydrostatic*) (prostire se 10 – 40 km iznad površine Zemlje) [47], [49], [62] koji uzrokuju kašnjenje radionavigacijskog signala. Budući da je troposfera nedisperzivni medij s obzirom na spektar

GNSS-ovih radionavigacijskih signala, veličina greške troposfere ne ovisi o frekvenciji radionavigacijskog signala te se ne može odrediti upotrebom dvofrekvencijskih prijamnika kao greška ionosfere. Greška troposfere može se modelirati temeljem osnovnih meteoroloških parametra troposfere: temperaturi, vlažnosti i tlaku zraka [6], [30], [34], [57], [61], [66]. Razvijeni su razni modeli za predviđanje i smanjivanje troposferske greške, između ostalih: Two-Quartic Hopfieldov model [5], Saastamoinenov model [3], Modificirani Hopfieldov model [12], Marinijev model [18], Model Davisa i sur. [67]. Navedeni modeli omogućuju, s različitim stupnjem točnosti, procijeniti *a priori* vrijednost troposferske greške. Time se dio greške uzrokovan suhim slojem troposfere može svesti na nekoliko milimetara, a dio se greške uzrokovan mokrim slojem troposfere može svesti između 10 – 20 % od stvarne vrijednosti [63].

Opći izraz smanjivanja brzine širenja radionavigacijskog GLONASS-ova signala uzrokovan slojem troposfere c_{tr} predstavljen je izrazom [33]:

$$c_{tr} = \frac{c}{n(h)} \quad (2.26)$$

pri čemu je $n(h) > 1$... koeficijent refrakcije troposfere na visini h iznad površine Zemlje.

Pri normalnim vremenskim uvjetima iznad površine Zemlje koeficijent $n = 1,0003$. GLONASS-ov sustav koristi model standardne atmosfere, tj. model koji opisuje najvjerojatnije stanje atmosfere Zemlje. Model se zasniva na dostupnim meteorološkim podatcima te na prosjecima troposferskih kašnjenja za područja bez meteoroloških podataka [6], [8]. Nakon primjene modela za korekciju troposferske greške SKP pseudoudaljenosti u uvjetima standardne atmosfere iznosi dva metra (Tablica 2.2.) [33].

Daljnja diskusija morfologije troposfere, utjecaja troposferske greške te troposferskih modela iznosi se u sljedećim poglavljima. Unaprjeđenje jednog od standardnih troposferskih modela temeljenim na podatcima GLONASS-ova sustava predstavlja okosnicu disertacije.

2.5.3. Greške korisničkog segmenta i mikrookoliša

Greška korisničke komponente podrazumijeva greške mjerenja pseudoudaljenosti nastale zbog pojave šuma prijamnika, pojave višestrukih puteva radionavigacijskog signala te zbog kašnjenja obrade signala unutar sklopova korisničke aparature [33], [36], [47], [63].

2.5.3.1. Greška uzrokovana šumom radionavigacijskog signala

Greška pseudoudaljenosti uzrokovana termičkim šumom javlja se prilikom procesuiranja primljenog radionavigacijskog signala unutar prijavnika te se smatra slučajnom greškom sa svojstvima bijelog šuma zato što nije u vremenskoj korelaciji [63]. Glavna je odlika greške to što nema isti učinak u modulirane komponente i komponente vala nosioca. Greška uzrokovana šumom u modulirane komponente radionavigacijskog signala pokazuje postojani uzorak rasipanja, a u komponente vala nosioca uzrokuje znatno manju raspršenost, pri čemu je uzorak nepostojan i isprekidan [47]. Greška pseudoudaljenosti uzrokovana šumom prijavnika stoga se može promatrati sa stajališta preciznosti i točnosti. Prilikom mjerenja pseudoudaljenosti (temeljenom na moduliranoj komponenti radionavigacijskog vala) šum ima izraženiji intenzitet jednoznačnog karaktera (engl. *unambiguous*), a prilikom mjerenja brzine (mjerene na komponenti vala nosioca) šum ima mali intenzitet, ali je višeznačnog karaktera (engl. *ambiguous*). Posljedica je to da relativni rezultati dobiveni mjerenjem vala nosioca mogu biti vrlo precizni (u smislu međusobnih vrijednosti i standardne devijacije dobivenih položaja), ali odstupanje s obzirom na stvarni korisnički položaj može biti i izrazito veliko jer je početna nominalna vrijednost prisutnog (engl. *bias*) šuma nepoznata. Istovremeno, utjecaj šuma na moduliranu komponentu daje raspršenije rezultate sa znatno većim ekstremnim vrijednostima, ali su oni grupirani oko srednje vrijednosti koja ne odstupa značajnije od stvarnog korisničkog položaja. Pritom ne postoji korelacija utjecaja šuma na istodobna mjerenja modulirane komponente i komponente vala nosioca jednog prijavnika [63]. To je glavni razlog zbog čega se za promatranja oborive vode (engl. *Precipitable Water Vapor – PWV*) u atmosferi upotrebljavaju mjerenja faze signala vala nosioca te se ne mjeri točnost korisničkog položaja, već zakašnjenje u širenju vala uzrokovano stanjem atmosfere [59].

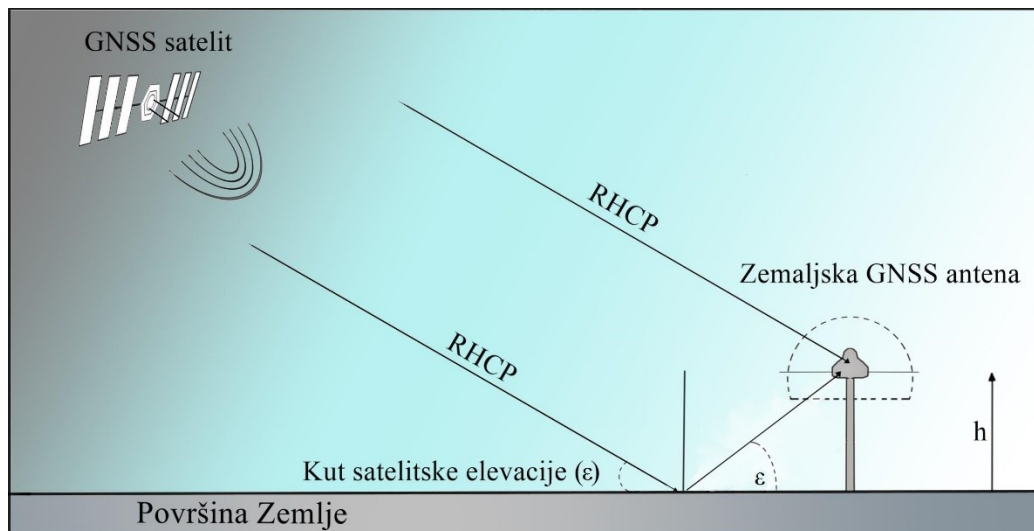
Vrijednosti greške šuma ovise o snazi radionavigacijskog signala, dizajnu antene prijavnika, algoritmu za analogno-digitalnu pretvorbu i dr. [47] te su neovisne o proizvođaču prijavnika ili antene. SKP pseudoudaljenosti uzrokovana pojavom šuma u GLONASS prijavnika iznosi 2,5 metara (Tablica 2.2.), pri čemu se njezin iznos prilikom mjerenja pseudoudaljenosti upotrebom algoritma za dvofrekvencijsko mjerenje trostruko povećava [33].

2.5.3.2. Greška višestazne putanje radionavigacijskih signala

Na svojem putu radionavigacijski signal može, osim izravnom putanjom od satelita (engl. *Line-of-sight – LOS*), do antene prijavnika doći sa zakašnjenjem reflektiran od prepreka na svojem širenju. Prepreke mogu biti zemaljski objekti od kojih će se radionavigacijski signal

reflektirati (moguće i višekratno) te prisutni objekti u zraku i/ili moru (druga plovila, morske instalacije, plutače i dr.). Greška višestazne putanje različito se manifestira u različitim GNSS-ovim frekvencijama te se javlja u modulirane komponente i komponente vala nosioca radionavigacijskog signala uz ukupno kašnjenje radionavigacijskog signala. Moguće su i višestruke refleksije između navedenih objekata [3], [7], pri čemu se javljaju četiri osnovna parametra o kojima ovisi greška višestazne putanje GNSS-ova radionavigacijskog signala [61] (Slika 2.11.):

- valna duljina GNSS-ova radionavigacijskog signala (λ)
- odnos amplitude reflektiranog vala i amplitude izravno primljenog vala (α)
- kut elevacije GNSS-ovih satelita (ϵ)
- visina GNSS-ove antene (H).



Slika 2.11.: Višestazna putanja radionavigacijskog signala [61]

Međusobna povezanost navedenih parametara može se prikazati izrazom:

$$\delta\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \sin \left(4\pi \frac{h}{\lambda} \sin \epsilon \right)}{1 + \alpha \cos \left(4\pi \frac{h}{\lambda} \sin \epsilon \right)} \right) = \delta\Phi(\lambda, \alpha, \epsilon, H) \quad (2.27)$$

pri čemu je $\delta\Phi$...vrijednost pomaka reflektirane faze vala u odnosu na ukupnu vrijednost (direktni plus reflektirani val).

Budući da ovisi o promjenjivoj okolini pojedinačnog GNSS-ova prijammnika te dizajnu antene i prijammnika, grešku višestazne putanje radionavigacijskih signala nije moguće u

potpunosti smanjiti ili ukloniti, čak ni primjenom metode dvostrukog diferenciranja (engl. *double differences* – DD) [54], [61]. Polarizacija radionavigacijskog signala primljenog na anteni GNSS-ova prijamnika može biti dvojaka; u smjeru kretanja kazaljke (desno kružno-polarizirajuća) (engl. *Right-hand Circular Polarization* – RHCP) ili obrnuto od smjere kretanja kazaljke (lijevo kružno-polarizirajuća) (engl. *Left-hand Circular Polarization* – LHCP) (Slika 2.11.). Različite podloge (zemlja, voda, snijeg, vegetacija i dr.) uvjetuju i različit proces refleksije. Ukoliko se refleksija odvija unutar ravnine upadnog polja (engl. *incident field*), utoliko će koeficijent refleksije biti pokazatelj promjene stanja polarizacije upadnog polja i stupnja slabljenja reflektirajućeg polja [61]. Reflektirani signal, uslijed višestruke refleksije, zakašnjela je i obično slabija inačica originalnog, direktnog satelitskog signala. Ključni su čimbenici smještaj antene prijamnika s obzirom na blizinu potencijalne reflektirajuće strukture (uključujući i površinu Zemlje) i elevacija (engl. *elevation*) satelita (ε) [33], [47], [61], [62] te stoga razlikujemo: (i) greške višestazne putanje radionavigacijskih signala uzrokovane promjenama kuta satelitske elevacije te (ii) uzrokovane promjenama visine antene.

- i. Promatrajući greške višestazne putanje i polazeći od izraza (2.27), može se uvesti koeficijent $M = 4\pi \frac{h}{\lambda}$, pri čemu izraz (2.27) poprima formu [61]:

$$\delta\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \sin(M \sin \varepsilon)}{1 + \alpha \cos(M \sin \varepsilon)} \right) = \delta\Phi(\lambda, M, \varepsilon) \quad (2.28)$$

Budući da se visina antene h ne mijenja, vrijednost M ne mijenja se tijekom vremena te je brzina promjene reflektiranih višestaznih signala ($V_{\delta\Phi}$) povezana s promjenom kuta elevacije satelita. Vrijednost promjene kuta elevacije satelita (V_{ε}) može se izraziti:

$$\frac{V_{\delta\Phi}}{V_{\varepsilon}} = \frac{d\delta\Phi/dt}{d\varepsilon/dt} = \frac{d\delta\Phi}{d\varepsilon} = \frac{\frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\alpha \sin(M \sin \varepsilon)}{1 + \alpha \cos(M \sin \varepsilon)} \right)}{1 + \left(\frac{\alpha \sin(M \sin \varepsilon)}{1 + \alpha \cos(M \sin \varepsilon)} \right)^2} \quad (2.29)$$

Razvijajući izraz (2.29) dobiva se pojednostavljeni izraz:

$$\frac{V_{\delta\Phi}}{V_{\varepsilon}} = \frac{d\delta\Phi}{d\varepsilon} = M\alpha \frac{\alpha \cos \varepsilon + \cos \varepsilon \cos(M \sin \varepsilon)}{(1 + \alpha \cos(M \sin \varepsilon))^2} \quad (2.30)$$

Kada je elevacija satelita nula ili $\pi/2$, iz izraza (2.30), slijedi:

$$(2.31)$$

$$\varepsilon = 0 \Rightarrow \frac{d\delta\Phi}{d\varepsilon} = M\alpha \frac{\alpha + 1}{(1 + \alpha)^2} = \frac{M\alpha}{1 + \alpha}$$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{d\delta\Phi}{d\varepsilon} = 0 \quad (2.32)$$

- ii. Promjena greške višestazne putanje s obzirom na promjenu visine antene GNSS-ova prijamnika, analogno izrazu (2.29), može se iskazati izrazom:

$$\frac{V_{\delta\Phi}}{V_H} = \frac{d\delta\Phi/dt}{dH/dt} = \frac{d\delta\Phi}{dH} = \frac{\frac{d}{dH} \left(\frac{\alpha \sin(NH)}{1 + \alpha \cos(NH)} \right)}{1 + \left(\frac{\alpha \sin(NH)}{1 + \alpha \cos(NH)} \right)^2} \quad (2.33)$$

pri čemu je N ...koeficijent u funkciji elevacije kuta satelita definiran izrazom [61]:

$$N = \frac{4\pi}{\lambda} \sin\varepsilon \quad (2.34)$$

Odnos između visine antene V_H i promjene brzine reflektiranih višestaznih signala ($V_{\delta\Phi}$) uz postojanu elevaciju kuta satelita (ε) može se pojednostavljeno prikazati:

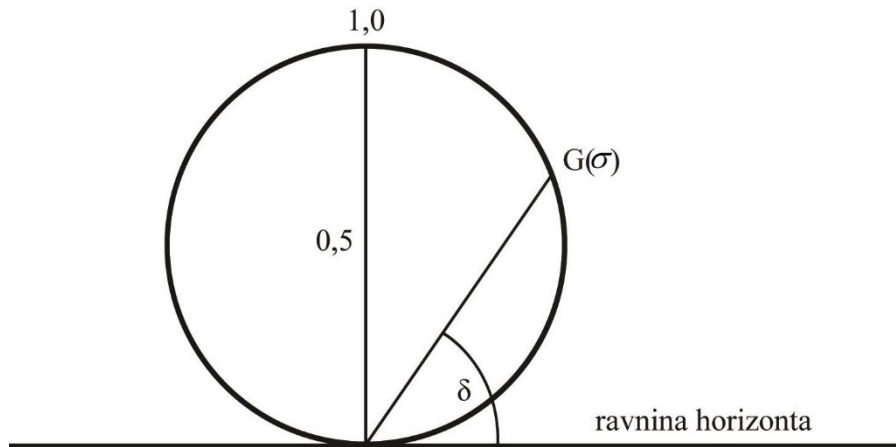
$$\frac{V_{\delta\Phi}}{V_H} = \frac{d\delta\Phi}{dH} = N\alpha \frac{(\cos(NH) + \alpha)}{(\alpha + \cos(NH))^2 + \sin^2(NH)} \quad (2.35)$$

Sukladno (2.31), ako visina antene iznosi nula uz vrijednost koeficijenta N koji je u funkciji elevacije kuta satelita, slijedi izraz:

$$\frac{d\delta\Phi}{dH} = N \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (2.36)$$

Greški višestazne putanje radionavigacijskog signala prvenstveno su izloženi mobilni korisnici satelitskog određivanja korisničkog položaja.

Greška višestazne putanje može se smanjiti pažljivim izborom lokacije za smještanje antene prijamnika te posebnim dizajnom antene. Antene GLONASS prijamnika dizajnirane su s usmjerenim vrhom sfernog oblika (engl. *choke ring*) te se izravno primljeni signali uvode na ulaz prijamnika, a reflektirani se signali odbijaju. Ovisno o tipu i poziciji objekta na koji se antena ugrađuje, ulazni kut signala može se prilagođavati tako da brodske GLONASS antene imaju prostorno usmjerenu karakteristiku primanja signala samo iznad ravnine horizonta (uzevši u obzir visinski položaj antene) (Slika 2.12.) [34].



Slika 2.12.: Dijagram usmjerenosti GLONASS-ove antene za brodske prijamnike [33]

Prostorno-selektivna karakteristika antene $G(\sigma)$ im oblik [33]:

$$G(\sigma) = \frac{0,5 \sin 2\delta}{\cos \delta} = \sin \delta \quad (2.37)$$

pri čemu je δ ... ulazni kut radionavigacijskog signala. Signali s vrijednošću $\delta = 0$ ne uvode se na ulaz prijamnika.

Reflektirani radionavigacijski valovi višestruko interferiraju s korisnim radionavigacijskim valovima te je interferencija najštetnija kada reflektirani signal ima zrcalnu usklađenost s izvornim signalom, pri čemu se mijenja smjer njegove kružne polarizacije. Ona postaje ortogonalna s obzirom na izvorni signal koji time slabi. Druga je nepovoljna situacija ako reflektirani signal ima vrijeme zadržke interferencije u iznosu od jedne polovine vremenskog trajanja navigacijske poruke otkrivenih GLONASS kanala ($t_z = 1\text{ms}$), pri čemu je greška višestazne putanje najizraženija [33]. Snaga reflektiranih radionavigacijskih GLONASS signala jest 1000 – 1500 puta (30 – 32 dB) manja od snage direktnih radionavigacijskih signala. Negativni učinak višestruke refleksije može se smanjiti raznim tehnikama obrade signala u korisničkom prijamniku.

SKP višestazne putanje signala pseudoudaljenosti na frekvencijama f_1 i f_2 pri najvećem ometajućem djelovanju reflektiranih radiosignala određuje se prema izrazu [33], [36]:

$$\sigma_{ref}(R) = \frac{c \cdot \tau}{4} \cdot \sqrt{\frac{P_{ref}}{2P_s}} \sim 3 \text{ m} \quad (2.38)$$

pri čemu je: P_{ref} ...snaga reflektiranog radiosignala, P_S ... snaga izravno primljenog radiosignala, τ ...vremenski odsječak pojedinačnog signala (1,975 μ s). SKP višestazne putanje signala pseudoudaljenosti ima vrijednost približno tri metra (Tablica 2.2.).

Tablica 2.2.: Pojedinačni izvori i pripadajući iznosi SKP (σ_{pr}) pseudoudaljenosti u jednofrekvencijskih i dvofrekvencijskih GLONASS prijarnika

Izvor greške	Jednofrekvencijski prijamnik	Dvofrekvencijski prijamnik
	Greška pseudoudaljenost σ_{pr} [m]	
Greška međusobne sinkronizacije satelita	2,70	2,70
Greške efemerida	1,50	1,50
Greška ionosfere	7,00	0,07
Greška troposfere	1,50	1,50
Greška višestazne putanje signala	3,00	3,00
Greška uzrokovana šumom signala	2,50	2,50
Ukupna greška	8,70	5,00

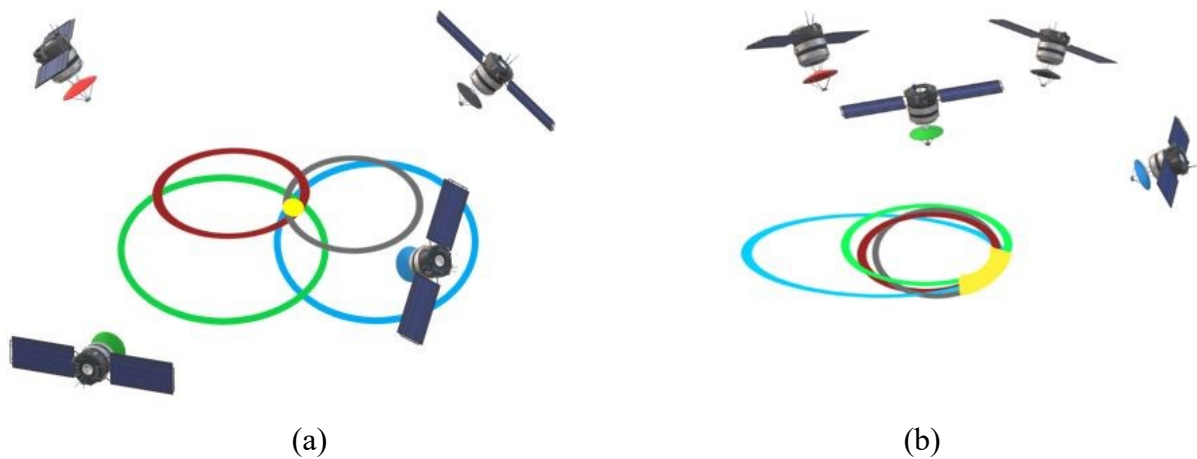
Izvor: [33]

Navedena zbirna vrijednost množi se HDOP (engl. *Horizontal Dilution of Precision*) koeficijentom, tako za HDOP = 2 ukupna greška korisničkog položaja u ravnini iznosi 17,4 m (u jednokanalnih GLONASS prijarnika).

2.5.4. Greška geometrijske razdiobe točnosti

Ne koristeći SBAS ili diferencijske podsustave korekcije, točnost korisničkog položaja (posljedično i parametara brzine te ubrzanja) ostvarena određivanjem pseudoudaljenosti podložne su popravku geometrijske razdiobe točnosti. Pritom se koordinate SKP točnosti korisničkog položaja (σ_φ , σ_λ , σ_H) mogu promatrati u ravnini (2D σ_r) i prostoru (3D σ_{rv}), kao i točnost brzine kretanja mobilnog korisničkog položaja/objekta brzine u ravnini $\sigma(V_r)$ i prostoru $\sigma(V_{rv})$. Točnost korisničkog položaja i brzine ovisi o greški izračunate pseudoudaljenosti σ_{pr} , brzini promjene pseudoudaljenosti σ_{ps} do promatranih satelita, kao i od međusobnog položaja korisničkog položaja/objekta i promatranih satelita [33], čiji međusobni odnosi dovode

do različitog stupnja neodređenosti korisničkog položaja (Slika 2.13. (a) i (b)).



Slika 2.13.: Povoljni prostorni raspored (a) i nepovoljni prostorni raspored (b) GLONASS-ovih satelita s obzirom na određivanje korisničkog položaja

Određivanje točnog korisničkog položaja i brzine, osim poznavanja pseudoudaljenosti σ_{pr} te brzine promjene pseudoudaljenosti σ_{ps} , podrazumijeva i unaprijed poznate koordinate položaja promatranih satelita dobivenih iz almanaha sustava. Pretpostavljajući da su SKP izmjerene pseudoudaljenosti σ_{pr} i SKP brzine promjene pseudoudaljenosti iste σ_{ps} , korisnički položaj i brzina kretanja određuju se sljedećim izrazima [33], [36]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \sigma_{pr} \cdot HDOP; \quad \sigma(V_r) = \sigma_{ps} \cdot HDOP \\ \sigma_{rv} &= \sigma_{pr} \cdot PDOP; \quad \sigma(V_{rv}) = \sigma_{ps} \cdot PDOP \\ \sigma_H &= \sigma_{pr} \cdot VDOP \\ \sigma_\varphi &= \sigma_{pr} \cdot G_\varphi \\ \sigma_\lambda &= \sigma_{pr} \cdot G_\lambda\end{aligned}\tag{2.39}$$

pri čemu je: HDOP... geometrijski koeficijent razdiobe točnosti položaja i brzine u horizontalnoj ravnini, PDOP (engl. *Position Dilution of Precision*)... geometrijski koeficijent razdiobe točnosti položaja i brzine u prostoru, VDOP (engl. *Vertical Dilution of Precision*)...geometrijski koeficijent vertikalne razdiobe točnosti položaja, G_φ ...geometrijski koeficijent položaja i brzine φ koordinate te G_λ ... geometrijski koeficijent položaja i brzine λ koordinate.

Međusobni odnosi geometrijskih koeficijenata prikazani su izrazima:

$$G_{\varphi}^2 + G_{\lambda}^2 + VDOP^2 = PDOP^2$$

$$G_{\varphi}^2 + G_{\lambda}^2 = HDOP^2$$
(2.40)

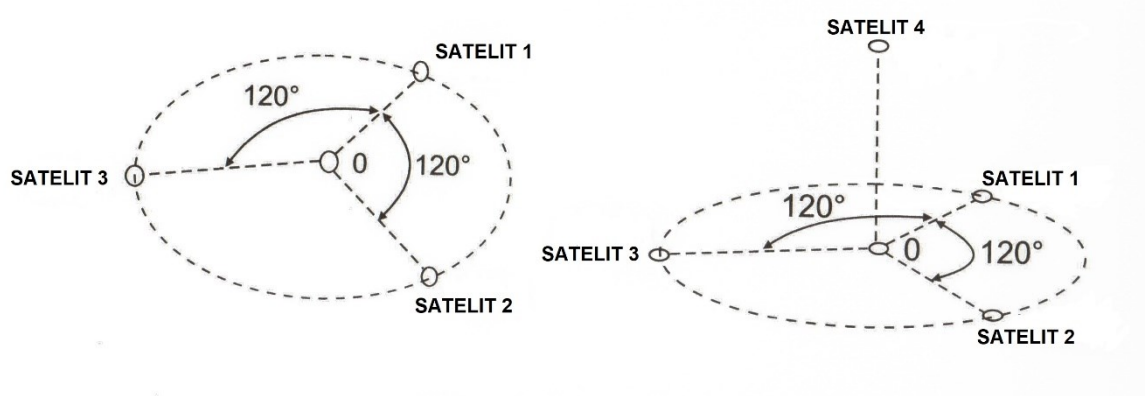
Odnosi točnosti korisničkog položaja/brzine i koeficijenta razdiobe točnosti DOP prikazani su u Tablici 2.3.

Tablica 2.3.: Vrijednost DOP koeficijenta s pripadajućom točnosti korisničkih parametara položaja i brzine

Stupanj točnosti	Vrijednost DOP koeficijenta
Idealan	1
Odličan	1 – 2
Dobar	2 – 4
Zadovoljavajuć	4 – 6
Neprihvatljiv	6 – 8
Loš	> 8

Izvor:[33], [68]

Optimalan teoretski prostorni raspored triju odnosno četiriju nužnih GLONASS satelita pri najmanjim DOP koeficijentima prikazan je na Slici 2.14, pri čemu se tri satelita nalaze u istoj ravnini s korisničkim prijamnikom ($\Delta\delta = 0^\circ$), a četvrti je satelit u zenitu ($\Delta\delta = 90^\circ$). U odnosu na prijamnik korisnika, sateliti su horizontalno razmješteni za 120° (Slika 2.14.).



Slika 2.14.: Optimalan raspored minimalnog broja GLONASS satelita za ostvarivanje minimalnih DOP koeficijenata [33]

Pri navedenom prostornom rasporedu vrijednosti geometrijskih koeficijenata razdiobe su točnosti najmanje i iznose [33], [34], [36]: $G_{\varphi} = G_{\lambda} = 0,8$; $VDOP = HDOP = 1,15$; $PDOP =$

1,63. Ako se promatra porast horizontalnog kuta ($\Delta\delta$) obodno raspoređenih satelita uz zadržavanje četvrtog satelita u zenitu ($\Delta\delta = 90^\circ$), tada se geometrijski koeficijenti razdiobe točnosti računaju po izrazima [33], [36]:

$$G_\varphi = G_\lambda = \frac{0,8}{\cos\delta} \quad (2.41)$$

$$HDOP = \frac{1,15}{\cos\delta} \quad (2.42)$$

$$PDOP = \frac{1,63}{\cos\delta\sqrt{1 - \sin\delta}} \quad (2.43)$$

$$VDOP = \frac{1,15}{1 - \sin\delta} \quad (2.44)$$

Vidljivo je da geometrijski koeficijenti koordinata G_φ i G_λ imaju istu vrijednost koja je manja od vrijednosti VDOP koeficijenta vertikalne razdiobe točnosti. Ukoliko su sateliti u istoj prostornoj ravnini sa satelitima ($\Delta\delta = 0$), utoliko je SKP visinske komponente korisničkog položaja 1,41 puta veća od SKP horizontalnih komponenata (φ i λ) korisničkog položaja, a pri visini satelita $\Delta\delta = 60^\circ$ SKP visinske komponente korisničkog položaja veći je od SKP horizontalnih komponenata za 3,86 puta [33]. S obzirom na visine i geometriju orbita, sustav GLONASS ostvaruje pretpostavke za najniži VDOP koeficijent od svih sustava GNSS [36], [37].

3. MORFOLOGIJA TROPOSFERE

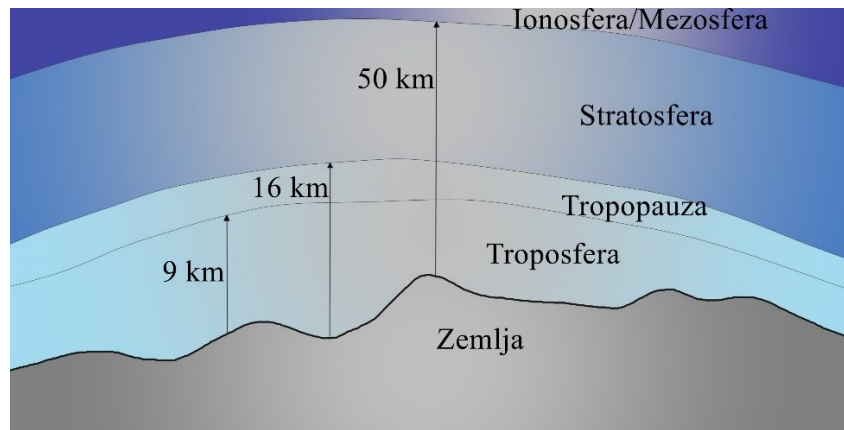
Atmosfera je zajednički naziv za grupu plinovitih slojeva koji okružuju Zemlju i čija ih gravitacija drži na mjestu. Od prisutnih plinova volumno su najzastupljeniji dušik (78,09 %), kisik (20,95 %) i argon (0,93 %) (Tablica 3.1.) uz manju količinu ostalih plinova prirodnog ili antropogenog podrijetla [69]. Slojevi atmosfere mogu se podijeliti i karakterizirati prema zahtijevanoj svrsi promatranja [70]. Općenito, atmosfera se dijeli na pet temeljnih slojeva: (i) troposferu, (engl. *troposphere*), (ii) stratosferu, (engl. *stratosphere*), (iii) mezosferu, (engl. *mesosphere*), (iv) termosferu (engl. *thermosphere*) te (v) egzozferu (engl. *exosphere*), pri čemu promatramo njihov sastav, tlak i temperaturu [64], [69], [71]. Gornja granica svakog sloja omeđena je graničnim slojem označenim dodatkom 'pauza' (engl. *pause*) [72]. Ako se atmosfera promatra s aspekta širenja radionavigacijskih valova uzimajući u obzir učinke temperature i

procesa ionizacije, tada se atmosfera dijeli na sloj troposfere i ionosfere. Dodatne potencijalne podjele atmosfere uključuju podjelu prema stupnju ionizacije (neutrosfera (engl. *neutrosphere*), ionosfera i protonosfera (engl. *protonosphere*)), prema magnetskim svojstvima (dinamosfera (engl. *dynamosphere*) i magnetosfera (engl. *magnetosphere*)), (Slika 3.1.) [70].

Visina (km)	Temperatura	Ionizacija	Magnetsko polje	Širenje	Tehnička podjela
10000	Egzosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera	Gornja atmosfera
1000	Termosfera	Ionosfera			
100	Mezosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera	Donja atmosfera
10	Stratosfera				
	Troposfera				

Slika 3.1.: Potencijalna podjela Zemljine atmosfere [70]

S obzirom na područje provedenog istraživanja te svrsi, predmetu i cilju istraživanja, atmosferi se pristupa s obzirom na utjecaj na širenje GNSS-ovih radionavigacijskih signala, što podrazumijeva podjelu atmosfere na troposferu i ionosferu. Za razliku od ionosfere koja se, s obzirom na utjecaj na fazu signala nosioca i signala informacije smatra disperzivnim medijem, troposfera je, po svojem elektromagnetskom učinku, neutralna te se smatra neutralnim dijelom atmosfere. Troposfera izaziva nedisperzivno kašnjenje radionavigacijskog signala koje se može modelirati uz uvjet poznavanja atmosferskih parametara u trodimenzionalnom rasporedu [15]. Stoga je, s obzirom na aktivnosti GNSS-a, pojam neutralna atmosfera istovjetan pojmu neutralna troposfera i uključuje atmosferske slojeve troposfere, tropopauze i stratosfere (Slika 3.2.) [56].



Slika 3.2.: Visinska struktura troposfere [63]

Istovjetno se i kašnjenje GNSS-ova radionavigacijskog signala, kao posljedica djelovanja neutralne atmosfere, uobičajeno navodi zajedničkim pojmom troposfersko kašnjenje.

3.1. Elementi dinamike troposfere

Troposfera je sloj atmosfere u kojem se odvijaju meteorološki procesi i u kojem je sadržano približno 80 % njezine ukupne molekularne mase. Proteže se od površine Zemlje do otprilike 9 km visine (u području Zemljinih polova) odnosno do otprilike 50 km iznad ekvatora (ovisno o meteorološkim varijacijama granica može biti i veća) [40], [59], [63], [64], [69].

Troposfera je omeđena slojem tropopauze (engl. *tropopause*) koja, većim svojim dijelom, donosi temperaturnu inverziju [69], a na ostalim se područjima troposfere zadržava prosječna stopa opadanja temperature s visinom (engl. *lapse-rate*) od 5°C do $7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ visine (prosječno $6,5^{\circ}\text{C}$) [59], [66], [73]. Visina tropopauze mijenja se prostorno i vremenski. Uobičajeno se rasprostire od približno 7 – 10 km u visinu iznad polarnih područja te od približno 16 – 18 km iznad tropskih i ekvatorskog područja [15]. Dodatno, temperaturni gradijenti tropopauze ne prostiru se ravnomjerno; na sjevernoj hemisferi prvi temperaturni gradijent (engl. *First Lapse-Rate Tropopauses – LRT1*) proteže se 20° – 40° zemljopisne širine na približnoj visini 15 km, a drugi se temperaturni gradijent (engl. *Second Lapse-Rate Tropopauses – LRT2*) nalazi na visini 14 – 25 km [72], pri čemu navedeni temperaturni gradijenti imaju vrijednost $2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ visine. Tropopauza tropskih područja prostire se unutar područja omeđena od 30° sjeverne zemljopisne širine do 30° južne zemljopisne širine [72]. Prostorna promjena tropopauze pokazatelj je kemijskih i fizičkih promjena susjednih slojeva stratosfere i troposfere te posljedično i potencijalnog antropogenog utjecaja [69], [72]. S obzirom na sustave GNSS, točnijim poznavanjem prostornog rasprostiranja sloja tropopauze te naravi i vrijednosti

temperaturnih gradijenata mogu se preciznije prostorno odrediti i ostali meteorološki parametri stanja troposfere. Time se može točnije odrediti utjecaj troposfere na širenje radionavigacijskih signala te posljedično i parametri korisničkog položaja.

Iznad područja tropopauze prostire se stabilni atmosferski sloj stratosfere s donjom granicom na približno 13 km do gornje granice približno na visini 50 km [69]. Temperaturna razdioba u stratosferi nije ujednačena, pri čemu su donji slojevi hladniji i temperatura raste s visinom. Navedeno je posljedica prisutnosti ozona koji upija ultraljubičasto sunčevo zračenje dostižući maksimalnu vrijednost 0° C na približno 50 km visine [15]. Koncentracija ozona u stratosferi ima vrijednosti 2 – 8 ppm, podložna je sezonskim kolebanjima čime dovodi i do sezonskih kolebanja temperature u stratosferi [69]. Gornji granični sloj stratosfere je stratopauza i označava prijelaz u viši sloj, mezosferu.

3.2. Elementi troposfere i njihov utjecaj na troposfersko kašnjenje

Sastav troposfere može se podijeliti sa više stanovišta te je s obzirom na utjecaj širenja radionavigacijskih GNSS-ovih signala odgovarajuća podjela na tri osnovne kategorije: suhi zrak (engl. *dry air*), vodene tvari (engl. *water substances*) te različite suspenzije krutih ili tekućih supstancija (engl. *aerosols*) [15], [40], [70]. Pritom se, za potrebe manipulacije troposferskog kašnjenja, sastav troposfere promatra kao mješavina dvaju idealnih plinova suhoga zraka i vodene pare (engl. *water vapor*) [15], [59], [70].

Pristup troposferskom kašnjenju uključuje mogućnosti promatranja odvojeno hidrostatske (suhe) i nehidrostatske (mokre) komponente te se navedene komponente mogu modelirati zajednički ili odvojeno. Hidrostatsko kašnjenje uzrokovano je atmosferskim plinovima koji su u hidrostatskoj ravnoteži (engl. *hydrostatic equilibrium*) [70], [74]. Da bi se iskazala povezanost tlaka i visine početni uvjet je statička ravnoteža atmosfere pri kojoj su vrijednosti tlaka i gravitacije ujednačeni u okomitom stupcu zraka površine 1 cm², što je prikazano izrazom (3.1).

$$dP = -g\rho dh \quad \text{ili} \quad -g\rho = \frac{dP}{dh} \quad (3.1)$$

pri čemu je: dh ...visina sloja hidrostatske ravnoteže iznad razine mora (m), dP ...razlika tlakova koji djeluju s obiju strana sloja troposfere u hidrostatskoj ravnoteži (hPa), g ...gravitacijsko ubrzanje (m s⁻²), ρ ...gustoća (kg m⁻³).

3.2.1. Jednadžba stanja suhoga zraka

Suhi zrak (engl. *dry air*) mješavina je plinova unutar koje su najzastupljeniji dušik, kisik i argon (zajedno zauzimaju oko 99,97 % volumnog udjela) uz prisustvo ugljičnog dioksida, neona, kriptona, vodika te ozona (Tablica 3.1.) [15], [40]. Navedeni plinovi (uz iznimku ugljičnog dioksida i ozona) imaju ravnomjernu međusobnu zastupljenost do visina 80 – 100 km kao posljedicu procesa relativnog atmosferskog miješanja fluida i zračnih čestica.

Tablica 3.1.: Prosječne vrijednosti udjela plinova suhoga zraka u donjim slojevima atmosfere

Plin		Udio [%]
Dušik	N ₂	78,09
Kisik	O ₂	20,95
Argon	Ar	0,93
Ugljični dioksid	CO ₂	0,04
Neon	Ne	0,0018
Kripton	Kr	0.0001
Helij	He	0.0005
Vodik	H ₂	0.00005
Ozon	O ₃	varijabilno

Izvor: [15], [40], [69]

Koncentracija ugljičnog dioksida varira u nižim slojevima troposfere kao posljedica fotosinteze, oceanskog upijanja i otpuštanja, antropogenih aktivnosti te drugih prirodnih procesa. Vrijednosti koncentracije ozona variraju, pri čemu su niže u ekvatorijalnim područjima i povećavaju se porastom zemljopisne širine [15], a sezonske varijacije nisu prostorno ujednačene.

Premda u volumenu atmosfere ne postoje idealni plinovi, iz praktičnih razloga moguće je pretpostaviti da se pojedinačni plinovi u atmosferi ponašaju po svojstvima karakterističnim za idealne plinove. Tlak koji ostvaruje idealni plin naziva se parcijalni tlak (engl. *partial pressure*) te se može primijeniti jednadžba stanja [15]:

$$P_i V = n_i R T \quad (3.2)$$

pri čemu je: P_i ...parcijalni tlak (hPa), V ...volumen zraka (m³), T ...temperatura stupnjeva Kelvina, R ...univerzalna plinska konstanta (J mol⁻¹K⁻¹), n_i ...množinski broj (mol) plina i .

Budući da je:

$$n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad (3.3)$$

pri čemu je: m_i ...masa plina (kg), M_i ...molekularna masa (kg mol⁻¹), izraz (3.1) dobiva formu:

$$P_i V = m_i R_i T \quad (3.4)$$

pri čemu je $R_i = R/M_i$...specifična plinska konstanta pojedinog plina .

Uvođenjem vrijednosti varijable specifičnog volumena α , sukladno Boyleovu zakonu (engl. *Boyle's law*) i Charlesovu zakonu (engl. *Charles's law*) o idealnim plinovima, dobiva se izraz [40]:

$$P_i \alpha = R_i T \quad (3.5)$$

Sukladno Daltonovu zakonu (engl. *Dalton's law*) o parcijalnim tlakovima pojedinačnih plinova unutar smjese plinova koji su proporcionalni njihovoj molekularnoj koncentraciji, tlak smjese plinova u odnosu na parcijalne tlakove prikazan je izrazom:

$$P = \sum_{i=1}^k P_i \quad (3.6)$$

pri čemu je k ... broj plinova unutar smjese.

Promatrajući smjesu od k plinova ukupne mase m , sukladno izrazu (3.4) slijedi:

$$PV = m R_m T \quad (3.7)$$

pri čemu je R_m ...specifična plinska konstanta plinske smjese, određena po izrazu [15]:

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^k m_i R_i}{m} \quad (3.8)$$

pri čemu je m_i ...masa te R_i ...specifična plinska konstanta pojedinačne i -te komponente plinske smjese.

Ukoliko je srednja molekularna masa plinske smjese M_m (kg mol⁻¹) poznata te određena izrazom:

$$M_m = \frac{\sum_{i=1}^k n_i M_i}{n} \quad (3.9)$$

utoliko specifična plinska konstanta ima oblik [15]:

$$R_m = \frac{R}{M_m} \quad (3.10)$$

Ako se promatra suhi zrak kao smjesa idealnih plinova, može se uvesti veličina molekularne mase suhoga zraka M_d upotrebljavajući vrijednosti specifične molekularne mase pojedinačnih plinova te se može odrediti srednja specifična plinska konstanta R_d koja iznosi $R_d = 287,06 \pm 0,01 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [40].

Parcijalni tlak P_d (hPa) suhoga zraka prikazan je izrazom:

$$P_d = \frac{m_d R_d T}{V} \quad (3.11)$$

pri čemu je m_d ...masa suhoga zraka (kg). Uvodeći vrijednost gustoće suhoga zraka ρ_d (kg m^{-3}), dobivamo izraz:

$$P_d = \rho_d R_d T \quad (3.12)$$

koji predstavlja jednadžbu stanja suhoga zraka.

3.2.2. Jednadžba stanja vodene pare

Uz elemente sadržane u komponenti suhoga zraka, troposfera sadržava i neujednačeni nivo vodene pare. Vodena para javlja se u dvama oblicima u atmosferi; u tekućoj formi kao magla, oblaci i kiša te u formi krutine kao tuča, snijeg i kristali leda [40], pri čemu u tekućoj formi vodena para ostvaruje međudjelovanje s aerosolnim česticama i plinovima [75]. Većina vodene pare nalazi se iznad površine Zemlje 1,5 – 2 km visine, daljnjih 5 – 6 % u sloju je troposfere iznad 5 km visine iznad razine mora, a u stratosferi nalazi se manje od 1 % ukupne vodene pare [59], [70], [76]. Izražen utjecaj na sastav oborina može imati ugljični dioksid, klorovodična kiselina (engl. *hydrochloric acid*), karboksilna kiselina (engl. *carboxylic acid*), sumporov dioksid (engl. *sulfur dioxide*) i dr. [75]. Najznačajniji je učinak ugljičnog dioksida koji, osim prisutnog slabljenja GNSS-ova radionavigacijskog signala zbog utjecaja kiše/vodene pare, utječe na dodatno slabljenje signala ovisno o valnoj duljini. Pritom su signali valnih duljina 13,3 – 15 μm najpodložniji slabljenju zbog utjecaja ugljičnog dioksida [76].

Vodena para može se, u približnom odnosu, smatrati idealnim plinom te se može, sukladno izrazima (3.1) – (3.10), izraziti i molekularna masa vodene pare $M_w = 18,0153 \pm 0,0003 \text{ kg kmol}^{-1}$ kojom se određuje specifična plinska konstanta vodene pare $R_w = 461,525 \pm 0,003 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ [15], [45].

Parcijalni tlak vodene pare e , istovjetno postupku za suhi zrak, dobiva oblik:

$$e = \frac{m_w R_w T}{V} \quad (3.13)$$

pri čemu je m_w ...masa vodene pare. Uvođenjem vrijednosti gustoće vodene pare $\rho_w \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$ dobivamo:

$$e = \rho_w R_w T \quad (3.14)$$

što je izraz koji predstavlja jednadžbu stanja vodene pare.

Prosječna kinetička energija molekula vodene pare ovisi o temperaturi, pri čemu u svojoj tekućoj fazi molekule vode mogu ostvariti dovoljnu količinu kinetičke energije da savladaju molekularnu površinsku privlačnu silu [76]. Odvajajući se od površine, molekula vode isparava te prelazi u znatno rjeđi oblik vodene pare. Povećanjem broja molekula vodene pare dolazi i do odgovarajućeg povećanja broja molekula koje se kondenziraju na tekućoj površini, čime se uspostavlja proces sublimacije (engl. *sublimation*) [40]. Ako se navedeni proces odvija u zatvorenom volumenu, uspostavlja se stanje ravnoteže s jednakim brojem molekula koje sudjeluju u procesu sublimacije, čime se jasno uspostavlja odnos temperature ukapljene vode i tlaka neposredno iznad površine vode [40], [75]. U takvu stanju vodena para smatra se zasićenom vodenom parom s pripadajućim vrijednostima zasićenog tlaka vodene pare e_{sat} (engl. *saturation vapor pressure*). Smjesa zraka i vodene pare u stanju ravnoteže smatra se zasićenim zrakom [40], [76].

3.2.3. Vlažni zrak – udio vodene pare

Uobičajeno se zrak s prisutnošću vodene pare smatra vlažnim zrakom, pri čemu je poznavanje udjela vodene pare nužno za niz primjena. Da bi se izrazio udjel vodene pare u vlažnom zraku, može se upotrijebiti niz varijabla koje opisuju stanje vodene pare. Uz opisani zasićeni tlak vodene pare (tlak vodene pare smatra se ključnim parametrom za definiranje širenja radiosignala) [15], [77], uz dodatne parametre ubrajaju se omjer miješanja (engl. *mixing ratio*), specifična vlažnost (engl. *specific humidity*), apsolutna vlažnost (engl. *absolute*

humidity), relativna vlažnost (engl. *relative humidity*) te virtualna temperatura (engl. *virtual temperature*). Navedeni parametri mogu se, ovisno o pristupu i dostupnim podacima, upotrijebiti za određivanje vrijednosti atmosferskog tlaka prilikom promatranja učinka troposferskog kašnjenja.

Najjednostavniji je način mjerenja udjela vodene pare određivanje **omjera pomiješanosti** m (engl. *mixing ratio*) koji je definiran omjerom masa vodene pare po jedinici mase suhoga zraka unutar vlažnog zraka po izrazu [15], [40]:

$$m = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_w/V}{m_d/V} = \frac{\rho_w}{\rho_d} \quad (3.15)$$

Omjer bezdimenzionalnog koeficijenta m može se izraziti i preko jednadžba stanja obje komponente vlažnog zraka (3.12) i (3.14) te slijedi izraz:

$$m = \frac{e/TR_w}{(p - e)/TR_d} = \frac{0,662e}{p - e} \quad (3.16)$$

pri čemu je $(p - e)$...parcijalni tlak suhog zraka dobiven kao razlika atmosferskog tlaka p i parcijalnog tlaka vodene pare e . Budući da je vrijednost e vrlo mala u usporedbi s vrijednosti p , koeficijenti m i q gotovo su identični [40].

Specifična vlažnost q definira se omjerom mase vodene pare po jedinici mase zraka (uobičajeno iskazane u g/kg) te ima približno jednak iznos kao i vrijednost omjera pomiješanosti m . Polazeći od jednadžbe (3.15), određuje se izrazom:

$$q = \frac{p_w}{p_d} = \frac{p_w}{p_d + p_w} \quad (3.17)$$

Polazeći od vrijednosti omjera pomiješanosti m , specifična vlažnost može se odrediti izrazom:

$$q = \frac{m}{1 + m} \quad (3.18)$$

Apsolutna vlažnost δ_w definira se kao omjer mase vodene pare po jedinici vlažnoga zraka i određuje se izrazom:

$$\delta_w = \frac{M_w}{V} \quad (3.19)$$

Uobičajeno se iskazuje u g/m³ te se tada, polazeći od izraza (3.13), računa po izrazu [15]:

$$\delta_w = \frac{e}{R_w T} = 216,67 \frac{e}{T} \quad (3.20)$$

Relativna vlažnost Rh definirana je odnosom omjera pomiješanosti (m) i zasićenog omjera pomiješanosti (engl. *saturation mixing ratio*) m_{sat} , tj. omjerom (izraženom u postotku) između količine vodene pare u zraku i maksimalne količine koju bi zrak mogao sadržavati pri danoj temperaturi, što je prikazano izrazom:

$$Rh = \frac{m}{m_{sat}} \quad (3.21)$$

Budući da je zasićeni omjer pomiješanosti u funkciji temperature, relativna vlažnost izravno ovisi o vrijednosti temperaturnih promjena [15], [40].

Zasićeni omjer pomiješanosti prikazan je izrazom:

$$m_{sat} = \frac{0,622 e_{sat}}{p - e_{sat}} \quad (3.22)$$

Budući da je zasićeni tlak vodene pare e_{sat} u funkciji temperature, zasićeni omjer pomiješanosti m_{sat} u funkcijskom je odnosu tlaka i temperature te se uobičajeno iskazuje u g/kg (vodene pare/suhoga zraka).

Virtualna temperatura T_v ona je temperatura suhog zraka pri kojoj bi on imao istu gustoću kao i vlažni zrak pri zadanom tlaku. Polazeći od jednadžbe stanja vlažnog zraka (3.14), slijedi:

$$P = \rho_m R_m T \quad (3.23)$$

pri čemu je: P ...ukupni tlak (vlažnog) zraka, ρ_m ...gustoća vlažnog zraka, R_m ...specifična plinska konstanta vlažnog zraka.

Budući da je $\rho_m = \rho_w + \rho_d$, uključujući jednadžbe (3.12), (3.14) i (3.15), slijedi izraz za određivanje specifične plinske konstante vlažnog zraka u funkciji omjera pomiješanosti m [70]:

$$R_m = \frac{R_d + mR_w}{1 + m} = \frac{R_d(1 + 1,61m)}{1 + m} \approx R_d(1 + 0,61m) \quad (3.24)$$

Uvrštavajući dobiveni izraz u (3.22) slijedi:

$$P = \rho_m R_d T_v \quad (3.25)$$

pri čemu je virtualna temperatura izražena u stupnjevima Kelvina te se može odrediti izrazom [78]:

$$T_v = (1 + 0,608m)T \quad (3.26)$$

Jednadžbe (3.25) i (3.26) služe kao osnova za izradu termodinamičkih dijagrama. Uvođenje korekcije virtualne temperature ($T_v - T$) za zasićeni zrak, u funkciji tlaka i temperature, također je u funkciji izrade navedenih dijagrama [40].

3.2.4. Homogena atmosfera

Homogena atmosfera suha je atmosfera pretpostavljene konstantne gustoće. Pretpostavka uključuje niz kružnih slojeva jednakih visina, pri čemu svaki sloj ravnomjerno sudjeluje u ukupnom tlaku na površini Zemlje [15]. Dodatne početne pretpostavke uključuju maksimalnu visinu slojeva atmosfere (budući da je tlak na površini Zemlje konačan) označenu kao visinsku ljestvicu (engl. *scale height*) H (km). Pritom tri sile određuju zakonitosti hidrostatske ravnoteže u tako određenom prostoru: (i) sila fluida koja djeluje s vrha promatranog volumena prema dolje s negativnim predznakom, (ii) sila fluida unutar volumena koja djeluje prema gore s pozitivnim predznakom te (iii) sila teže promatranog volumena usmjerena prema dolje. Dovodeći u ravnotežu navedene sile i izjednačavajući njihov zbroj s nulom (zato što je brzina fluida/zraka stalna ili ima vrijednost 0), slijedi:

$$\sum F = F_{dno} + F_{vrh} + F_{težina} = p_{dno}A - p_{vrh}A - \rho g A \Delta z \quad (3.27)$$

pri čemu je: $\sum F$... ukupni zbroj prisutnih sila, F_{dno} ...sila fluida koja djeluje s dna volumena, F_{vrh} ...sila fluida koja djeluje s dna volumena, $F_{težina}$...težina promatranog fluida unutar volumena, p_{dno} ...tlak fluida na dnu, p_{vrh} ...tlak fluida na vrhu, ρ ...gustoća fluida, A ...površina promatranog volumena, Δz ...visina promatranog volumena, g ...gravitacijska konstanta.

Razvijajući izraz, slijedi:

$$p_{vrh} - p_{dno} = -\rho g \Delta z \quad (3.28)$$

Budući da lijeva strana jednakosti $p_{vrh} - p_{dno}$ predstavlja promjenu tlaka dp , slijedi:

$$dp = -\rho g \Delta z \Rightarrow \frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (3.29)$$

pri čemu krajnji izraz predstavlja hidrostatsku jednadžbu.

Hidrostatska jednadžba primijenjena na pretpostavljenu homogenu atmosferu sa zadanom početnom temperaturom na površini od 273° K daje nam vrijednost visine ljestvice homogene atmosfere od razine mora H ($H = z_0 + \Delta z$) od oko 8000 metara [15], [40]. Prosječna stopa opadanja temperature s visinom Y_h za homogenu atmosferu iznosi $Y_h = \frac{g}{R_d} = 3,42 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$.

Y_h se često naziva i autokonvektivna stopa opadanja (engl. *autoconvective lapse rate*). Ako postojeća virtualna stopa opadanja prelazi navedeni iznos, gustoća atmosfere se povećava povećanjem visine [40].

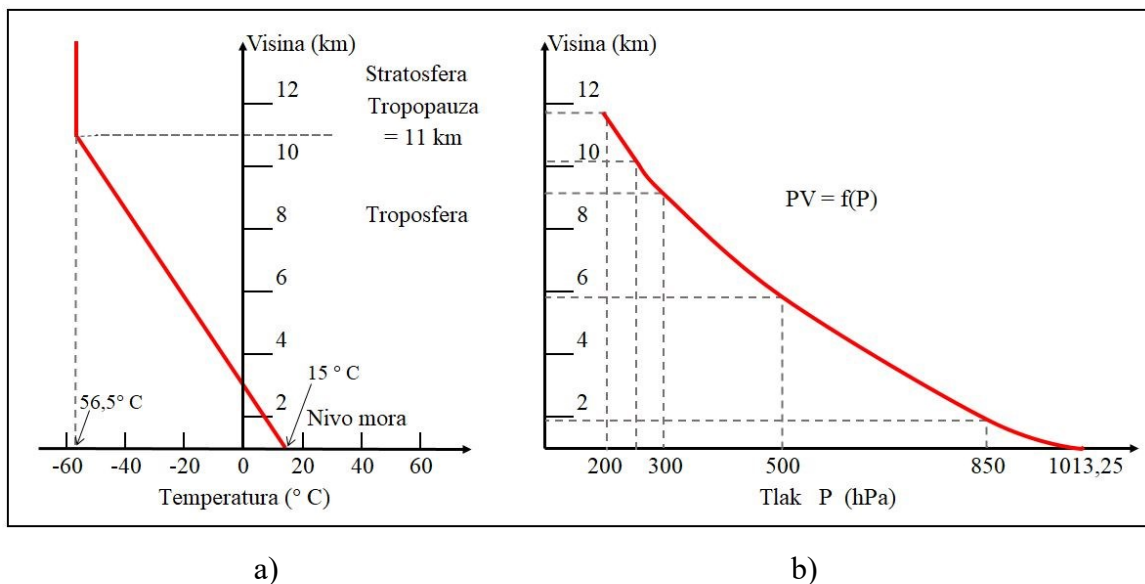
Uzevši u obzir početne uvjete i stalnu stopu opadanja temperature, model homogene atmosfere ne oslikava fizičku stvarnost, međutim, sa stanovišta širenja radiosignala, ona predstavlja medij sa stalnim indeksom refrakcije. Time se omogućava jednostavno određivanje parametra visine u području istraživanja širenja radiosignala [15].

3.2.5. Standardna atmosfera

Nastojanje da se razvije model koji bi opisivao atmosferu unutar prosječnih očekivanih vrijednosti atmosferskih parametara proizašlo je iz potrebe pojedinih područja ljudskih djelatnosti. Budući da realna stanja atmosfere nikada ne pokazuju vremensku ni prostornu stalnost, postoji potreba za hipotetskim standardnim modelom koji bi opisivao očekivano stanje atmosfere unutar poznatih vrijednosti atmosferskih parametara. Poznavanje prostorne raspodjele tlaka, temperature, gustoće, vlage, brzine zvuka i drugih atmosferskih parametara nužno je za stvaranje takva hipotetskog modela atmosfere.

Počevši od 1920. godine, razvijen je niz modela standardne atmosfere, ali svi ne odgovaraju nužnim pretpostavkama za proučavanje širenja radiosignala. Standardni model pogodan za korištenja u području širenja radiosignala mora uključivati visinske podatke temperature, tlaka i vlage, uz podatke o njihovim sezonskim kretanjima te o njihovim kretanjima ovisno o zemljopisnoj širini unutar područja neutralne atmosfere [15]. Za znatan dio razvijenih modela početni parametri uključuju hidrostatsku ravnotežu atmosferskih plinova te nepostojanje vlage. Pritom je atmosfera tražene visine podijeljena u skup slojeva sa stalnim temperaturnim gradijentom, a parametri se temperature, tlaka i gustoće promatraju s obzirom na pojedinu zemljopisnu širinu [15]. Primjer takva modela jest 'Međunarodni standardni model atmosfere' (engl. *International Standard Atmosphere – ISA*) koji je razvila Međunarodna civilna zrakoplovna organizacije (engl. *International Civil Aviation Organization – ICAO*). Za atmosferu se u tom modelu pretpostavlja da je bez prašine, vlage i vodene pare te bez kretanja

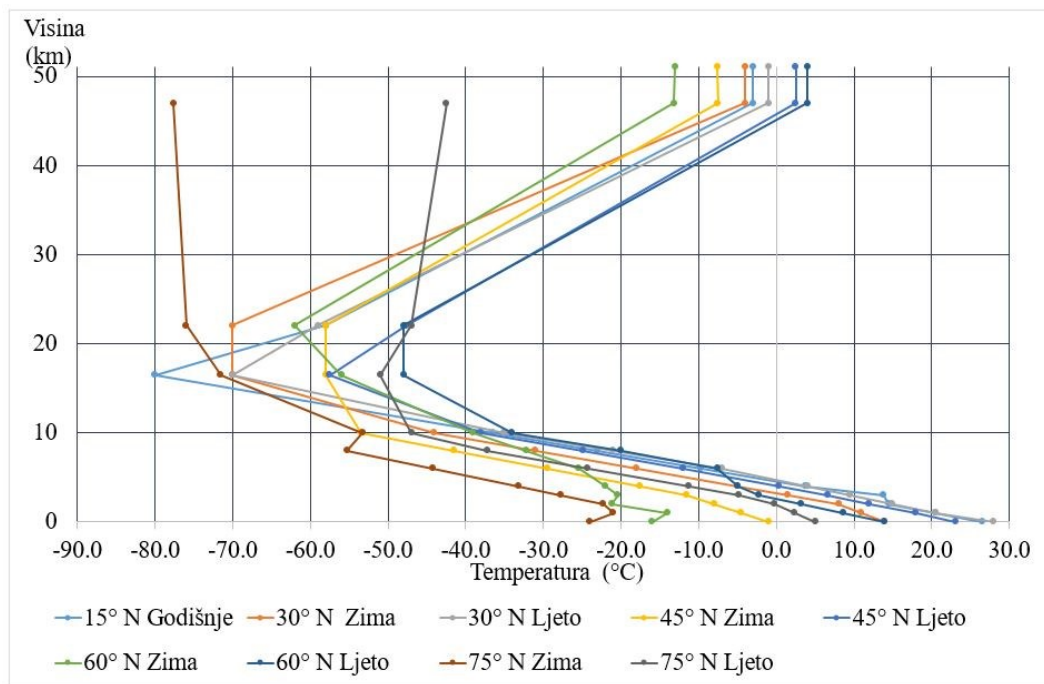
vjetra i turbulencijā [73]. S obzirom na osnovnu namjenu modela, visinski profili temperature (Slika 3.3. (a)) i tlaka (Slika 3.3. (b)) prikazani su do visine tropopauze.



Slika 3.3.: Visinska struktura troposfere po ISA-inu modelu atmosfere [73]

Budući da u takvim modelima ne postoje podatci o sadržaju vodene pare te ne pružaju podatke o sezonskim kretanjima prisutnih meteoroloških parametara, takvi modeli nisu pogodni za upotrebu u izučavanju i modeliranju širenja radiosignala u neutralnoj atmosferi. Dopunske informacije sadržane su u *U. S. Standard Atmospheric Supplements, 1966 (USSAS 66)* [79] te *International Organization for Standardization (ISO) – Reference atmospheres for aerospace use (ISO 5878:1982, ADD 1983)*. USSAS 66 donosi niz podjela atmosfere po zemljopisnoj širini za 15° N (tropsko područje), 30° N (suptropsko područje), 45° N (područje srednjih širina), 60° N (subarktičko područje) te 75° N (Arktik).

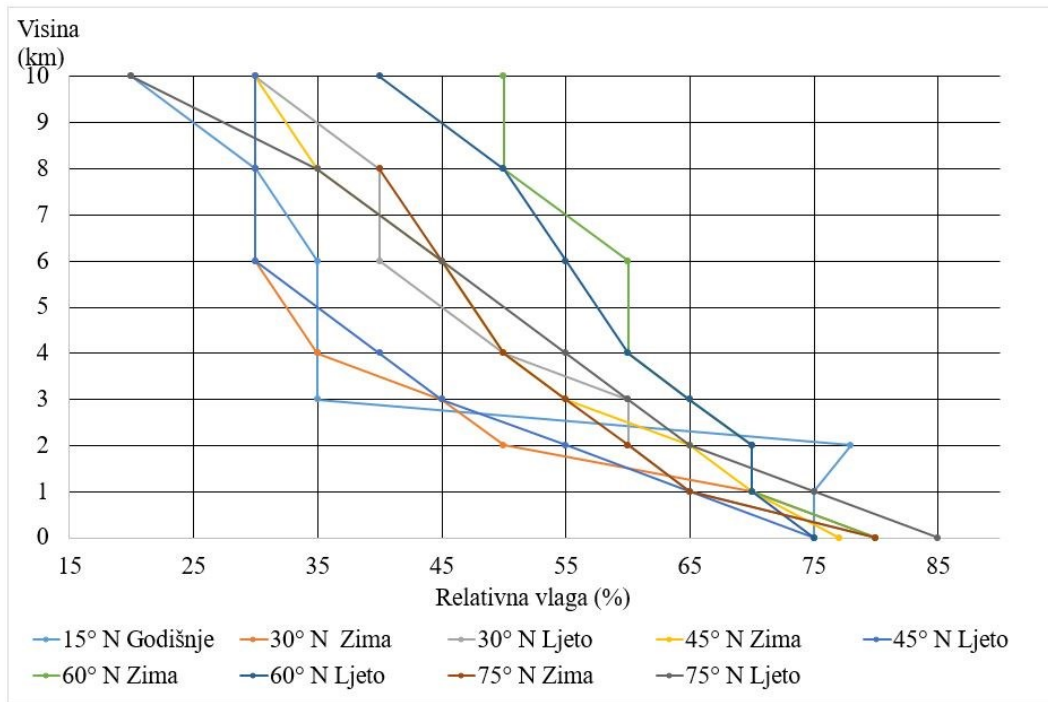
Prikazani su profili meteoroloških parametara do visine 120 km te 30 km za područje Arktika (zbog izostanka podataka). Sezonske varijacije obuhvaćaju razdoblja siječanj/lipanj, osim za područja na zemljopisnim širinama od 15° N koje je obuhvaćeno godišnjim modelom kretanja atmosferskih parametara zbog njihove minimalne varijabilnosti u tom području (Slika 3.4.) [79].



Slika 3.4.: Struktura temperaturnih profila troposfere po modelu standardne atmosfere USSAS 66

Količina vlage iskazana je parametrom relativne vlage za prvih 10 km visine, uz vrlo malu (unutar nekoliko postotaka) globalnu varijaciju tlaka te uz eksponencijalno smanjivanje vrijednosti tlaka po visini za približno iste vrijednosti ljeti i zimi (Slika 3.5.) [15].

Uz uvijek prisutnu mogućnost da se stvarno stanje atmosfere na određenoj lokaciji može u značajnoj mjeri razlikovati od stanja predviđena modelom, dodatno ograničenje USSAS 66 i ISO 5878:1982/1983 modela ogleda se u činjenici da ne pružaju informacije o stanjima atmosfere južne hemisfere premda se u prvoj aproksimaciji odgovarajući model može asimetrično preslikati [15].



Slika 3.5.: Raspodjela relativne vlage do 10 km visine troposfere po modelu standardne atmosfere USSAS 66

Unatoč tomu, prisutnost parametra vlage u modelu te adekvatna visinska i zemljopisna razdioba čini USSAS 66 (uz činjenicu da model ISO 5878:1982/1983 ne upotrebljava istu raspodjelu zemljopisnih širina pri modeliranju temperature/tlaka i vlage [15]) najpogodnijim postojećim modelom standardne atmosfere za upotrebu u području širenja radiosignala [80], uključujući i razvoj globalnog modela troposferske greške [11].

3.2.6. Oboriva voda

Oboriva voda (engl. *Precipitable water vapour* – PWV) predstavlja vrijednost ukupne mase vode po jedinici površine promatranog stupca zraka, prikazano izrazom [40], [77]:

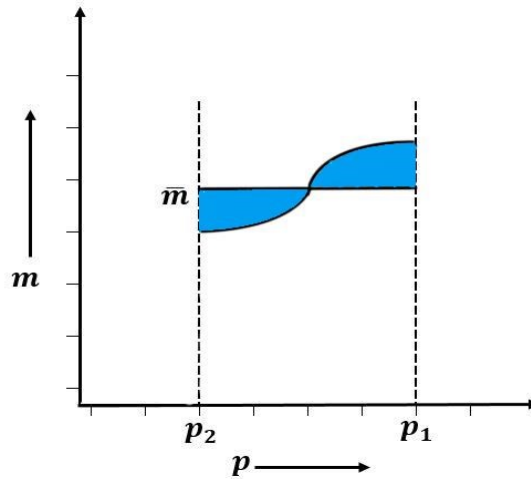
$$P_v = \int_{z_1}^{z_2} \rho_v dz = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{\rho_v}{g\rho} dp \quad (3.30)$$

pri čemu je: P_v ...oboriva voda, ρ_v ...gustoća vode, ρ ...gustoća zraka, z_1, z_2 ...visine iznad početne razine tlaka zraka od 1013,25 mb, p ...tlak zraka.

Razvijajući izraz, slijedi:

$$P_v = -\frac{1}{g} \int_1^2 q dp \doteq -\frac{1}{g} \int_1^2 m dp \quad (3.31)$$

pri čemu jednadžba (3.31) poprima oblik (3.32) i može se grafički prikazati (Slika 3.6.).



$$P_v = \frac{\bar{m} (p_1 - p_2)}{g} \quad (3.32)$$

Slika 3.6.: Oboriva voda u sloju $p_1 - p_2$ [40]

Jednadžba (3.31) ili (3.32) može biti upotrijebljena dva puta na promatranom sloju $p_1 - p_2$, prije i poslije dizanja. Pretpostavljajući da ne postoji horizontalni priljev ili gubitak, razlika predstavlja akumuliranu vlagu [40].

3.3. Utjecaj troposfere na širenje radiosignala

Širenje radiosignala kroz Zemljinu atmosferu podložno je učincima refrakcije, refleksije, difrakcije, disperzije te apsorpcije, pri čemu pojedinačni učinci imaju različite razine utjecaja na širenje promatrana GNSS-ova radionavigacijskog signala. **Refrakcijom** smatra se promjena smjera širenja radiosignala uzrokovana promjenom elektrodinamičkih osobina medija. Pritom se elektrodinamička svojstva medija izražavaju indeksom loma (refrakcije) n [15], [40], [41], [62]. Općenito se veza između indeksa refrakcije i elektrodinamičkih osobina medija može prikazati izrazom [62]:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (3.33)$$

pri čemu je: ϵ ...dielektričnost medija, μ ...magnetska permeabilnost (engl. *permeability*) medija.

Uobičajeniji prikaz indeksa refrakcije prikazan je odnosom promjena faznih brzina širenja radionavigacijskog signala u vakuumu i promatranom mediju, što je prikazano izrazom:

$$n = c/v_m \quad (3.34)$$

pri čemu je: c ...brzina širenja radio vala u vakuumu, v_m ...brzina širenja u mediju.

Relativni indeks refrakcije između dvaju medija prikazan je omjerom njihovih apsolutnih indeksa refrakcije te razvijajući izraz (3.33) i (3.34), slijedi:

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}} = \frac{v_2}{v_1} \quad (3.35)$$

pri čemu se indeksi n_1 i n_2 odnose na dva promatrana medija.

Budući da je vrijednost atmosferskog indeksa refrakcije neznatno viša od jedan (uobičajena vrijednost je 1,00035), ustaljeno je korištenje pojma vrijednosti atmosferske refrakcije N , (N jedinica) općenito prikazana izrazom [41], [81]:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (3.36)$$

pri čemu je: P ...atmosferski tlak, T ...apsolutna temperatura, e ...parcijalni tlak vodene pare.

Budući da se vrijednosti tlaka, udjela oborive vode i temperature smanjuju porastom visine unutar troposfere (osim u inverznim slojevima gdje temperatura raste), indeks atmosferske refrakcije za pojedini atmosferski model može se odrediti izrazom:

$$N(h) = N_s \exp \left(\frac{-h}{H} \right) \quad (3.37)$$

pri čemu je: $N(h)$...vrijednost refrakcije na visini h , N_s ...vrijednost refrakcije iznad visine h , H ...visinska ljestvica. Primjerice, ovako određena vrijednost refrakcije za model atmosfere CCIR (engl. *International Radio Consultative Committee*) iznosi [41], [82]:

$$N(h) = 315 \exp (- 0,136h) \quad (3.38)$$

pri čemu je 315 iznos prosječne vrijednosti površinske refrakcije uz visinsku ljestvicu od 7,353 km.

Određivanjem vrijednosti refrakcije na razini mora po izrazu (3.38) vrijednost $N_s = N_0$ ima vrijednosti (ovisno o klimatskom području) 300 – 390 N jedinica. Godišnja varijacija N_s

parametra, s obzirom na zemljopisnu širinu, kreće se 5 – 10 N jedinica za ekvatorijalno klimatsko područje (+/- 5°), 70 – 110 N jedinica za kontinentalno područje (5°– 20°), uzevši pritom u obzir i sezonska kišna obilježja. U područjima iznad 30° zemljopisne širine vrijednost N_s parametra ne spušta ispod 310 N jedinica [41].

Ukoliko se indeks atmosfere refrakcije želi odrediti za određeno valno područje radio signala, utoliko je moguće upotrijebiti izraz [19]:

$$N = \left(287,604 + \frac{1,6288}{\lambda^2} + \frac{0,0136}{\lambda^4} \right) \left(\frac{P}{1013,25} \right) \left(\frac{1}{1 + 0,00366 \cdot t} \right) - 0,055 \left(\frac{760}{1013,15} \right) \left(\frac{e}{1 + 0,00366 \cdot t} \right) \quad (3.39)$$

pri čemu je: t ...temperatura u stupnjevima Celzija, P ...atmosferski tlak u milibarima, λ ...valna duljina u mikrometrima.

Budući da se neki od prvih modela funkcije mapiranja troposferskog kašnjenja temelje na eksperimentima mjerenja udaljenosti laserskom zrakom [19] te zato što je zrak disperzivni medij s obzirom na širenje signala optičkih frekvencija, nužno je uvesti izraz grupne refrakcije N_g izrazom:

$$N_g = \frac{d}{df}(fN) = N - \lambda \frac{dN}{d\lambda} \quad (3.40)$$

$$N_g = 80,343 \cdot f(\lambda) \frac{P}{T} \cdot 11,3 \frac{e}{T} \quad (3.41)$$

pri čemu je T ...temperatura u stupnjevima Kelvina.

Parametar frekvencije i valne duljine s obzirom na promatrani signal određujemo po izrazu:

$$f(\lambda) = 0,9650 + \frac{0,0164}{\lambda^2} + \frac{0,000228}{\lambda^4} \quad (3.42)$$

Neki od modela refrakcije temeljenih na linearnom modelu jesu jednostruko eksponencijalni model (engl. *single-exponential model*), CRPL referentni atmosferski model 1958 (engl. *CRPL reference atmosphere model 1958*), bieksponecijalni model (engl. *bi-exponential model*) [83] te troeksponecijalni model (engl. *three-exponential model*) [15]. Do pojave refrakcije u atmosferi dolazi zbog visinske nehomogenosti parametara tlaka, temperature i vlažnosti. Povezanost oborive vode i relativne vlažnosti H prikazana je izrazima [41]:

$$\rho = 216,7 \cdot \frac{e}{T} \quad (3.43)$$

$$H = 100 \cdot \frac{e}{e_{sat}} \quad (3.44)$$

$$e_s = \frac{5854}{T^6} \cdot 10^{(20-2950/T)} \quad (3.45)$$

pri čemu je: ρ ...gustoća oborive vode, e_{sat} ...tlak zasićene vodene pare pri temperaturi T .

S obzirom na to da se indeks refrakcije u pravilu [62] smanjuje porastom visine, troposferska refrakcija uzrokuje savijanje putanje širenja radiosignala prema tlu. Radijus zakrivljenosti R (N jedinica / km) prikazan je izrazom:

$$\frac{1}{R} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \cos\theta \quad (3.46)$$

pri čemu je θ ...vrijednost kuta loma u odnosu na zenit. U troposferi s vrijednošću indeksa refrakcije $n \approx 1$ i za niske vrijednosti kuta loma u odnosu na zenit θ razvijajući jednadžbu (3.46), slijedi:

$$\frac{1}{R} = -\frac{dn}{dh} = -\frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} \quad (3.47)$$

Radijus zakrivljenosti putanje radiosignala određen je stopom opadanja atmosferske refrakcije visinom, ne apsolutnom vrijednošću refrakcije. Kada je omjer dN/dh negativan, vrijednost radijusa zakrivljenosti putanje R pozitivna je, pri čemu putanja poprima konveksan oblik [41].

U općem obliku atmosferska se refrakcija može prikazati pojedinačnim udjelima suhog zraka i vodene pare [63], [70]:

$$N = N_d + N_w \quad (3.48)$$

pri čemu je: N_d ...refrakcija suhog zraka, N_w ...refrakcija vodene pare.

Budući da udio vodene pare značajno varira prostorno i vremenski (za razliku od udjela suhog zraka), za frekvencije do 20 GHz [42] opći izraz atmosferske refrakcije (3.48) može se prikazati u funkciji parcijalnog tlaka i temperature [23], [63], [64], [84]:

$$N_d = K_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} \quad (3.49)$$

$$N_w = \left[K_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] Z_w^{-1} \quad (3.50)$$

pri čemu je: K_i ...konstante atmosfere refrakcije, P_d ...parcijalni tlak suhih plinova, uključujući CO_2 , e ...parcijalni tlak vodene pare, T ...apsolutna temperatura, Z_d^{-1} ...inverzni faktor stlačivosti (engl. *compressibility*) komponentata suhog zraka, Z_w^{-1} ... inverzni faktor stlačivosti vodene pare.

Z_d i Z_w empirijski su određeni faktori te su izraženi kao funkcija parcijalnog tlaka i temperature [42], [83]:

$$Z_d^{-1} = 1 + P_d \left[57,97 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{0,52}{T} \right) - 9,4611 \cdot 10^{-4} \frac{T_c}{T} \right] \quad (3.51)$$

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \frac{e}{T^3} [1 - 0,0137T_c + 1,75 \cdot 10^{-4}T_c^2 + 1,44 \cdot 10^{-6}T_c^3] \quad (3.52)$$

pri čemu je T_c ... temperatura u stupnjevima Celzija. Ovi koeficijenti primjenjuju se u neidealnom ponašanju suhog zraka i vodene pare; pod normalnim uvjetima njihove vrijednosti približno su jedan [70].

Neke od najznačajnijih laboratorijski određenih konstantā atmosfere refrakcije K_i prikazane su u Tablici 3.2.

Tablica 3.2.: Prikaz najznačajnijih konstanti atmosfere refrakcije

Autor	K_1 (K mbar ⁻¹)	K_2 (K mbar ⁻¹)	K_3 (10 ⁵ · K ² mbar ⁻¹)
Smith i Weintraub (1953.)	77,607±0,01	71,6 ±9	3,747 ±0,03
Boudouris (1963.)	77,59 ± 0,08	71,97 ±11	3,754±0,03
Thayer (1974.)	77,603 ±0,01	64,79 ±0.08	3,776 ±0,004
Hill et al. (1982.)	–	98 ±1	3,583±0,03
Hill (1988.)	–	102 ±1	3,578±0,003
Rüeger	77,689	71,295	3,754

Izvor: [15], [44], [83], [85], [86]

Uvodeći faktor stlačivosti za neidealne plinove te primjenjujući jednadžbe stanja idealnog plina (3.2 – 3.5) na njih, slijedi:

$$p_i = \rho_i \cdot R_i \cdot Z_i \cdot T \quad (3.53)$$

pri čemu je: p_i ...tlak idealnog plina, ρ_i ...gustoća plina i , R_i ...specifična plinska konstanta plina i , Z_i ...faktor stlačivosti plina i .

Uz početnu pretpostavku da je $Z_d^{-1} \approx Z_w^{-1} \approx 1$ navedeni je izraz dostatno precizan tj. mokri i suhi zrak mogu se u većini slučajeva smatrati idealnim plinovima. Polazeći od općih izraza za atmosfersku refrakciju suhog zraka i vodene pare (3.48 – 3.50) uz primjenu izraza za neidealne plinove (3.53), slijedi [59], [70]:

$$K_1 \cdot \frac{p_d}{T} \cdot Z_d^{-1} = K_1 \frac{\rho_d \cdot R_d \cdot Z_d \cdot T}{T} \cdot Z_d^{-1} = K_1 \cdot \rho_d \cdot R_d = K_1 \cdot \frac{\rho_d \cdot R_o}{M_d} \quad (3.54)$$

pri čemu je: R_o ...univerzalna plinska konstanta, M_d ...molekularna masa suhoga zraka (28,9644 kg/kmol).

Odnos $\frac{\rho_d \cdot R_o}{M_d}$ može se razviti:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_d \cdot R_o}{M_d} &= \frac{\rho_d \cdot R_o}{M_d} + \frac{\rho_w \cdot R_o}{M_d} - \frac{\rho_w \cdot R_o}{M_d} = \frac{\rho_d \cdot R_o + \rho_w \cdot R_o}{M_d} - \frac{\rho_w \cdot R_o}{M_d} \\ &= \frac{R_o \cdot (\rho_d + \rho_w)}{M_d} - \frac{\rho_w \cdot R_o}{M_d} \cdot \frac{M_w}{M_w} \cdot \frac{T}{T} \cdot \frac{Z_w}{Z_w} \\ &= \frac{R_o \cdot (\rho_d + \rho_w)}{M_d} - \left(\rho_w \cdot \frac{R_o}{M_w} \cdot T \cdot Z_w \right) \cdot \frac{1}{T} \cdot Z_w^{-1} \cdot \frac{M_w}{M_d} \\ &= \frac{R_o \cdot \rho}{M_d} - \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} \cdot \frac{M_w}{M_d} \end{aligned} \quad (3.55)$$

pri čemu je M_w ...molekularna masa vlažnog zraka.

Uvrštavajući zadnju jednadžbu u opću jednadžbu atmosferske refrakcije (3.48 – 3.50), slijedi:

$$\begin{aligned} N &= K_1 \cdot \left(\frac{R_o \cdot \rho}{M_d} - \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} \cdot \frac{M_w}{M_d} \right) + K_2 \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} + K_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_w^{-1} \\ &= K_1 \cdot \frac{R_o \cdot \rho}{M_d} - K_1 \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} \cdot \frac{M_w}{M_d} + K_2 \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} + K_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_w^{-1} \\ &= K_1 \cdot \frac{R_o \cdot \rho}{M_d} + \left(K_2 - K_1 \cdot \frac{M_w}{M_d} \right) \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} + K_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_w^{-1} \\ &= K_1 \cdot \frac{R_o \cdot \rho}{M_d} + K_2' \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} + K_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_w^{-1} \end{aligned} \quad (3.56)$$

pri čemu je K_2' izvedena konstanta s ponderiranom srednjom vrijednošću od 22,1±2,2 K hPa⁻¹. Završna jednadžba odijeljeno prikazuje hidrostatske i nehidrostatske sudionike atmosferske refrakcije.

Uz pojavu refrakcije radiosignala, u graničnom sloju dvaju medija javlja se i pojava **refleksije (odbijanja)** radiosignala, pri čemu ona može biti i dominantna. Visinski u troposferi refleksija se javlja u području ionosfere, područjima inverznih slojeva, uključujući i sloj tropopauze. Prisutna je refleksija i od površine Zemlje, uključujući slojeve stijena ispod površine [62] te od nadzemnih objekata. Refleksija ovisi o frekvenciji i polarizaciji radiosignala. Na snagu reflektiranog radio signala utječu njegova polarizacija, frekvencija, upadni kut, vrijednost koeficijenta refleksije prepreke te koeficijent rasipanja reflektiranog vala [43], [87].

Difrakcija (ogib) pojava je pri kojoj se, nailaskom na prepreku, dio radiosignala odbija ili apsorbira dovodeći do zasjenjenja iza prepreke. Fenomen se objašnjava Huygens-Fresnelovim pravilom (engl. *Huygens–Fresnel principle*) po kojem svaka točka na fronti ispred signala predstavlja sekundarni izvor emitiranja energije u svim smjerovima ispred radiosignala. Time su amplituda i faza radiosignala u bilo kojoj točki prostora posljedica interferencije valova koje emitiraju sekundarni izvori. Difrakcija je osobina koja se može zapaziti tek kada fronta radiosignala naiđe na prepreku, pri čemu je učinak difrakcije obrnuto proporcionalan frekvenciji radiosignala [87].

Disperzija (raspršivanje) radio signala podrazumijeva istovremenu pojavu refrakcije, refleksije i difrakcije na način kada njihove učinke nije moguće pojedinačno utvrditi. Pojava je naročito izražena u donjim slojevima troposfere zbog vremensko i prostorno nehomogenih promjena indeksa loma rezultirajući gubitkom energije radiosignala na vodenim strukturama u troposferi [62], [75], [76].

Apsorpcija radiosignala dovodi do njegova prigušenja (slabljenja intenziteta) kao posljedice međudjelovanja elektromagnetskog polja i prisutne materije uslijed kojeg dolazi do pretvaranja dijela elektromagnetske energije u druge oblike energije [62]. Pojava se na kvantnom nivou može objasniti izvlačenjem pojedinačnih kvanta energije (engl. *quanta*) iz izvora zračenja od molekula medija kroz koji se radiosignal širi. Tako stvoreni gubici energije predstavljaju pojaseve apsorpcije (engl. *absorption bands*) čiji su frekvencijski rasponi specifični za pojedinu atmosfersku molekulu plina i vodene pare te o valnoj duljini radiosignala. Ovisno o frekvenciji radiosignala, u troposferskom procesu apsorpcije sudjeluju poliatomne molekule prisutnih plinova (kisika, ugljičnog dioksida, ozona, dušika i dr.) te vodene pare, s različitim stupnjem utjecaja na slabljenje radiosignala [40].

U troposferi voda (u formi oblaka, oborina i magle) uz raspršivanje uzrokuje istovremeno i apsorpciju radiosignala [75], [76], [88] koja raste porastom frekvencije, osobito na frekvencijama bliskim vlastitim frekvencijama titranja molekula vode i plinova, što dovodi do pojave rezonantne apsorpcije [62].

Udio glavnih plinova u troposferi ne mijenja se promjenom visine, osim udjela vodene pare čiji se volumni udio kreće od 0,001 % na području Arktika do 5 – 6 % u tropskim područjima. Istodobno se njezin udio izrazito smanjuje povećanjem visine i u značajnoj je mjeri ovisan o lokalnoj temperaturi [41]. Pritom stalni dipolni moment molekula vodene pare u značajnoj mjeri pridonosi variranju indeksa refrakcije troposfere. Troposferski procesi apsorpcije, zračenja, kondenzacije, isparivanja, termalni prijenosi procesima advekcije (engl. *advection*) i konvekcije (engl. *convection*) uz turbulentne pojave difuzije dovode do nelinearnih i nepredvidljivih stanja troposfere.

3.4. Neutralna atmosfera – struktura troposferskog kašnjenja GNSS-ova radionavigacijskog signala

Neutralna atmosfera predstavlja medij s kontinuirano promjenjivim indeksom refrakcije, što dovodi do dviju posljedica u širenju radionavigacijskog signala, smanjenjem brzine širenja te odstupanjem širenja od pravocrtne linije. Budući da je koeficijent refrakcije troposfere veći od iznosa 1, brzina širenja radionavigacijskog signala (ekvivalentna brzini širenja svjetlosti) opada s približavanjem zemljinoj površini (2.26). S obzirom na kontinuirano mijenjanje koeficijenta refrakcije, pritom se mijenja i putanja, tj. odstupa od idealne geometrijske putanje. Fenomen se opisuje Fermatovim zakonom (engl. *Fermat's principle*) koji navodi da je stvarni put što ga svjetlost (ili drugi elektromagnetski val) prijeđe između dviju točaka takav da je za taj put potrebno najmanje vrijeme [89], [90]. Primjenjujući na zakon refrakcije Fermatov princip pokazuje se da elektromagnetski signal slijedi putanju širenja između dviju proizvoljnih točaka za koju je potrebno najkraće vrijeme širenja (pri čemu se pojam 'najkraće vrijeme' zamjenjuje pojmom 'stacionarno' vrijeme prikazano izrazom 3.57). Time se podrazumijeva da, uz postojeću putanju širenja, postoji i niz potencijalnih susjednih putanja širenja s pripadajućim vremenima širenja bliskima postojećem vremenu. Zamjenjujući proizvoljne mjerne točke ukupnom putanjom širenja elektromagnetskog vala te integriranjem duž cijele putanje širenja, slijedi:

$$\delta \int_{\text{Putanja}} dt = 0 \quad (3.57)$$

pri čemu je δdt ...vrijeme širenja radiovala između postojeće i potencijalnih susjednih putanja širenja.

Uvrštavajući brzinu širenja u vakuumu c s obzirom na duljinu putanje širenja, slijedi:

$$\delta \int_{\text{putanja}} c dt = 0 \quad (3.58)$$

Definirajući optičku (ili elektromagnetsku) udaljenost između satelitskog odašiljača i prijamnika navedenim izrazima, slijedi [15], [70]:

$$S = \int c dt = \int \frac{c}{v} ds = \int_S n(s) ds \quad (3.59)$$

pri čemu je: S ...optička udaljenost između GNSS-ova odašiljača i prijamnika, s ...optička putanja, $v = ds/dt$...brzina širenja GNSS-ova radionavigacijskog signala, $n = c/v$...indeks refrakcije.

Budući da se, nailazeći na slojeve neutralne atmosfere s različitim indeksima refrakcije, putanja povija u pravilu prema dolje (sukladno načelu stacionarnosti putanje), optička putanja veća je od idealne geometrijske putanje (ostvarive u uvjetu vakuuma).

$$G = \int_{\text{vac}} dt \quad (3.60)$$

pri čemu je G ... duljina idealne geometrijske putanje radionavigacijskog signala.

3.4.1. Kašnjenje radionavigacijskog signala u neutralnoj atmosferi

Kašnjenje širenja radionavigacijskog signala u neutralnoj atmosferi d_{na} definira se kao odnos duljina optičke i geometrijske putanje i prikazuje izrazom:

$$d_{na} = \int_{\text{putanja}} nds - \int_{\text{vac}} ds \quad (3.61)$$

Uzimajući u obzir izraz za određivanje optičke duljine putanje (3.59), slijedi [15]:

$$d_{na} = \int_{\text{putanja}} n ds - \int_{\text{putanja}} ds + \int_{\text{putanja}} ds - \int_{\text{vac}} ds \quad (3.62)$$

iz čega slijedi jednačba:

$$d_{na} = \int_{\text{putanja}} (n - 1) ds + \left[\int_{\text{putanja}} ds - \int_{\text{vac}} ds \right] \quad (3.63)$$

Prvi dio jednačbe predstavlja produljenje putanje radionavigacijskog signala zbog kašnjenja signala izazvana usporenjem brzine širenja [91] (engl. i.e. *range error*), a drugi dio jednačbe predstavlja kašnjenje uzrokovano povijanjem putanje širenja radionavigacijskog signala do kuta elevacije (engl. i.e. *geometric delay*). Ovako definirano kašnjenje radionavigacijskog signala pojednostavljuje određivanje kašnjenja neutralne atmosfere zato što je kašnjenje uzrokovano povijanjem putanje signala značajno do kuta elevacije od 10°.

3.4.2. Ukupno zenitno kašnjenje

Pod pretpostavkom da je atmosfera sferno simetrična te da radionavigacijski signal ima zenitni dolazni kut ($\epsilon = 90^\circ$), povijanje putanje radionavigacijskog signala se ne javlja te se kašnjenje u takvoj atmosferi može prikazati izrazima [15]:

$$d_{na}^z = \int_{r_s}^{r_a} (n - 1) dz \quad (3.64)$$

odnosno

$$d_{na}^z = 10^{-6} \int_{r_s}^{r_a} N dz \quad (3.65)$$

pri čemu je: $r_s - r_a$...putanja signala kroz sferično simetričnu atmosferu, z ...integriranje u zenitnom smjeru.

Ovako definirano kašnjenje smatra se ukupnim kašnjenjem neutralne atmosfere u zenitnom smjeru ili, pojednostavljeno, ukupno zenitno kašnjenje (engl. *Total Zenith Delay – ZTD*).

Budući da se ukupno zenitno kašnjenje sastoji od hidrostatskog (engl. *Zenith Hydrostatic Delay – ZHD*) (inducirano nedipolnim momentom oborive vode) i nehidrostatskog kašnjenja (engl. *Zenith Wet Delay – ZWD*) (inducirano stalnim dipolnim momentom oborive vode i oborinama)

[92]–[94] te poznajući njihovu povezanost (izraz 3.56), ukupno zenitno kašnjenje može se prikazati izrazom:

$$ZTD = ZHD + ZWD = 10^{-6} \int_s^{\infty} N_h dz + 10^{-6} \int_s^{\infty} N_w dz \quad (3.66)$$

pri čemu je s ...ravnina antene prijammnika.

Razvijen je niz modela koji opisuju zenitno kašnjenje, pri čemu pojedini modeli zajednički modeliraju mokru i suhu komponentu zenitnog kašnjenja, a pojedini modeli odvojeno modeliraju ulaznu mokru i suhu komponentu. Prikaz najvažnijih postojećih modela ZTD prikazan je u idućem poglavlju.

3.4.3. Struktura troposferskog kašnjenja – zenitno kašnjenje i funkcija mapiranja

Druga teoretska mogućnost kod koje se ne javlja povijanje putanje radionavigacijskog signala jest postojanje neutralne atmosfere sa stalnim indeksom refrakcije uz ravnu površinu Zemlje. Pod tim se pretpostavkama kašnjenje širenja može izraziti preko funkcije ukupnog zenitnog kašnjenja izrazom [15], [95]:

$$d_{na} = d_{na}^z \cdot \csc(\varepsilon) \quad (3.67)$$

Iako se temelji na vrlo pojednostavljenim pretpostavkama nedovoljne točnosti, ovaj izraz pokazuje mogućnost funkcijskog povezivanja kašnjenja neutralne atmosfere u zenitnom smjeru s kašnjenjem za ostale kutove elevacije radionavigacijskog signala, tj.

$$d_{na} = d_{na}^z \cdot m(\varepsilon) \quad (3.68)$$

pri čemu je $m(\varepsilon)$...ukupna funkcija mapiranja.

Navedeni izraz opisuje funkciju mapiranja u zenitnom smjeru koja se može dodatno razvijati po svojim hidrostatskim (suhim) i nehidrostatskim (mokrim) komponentama.

Razvijajući funkciju mapiranja (3.68) po hidrostatskoj i nehidrostatskoj komponenti, dobiva se opća funkcija mapiranja troposferskog kašnjenja [15], [63]:

$$d_{na} = d_a^z \cdot m_d(\varepsilon) + d_w^z \cdot m_w(\varepsilon) \quad (3.69)$$

pri čemu je: $m_d(\varepsilon)$...hidrostatska funkcija mapiranja, $m_w(\varepsilon)$...nehidrostatska funkcija mapiranja.

Razvijanjem funkcije mapiranja moguće je odrediti troposfersko kašnjenje za bilo koji kut nagiba putanje (engl. *Slant Tropospheric Delay* – STD) radionavigacijskog signala [32]. Razvoj funkcije mapiranja i njihov detaljniji prikaz donosi se u sljedećem poglavlju rada.

3.4.4. Hidrostatski (suhi) uzroci refrakcije radionavigacijskih signala

Posljednji oblik opće jednadžbe atmosferske refrakcije (3.56) odvojeno prikazuje hidrostatske i nehidrostatske atmosferske parametre koji dovode do refrakcije radionavigacijskog signala. Komponenta indeksa atmosferske refrakcije uzrokovana hidrostatskim parametrima ima oblik:

$$N_d = K_1 \frac{R_o \cdot \rho}{M_d} \quad (3.70)$$

Izvori su troposferske greške hidrostatskog sloja prisustvo atmosferskih suhih plinova i nedipolne komponente refrakcije vodene pare [63] koji su u hidrostatskoj ravnoteži [70]. Vrijednost troposferske greške uzrokovane suhom komponentom pokazuje minimalnu i ujednačenu prostornu i vremensku varijabilnost te se može precizno odrediti temeljem površinskih vrijednosti atmosferskog tlaka [47], [54]. Pritom suha komponenta sudjeluje s otprilike 90 % u ukupnoj troposferskoj greški [56].

Slabljenje (engl. *attenuation*) radionavigacijskog signala posljedica je djelovanja molekula kisika i nedipolne komponente vodene pare na njegovo širenje. Magnetski moment molekule kisika dovodi do magnetskog međudjelovanja u ravnini upadnog polja te pojave apsorpcijskih linija (engl. *absorption lines*) (predstavljaju centralno područje najvećeg intenziteta pojaseva apsorpcije) karakterističnih za pojedinu poliatomnu atmosfersku molekulu. Za molekulu kisika apsorpcijske linije nalaze se između 50 i 70 GHz. Budući da molekula kisika ima mali magnetski moment, ostvaruje nizak utjecaj na slabljenje radionavigacijskog signala (frekventno područje L): oko 0,035 dB u zenitnom smjeru i oko 0,38 dB pri kutu elevacije od 5° [66].

Ukupna apsorpcija u atmosferi A_a za putanju radiosignala prikazana je izrazom:

$$A_a = \int_0^{r_o} \tau_a(r) dr \quad (3.71)$$

pri čemu je: r_o ...duljina putanje radio signala, $\tau_a(r)$...specifično slabljenje (dB / km).

Koeficijent specifičnog slabljenja ima oblik:

$$\tau_a(r) = \tau_o(r) + \tau_w(r) \quad (3.72)$$

pri čemu je: $\tau_o(r)$...učinak kisika na slabljenje radio signala, $\tau_w(r)$...učinak vodene pare na slabljenje signala.

Učinak slabljenja na putanji radiosignala pod kutom može se odrediti dvojako [41]:

- i. integrirajući izraz (3.71) dobiva se izraz za kutove elevacije iznad 10°:

$$A_a = \frac{h_o \tau_o + h_w \tau_w}{\sin \theta} \quad (3.73)$$

pri čemu je: h_o ... visinski ekvivalent kisika, h_w ...visinski ekvivalent vodene pare. Princip visinskog ekvivalenta kisika i vodene pare podrazumijeva početno uvođenje eksponencijalne visinske razdiobe atmosfere za opisivanje smanjivanja gustoće porastom visine, koji variraju zemljopisno i sezonski

- ii. temeljem površinskih meteoroloških parametara. Uzevši vrijednost površinskog tlaka $P = 1000$ mbar, specifično slabljenje τ_a ima oblik:

$$\tau_a = b\rho + ct \quad (3.74)$$

pri čemu je: ρ ...površinska koncentracija vodene pare (g/m^3), t ...površinska temperatura, a, b, c ...empirijski koeficijenti određeni metodom višestrukom regresijskom analize koji su ovisni o frekvenciji.

Utjecaj ostalih atmosferskih plinova na slabljenje frekvencija valnog pojasa L neznatan je [66].

3.4.5. Nehidrostatski (mokri) uzroci refrakcije radionavigacijskih signala

Nehidrostatski (mokri) atmosferski parametri koji uzrokuju mokru komponentu atmosferske refrakcije (jednadžba 3.56) prikazani su izrazom:

$$N_w = \left(K'_2 \cdot \frac{e}{T} + K_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_w^{-1} \quad (3.75)$$

Troposferska greška uzrokovana mokrom komponentom posljedica je prisustva vodene pare u visinskom sloju troposfere do 10 km. Premda je u apsolutnom iznosu dio troposferske greške uzrokovan nehidrostatskim uzrocima znatno manji od dijela uzrokovana suhom komponentom (nekoliko desetaka centimetara) [47], greška uzrokovana mokrom komponentom ne može se precizno modelirati koristeći se površinskim meteorološkim

podacima zato što je vodena para izrazito prostorno i vremenski nestabilna. Budući da elementi mokre komponente nisu u hidrostatskoj ravnoteži, modeli temeljeni na parcijalnom tlaku vodene pare ili površinske relativne vlažnosti ne pružaju dovoljnu točnost te zahtijevaju empirijske konstante koje variraju prostorno i vremenski [70].

Prisutni oblici vodene pare – oblaci, kiša, magla, led, snijeg i tuča – mogu izazvati slabljenje radionavigacijskih signala, pri čemu se javljaju idući učinci [41], [96]:

- slabljenje uzrokovano rasipanjem energije radiovala u obliku topline
- raspršenjem gubitkom putanje propagacije, posljedično dovodeći do interferencije s drugim radioizvorima
- značajnom amplitudnom i faznom scintilacijom uzrokovanom odgovarajućim višestaznim širenjem
- depolarizacijom zbog nesferičnog oblika kišnih kapi
- smanjivanjem pojačanja antene zbog fazne disperzije na putanji signala
- smanjenje propusnosti valnog pojasa, posebno u digitalnih sustava.

Učinak kišnih kapi ogleda se u rasipanju i apsorpciji energije zračenja, pri čemu oba učinka doprinose slabljenju radionavigacijskog signala. Ovisno o međusobnom odnosu valne duljine radiosignala i veličini kišne kapi, slabljenje zbog apsorpcije izraženije je u valnih duljina većih od veličine kišnih kapi i obratno. Stoga, s obzirom na frekvencije GNSS-ovih radionavigacijskih signala, slabljenje signala opisano je zakonitostima Rayleighova raspršenja (engl. *Rayleigh scattering*) s primjenom na frekvencijama do 3 GHz [41].

Specifično slabljenje radionavigacijskog signala τ (dB/km) izazvano kišom prikazano je izrazom [97]:

$$\tau = 4,343 \int_0^{\infty} Q_T(D) \cdot N(D) dD \quad (3.76)$$

pri čemu je: Q_T ...ukupno povećanje poprečnog presjeka (engl. *total extinction cross section*), $N(D)$...broj kapi po jedinici volumena po jedinici promjera u promatranom intervalu ($\text{mm}^{-1}\text{m}^{-3}$).

Q_T može se prikazati s obzirom na učinke slabljenja i raspršenja, što je prikazano izrazom:

$$Q_t(D) = Q_s(D) + Q_A(D) \quad (3.77)$$

pri čemu je: $Q_S(D)$...dio površine poprečnog presjeka s učinkom raspršenja, $Q_A(D)$...dio površine poprečnog presjeka s učinkom slabljenja.

Ukupna površina kišne kapi koja ostvaruje međudjelovanje s radiosignalom ovisi o veličini presjeka kapi kiše, valne duljine i indeksu refrakcije n [41].

Dodatni učinak kiše ogleda se u pojavi depolarizacije radionavigacijskog vala [98], pri čemu se njegovo kopolarizirano slabljenje duž putanje širenja CPA (engl. *co-polarized path attenuation* - CPA) može opisati izrazom:

$$XPD = U - V \log(CPA) \quad (3.78)$$

pri čemu je: XPD ...unakrsna polarizacijska diskriminacija (neusklađenost) engl. (*cross polarization discrimination*), U ...elevacijski kut putanje širenja radiosignala u odnosu na horizontalnu ravninu, V ...kut polarizacijskog nagiba u odnosu na horizontalnu ravninu. Parametri U i V ovise prvenstveno o frekvenciji te, u određenoj mjeri, o raspodjeli veličina, oblika i temperature kapi kiše [41].

Budući da su opisani učinci degradacije najizraženiji u frekvencija iznad 10 GHz [96], njihov utjecaj na signale valnog pojasa L malen je te ukupno slabljenje radionavigacijskog signala iznosi (u pretpostavljenom slučaju intenzivnih oborina, npr. 10 cm/h) ispod 0,01 dB/km [66].

Uzroci su troposferske scintilacije atmosferske turbulencije koje dovode do neregularnog kretanja vrijednosti indeksa refrakcije, pri čemu je putanja radionavigacijskog signala podložna slučajnim procesima apsorpcije i raspršivanja. Intenzitet scintilacije ovisi o frekvenciji, kutu putanje radionavigacijskog signala te atmosferskim uvjetima [66]. Posljedice troposferske scintilacije na radionavigacijske signale valnog područja L malene su. Sukladno postojećim modelima troposferske scintilacije, vrijednosti troposferske scintilacije kreću se u rasponu od 0,3 dB (za kut elevacije od 20°) do 2 dB (za kut elevacije od 2°), pri čemu je točnost postojećih modela zadovoljavajuća samo iznad kutova elevacije od 5° [41], [96].

Maksimalne vrijednosti atmosferskog kašnjenja GPS radionavigacijskog signala uzrokovane pojedinim atmosferskim sastojcima prikazane su u Tablici 3.3.

Tablica 3.3.: Prikaz maksimalnih vrijednosti kašnjenja GPS-ova signala u neutralnoj atmosferi

Atmosferski sastojak	Promjer [\leq mm]	Površinska gustoća [\leq g/m ³]	Površinsko kašnjenje [\leq mm/km]	Ljestvica visine sastojka [km]	Udio duž putanje limba [%]	Kašnjenje u ravnini limba [\leq m]
Suhi zrak	10 ⁻⁷	1400	290	8	100	890
Visoko intenzivna para	10 ⁻⁷	25	140	2,7	100	3066
Para niskog intenziteta	10 ⁻⁷	2,7	15	2,7	100	172
Oblak	0,1	5	8	5	100	107
Radijacijska magla	0,05	0,1	0,2	0,5	50	11
Adveksijska magla	0,05	0,3	0,3	1	50	11
Izmaglica	0,001	0,01	0,02	2	50	0,5
Lagana kiša	0,5	0,1	0,2	1,5	50	5,9
Stalna kiša	4	1	2	3	50	38
Intenzivna kiša	6	7	15 (L ₂)	6	25	92
Tuča	20	7	7 (L ₂)	6	5	8,5
Snijeg	15	0,75	0,75 (L ₂)	3	50	4,4
Aerosoli	0,01	0,1	0,1	0,5	50	5,7
Pijesak	1	60	18	1	50	205
Vulkanski pepeo	0,2	0,03	0,01	4	50	0,15

Izvor:[99]

4. POSTOJEĆI MODELI ZA ISPRAVKU TROPOSFERSKOG KAŠNJENJA

Djelovanje neutralne atmosfere očitava se u kašnjenju radionavigacijskog signala te njegovoj djelomično proširenoj putanji kao posljedica učinka niza fizikalnih utjecaja duž putanje širenja radionavigacijskog signala. Budući da se spomenuti procesi odvijaju uglavnom u troposferi, za njihovo opisivanje ustalio se opći pojam troposfersko kašnjenje koji obuhvaća učinke kašnjenja i proširenja putanje signala koji dovode do pojave troposferske greške kao jedne od komponenata greške korisničkog položaja određenog sustavom GNSS. Potpuni model troposferskog kašnjenja sadrži četiri komponente, tj. uključuje odvojene modele kašnjenja

radionavigacijskog u zenitnom smjeru i nagibnom dolaznom smjeru, pri čemu se za svaki dolazni smjer odvojeno modeliraju hidrostatska i nehidrostatska komponenta. Ipak, primijenjeni su različiti pristupi tako da neki od modela skupno modeliraju pojedine komponente te primjenjuju različite ulazne parametre. Ovdje prikazani dostupni modeli opisani su u svojem izvornom obliku, pri čemu su, ovisno o pojedinom modelu, odvojeno ili zajednički prikazani modeli zenitnog i nagibnog smjera te hidrostatskih i nehidrostatskih uzroka ili njihovih objedinjenih modela. Podrijetlo meteoroloških ulaznih podataka (izravnih ili u obliku koeficijenata) razlikuje se ovisno o pristupu pojedina modela, tako mogu biti stvarni meteorološki podatci (ostvareni s mjerne GNSS-ove postaje), interpolirani iz pojedinog numeričkog vremenskog modela (engl. *Numerical weather models* – NWM) ili predviđeni [100]. Po svojoj primjenjivosti postojeći modeli mogu se podijeliti na globalne i lokalne, pri čemu globalni ostvaruju nižu točnost, a lokalni modeli zahtijevaju dodatne ulazne parametre [101].

4.1. Geodetski orijentirani troposferski modeli

Jedna se općih podjela postojećih modela troposferske greške odnosi na geodetsko orijentirane i navigacijsko orijentirane modele [102], pri čemu su geodetsko orijentirani modeli složeniji te ulazni podatci uključuju površinske meteorološke parametre. Premda točnije opisuju troposfersku grešku, točnost im uvelike ovisi o točnosti i dostupnosti ulaznih meteoroloških parametara. U njihovu nedostatku upotrebljavaju se pripadajuće tablice sa srednjim sezonskim prosjecima.

4.1.1. Saastamoinenov model

Saastamoinenov model polazi od stanja hidrostatske ravnoteže (3.1), pri čemu vrijednost gravitacijskog ubrzanja u hidrostatskom zenitnom smjeru definira izrazom [2], [3], [15], [63]:

$$g_m = 9,784(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00000028H_s) \quad (4.1)$$

pri čemu je: g_m ...gravitacijsko ubrzanje s obzirom na centar mase vertikalnog stupca zraka promatrane visine, φ ...zemljopisna širina korisničkog prijamnika (rad), H_s ...visina korisničkog prijamnika iznad razine mora (m).

Pojednostavljajući jednadžbu (3.49) te koristeći se Essen-Froomovom (engl. *Essen & Froome*) konstantom refrakcije, određena je hidrostatska zenitna komponenta Saastamoinenova modela:

$$d_h^z = \frac{0,002277P_s}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00000028H_s)} \quad (4.2)$$

pri čemu je P_s ...tlak na nivou prijamnika (hPa).

Pri određivanju nehidrostatske zenitne komponente, početne pretpostavke uključuju linearno smanjivanje temperature i vodene pare porastom visine. Zanemarujući faktore stlačivosti, izraz nehidrostatskog zenitnog troposferskog kašnjenja (3.75) dobiva oblik:

$$d_w^z = 10^{-6} \int_{r_s}^{r_a} K_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) dz \quad (4.3)$$

pri čemu je: e ...parcijalni tlak vodene pare (hPa), T ...temperatura u stupnjevima Kelvina.

Varijacija parcijalnog tlaka vodene pare (kao najvažnijeg uzroka nehidrostatske komponente) prikazana je izrazom:

$$e = e_s \left[\frac{T}{T_s} \right]^{\frac{vg}{R_d \alpha}} \quad (4.4)$$

pri čemu je: e_s ...parcijalni tlak vodene pare na nivou prijamnika (hPa), v ...brojčani koeficijent određen na osnovi opažanja s pojedinačnog korisničkog položaja, R_d ...specifična plinska konstanta, α ...specifična stopa opadanja vrijednosti s visinom (K/m), T_s ...površinska temperatura (K).

Za prosječne meteorološke uvjete i područja srednjih zemljopisnih širina, nehidrostatska komponenta Saastamoinenova modela ima oblik [12], [103]:

$$d_w^z = 0,002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0,05 \right) e_s \quad (4.5)$$

Uključujući i raspisujući pojedinačne jednadžbe za hidrostatsku (4.2), nehidrostatsku (4.3) i komponentu funkcije mapiranja (4.59), jedinstveni Saastamoinenov model troposferskog kašnjenja δ_s ima oblik [2], [3], [102]:

$$\delta_s = \frac{0,002277}{\cos z} \left[P_s + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e_s - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (4.6)$$

pri čemu su: $B, \delta R$... koeficijenti ovisni o visini prijamnika i kutu elevacije čije se vrijednosti interpoliraju iz pripadajućih tablica (4.1. i 4.2.), z ...zenitni kut.

Tablica 4.1.: Tablica za interpolaciju koeficijenta $B(H)$ Saastamoinenova modela

Visina [km]	Koeficijent B [mbar]
0,0	1,156
0,5	1,079
1	1,006
1,5	0,938
2	0,874
2,5	0,813
3	0,757
4	0,654
5	0,563

Izvor: [102]

Tablica 4.2.: Tablica za interpolaciju koeficijenta δR Saastamoinenova modela (m)

Zenitni kut	Visina korisničkog prijamnika [km]							
	0	0,5	1	1,5	2	3	4	5
60°00'	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001
66°00'	0,006	0,006	0,005	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002
70°00'	0,012	0,011	0,010	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004
73°00'	0,020	0,018	0,017	0,015	0,013	0,011	0,009	0,007
75°00'	0,031	0,028	0,025	0,023	0,021	0,017	0,014	0,011
76°00'	0,039	0,035	0,032	0,029	0,026	0,021	0,017	0,014
77°00'	0,050	0,045	0,041	0,037	0,033	0,027	0,022	0,018
78°00'	0,065	0,059	0,054	0,049	0,044	0,036	0,030	0,024
78°30'	0,075	0,068	0,062	0,056	0,051	0,042	0,034	0,028
79°00'	0,087	0,079	0,072	0,065	0,059	0,049	0,040	0,033
79°30'	0,102	0,093	0,085	0,077	0,070	0,058	0,047	0,039
79°45'	0,111	0,101	0,092	0,083	0,076	0,063	0,052	0,043
80°00'	0,121	0,110	0,100	0,091	0,083	0,068	0,056	0,047

Izvor: [64], [102]

Parcijalni tlak vodene pare određuje se izrazom:

$$e = R_h \exp(-37,2465 + 0,213166T - 0,000256908T^2) \quad (4.7)$$

pri čemu je R_h ...relativna vlažnost (u postotcima).

Potrebne vrijednosti relativne vlažnosti, temperature i tlaka potrebno je ostvariti s promatrane lokacije. Ako ne postoje lokalni podatci, koristi se početnim vrijednostima standardne atmosfere: $P_0=1013,25$ mbar, $T_0=18^\circ$ C, $R_{h0}= 50$ %, uz početnu visinu $H_0= 0$ m. Ulazni parametri dobivaju se izrazima:

$$P = P_0[1 - 0,000226(H - H_0)]^{5,225} \quad (4.8)$$

$$T = T_0 - 0,0065(H - H_0) \quad (4.9)$$

$$R_h = R_{ho} \exp[-0,0006396(H - H_0)] \quad (4.10)$$

Unaprijeđeni Saastamoinenov model troposferskog kašnjenja uvodi nove parametre ovisne o lokaciji prijavnika [2], [64]:

$$\delta_s = \frac{0,002277}{\cos z} (1 + D) \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (4.11)$$

pri čemu je D ...koeficijent ovisan o zemljopisnoj širini prijavnika te se računa po izrazu:

$$D = 0,0026 \cos 2\varphi + 0,00028H_s \quad (4.12)$$

Za razliku od unaprijeđenog modela, vrijednosti δR i B koeficijenata u izvornom Saastamoinenovu modelu imaju stalnu vrijednost nula.

4.1.2. Hopfieldov model

Hopfieldov model hidrostatske zenitne komponente troposferskog kašnjenja pretpostavlja da se refrakcijski atmosferski profil može izraziti kvartalnim modelom [5]:

$$N_d = N_{ds} \frac{(H_d^e - H)^4}{(H_d^e)^4} \quad (4.13)$$

pri čemu je: $H_d^e \dots = 40136 + 148,72 \cdot (T - 273,16)$, N_{ds} ...refrakcija suhe komponente na površini, H ... visina iznad razine mora (km). H_d^e predstavlja efektivnu visinu hidrostatske komponente i smatra se jednaka visini tropopauze (km) [59].

Polazeći od općeg izraza za hidrostatsko zenitno kašnjenje (3.66) te obavljajući integriranje po visini, slijedi:

$$d_d^z = 10^{-6} N_{ds} \frac{H_d^e}{5} \quad (4.14)$$

Primjenjujući Smith-Wientraubovu (engl. *Smith and Wientraub*) refrakcijsku konstantu, dobiva se završni izraz [5], [15], [63]:

$$d_d^z = 77,6 \cdot 10^{-6} \frac{P_s H_d^e}{T_s 5} \quad (4.15)$$

Pod istim početnim pretpostavkama izveden je i model za nehidrostatsku zenitnu komponentu troposferskog kašnjenja:

$$d_w^z = 10^{-6} \cdot N_{ws} \frac{H_w^e}{5} \quad (4.16)$$

pri čemu je: N_{ws} ...refrakcija mokre komponente na nivou prijamnika, H_w^e ...efektivna visina mokre komponente (km), najčešće se smatra jednakom visini tropopauze i iznosi 11 km. Dodatno, povezanost površinske temperature i vrijednosti H_w^e može se odrediti izrazom [59]:

$$H_w^e = 7505[\text{m}] + 0,002421[\text{m}] \cdot \exp\left(\frac{t_o}{22,9[^\circ\text{C}]}\right) \quad (4.17)$$

pri čemu je t_o ...površinska temperatura ($^\circ\text{C}$).

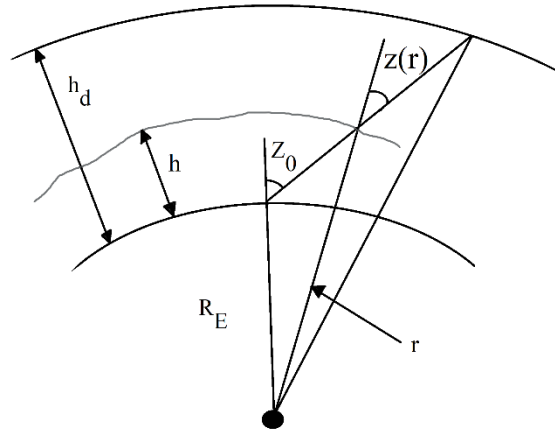
Vrijednost površinske refrakcije mokre zenitne komponente N_{ws} određena je jednačbom Smitha i Wientrauba:

$$N_{ws} = 3,73 \cdot 10^5 \frac{e_s}{T_s^2} \quad (4.18)$$

4.1.3. Modificirani Hopfieldov model

Modificirani Hopfieldov model uvodi parametre duljine vektora pozicije umjesto visine [4], [5], [63], [102]. Ako predstavimo R_E kao radijus Zemlje (6378137 m), h kao visinski ekvivalent nehidrostatskog dijela atmosfere (11000 m) te h_d kao visinski ekvivalent hidrostatskog dijela atmosfere (41,6 km) [63], tada odgovarajuće duljine vektora iznose (Slika 4.1.) i mogu se matematički izraziti jednačbama:

$$\begin{aligned} r_d &= R_E + h_d \\ r &= R_E + h \end{aligned} \quad (4.19)$$



Slika 4.1.: Vektori pozicije modificirana Hopfieldova modela [102]

Refrakcije hidrostatske i nehidrostatske komponente prikazane su izrazima:

$$N_h^{trop}(r) = N_{ds}^{trop} \left[\frac{r_d - r}{r_d - R_E} \right]^4 \quad (4.20)$$

$$N_w^{trop}(r) = N_{ws}^{trop} \left[\frac{r_w - r}{r_w - R_E} \right]^4 \quad (4.21)$$

pri čemu je: N_{ds}^{trop} ...model hidrostatske refrakcije pri površini Zemlje, N_{ws}^{trop} ...model nehidrostatske refrakcije pri površini Zemlje. Njihove vrijednosti računaju se po izrazima:

$$N_{ds}^{trop} = c_1 \frac{e}{T} \quad (4.22)$$

$$N_{ws}^{trop} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad (4.23)$$

pri čemu su c_1, c_2, c_3 ...empirijski određeni koeficijenti.

Konačni modificirani Hopfieldov model ima oblik:

$$d_i^{trop}(\varepsilon) = 10^{-6} N_{i,s}^{trop} \left[\sum_{k=1}^9 \frac{\alpha_{k,i}}{k} r_i^k \right] \quad (4.24)$$

pri čemu je: i ...oznaka za odvojene iteracije hidrostatske i nehidrostatske komponente, k ... sloj troposfere, $N_{i,s}^{trop}$...refrakcija na površini Zemlje.

Vrijednosti ostalih parametara jednadžbe prikazani su izrazima:

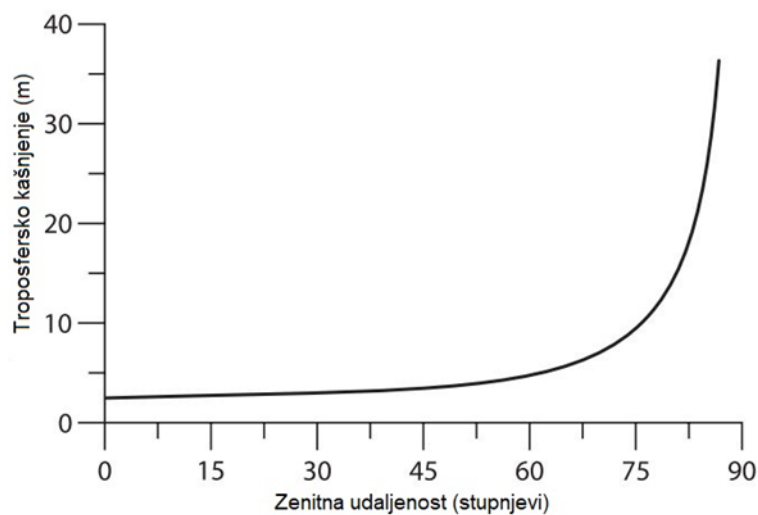
$$\begin{aligned} \dot{r}_i &= \sqrt{(R_E + h_i)^2 - (R_E \cos \varepsilon)^2} - R_E \sin \varepsilon \\ \alpha_{1,i} &= 1, & \alpha_{2,i} &= 4a_i \\ \alpha_{3,i} &= 6a_i^2 + 4b_i & \alpha_{4,i} &= 4a_i(a_i^2 + 3b_i) \\ \alpha_{5,i} &= a_i^4 + 12a_i^2b_i + 6b_i^2 & \alpha_{6,i} &= 4a_ib_i(a_i^2 + 3b_i) \\ \alpha_{7,i} &= b_i^2(6a_i^2 + 4b_i) & \alpha_{8,i} &= 4a_ib_i^3 \\ \alpha_{9,i} &= b_i^4 \end{aligned} \quad (4.25)$$

pri čemu su parametri a i b određeni izrazima:

$$a_i = -\frac{\sin \varepsilon}{h_i}, \quad b_i = -\frac{\cos^2 \varepsilon}{2h_iR_E} \quad (4.26)$$

Vrijednosti troposferskog kašnjenja GNSS-ova signala (GPS) u ovisnosti o ulaznom kutu određeno modificiranim Hopfieldovim modelom prikazano je na Slici 4.2.

Ulazni meteorološki parametri modela jesu temperatura, tlak i vlaga dobiveni s promatrane lokacije ili njihove vrijednosti aproksimirane iz modela standardne atmosfere. Ako se navedeni parametri određuju s obzirom na promatranu visinu, njihove vrijednosti određuju se izrazima 4.8 – 4.10.



Slika 4.2.: Vrijednosti troposferskog kašnjenja GPS-ova radionavigacijskog signala određeno po modificiranom Hopfieldovu modelu [102]

4.1.4. Ifadisov model

Ifadisov model temelji se na linearnoj povezanosti nehidrostatske zenitne komponente i površinskih meteoroloških parametara [32] premda stupanj međusobne povezanosti može značajnije varirati [6], [15]. Opći oblik funkcije troposferskog kašnjenja nehidrostatske zenitne komponente prikazan je izrazom:

$$d_w^z = 0,00554 - 0,88 \cdot 10^{-4}(P_s - 1000) + 0,272 \cdot 10^{-4}e_s + 2,771 \left(\frac{e_s}{T_s}\right) \quad (4.27)$$

4.1.5. Askneov i Nordiusov model

Askneov i Nordiusov model nehidrostatske zenitne komponente zasniva se na sezonskim i meteorološkim varijacijama promatrana područja. Početna pretpostavka podrazumijeva da je stopa smanjivanja tlaka vodene pare porastom visine značajno brža od stope smanjivanja ukupnog tlaka (više od uobičajenih 1 %) te je prikazana izrazom [7]:

$$e = e_s \left(\frac{P}{P_s}\right)^{\lambda+1} \quad (4.28)$$

pri čemu je λ ...empirijski koeficijent s obzirom na zemljopisnu širinu i godišnje doba. Time početni izraz nehidrostatskog troposferskog kašnjenja ima oblik:

$$d_w^z = 10^{-6} \left(K'_2 + \frac{K_3}{T_m}\right) \frac{e_s}{P_s} \int_{r_s}^{r_a} \left(\frac{P}{P_s}\right)^{\lambda} \frac{P}{T} dz \quad (4.29)$$

pri čemu je $K'_2 = K_2 - K_1 \frac{M_w}{M_d} = 16,52 \text{ K/mbar}$, tj. ovako izvedeno nehidrostatsko kašnjenje prati i parametar hidrostatskog kašnjenja (M_d), T_m ... srednja temperatura (K).

Završni oblik modela prikazan je izrazom:

$$d_w^z = 10^{-6} \left(K'_2 + \frac{K_3}{T_m}\right) \frac{R_d}{(\lambda + 1)g_m} e_s \quad (4.30)$$

Izračun srednje temperature prikazan je izrazom:

$$T_m = T_s \left(1 - \frac{\alpha R_d}{(\lambda + 1)g_m}\right) \quad (4.31)$$

Za vrijednosti koeficijenta $\alpha = 0,0062 \text{ K/m}$ te $\lambda = 3$, model odgovara nehidrostatskoj komponenti Saastamoinenova modela (4.5). Vrijednosti koeficijenta λ moguće je odrediti na više načina[7], [104]; s obzirom na temperaturne profile za svakih 10 stupnjeva zemljopisne širine temeljene na meteorološkim podacima ili korištenjem podataka radiosondā o kretanju vodene pare (engl. *Water Vapor Radiometer* – WVR) iz područja radiometeorologije. Vrijednosti empirijskog koeficijenta λ , određenih pomoću podataka s lokacija uglavnom u sjevernoj hemisferi, prikazani su u Tablici 4.3.

Tablica 4.3.: Tablica vrijednosti koeficijenta λ za primjenu u Askneovu i Nordiusovu modelu

Φ (° N)	Zima	Proljeće	Ljeto	Jesen	Srednja godišnja vrijednost
0 – 10	3,37	2,85	2,80	2,64	2,91
10 – 20	2,99	3,02	2,70	2,93	2,91
20 – 30	3,60	3,00	2,98	2,93	3,12
30 – 40	3,04	3,11	2,92	2,94	3,00
40 – 50	2,70	2,95	2,77	2,71	2,78
50 – 60	2,52	3,07	2,67	2,93	2,79
60 – 70	1,76	2,69	2,61	2,61	2,41
70 – 80	1,60	1,67	2,24	2,63	2,03
80 – 90	1,11	1,44	1,94	2,02	1,62
Prosjek	2,52	2,64	2,62	2,70	2,61

Izvor: [15]

4.1.6. Model Babyja i sur.

Nastavljajući teorijski razvoj Saastamoinenova modela, u modelu Babyja i sur. predlaže se određivanje gravitacijskog ubrzanja u jednadžbi stanja hidrostatske ravnoteže (3.1) izrazom [8]:

$$g_m = \frac{c}{1 + \frac{2}{r_s \sigma (\mu + 1)}} \quad (4.32)$$

pri čemu je: g_m ...gravitacijsko ubrzanje promatranog položaja, r_s ...srednji geocentrični radijus promatrana položaja (za vrijednost radijusa Zemlje predlaže se $r_0 = 6378000 \text{ m}$) i visine promatrana položaja H_s (m). Koeficijenti σ i μ određeni su izrazima:

$$\mu = \frac{g_s}{R_d \alpha} \left[1 - \frac{2}{r_s \sigma} \right] \quad (4.33)$$

$$\sigma = \frac{\alpha}{T_s}$$

Uključujući razvijenu konstantu K_1 [105], hidrostatska zenitna komponenta troposferskog kašnjenja prikazana je izrazom:

$$d_d^z = \frac{0,022277P_s}{g_s} \left[1 + \frac{2}{r_s \sigma (\mu + 1)} \right] \quad (4.34)$$

Uključivanjem higrometrijskih konstantā A , B i C te uz pretpostavku da je relativna vlaga konstantna do visine z gdje se smanjuje na nulu, tlak zasićenja vodene pare može se prikazati izrazom [85]:

$$e_{sat} = \exp \left(A - \frac{B}{T} - C \cdot \ln T \right) \quad (4.35)$$

pri čemu je: T ...temperatura ($^{\circ}$ K), vrijednosti higrometrijskih konstantā jesu $A = 17,1485$; $B = 4684,1$; $C = 38,45$.

Model nehidrostatske zenitne komponente troposferskog kašnjenja Babyja i sur. prikazan je izrazom [85]:

$$d_w^z = \left(\frac{3,81U_s}{\alpha} \right) \left[\frac{e_{sat}T_s}{B_s} - \frac{e_{sat}T_m}{B_m} \right] \quad (4.36)$$

pri čemu je U_s ...relativna vlaga (u postotcima).

Autori Baby i sur. predlažu poluempirijski opći model troposferskog kašnjenja koji bi se, slično Askneovu i Nordiusovu modelu, temeljio na lokalnim opservacijama WVR uređaja ili radiosondā. Time bi se omogućila veća točnost sezonskih varijacija meteoroloških parametara. Tako dobivena nehidrostatska komponenta sadrži i parametar hidrostatskog troposferskog kašnjenja te ukupno troposfersko zenitno kašnjenje poluempirijskog općeg modela Babyja i sur. ima oblik [8], [85]:

$$d_{trop} = \frac{0,022277P_s}{g_s} \left[1 + \frac{2T_s}{r_s \sigma (\mu + 1)} \right] + 10^{-3} \nu 10^{\nu t} U_s \quad (4.37)$$

pri čemu je: t ... površinska temperatura u stupnjevima Celzija, ν i γ ... empirijski koeficijenti ovisni o zemljopisnoj širini, sezoni i klimatskim uvjetima. Vrijednosti ν i γ koeficijenata navedeni su u Tablici 4.4.

Tablica 4.4.: Tablica vrijednosti koeficijenta ν i γ za primjenu u poluempirijskom općem modelu Babyja i sur.

Interval zemljopisne širine	Oceanska klima		Kontinentalna klima	
	ν	ν	ν	γ
90° S – 70° S	0,6421	0,0290	0,4164	0,0193
70° S – 50° S	0,5864	0,0259	0,5593	0,0362
50° S – 30° S	0,6124	0,0247	0,5369	0,0285
30° S – 10° S	0,4729	0,0296	0,4229	0,0335
10° S – 10° N	1,0772	0,0192	0,6542	0,0269
10° N – 30° N	0,8063	0,0213	0,6626	0,0249
30° N – 50° N	0,6614	0,0241	0,7574	0,0224
50° N – 70° N	0,7075	0,0244	0,7652	0,0236
70° N – 90° N	0,7434	0,0256	0,7687	0,0257

Izvor: [15]

Koeficijent ν izražen je u $\text{mm} \cdot (\%)^{-1}$, koeficijent γ u $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

4.1.7. Model Davisa i sur.

Koristeći se vrijednosti Thayerova koeficijenta refrakcije K_1 [42] te unaprijeđenim Saastamoinenovim modelom (4.11 i 4.12), model hidrostatske zenitne komponente troposferskog kašnjenja dobiva oblik [15], [63], [67]:

$$d_a^z = \frac{0,0022768P_s}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00000028 H_s)} \quad (4.38)$$

4.1.8. Chaov model

Chaov model nehidrostatske zenitne komponente troposferskog kašnjenja temelji se na početnim pretpostavkama hidrostatske jednadžbe homogene atmosfere te adijabatskom aproksimacijom kretanja vodene pare (4.39) [10], [15], [85]:

$$e = K^{\beta} \rho_w^{\beta} \quad (4.39)$$

pri čemu je: β ...specifični toplinski omjer ($\sim 1,3$ za vodenu paru). Ovako određeni koeficijent znatno točnije određuje kretanje tlaka vodene pare nego početna pretpostavka primjene zakona hidrostatske ravnoteže idealnih plinova na vodenu paru.

Chaov model opisuje kretanje troposferskog kašnjenja uzrokovana zenitnom nehidrostatskom komponentom jednadžbom [10], [15]:

$$d_w^z = 4,7 \cdot 10^2 \frac{e_s^{1,23}}{T_s^2} + 1,71 \cdot 10^6 \frac{e_s^{1,46}}{T_s^3} \alpha \quad (4.40)$$

Premda se koeficijent α može odrediti temeljem lokalnih kretanja temperature promatrana položaja, stupanj točnosti Chaova modela neće se time značajnije unaprijediti.

4.1.9. Callahanov model

Model Callahana podrazumijeva linearnu stopu smanjivanja temperature te je kretanje parcijalnog tlaka vodene pare prikazano u funkciji visine [15]:

$$e = e_s \exp(-aH - bH^2) \quad (4.41)$$

pri čemu su koeficijent $a = 0,248 \text{ km}^{-1}$ i koeficijent $b = 0,048 \text{ km}^{-2}$ prikazani u nominalnim vrijednostima.

Skraćeni oblik Callahanova modela troposferskog kašnjenja uzrokovana nehidrostatskom zenitnom komponentom sa svojim nominalnim ulaznim parametrima ima oblik [15]:

$$d_w^z = \frac{1035e_s}{T_s^2} \quad (4.42)$$

4.1.10. Bermanov modeli

Početne pretpostavke razvoja više Bermanovih modela troposferskog kašnjenja uzrokovana nehidrostatskom zenitnom komponentom uključuju [15]: (i) refrakcija uzrokovana mokrom komponentom u području tropopauze (11 km visine) ima vrijednost 0, (ii) stopa je smanjivanja temperature (α) stalna, (iii) relativna je vlažnost stalna porastom visine te odgovara vrijednosti na površini.

Prvi model 'Berman 70' prikazan je oblikom [15], [85]:

$$d_w^z = \frac{0,373}{\alpha(B - AC)} \left(1 - \frac{C}{T_s}\right)^2 e_s \quad (4.43)$$

pri čemu su A, B i C ...higrometrijske konstante.

Parcijalni tlak na nivou prijavnika određen je izrazom [15]:

$$e_s = 0,061 U_s \exp\left(\frac{AT_s - B}{T_s - C}\right) \quad (4.44)$$

Utvrdivanje izražene povezanosti međusobnih odnosa zenitnog kašnjenja mokre i suhe komponente te njihovih indeksa atmosferske refrakcije prikazano je izrazom [15], [63], [85]:

$$\frac{d_w^z}{d_d^z} = K \left[\frac{N_w}{N_d} \right] \quad (4.45)$$

pri čemu je K ...empirijski određena konstanta.

Temeljem navedenog izraza, razvijeni su modeli troposferskog kašnjenja uzrokovana nehidrostatskom zenitnom komponentom 'Berman (D/N)' i 'Berman (TMOD)', koji su prikazani izrazom:

$$d_w^z = 10,946 K \left(\frac{e_s}{T_s}\right) \quad (4.46)$$

Vrijednosti koeficijenata K razlikuju se unutar navedenih modela i prikazani su u Tablici 4.5.

Tablica 4.5.: Tablica vrijednosti koeficijenta K za primjenu u modelu 'Berman (D/N)' te 'Berman (TMOD)'

	Berman (D/N)	Berman (TMOD)
K	0,2896 (dan) 0,3773 (noć)	0,3281

Izvor: [15]

Vrijednosti koeficijenta K u modelu 'Berman (D/N)' posebno su određene za periode dana i noći, što model čini značajno točnijim u odnosu na model 'Berman 74'. Određivanje koeficijenta K u modelu 'Berman (TMOD)' predstavlja pokušaj ujednačavanja dnevnih površinskih varijacija ulaznih meteoroloških parametara, dajući pritom rezultate usporedive s modelom 'Berman (D/N)' [15].

4.2. Navigacijski orijentirani modeli

Navigacijsko orijentirani modeli troposferskog kašnjenja nužno ne zahtijevaju meteorološke podatke s lokacija prijavnika, već se traženi podatci interpoliraju iz pratećih tablica srednjih vrijednosti te sezonskih varijacija ulaznih meteoroloških parametara. Pritom su promatrani ulazni podatci dan u godini (engl. *the Day of Year* – DoY) te zemljopisna širina prijavnika.

4.2.1. Troposferski model MOPS

U izostanku meteoroloških podataka, troposferski model MOPS (engl. *Minimum Operational Performance Standards* – MOPS) upotrebljava standardne vrijednosti meteoroloških podataka temeljenih na zemljopisnoj širini prijavnika uzimajući u obzir dan u godini, godišnja doba te sezonska kretanja meteoroloških parametara [59], [106]. Početni uvjeti koje je organizacija RTCA (engl. *Radio Transmission Commission for Aeronautics* – RTCA) usvojila za model MOPS određuju izračunavanje hidrostatske i nehidrostatske zenitne komponente kašnjenja pri površini Zemlje (m):

$$d_{ds}^z = 10^{-6} \frac{K_1 R_d p_s}{g_m} \quad (4.47)$$

$$d_{ws}^z = 10^{-6} \frac{K_3 R_d}{g_m(\lambda + 1) - \alpha R_d} \cdot \frac{e_s}{T_s} \quad (4.48)$$

pri čemu je: λ ...bezdimenzionalni koeficijent stope smanjivanja vodene pare, koeficijent $K_3 = 382000 \text{ K}^2 \text{ mbar}^{-1}$. Meteorološki parametri (T_s , e_s , p_s , λ i α) određuju se temeljem početnih standardnih meteoroloških podataka ovisno o zemljopisnoj širini prijavnika (Tablica 4.6.).

Tablica 4.6.: Tablica prosječnih standardnih vrijednosti meteoroloških parametara

Zemljopisna širina [φ]	T_o [K]	P_o [hPa]	e_o [hPa]	λ_o [/]	α_o [K/m]
$\leq 15^\circ$	299,65	1013,25	26,31	2,77	0,00630
30°	294,15	1017,25	21,79	3,15	0,00605
45°	283,15	1015,75	11,66	2,57	0,00558
60°	272,15	1011,75	6,78	1,81	0,00539
$\geq 75^\circ$	263,65	1013,00	4,11	1,55	0,00453

Izvor: [59]

Sezonske varijacije meteoroloških parametara, ovisno o promatranome danu u godini i zemljopisnoj širini prijavnika, određuju se izrazom [106]:

$$\xi(\varphi, DoY) = \xi_o(\varphi) - \Delta\xi(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(DoY - DoY_{min})}{365,25}\right) \quad (4.49)$$

pri čemu je: DoY ...promatrani dan u godini, DoY_{min} ...tzv. 'dan maksimalne zime' s vrijednošću 28 (za sjevernu hemisferu) i 211 za južnu hemisferu, ξ_o ...prosječna vrijednost meteorološkog parametra, $\Delta\xi$...sezonska varijacija vrijednosti meteorološkog parametra.

Prosječne i sezonske varijacije meteoroloških parametara određenih linearnom interpolacijom prikazane su izrazima [59]:

$$\xi_o(\varphi) = \xi_o(\varphi_i) + [\xi_o(\varphi_{i+1}) - \xi_o(\varphi_i)] \cdot \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi} \quad (4.50)$$

$$\Delta\xi(\varphi) = \Delta\xi(\varphi_i) + [\Delta\xi(\varphi_{i+1}) - \Delta\xi(\varphi_i)] \cdot \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi} \quad (4.51)$$

pri čemu su: φ_i i φ_{i+1} ... vrijednosti zemljopisne širine najbliže zemljopisnoj širini prijavnika potrebne za interpolaciju.

Ulazni podatci potrebni za interpolaciju prikazani su u Tablici 4.7.

Tablica 4.7.: Tablica prosječnih vrijednosti sezonskih varijacija meteoroloških parametara

Zemljopisna širina [φ]	ΔT [K]	ΔP [hPa]	Δe [hPa]	$\Delta \lambda$ [/]	$\Delta \beta$ [K/m]
$\leq 15^\circ$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000
30°	7,00	-3,75	8,85	0,33	0,0025
45°	11,00	-2,25	7,24	0,46	0,0032
60°	15,00	-1,75	5,36	0,74	0,0081
$\geq 75^\circ$	14,50	-0,50	3,39	0,30	0,0062

Izvor:[59]

Polazeći od početnih jednadžbā (4.47 i 4.48) uz određene vrijednosti meteoroloških parametara, troposfersko kašnjenje u zenitnom smjeru za hidrostatsku i nehidrostatsku komponentu za prijavnik na određenoj visini prikazan je izrazima:

$$d_d^z = \left(1 - \frac{\alpha H}{T}\right)^{\frac{g}{R\alpha}} \cdot d_{ds}^z \quad (4.52)$$

$$d_w^z = \left(1 - \frac{\alpha H}{T}\right)^{\frac{g(\lambda+1)}{R_d \alpha}} \cdot d_{ws}^z \quad (4.53)$$

pri čemu je H ...visina prijavnika iznad razine mora (m).

Za određivanje korisničkog položaja određena je funkcija mapiranja zenitnog kašnjenja za dolazni kut ε (4.68).

4.2.2. Niellov troposferski model

Niellov troposferski model (engl. *Niell (New) Mapping Functions*) – NMF) upotrebljava formu kontinuiranog razlomka za preslikavanje kašnjenja zenitnog smjera u bilo koji drugi kut nagiba putanje radionavigacijskog signala, pri čemu autor odvojeno preslikava hidrostatsku i nehidrostatsku komponentu [11], [20], [107]. Koeficijenti a , b i c ovise o kvocijentu ljestvice visine i radijusu Zemlje te se najtočnije vrijednosti modela funkcije mapiranja mogu ostvariti upotrebom vrijednosti koeficijenata iz standardnih modela atmosfere ili na osnovi podataka radiosondā [70]. Koeficijenti za Niellov model preuzeti su iz modela USSAS 66 [79] te se ostvaruje zadovoljavajuća točnost za kutove elevacije od 3° [15]. Ulazni podatci hidrostatskog dijela Niellova modela uključuju geografski položaj prijavnika (zemljopisna širina i visina) te dan u godini.

Matematički oblik Niellova troposferskog modela temelji se na Marinijevu modelu (funkcija kontinuiranog razlomka), pri čemu modelira odvojeno hidrostatsku i nehidrostatsku komponentu te se u nehidrostatskoj iteraciji funkcije ponavlja samo desni dio izraza [11], [20]:

$$m_\varepsilon = \frac{1 + \frac{a_i}{1 + \frac{b_i}{1 + c_i}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_i}{\sin \varepsilon + \frac{b_i}{\sin \varepsilon + c_i}}} + H \cdot 10^{-3} \left[\frac{1}{\sin \varepsilon} - \frac{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_{ht}}{\sin \varepsilon + \frac{b_{ht}}{\sin \varepsilon + c_{ht}}}} \right] \quad (4.54)$$

pri čemu su koeficijent a_i , b_i i c_i ...koeficijenti u funkciji dana u godini (DoY), zemljopisne širine te visine promatrana položaja. Računaju se izrazom (svi koeficijenti identično) upotrijebljenim za određivanje sezonskih varijacija meteoroloških parametara u modelu MOPS za određivanje sezonskih varijacija meteoroloških parametara (4.49).

Koeficijenti a_{ht} , b_{ht} i c_{ht} predstavljaju koeficijente za korekciju analitičke visine [11], [15]. Koeficijenti a_i , b_i i c_i interpoliraju se iz pripadajuće tablice (Tablica 4.8. i 4.9.).

Tablica 4.8.: Tablica koeficijenata hidrostatske funkcije Niellova modela

Koeficijent ξ	Zemljopisna širina [φ]				
	15°	30°	45°	60°	75°
Prosječne vrijednosti					
a	1,2769934e ⁻³	1,2683230e ⁻³	1,2465397e ⁻³	1,2196049e ⁻³	1,2045996e ⁻³
b	2,9153695e ⁻³	2,9152299e ⁻³	2,9288445e ⁻³	2,9022565e ⁻³	2,9024912e ⁻³
c	62,610505e ⁻³	62,837393e ⁻³	63,721774e ⁻³	63,824265e ⁻³	64,258455e ⁻³
Odstupanje					
a	0,0	1,2709626e ⁻⁵	2,6523662e ⁻⁵	3,4000452e ⁻⁵	4,1202191e ⁻⁵
b	0,0	2,1414979e ⁻⁵	3,0160779e ⁻⁵	7,2562722e ⁻⁵	11,723375e ⁻⁵
c	0,0	9,0128400e ⁻⁵	4,3497037e ⁻⁵	84,795348e ⁻⁵	170,37206e ⁻⁵
Koeficijenti korekcije visine					
a _{ht}	2,53e ⁻⁵				
b _{ht}	5,49e ⁻³				
c _{ht}	1,14e ⁻³				

Izvor: [15], [47], [59]

Tablica 4.9.: Tablica koeficijenata nehidrostatske komponente funkcije Niellova modela

Koeficijent ξ	Zemljopisna širina [φ]				
	15°	30°	45°	60°	75°
a	5,8021897e ⁻⁴	5,6794847e ⁻⁴	5,8118019e ⁻⁴	5,9727542e ⁻⁴	6,1641693e ⁻⁴
b	1,4275268e ⁻³	1,5138625e ⁻³	1,4572752e ⁻³	1,5007428e ⁻³	1,7599082e ⁻³
c	4,3472961e ⁻²	4,6729510e ⁻²	4,3908931e ⁻²	4,4626982e ⁻²	5,4736038e ⁻²

Izvor: [15], [47], [59]

Kod određivanja nehidrostatske komponente ulazni je podatak samo zemljopisna širina promatrana položaja zato što kretanje vodene pare ovisi isključivo o zemljopisnoj širini. Budući da vodena para nije u stanju hidrostatske ravnoteže, njezin vertikalni raspored ne može se predvidjeti s obzirom na visinu promatrana prijammnika. Premda se ulazni parametri za određivanje ulaznih koeficijenata temelje na podacima s radiosondā s lokacija sjeverne hemisfere (tablice 4.6 i 4.7), model se može smatrati globalnim ako se pretpostavi da su sjeverna i južna hemisfera vremenski nesimetrične [11], [15], [70].

4.2.3. Troposferski model PPP

Webbov i Zumbergeov model (jedan od dostupnih modela za određivanje korisničkog položaja PPP) ne zahtijeva površinske meteorološke podatke [14]. Model se temelji na Niellovu modelu te odvojeno modelira funkciju mapiranja hidrostatske i nehidrostatske komponente, prikazanu općim oblikom (3.69).

Troposfersko kašnjenje mokre komponente (Δd_w^z) smatra se slučajnim procesom (slučajni hod) (engl. *random walk process*) koji se obrađuje Kalmanovim filtriranjem (engl. *Kalman filter*) skupa s koordinatama korisničkog položaja te drugim parametrima. Proces Kalmanova filtriranja izvodi se na način da uzima u obzir početno stanje sustava, sustavnu dinamiku, dinamiku procesa ostvarivanja ulaznih mjernih podataka s greškama mjerenja te parametar sistemskog šuma [108], pri čemu se proces odvija u trima fazama. Početno prosječno odstupanje nehidrostatske zenitne komponente iznosi $\sigma_0^2 = 0,25 \text{ m}^2$ uz kretanje procesa greške $d\sigma^2/dt = 1 \text{ cm}^2/\text{h}$, [47] što pruža dostatnu točnost za većinu primjena. Ulazni je podatak i početni položaj prijarnika koji se također podvrgava Kalmanovu filtriranju. Tako značajno pojednostavljen pristup omogućava da se komponente hidrostatskog i nehidrostatskog zenitnog troposferskog kašnjenja uvelike pojednostave [14], [47]:

$$\begin{aligned} d_d^z &= \alpha e^{-\beta H_s} \\ d_w^z &= d_w^{z0} + \Delta d_w^z \end{aligned} \quad (4.55)$$

pri čemu je: $\alpha = 2,3 \text{ m}$, $\beta = 0,116 \cdot 10^{-3}$. Vrijednost d_w^z procjenjuje se na 0,1 m.

4.3. Modeli funkcije mapiranja troposferskog kašnjenja

U prijašnjim poglavljima opisana je mogućnost određivanja kašnjenja radiosignala u neutralnoj atmosferi ovisno o kutu elevacije, koja se temelji na pretpostavci da se troposfersko kašnjenje radiosignala pod bilo kojim drugim kutom može povezati sa zenitnim kašnjenjem odgovarajućom funkcijom mapiranja. Rezultat je razvoj jednostavnih modela funkcija mapiranja temeljenih na funkciji kosekant uz nužne početne aproksimacije [15]. Primjena funkcije mapiranja kašnjenja u zenitnom smjeru na putanju radionavigacijskog signala pod nekim drugim kutom (3.68) koristeći se funkcijom kosekant (3.67) ograničena je različitošću indeksa refrakcije te distribucijom temperature i vodene pare duž putanje. Stoga njezina primjena zadovoljava točnošću za kutove elevacije signala od 30° [59]. Opći oblik kašnjenja radionavigacijskog signala u neutralnoj atmosferi (3.61) za dolazni kut ima opći oblik:

$$dS_\varepsilon = \int_{\text{putanja}} n(s) ds - \int_{\text{vac}} ds \quad (4.56)$$

Sukladno Snellovu zakonu, ulazni kut ε ovisi o visini zbog mijenjanja atmosferske refrakcije. Budući da se smatra da učinak zakrivljenosti ne utječe značajnije (do 3 mm) pri kutovima iznad 20° , Saastamoinen [3] definira da:

$$\int_{putanja} ds \approx \int_{vac} ds \quad (4.57)$$

te istovremeno pruža i ispravak za geometrijski i približni zenitni kut smještaja antene prijarnika. Time opći izraz kašnjenja (4.56) integriranjem pruža opći oblik funkcije mapiranja za izračunavanje troposferskog kašnjenja duž putanje:

$$\begin{aligned} d_\varepsilon &= \int_{putanja} n(s)ds - \int_{vac} ds = \int_{putanja} [n(s) - 1]ds + \left[\int_{putanja} ds - \int_{vac} ds \right] \\ &= \int_{p_s}^{\infty} [n(s) - 1]ds + \Delta b = \int_{h_s}^{\infty} \frac{1}{\cos \varepsilon} \cdot [n(h) - 1]dh + \Delta b \end{aligned} \quad (4.58)$$

pri čemu je: Δb ...koeficijent povijanja radio signala, p_s ...tlak na površini (1013,25 mbar), h_s ...početna visina (0 m), ds ...diferencijski porast udaljenosti.

Navedeni izrazi vrijede ako se sferne površine stalne visine aproksimiraju kao ravne površine. Budući da točnost predloženog općeg oblika funkcije mapiranja pruža odgovarajuće ispravke za kutove elevacije ispod 30°, razvijen je niz kompleksnijih funkcija mapiranja.

Potreba za visokom preciznošću određivanja korisničkih parametara GNSS-a dovela je do razvoja novih modela funkcija mapiranja odvojenih od funkcije zenitnog kašnjenja. Budući da neadekvatne mogućnosti modeliranja nehidrostatskih uzroka troposferskog kašnjenja u zenitnom smjeru ograničavaju točnost funkcije mapiranja za ostale kutove elevacije signala, odvajanje funkcije mapiranja od zenitnog kašnjenja omogućilo je razvoj niza novih modela funkcija mapiranja. Takvi modeli mogu objedinjavati hidrostatske i nehidrostatske uzroke te se mogu kombinirati s modelima troposferskog kašnjenja u zenitnom smjeru tvoreći hibridne modele posebno odvojene po hidrostatskim i nehidrostatskim uzrocima. Općenito, iznosi troposferske greške kreću se 2 – 2,4 metra u zenitnom smjeru do 25 metara za horizontalne kutove elevacije [13], [109].

Uz navedeni pristup temeljen na funkciji kosekant na kojoj se temelji manji broj modela funkcija mapiranja, prisutne su još dvije osnovne grupe modela funkcija mapiranja [15]:

- grupa modela funkcija mapiranja temeljena na kvartičnim profilima (engl. *quartic profile*) koje je razvio Hopfield (1969.) i koja predstavlja osnovu niza funkcija mapiranja: Yionoulis (1970.), Moffet (1973.), Goad i Goodman (1974.), Black (1978.), Black i Eisner (1984.) i Santerre (1987.)

- druga grupa modela funkcijā mapiranja temeljena na skraćenom obliku kontinuiranog razlomka gdje spadaju modeli: Marini i Murray (1973.), Chao (1972.), Davis i sur. (1985.), Ifadis (1986.), Herring (1992.) i Niell (1996.).

Zajednička početna pretpostavka svih grupa modela funkcijā mapiranja početno je stanje hidrostatske ravnoteže atmosferskih plinova te azimutna simetrija neutralne atmosfere [15]. Pritom se ne uzima u obzir azimut dolaznog signala [110] premda je poznato da postoji horizontalna nejednakost atmosferske refrakcije zbog neheterogene raspodjele vodene pare [111].

4.3.1. Saastamoinenov model funkcije mapiranja

Pri navedenim početnim pretpostavkama te uz zanemarivanje koeficijenta povijanja signala, troposfersko kašnjenje Saastamoinenova modela funkcije mapiranja ima oblik [2], [3], [15]:

$$d_{trop} = 10^{-6} \int_{r_s}^{r_a} \frac{N}{\sin \theta} dr \quad (4.59)$$

Izraz $(\sin \theta)^{-1}$ raspisuje se u binomni niz, pri čemu se obavlja integriranje svakog člana. Uz standardne meteorološke parametre uvode se dodatni parametri visine tropopauze, temperaturne i specifične stope opadanja vodene pare. U nedostatku izmjenjenih meteoroloških parametara oni se interpoliraju iz postojećih tablica. Tako određene vrijednosti troposferskog kašnjenja ostvaruju zadovoljavajuću točnost za kutove elevacije iznad 10°.

Tri su oblika funkcije mapiranja sadržane u Saastamoinenovu modelu troposferskog kašnjenja (4.6): (i) prvi oblik $1/\cos z$ funkcija je mapiranja koja zadovoljava aproksimaciju ravne površine, (ii) drugi je oblik $\tan^2 z$, (iii) treći oblik predstavlja vrijednost interpoliranu iz pratećih tablica.

4.3.2. Hopfieldov model funkcije mapiranja

Početne pretpostavke Hopfieldove funkcije mapiranja uključuju hidrostatsku ravnotežu, azimutnu simetriju te stalnu stopu smanjenja temperature od $\sim 6,8 \text{ K km}^{-1}$, uz zanemarivanje povijanja putanje radiosignala [4], [5], [15], [63]. Tako određeno ukupno kašnjenje prikazano je izrazom:

$$d_{tro}^i = \frac{10^{-6} N_{si}}{(h_{tro_i})^4} \int_{-h_{tro_i}}^0 \frac{(r_{tro_i} + x)x^4}{\sqrt{(r_{tro_i} + x)^2 - (r_s \cos \varepsilon)^2}} dx \quad (4.60)$$

pri čemu je: d_{tro}^i ...ukupno troposfersko kašnjenje, r_{tro_i} ...geocentrični radijus točke gdje vrijednost refrakcije neutralne atmosfere N_i postaje zanemariva, r_s ...geocentrični radijus lokacije prijavnika. Pomoćne varijable jesu:

$$h_{tro_i} = r_{tro_i} - r_s = H_i^e - H_s \quad (4.61)$$

$$x = H - H_i^e \quad (4.62)$$

pri čemu je: H ...visina iznad razine mora (km), H_s ...visina lokacije prijavnika (km), H_i^e ...efektivna visina pojedine komponente i ($i = 1, 2$ odnosno hidrostatska i nehidrostatska komponenta).

Budući da je vrijednost kuta elevacije $\varepsilon = 90^\circ$, iz izraza (4.60) slijedi jednadžba ekvivalentna jednadžbi (4.16):

$$d_i^z = 10^{-6} \cdot N_{si} \frac{H_i^e}{5} \quad (4.63)$$

Ukupno troposfersko kašnjenje izraženo hidrostatskom ili nehidrostatskom funkcijom mapiranja može se prikazati kao umnožak kašnjenja u zenitnom smjeru i funkcije mapiranja:

$$m_i(\varepsilon) = d_i^z \left[\frac{5}{H_i^e} \int_{-h_{tro_i}}^0 \frac{(r_{tro_i} + x)x^4}{\sqrt{(r_{tro_i} + x)^2 - (r_s \cos \varepsilon)^2}} dx \right] \quad (4.64)$$

4.3.3. Ifadisov model funkcije mapiranja

Osnova za razvoj Ifadisova modela funkcije mapiranja trogodišnje je promatranje globalnih meteoroloških podataka radiosondā s ciljem stvaranja odgovarajućih i sveobuhvatnih atmosferskih profila [32]. Rezultat je globalno primjenjiv troposferski model sa zadovoljavajućom točnošću za kutove elevacije od 2° . Model je prikazan izrazom [6], [32], [59], [112]:

$$m_i(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a_i}{1 + \frac{b_i}{1 + c_i}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_i}{\sin \varepsilon + \frac{b_i}{\sin \varepsilon + c_i}}} \quad (4.65)$$

Koeficijenti a i b linearno su korelirani s površinskom temperaturom, tlakom i parcijalnim tlakom vodene pare, a koeficijent c brojčana je konstanta.

Navedeni hidrostatski parametri modela ($i = 1$) određeni su sljedećim jednadžbama [15], [32], [70]:

$$\begin{aligned} a &= 0,0011237 + 0,1316 \cdot 10^{-6}(P_s - 1000) + 0,8057 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{e_s} + 0,1378 \cdot \\ &\quad 10^{-5}(T_s - 15) \\ b &= 0,003333 + 0,1946 \cdot 10^{-6}(P_s - 1000) + 0,1747 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{e_s} + 0,1040 \cdot \\ &\quad 10^{-6}(T_s - 15) \\ c &= 0,078 \end{aligned} \quad (4.66)$$

Nehidrostatski parametri modela ($i = 2$) određeni se jednadžbama:

$$\begin{aligned} a &= 0,0005236 + 0,2471 \cdot 10^{-6}(P_s - 1000) + 0,1328 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{e_s} - 0,1724 \\ &\quad \cdot 10^{-6}(T_s - 15) \\ b &= 0,001705 + 0,7384 \cdot 10^{-6}(P_s - 1000) + 0,2147 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{e_s} + 0,3767 \\ &\quad \cdot 10^{-6}(T_s - 15) \\ c &= 0,05917 \end{aligned} \quad (4.67)$$

4.3.4. Model funkcije mapiranja MOPS

Funkcija mapiranja modela MOPS za dolazni kut elevacije ε temelji se na zenitnom kašnjenju i ima oblik:

$$m(\varepsilon) = \frac{1,001}{\sqrt{0,002001 + \sin^2 \varepsilon}} \quad (4.68)$$

Funkcija mapiranja modela MOPS primjenjiva je za kutove elevacije iznad 4° [59].

4.3.5. Model funkcije mapiranja Babyja i sur.

Polazeći od Snellova zakona loma, Baby i sur. razvijaju ulazni parametar $(\sin \theta)^{-1}$ te daju zajednički izraz hidrostatske i nehidrostatske komponente funkcije modela mapiranja [8]:

$$m(\theta) = \frac{1}{\sin \theta \sqrt{(1 + \varepsilon_H \cot^2 \theta)}} \quad (4.69)$$

pri čemu je: ε_H ...vrijednost koja ovisi o indeksu loma i geocentričnoj udaljenosti promatrana položaja, θ ...vrijednost kuta loma u odnosu na zenit.

Za kutove ispod 45° uvedene su prateće korekcije te je model prikladan za određivanje ukupna troposferskog kašnjenja za kutove elevacije od 10° [15].

4.3.6. Model funkcije mapiranja Daviesa i sur.

Model Daviesa i sur. uključuje hidrostatsku komponentu troposferskog kašnjenja te se temelji na funkciji kontinuiranog razlomka s tangensom [67] na način već primijenjen u Chaovu modelu [10]. Autori navode da se funkcijom tangensa putanja ne opisuje onoliko točno kako je opisuje funkcija sinus, što rezultira greškom $1 - 2$ mm za kutove elevacije od $20^\circ - 60^\circ$. Ulazni koeficijenti izvedeni su temeljem podataka radiosondā u idealnom modelu atmosfere za kutove elevacije od 5° .

Matematički oblik modela prikazan je izrazom:

$$m_i(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\tan \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}}} \quad (4.70)$$

Koeficijenti a i b linearno su korelirani s površinskim parametrima temperature, tlaka zraka, parcijalnim tlakom vodene pare, stopom opadanja temperature i visinom tropopauze. Pritom su koeficijenti a , b i c određeni izrazima:

$$\begin{aligned} a = & 0,001185\{1 + 0,6071 \cdot 10^{-4}(P_s - 1000) - 0,1471 \cdot 10^{-3}e_s + 0,3072 \\ & \cdot 10^{-2}(T_s - 20) + 0,01965(6,5 - \alpha) - 5,645 \\ & \cdot 10^{-6}(H_t - 11231)\} \end{aligned} \quad (4.71)$$

$$b = 0,001144\{1 + 0,1164 \cdot 10^{-4}(P_s - 1000) + 0,2795 \cdot 10^{-3}e_s + 0,3109 \\ \cdot 10^{-2}(T_s - 20) + 0,03038(6,5 - \alpha) - 1,217 \\ \cdot 10^{-5}(H_t - 11231)\}$$

$$c = -0,0090$$

pri čemu je H_t ...visina tropopauze (m).

Premda izvorno razvijen za hidrostatsku komponentu, model se može primijeniti i za nehidrostatsku komponentu troposferskog kašnjenja ($i=1,2$).

4.3.7. Chaov model funkcije mapiranja

Chaov model temelji se na dokazanoj Marinijevoj pretpostavci [18] da se atmosfersko kašnjenje može iskazati preko kuta elevacije dolaznog signala pomoću matematičkog oblika kontinuiranog razlomka i funkcije sinusa kuta elevacije. U Chaovu modelu funkcije mapiranja kontinuirani razlomak skraćuje se do drugog reda u kojem se funkcija sinus zamjenjuje funkcijom tangens. Dodatno, ulazni koeficijenti a i b izvedeni su temeljem analize i usklađivanja prikupljenih podataka [10] te su prikazani kao brojčane konstante.

Model odvojeno prikazuje hidrostatsku i nehidrostatsku komponentu troposferskog kašnjenja. Hidrostatska komponenta modela ima oblik:

$$m_d(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0,00143}{\tan \varepsilon + 0,0445}} \quad (4.72)$$

Nehidrostatska komponenta modela ima oblik:

$$m_w(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0,00035}{\tan \varepsilon + 0,017}} \quad (4.73)$$

Uvođenjem funkcije tangensa osigurava se da ukupna vrijednost funkcije mapiranja bude jedan za zenitnu elevaciju signala.

4.3.8. Blackov model

Blackov model temelji se na Hopfieldovim kvartičnim atmosferskim profilima te usvaja i uvedeni Hopfieldov visinski ekvivalent hidrostatskog dijela atmosfere (H_i^e). Jednostavniji oblik modela predstavljen je u obliku [16]:

$$m_i(\varepsilon) = \left[1 - \left[\frac{\cos \varepsilon}{1 + (1 - l_c) \left[\frac{H_i^e}{r_s} \right]} \right]^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.74)$$

pri čemu je $l_c = 0,85$ i predstavlja slabu funkciju (engl. *weak function*) površinske temperature i kuta elevacije. Blackov model primjenjuje se za hidrostatsku i nehidrostatsku komponentu te pruža zadovoljavajuću točnost za kutove elevacije iznad 5° .

4.3.9. Blackov i Eisnerov model

Blackov i Eisnerov model ima oblik funkcije mapiranja koja opisuje ukupno troposfersko kašnjenje te predstavlja daljnje unaprjeđenje izvornog Blackova modela [17]. U jednostavnom geometrijskom obliku s jednim ulaznim parametrom, model je prikazan izrazom [15], [17]:

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\cos \varepsilon}{1 + 0,001} \right)^2}} \quad (4.75)$$

Model zadovoljava točnošću za kutove elevacije iznad 7° .

4.3.10. Marinijev model

Marini (1972.) prvi počinje matematički korelirati zenitni kut i atmosfersko kašnjenje pomoću kontinuiranih razlomaka upotrebljavajući funkciju sinus [18]:

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + \frac{c}{\sin \varepsilon + \dots}}}} \quad (4.76)$$

pri čemu je: a, b, c, \dots konstante ili linearne funkcije ovisne o površinskim meteorološkim parametrima tlaka, temperature, stope smanjivanja (α, β) i visine. Početna pretpostavka uključuje simetrično sferični oblik troposfere, pri čemu atmosferski profil ne bi trebao značajnije odstupati od standardnih profila. Prednost funkcija u obliku kontinuiranih razlomaka u odnosu na modele temeljene na funkciji kosekant s nužnim početnim aproksimacijama (npr. Saastamoinen) u tome je što su primjenjive za skoro bilo koji zenitni kut [59].

4.3.11. Moffetov model

Moffetov model odvojeno preslikava hidrostatsku i nehidrostatsku komponentu troposferskog kašnjenja, pri čemu je ulazni podatak samo kut elevacije [113]:

$$m_d(\varepsilon) = \frac{1}{\sin(\varepsilon^2 + 6,25^\circ)} \quad (4.77)$$

$$m_w(\varepsilon) = \frac{1}{\sin(\varepsilon^2 + 2,25^\circ)} \quad (4.78)$$

Model se temelji na pojednostavljenom Hopfieldovu modelu funkcije mapiranja te je široko zastupljen zahvaljujući svojoj jednostavnosti [15].

4.3.12. Marinijev i Murrayev model

Marinijev i Murrayev model temelji se na Marinijevu modelu s unaprijedenim ulaznim parametrima temeljenim na rezultatima eksperimenta laserskog mjerenja satelitske udaljenosti i istovremenih meteoroloških mjerenja [19]. Izraz za određivanje greške satelitske udaljenosti prikazan je u formi kontinuiranog razlomka:

$$\Delta R = \frac{f(\lambda)}{f(\varphi, H)} \cdot \frac{a + b}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\frac{(a+b)}{\sin \varepsilon + 0,01}}} \quad (4.79)$$

pri čemu je: ΔR ...odstupanje satelitske udaljenosti (m), $f(\lambda)$...parametar frekvencije i valne duljine (3.42), H ...visina iznad razine mora (km), φ ...zemljopisna širina.

Zajednički parametar $f(\varphi, H)$ prikazan je izrazom [19], [114]:

$$f(\varphi, H) = 1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00031H \quad (4.80)$$

Za upotrijebljeni laser te položaj smješten na zemljopisnoj širini od 45° i na razini mora, $f(\varphi, H) = 1$. Koeficijenti a, b i k prikazani su izrazima:

$$a = 0,002357P_s + 0,000141e_s$$
$$b = (1,084 \cdot 10^{-8})P_s T_s K + (4,734 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{P_s^2}{T_s} \cdot \frac{2}{(3 - \frac{1}{k})} \quad (4.81)$$

$$k = 1,163 - 0,00968 \cos 2\varphi - 0,00104T_s + 0,00001435P_s$$

Za valnu duljinu lasera korištena u ispitivanju (na osnovi rubina) $f(\lambda) = 1$, a za signal se drugih valnih duljina parametar određuje izrazom (3.42). Marinijev i Murrayev model zadovoljava točnošću za signale iznad 10° kuta elevacije.

4.3.13. Herringov model

Herringov model funkcije mapiranja (poznat i kao *Mapping Temperature Test – MTT*) [15] temelji se na podacima ravin-sondā (engl. *rawinsonde*) na području SAD-a te sadržava obje komponente troposferskog kašnjenja. Model je dan izrazom [115]:

$$m_i(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a_i}{1 + \frac{b_i}{1 + c_i}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_i}{\sin \varepsilon + \frac{b_i}{\sin \varepsilon + c_i}}} \quad (4.82)$$

Hidrostatski koeficijenti prikazani su izrazima:

$$\begin{aligned} a &= [1,232 + 0,0139 \cos \varphi - 0,0000209H_s + 0,00215(t_s - 10)] \cdot 10^{-3} \\ b &= [3,1612 + 0,16 \cos \varphi - 0,0000331H_s + 0,00206(t_s - 10)] \cdot 10^{-3} \\ c &= [71,244 + 4,293 \cos \varphi - 0,000149H_s - 0,0021(t_s - 10)] \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (4.83)$$

Nehidrostatski koeficijenti prikazani su izrazima:

$$\begin{aligned} a &= [0,583 - 0,011 \cos \varphi - 0,000052H_s + 0,0014(t_s - 10)] \cdot 10^{-3} \\ b &= [1,402 - 0,102 \cos \varphi - 0,000101H_s + 0,002(t_s - 10)] \cdot 10^{-3} \\ c &= [45,85 - 1,91 \cos \varphi - 0,00129H_s + 0,015(t_s - 10)] \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (4.84)$$

Ulazni koeficijenti ovise o parametru tlaka, temperature, zemljopisne širine i visine promatrana položaja. Primjenjivi su na promatrane mjerne položaje u visinskom pojasu 0 – 1600 metara te u pojasu zemljopisnih širina 27° - 65° [115]

4.3.14. Model Vienna

Model funkcije mapiranja Vienna (VMF) temelji se na Niellovu modelu od kojeg preuzima ulazne koeficijente uz prilagodbu [116]:

$$m_i(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}} \quad (4.85)$$

Koeficijenti a, b i c temelje se na atmosferskim modelima razvijenim na obradi prikupljenih višegodišnjih podataka radio sonde. Ulazni podatci modela Vienna uz kut elevacije uključuju geografsku širinu i visinu promatrana položaja te koeficijente b i c koji se odvojeno računaju za hidrostatsku i nehidrostatsku komponentu. Koeficijent a može se odrediti jednostavnim invertiranjem oblika kontinuiranog razlomka.

Koeficijenti c i b hidrostatske komponente računaju se izrazima [24], [116]:

$$\begin{aligned} b_d &= 0,002905 \\ c_d &= 0,0634 + 0,0014 \cos 2\varphi \end{aligned} \quad (4.86)$$

Koeficijenti nehidrostatske komponente b_w i c_w istovjetni su Niellovoj nehidrostatskoj komponenti funkcije mapiranja (ovdje prikazani za $\varphi = 45^\circ$)

$$\begin{aligned} b_w &= 0,00146 \\ c_w &= 0,04391 \end{aligned} \quad (4.87)$$

Model Vienna omogućava adekvatnu točnost za kutove elevacije iznad 3° te ima globalnu primjenu sa rezolucijom od 2° zemljopisne širine i $2,5^\circ$ zemljopisne dužine [27].

4.4. Funkcije mapiranja – značaj i primjena

Premda se dugo vremena greška neutralne atmosfere (ionosferska i troposferska) smatrala smetnjom u ostvarivanju što točnijeg korisničkog položaja i pripadajućih parametara kretanja, mogućnost da se veličina greške izolira i modelira rezultirala je upotrebom GNSS-ova radionavigacijskog signala u području atmosferskih istraživanja. Cilj je navedenih istraživanja ostvarivanje preciznijih mjerenja vrijednosti TEC (u području ionosfere) te meteoroloških parametara temperature, tlaka i oborive vode. Stoga su ovdje prikazane osnovne tendencije dostupnih istraživanja troposferskog kašnjenja te pristupi u određivanju i upotrebi troposferske greške. Glavna područja razvoja troposferskih modela odnose se na primjenu GNSS-ova radionavigacijskog signala (prvenstveno sustava GPS uz prateće usluge IGS (engl. *International GPS Service – IGS*)) u području pozicioniranja svemirskih objekata visokih orbita

[117], meteorologiju temeljenu na površinskim opažanjima GNSS-a. Dodatnu primjenu nalaze u području geodinamičkih istraživanja Zemljine jezgre [25], [118] te u području dugobazične interferometrije [21]. Zajedničko svim navedenim područjima je, osim upotrebe GNSS-ova radionavigacijskog signala za određivanje troposferskog kašnjenja, istovremena upotreba i podataka dobivenih radiosondama i/ili laserski određenim udaljenostima. Radiosonde predstavljaju stanice podignute na tražene visine meteorološkim balonima te opremljene instrumentima za bilježenje meteoroloških podataka. Dobiveni se meteorološki podatci radiosignalima šalju u prijamne postaje, pri čemu se visine radiosondā (prema podacima u dostupnim istraživanjima) kreću od 2 do 2200 metara [15]. U značajnoj su mjeri radiosonde smještene na području sjeverne hemisfere. Budući da su položaji radiosondā unaprijed višestruko praćeni i određivani sredstvima GNSS-a ili radio odnosno laserskim signalima, međusobni položaji radiosondā te prijammnika izuzetno su točno poznati (s milimetarskom preciznošću). Pritom signali radiosondā služe za analizu i određivanje zenitnog kašnjenja radiosignala i analizu postojećih modela.

Najzastupljenija dostupna istraživanja obuhvaćaju istraživanja primjenjivosti i/ili unaprjeđenja postojećih modela troposferskog kašnjenja za određeno područje određivanjem pojedine komponente troposferskog kašnjenja, prvenstveno funkcije mapiranja. Budući da su uzroci hidrostatske komponente zenitnog kašnjenja u stanju hidrostatske ravnoteže, ona se relativno jednostavno i precizno određuje, pri čemu se ističe Saastamoinenov model. Komplement je hidrostatskoj komponenti nehidrostatska komponenta zenitnog kašnjenja čiji su uzroci stalni dipolni moment oborive vode i oborine. Zajedno dovode do ukupnog zenitnog kašnjenja s opće prihvaćenim iznosom 2,2 – 2,4 metra u ukupnoj greški položaja. Analize ZTD kašnjenja pojedinih modela [104], [119]–[122] u pravilu obuhvaćaju nehidrostatsku zenitnu komponentu koja ovisi prvenstveno o vremensko-prostornoj raspodjeli vodene pare, pri čemu je opet najvažnija visinska raspodjela vodene pare. Osim nehidrostatske zenitne komponente, prisutne su mnoge analize funkcija mapiranja, ulaznih koeficijenata i njihove točnosti na promatranome području [26]–[29], [31], [39].

Druga skupina istraživanja odnosi se na određivanje prostornih varijacija kretanja vodene pare u troposferi. Svrha takvih istraživanja može biti razvoj ili unaprjeđenje postojećih standardnih modela atmosfere iz kojih se preuzimaju vrijednosti meteoroloških parametara i koeficijenata za pojedini model [13], [123]–[125]. Također, mogu biti i dio meteoroloških istraživanja sa svrhom razvoja prognostičkih modela i obuhvatnijeg uvida u dinamiku

troposfere, prvenstveno u parametar oborive vode. Neovisno o namjeni istraživanja, prikazuje se točnost i podobnost pojedinih troposferskih modela (najčešće nehidrostatske komponente).

Treće područje primjene troposferskih modela jesu svemirsko-geodetske tehnike (engl. *Space-geodetic techniques*) VLBI, GPS i DORIS (engl. *Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite* – DORIS) s primjenom radioteleskopa i uz upotrebu uređaja WVR [21], [118]. Budući da svi sustavi upotrebljavaju mikrovalne frekvencije, moguće je primijeniti i analizirati pojedine troposferske modele. Premda se ostvareni podatci temelje na različitim sustavima s različitim lokacija i vremenskih perioda promatranja, analiza dobivenih rezultata troposferskog zenitnog kašnjenja [21] nedvojbeno pokazuje da su najveće razlike između promatranih troposferskih modela prisutne u rezultatima visinske komponente. Razlog leži u činjenici da visinsko odstupanje položaja od 10 metara (bilo kao razlika dvaju mjernih položaja ili kao mjerno odstupanje jednog položaja) odgovara troposferskom kašnjenju od 3 mm, što je prikazano početnim izrazima (3.65) i (3.66) koji sadržavaju i vrijednost indeksa atmosferske refrakcije N . Time se mogu povezati rezultati navedenih analiza koji opisuju vrijednost (najčešće) zenitnog nehidrostatskog kašnjenja funkcije mapiranja (u pravilu izražene u rasponu od jedan do nekoliko desetaka mm), s ostvarenim podacima utjecaja atmosferskih sastojaka na kašnjenje putanje GPS-ova radionavigacijskog signala (Tablica 3.3.). Drugi slični prikazani podatci uključuju iznose troposferskog kašnjenja GPS-ova radionavigacijskog signala po modificiranom Hopfieldovu modelu (Slika 4.2.) te podatci prosječnih vrijednosti troposferske komponente greške pseudoudaljenosti u sustavu GLONASS (Tablica 2.2.).

5. METODOLOŠKE ODREDNICE ISTRAŽIVANJA

Tijekom uvodnih istraživanja GNSS-ove troposferske greške sukladno prethodno određenoj svrsi istraživanja selektirani su dostupni izvori podataka i programska rješenja, pri čemu su definirani optimalni uvjeti za ostvarenje zadanih ciljeva. Ipak, većina dostupnih analiza pokazuje da ako se namjerava provesti analiza zenitnog kašnjenja, potrebno je ostvariti određene preduvjete:

- meteorološki podatci trebaju biti dobiveni od meteoroloških radiosondā, iz formata zapisa RINEX (engl. *Receiver Independent Exchange* – RINEX) promatranog položaja ili uvršteni iz pojedinog meteorološkog profila; u izostanku navedenih podataka uzimaju se podatci iz standardnog atmosferskog modela

- potrebni su podatci o točnim satelitskim orbitama, pri čemu postoji mogućnost upotrebe predviđenih orbita (engl. *predicted orbits*) s podacima unaprijed za 24 i 48 sati (točnosti 0,5 m); drugi izvor jesu IGS-ovi podatci tzv. brzih orbita (engl. *rapid orbits*) s točnošću 10 – 20 cm koji su dostupni nakon dva dana te završnih podataka orbita (engl. *final orbits*) koji su najtočniji (do 10 cm), ali su dostupni nakon dva tjedna; odaslani podatci sadržani u navigacijskoj poruci imaju točnost 1 – 5 metara te time nisu pogodni za analiziranje troposferskih modela, stoga se u pravilu upotrebljavaju dostupni IGS-ovi podatci [59]
- dvofrekvencijski GNSS-ov prijamnik potreban je zbog redukcije ionosferske greške
- nužne su IGS-ove korekcije podataka satelitskih satova
- ako se upotrebljava GNSS-ov signal radi preciznijih mjerenja, poželjan je dodatni radiosignal za usporedbu vrijednosti troposferskog kašnjenja.

Razvoj predloženog modela zasniva se na kombiniranim GLONASS-ovim položajnim zapisima i meteorološkim podacima s mjernih lokacija srednjih geografskih širina. Uvažavajući prisutna ograničenja dostupnih izvora te mogućnosti obrade podataka, istraživanje je provedeno temeljem poznate ideje određivanja troposferske greške mjerenjem pseudoudaljenosti [6]. Sukladno tomu, u ovom je poglavlju prikazan tijek obrade podataka do validacije predloženog modela. Navedene su osnovne osobine izvora položajnih podataka iskorištenih za izradu, validaciju i verifikaciju predloženog modela, izvori i priprema meteoroloških podataka te vremenski parametri izrade i verifikacije predloženog modela. Dodatno, opisana je matematička izrada modela s pratećim deskriptivnim statističkim pokazateljima.

5.1. Geografske značajke promatrana područja istraživanja

U skladu s utvrđenim ciljevima istraživanje je provedeno podacima ostvarenim na području Republike Hrvatske. Promatrani podatci omeđuju područje od 42,60° do 46,38° sjeverne zemljopisne širine te od 15,22° do 18,11° istočne zemljopisne dužine, uz visinski raspon od 64,3 do 457,9 metara nadmorske visine. Klimatološki se profili promatranih lokacija razlikuju [126]. Prema Köppenovoj klasifikaciji klime (engl. *Köppen climate classification*), određenoj prema srednjem godišnjem hodu temperature zraka i količine oborine, Čakovec je klasificiran oznakom *Cb* (umjereno topla kišna klima sa srednjom mjesečnom temperaturom najhladnijeg mjeseca između -3° C i 18° C). Pritom najtopliji mjesec u godini ima srednju

temperaturu nižu od 22° C [127]. Uz navedene karakteristike temperature, tijekom godine ne javljaju se naročito suhi mjeseci te je mjesec s najmanjom količinom oborina unutar hladnog dijela godine. Prema Thornthwaiteovoj klasifikaciji klime, (engl. *Thornthwaite climate classification*), temeljenoj na odnosu količine vode potrebne za potencijalnu evapotranspiraciju (engl. *evapotranspiration*) te izraženu koeficijentom vlažnosti $I_{P/E}$, Čakovec ima humidalnu (vlažnu) klimu. Zadar i Dubrovnik spadaju u područja s umjerenom klimom s dugim i vrućim ljetom (*Ca* oznaka prema Köppenovoj klasifikaciji klime), pri čemu Zadar, s obzirom na koeficijent vlažnosti $I_{P/E}$, spada u područja subhumidalne (poluvlažne) klime [128]. Dubrovnik zbog izraženijih oborina ima humidalnu klimu [127].

Količina vodene pare i oborine čine najvažnije ulazne meteorološke parametre u određivanju nehidrostatske zenitne komponente GNSS-ova položaja. Budući da navedene mjerne lokacije nemaju međusobno značajnije izraženih razlika u koeficijentima vlažnosti, one predstavljaju adekvatan izbor za izradu predloženog modela primjenjivog na širim geografskim područjima sličnih klimatskih profila.

5.2. Izbor mjernih postaja GNSS-a

Istraživanje je provedeno temeljem podataka s lokacija opremljenih GNSS-ovim postajama uz istovremenu dostupnost predviđenih meteoroloških parametara adekvatne vremenske rezolucije. Stoga su izabrane EUREF-ove mjerne postaje u Čakovcu, Zadru i Dubrovniku, čiji su osnovni podatci prikazani u Tablici 5.1.

Tablica 5.1.: Opći podatci korištenih EUREF-ovih mjernih postaja

Oznaka postaje	Lokacija	Geografska širina φ (° N)	Geografska dužina λ (° E)	Nadmorska visina h (m)	ECEF koordinate (m)		
					x	y	z
CAKO00 HRV	Čakovec	46.3871	16.4391	222.1	4227250.7	1247280.6	4595193.3
DUB200 HRV	Dubrovnik	42.6502	18.1103	457.9	4465932.8	1460581.6	4299308.5
ZADA00 HRV	Zadar	44.1132	15.2276	64.3	4425737.1	1204734.5	4417173.4

Izvor: [129]

Šire geografsko područje mjernih postaja prikazano je na Slici 5.1.



Slika 5.1.: Širi geografski smještaj izabranih mjernih GNSS-ovih postaja

Međusobne udaljenosti mjernih postaja (zračnom linijom) iznose: Čakovec – Zadar 270 km, Zadar – Dubrovnik 283 km te Čakovec – Dubrovnik 436 km.

5.3. Izbor meteoroloških podataka

Skup ulaznih meteoroloških podataka određen je sukladno opisanoj povezanosti širenja radiosignala kroz neutralnu atmosferu s dinamičkim procesima troposfere te ustanovljenim hidrostatskim i nehidrostatskim uzrocima troposferskog kašnjenja. Ulazne nezavisne varijable za izradu predviđena modela jesu: tlak P (hPa), temperatura T ($^{\circ}C$), oboriva voda PWV (mm), oborine P_r (mm) te relativna vlaga R_h (postotci). Budući da odabrane GNSS-ove postaje nisu opremljene mjernim meteorološkim uređajima te s obzirom na format dostupnih navigacijsko-opservacijskih zapisa (RINEX 2), nužno je bilo pažljivo odabrati izvor meteoroloških podataka. Oni se mogu interpolirati iz postojećih vremenskih standardnih modela, što je prihvatljivo prilikom analize postojećih troposferskih modela, ali je nesvrishodno u razvoju novog, tj. predloženog unaprijeđenog modela lokalnog karaktera. Stoga su upotrijebljeni meteorološki podatci Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske (DHMZ) [127]. Točnost ulaznih meteoroloških parametara ključna je za definiranje troposferskog kašnjenja, pri čemu je površinski tlak zraka najvažniji hidrostatski parametar uzevši u obzir da varijacija tlaka 0,5 – 1 hPa dovodi do otprilike 1,5 – 3 mm zenitnog troposferskog kašnjenja [13]. Površinska temperatura općenito je manje značajan ulazni parametar i najčešće se opisuje u kontekstu transformacije nehidrostatskog troposferskog zenitnog kašnjenja u količinu oborive vode. Ipak,

njezino prostorno-vremensko poznavanje upotpunjuje razdiobu kretanja ostalih ulaznih parametara funkcije mapiranja. Navedeno se na isti način odnosi i na podatke o relativnoj vlazi i količini oborina koji su značajni za nehidrostatsku komponentu zenitnog kašnjenja (u manjoj mjeri) te osobito značajni za funkciju mapiranja kada se ne mogu jednostavno linearno interpolirati (za razliku od određivanja u vertikalnom smjeru) [59].

5.4. Razdoblje istraživanja

Vremensko razdoblje istraživanja određeno je sukladno postavljenim ciljevima istraživanja te dostupnim GNSS-ovim i meteorološkim podacima. Podloga za izradu modela jesu GLONASS-ovi podatci iz 2019. godine za postaje u Čakovcu, Zadru i Dubrovniku te meteorološka mjerenja za navedena razdoblja i lokacije. Navedeni vremensko-prostorni okvir iskorišten je i za validaciju predloženog modela. Za provjeru uspješnosti modela upotrijebljeni su GLONASS-ovi položajni te meteorološki podatci s istih lokacija iz 2014. i 2015. godine, zato što i provjera uspješnosti predloženog modela zahtijeva vremensko-prostorno usklađenost meteoroloških i GNSS-ovih podataka.

5.5. Programska obrada EUREF-ovih GNSS-ovih i meteoroloških podataka

Provedeno istraživanje temelji se na određivanju položaja mjerenjem pseudoudaljenosti koje se u jednostavnijem obliku može definirati razlikom vremena prijama signala određena njegovim satom i vremenom (određena satelitskim satom), što je prikazano sljedećim izrazom [47], [130]:

$$P_{r,i}^S = c(\bar{t}_r - \bar{t}^S) \quad (5.1)$$

pri čemu je: $P_{r,i}^S$...pseudoudaljenost i-tog satelita, \bar{t}_r ...vrijeme prijama signala određeno satom prijarnika (s), \bar{t}^S ...vrijeme emitiranja signala određeno satelitskim satom (s).

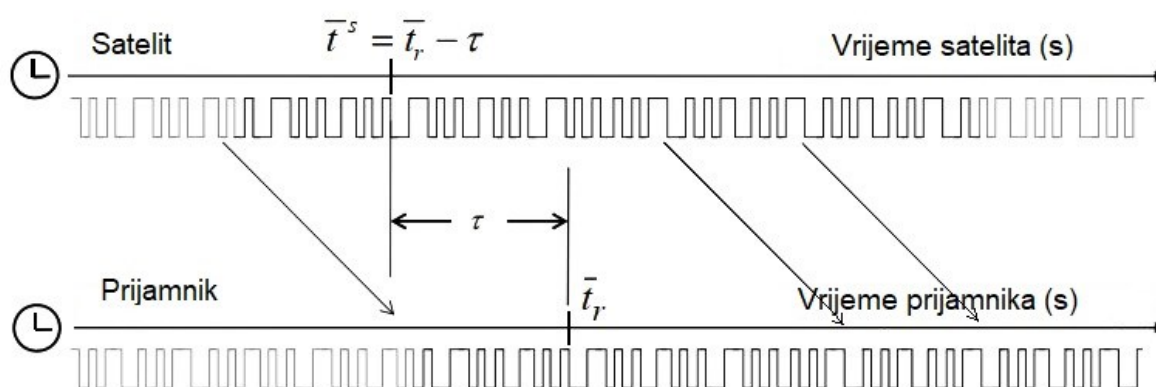
Uvođenjem parametra geometrijske udaljenosti između antena satelita i prijarnika, neusklađenosti satova satelita i prijarnika, ionosferske i troposferske greške te greške mjerenja, pri čemu izraz (5.1) poprima oblik (5.2).

$$\begin{aligned} P_{r,i}^S &= c \left((t_r + dt_r(t_r)) - (t^S + dT^S(t^S)) \right) + \varepsilon_P \\ &= c(t_r - t^S) + c \left(dt_r(t_r) - dT^S(t^S) \right) + \varepsilon_P \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned}
&= (\rho_r^S + I_{r,i}^S + T_r^S) + c(dt_r(t_r) - dT^S(t^S)) + \varepsilon_P \\
&= \rho_r^S + c(dt_r(t_r) - dT^S(t^S)) + I_{r,i}^S + T_r^S + \varepsilon_P
\end{aligned}$$

pri čemu je: ρ_r^S ...geometrijska udaljenost između antena satelita i prijavnika, dt_r, dT^S ...neusklađenost satova prijavnika i satelita, $I_{r,i}^S$...ionosferska greška, T_r^S ...troposferska greška, ε_P ...greška mjerenja.

Karakteristike prijama radionavigacijskog signala temeljena na određivanju pseudoudaljenosti prikazan je na Slici 5.2.



Slika 5.2.: Model određivanja pseudoudaljenosti [130]

Pretvorba geodetskog položaja u ECEF-ovu formatskog zapisa s vrijednostima izraženim u metrima iskazana je prema idućim izrazima:

$$el^2 = f(2 - f) \quad (5.3)$$

$$v = \frac{a}{\sqrt{1 - el^2 \sin^2 \phi_r}} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{pmatrix} (v + h) \cos \phi_r \cos \lambda_r \\ (v + h) \cos \phi_r \sin \lambda_r \\ v(1 - el^2) \sin \phi_r \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

pri čemu je: λ_r ...geodetska zemljopisna dužina, ϕ_r ...geodetska zemljopisna širina, h ...elipsoidna visina, a ...duža os referentnog Zemljina elipsoida⁶ (6378137 m) te f ...indeks spljoštenosti referentnog Zemljina elipsoida ($f = 1/298,257223563$).

⁶ Premda položajni parametri dolaznog radionavigacijskog signala mogu biti određeni drugim geodetskim datumima, program RTKLIB uvijek koristi geodetski datum WGS84 za pretvorbu geodetskih koordinata.

Sukladno postavljenim ciljevima istraživanja, upotrijebljen je dostupni Saastamoinenov model troposferske ispravke (4.6) u programskim postavkama. Ulazni parametri tlaka, apsolutne temperature i parcijalnog tlaka određeni su izrazima modela standardne atmosfere [130]:

$$P = 1013,25 \cdot (1 - 2,2557 \cdot 10^{-5}h)^{5,2568} \quad (5.6)$$

$$T = 15 - 6,5 \cdot 10^{-3}h + 273,15 \quad (5.7)$$

$$e = 6,108 \cdot \exp\left(\frac{17,15 T - 4684}{T - 38,45}\right) \cdot \frac{h_{rel}}{100} \quad (5.8)$$

pri čemu je: P ...ukupni tlak zraka (hPa), T ...temperature u stupnjevima Kelvina, e ...parcijalni tlak zraka (hPa), h ...geodetska visina iznad razine mora, h_{rel} ...relativna vlaga. Primijenjeni Saastamoinenov model upotrebljava stalnu vrijednost relativne vlage od 70 %.

Troposferska korekcija u ovoj konfiguraciji izračunata je sljedećim algoritmima [131], [132]. Za funkciju mapiranja izabrana programska postavka koristi Niellov model prema izrazu:

$$m(\varepsilon) = m_w(\varepsilon)\{1 + \cot \varepsilon \cdot (G_N \cos z + G_E \sin z)\} \quad (5.9)$$

pri čemu je: ε ...kut elevacije signala, z ...zenitni kut signala, G_N ...troposferski gradijent u sjevernom usmjerenju, G_E ...troposferni gradijent u istočnom usmjerenju, m_w ...nehidrostatska funkcija mapiranja (NMF).

Ukupno troposfersko kašnjenje izračunato je prema izrazu:

$$d_{tro} = m_d(\varepsilon)d_d^z + m(\varepsilon)(d_{tot}^z - d_d^z) \quad (5.10)$$

pri čemu je: d_{tro} ...ukupno troposfersko kašnjenje, d_d^z ...hidrostatska komponenta zenitnog troposferskog kašnjenja (u metrima, određena Saastamoinenovim modelom), d_{tot}^z ...ukupno troposfersko kašnjenje u zenitnom smjeru, m_d ...hidrostatska funkcija mapiranja (NMF). Parametri troposferskih gradijenata te ukupno troposfersko kašnjenje u zenitnom smjeru procjenjuju se postupkom proširena Kalmanova filtera (eng. *Extended Kalman filter* – EKF) [131].

Parametri za ispravak ionosferskog učinka sadržani u GLONASS-ovoj navigacijskoj poruci (engl. *broadcast ionosphere model*) [36] (A – numerički koeficijent maksimalnog ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u sloju ionosfere F2, F – indeks solarne aktivnosti te A_p – dnevni indeks geomagnetne aktivnosti) imaju oblik [130]:

$$P_{ion} = (\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3)^T \quad (5.11)$$

Određivanje ionosferskog kašnjenja I_r^S (m) izvedeno je Klobučarevim modelom sljedećim izrazima:

$$\psi = 0,0137 / (El + 0,11) - 0,022 \quad (5.12)$$

$$\varphi_i = \varphi + \psi \cos Az \quad (5.13)$$

$$\lambda_i = \lambda + \psi \sin Az / \cos \varphi_i \quad (5.14)$$

$$\varphi_m = \varphi_i + 0,064 \cos(\lambda_i - 1,617) \quad (5.15)$$

$$t = 4,32 \cdot 10^4 \lambda_i + t \quad (5.16)$$

$$F = 1 + 16 \cdot (0,53 - El)^3 \quad (5.17)$$

$$x = 2\pi(t - 50400) / \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n \quad (5.18)$$

$$I_r^S = \begin{cases} F \cdot 5 \cdot 10^{-9} & (|x| > 1,57) \\ F \cdot \left(5 \cdot 10^{-9} + \sum_{n=1}^4 \alpha_n \varphi_m^n \cdot \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right) & (|x| \leq 1,57) \end{cases} \quad (5.19)$$

U istraživanju su korišteni ulazni podatci o parametrima satova i efemeridama odaslani u navigacijskoj poruci (engl. *broadcast ephemeris and clock parameters*) u obliku [36], [130], [132]:

$$P_{eph}(t_b) = (x, y, z, v_x, v_y, v_z, a_x, a_y, a_z, \tau_n, \gamma_n) \quad (5.20)$$

Sustavi za rješavanje diferencijalnih jednadžbi za određivanje položaja ($\mathbf{r}^S(t) = (x, y, z)^T$) i brzine ($\mathbf{v}^S(t) = (v_x, v_y, v_z)^T$) satelita u ECEF-ovu koordinatnom sustavu, s obzirom na korištene parametre PZ-90 geodetskog datuma, imaju oblik [130]:

$$\frac{dx}{dt} = v_x, \frac{dy}{dt} = v_y, \frac{dz}{dt} = v_z \quad (5.21)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{\mu}{r^3} x - \frac{3}{2} J_2 \cdot \frac{\mu a_e^2}{r^5} x \cdot \left(1 - \frac{5z^2}{r^2} \right) + \omega_e^2 x + 2\omega_e v_y + a_x \quad (5.22)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -\frac{\mu}{r^3}y - \frac{3}{2}J_2 \cdot \frac{\mu a_e^2}{r^5}y \cdot \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \omega_e^2 y + 2\omega_e v_x + a_y \quad (5.23)$$

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{\mu}{r^3}z - \frac{3}{2}J_2 \cdot \frac{\mu a_e^2}{r^5}z \cdot \left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + a_z \quad (5.24)$$

pri čemu je: a_e ... duža os referentnog Zemljina elipsoida PZ-90 geodetskog datuma (6378136 m), μ ...gravitacijska konstanta Zemlje ($398600,44 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$), ω_e ...kutna brzina Zemlje ($7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$), J_2 ...drugi geopotencijalni zonski harmonik ($1082625,7 \cdot 10^{-9}$). Relativistički učinak satelitskog sata sadržan je u GLONASS-ovoj navigacijskoj poruci te ne zahtijeva naknadni relativistički ispravak.

Parametri sadržani u navigacijskoj poruci omogućavaju određivanje položaja satelita i neusklađenosti satelitskog sata τ , pri čemu nepoznati ostaju parametri položaja korisnika i neusklađenost sata prijamnika. S obzirom na svojstva položajnih zapisa promatranih lokacija izabran je jednostruki način pozicioniranja (engl. *single positioning mode*) primjenom linearnog modela. Primjenjujući linearni model na većem broju vidljivih satelita te upotrebljavajući Pitagorin teorem dobiva se sustav jednadžbā, najčešće prikazan u formi za četiri satelita (2.3). Linearni model podrazumijeva da se promatrani položaj može odrediti kao suma položaja predviđena modelom i preostale greške [133]:

$$P_{obs} = P_{model} + noise = P(x, y, z, \tau) + v \quad (5.25)$$

Primjenjujući Taylerov teorem (engl. *Thayler's theorem*) i proširujući model uvodeći privremene vrijednosti parametara (x_0, y_0, z_0, v_0) te zanemarujući greške višeg reda, greške promatrana položaja mogu se izraziti kao razlika između vrijednosti određenih promatranjem i vrijednosti određenih izračunom uz upotrebu privremenih vrijednosti parametara. Opisani postupak uobičajeno se navodi u općem matričnom obliku za svaki vidljivi satelit [130], [133]:

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial x} \quad \frac{\partial P}{\partial y} \quad \frac{\partial P}{\partial z} \quad \frac{\partial P}{\partial \tau} \right) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \tau \end{pmatrix} + v \quad (5.26)$$

Za m broj vidljivih satelita s kojih prijamnik istovremeno prima radionavigacijski signal, navedena jednadžba dobiva matrični oblik:

$$\begin{pmatrix} \Delta P^1 \\ \Delta P^2 \\ \Delta P^3 \\ \vdots \\ \Delta P^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P^1}{\partial x} & \frac{\partial P^1}{\partial y} & \frac{\partial P^1}{\partial z} & \frac{\partial P^1}{\partial \tau} \\ \frac{\partial P^2}{\partial x} & \frac{\partial P^2}{\partial y} & \frac{\partial P^2}{\partial z} & \frac{\partial P^2}{\partial \tau} \\ \frac{\partial P^3}{\partial x} & \frac{\partial P^3}{\partial y} & \frac{\partial P^3}{\partial z} & \frac{\partial P^3}{\partial \tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P^m}{\partial x} & \frac{\partial P^m}{\partial y} & \frac{\partial P^m}{\partial z} & \frac{\partial P^m}{\partial \tau} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \tau \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v^1 \\ v^2 \\ v^3 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (5.27)$$

U općem vektorskom obliku matrica se može prikazati u vektorskom obliku:

$$y = Ax + v \quad (5.28)$$

pri čemu prikazuje linearni odnos između ostataka vrijednosti položaja određenog promatranjem (y : razlika između vrijednosti određenih promatranjem i vrijednosti određenih izračunom) i slučajne greške mjerenja v .

Linearni koeficijenti koji predstavljaju parcijalne derivacije promatranja svakog pojedinog satelita, s obzirom na svaku ulazni parametar, mogu biti prikazani u općem matricnom obliku matrice [47], [133]. Tako formirana matrica ima broj redova koji odgovara broju ulaznih satelita te je funkcija isključivo podataka primljenih sa satelita od strane prijammnika.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{x_0 - x^1}{\rho} & \frac{y_0 - y^1}{\rho} & \frac{z_0 - z^1}{\rho} & c \\ \frac{x_0 - x^2}{\rho} & \frac{y_0 - y^2}{\rho} & \frac{z_0 - z^2}{\rho} & c \\ \frac{x_0 - x^3}{\rho} & \frac{y_0 - y^3}{\rho} & \frac{z_0 - z^3}{\rho} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0 - x^m}{\rho} & \frac{y_0 - y^m}{\rho} & \frac{z_0 - z^m}{\rho} & c \end{pmatrix} \quad (5.29)$$

U izabranom načinu pozicioniranja obavlja se iteracija ponderiranih vrijednosti položaja određenih metodom linearne procjene najmanjeg kvadrata, pri čemu model ima vektorski oblik [130]:

$$y = Hx + v \quad (5.30)$$

gdje je: y ...vektor mjerenja, H ...nepoznata ispravka parametra vektora x , v ...slučajne greške mjerenja.

Ako mjerenja nisu izražena linearnim modelom, primjenjuje se Gauss-Newtonova (engl. *Gauss–Newton*) iteracija za nelinearnu procjenu najmanjeg kvadrata ili metoda LM (engl. *Levenberg – Marquardt*), čime vektorski model poprima oblik [130]:

$$y = (h)x + v \quad (5.31)$$

pri čemu je $(h)x$...mjerna vektorska funkcija parametra vektora x .

Hodogram obrade ulaznih meteoroloških i položajnih zapisa sa svim fazama do faze verifikacije prikazan je na Slici 5.3. Dodatno, u Prilogu E naveden je korišteni *Python* programski kod te (u Prilogu F) dio ulazne matrice za izradu predloženog modela.

GNSS-ov ulazni dio podataka čine GLONASS-ovi položajni zapisi u formatu RINEX 2 preuzeti s IGS-ova servera [35]. Preuzete su GLONASS-ove navigacijske datoteke (format *.g*) i opservacijske datoteke (format *.d*) iz kojih su se dostupnim programom RTKLIB [132] formirale položajne datoteke (format *.pos*) za svaki dan promatrana razdoblja. Budući da za navedene mjerne postaje nisu dostupni dodatni IGS-ovi proizvodi (točnije određene satelitske orbite i greške atomskih satova ili IGS-ovo ionosfersko i troposfersko kašnjenje), programske postavke identično su postavljene za sve mjerne postaje tijekom promatranih perioda kako slijedi:

- format izlaznog zapisa položaja: ECEF
- troposferska korekcija: Saastamoinenov model
- kut maskiranja (engl. *elevation mask*): 3° (uzevši u obzir primjenjivost upotrijebljene NMF-ove funkcije mapiranja)
- ionosferska korekcija: ulazni podatci odaslani u navigacijskoj poruci
- satelitske orbite/sat: odaslano u navigacijskoj poruci
- način pozicioniranja (engl. *positioning mode*): jednostruki (engl. *single*).

Iz tako generiranih dnevnih položajnih zapisa za daljnju obradu upotrijebljeni su podatci o ostvarenom GLONASS-ovu položaju (X, Y i Z koordinate u ECEF-ovu formatu), UTC-ovo vrijeme (vremenska je rezolucija zapisa jedna minuta). Navedeni postupak ponovljen je za svaki dostupan dnevni zapis 2014., 2015. i 2019. godine s navedenih lokacija za potrebe izrade, validacije i verifikacije predloženog modela.

Drugi dio ulaznih podataka činili su podatci meteoroloških parametara: tlaka, temperatura, oborive vode, relativne vlage te oborine. Podatci dobiveni od DHMZ-a bili su određeni lokalnim vremenom. Prije formiranja matrice ulaznih meteoroloških podataka isti su pročišćeni eliminiranjem necjelovitih zapisa (zato što su ostvareni s automatskih mjernih postaja postoji mogućnost da jedan ili više uređaja nisu u funkciji, odnosno da ne pružaju očekivane vrijednosti). Provedenim postupcima formirani su meteorološki zapisi za navedena razdoblja i lokacije. Vremenska rezolucija meteoroloških podataka jest deset minuta.

Iduća faza uključila je spajanje navedenih položajnih i meteoroloških zapisa po zajedničkim indeksima UTC-ova vremena i lokacija. Posebna pažnja posvećena je usklađivanju vremena (lokalno i UTC-ovo) te daljnjem pročišćavanju konačnih matrica, zato što periodi bez meteoroloških podataka nisu istovjetni periodima bez položajnih podataka. S ciljem usklađivanja vremenskih rezolucija položajnih i meteoroloških podataka položajni su podatci funkcijom aritmetičke sredine svedeni na desetominutne prosječne vrijednosti. Navedene radnje izvršene su u programskom paketu *Python*. Tako pripremljena matrica ulaznih podataka podvrgnuta je postupcima regresijske statističke analize.

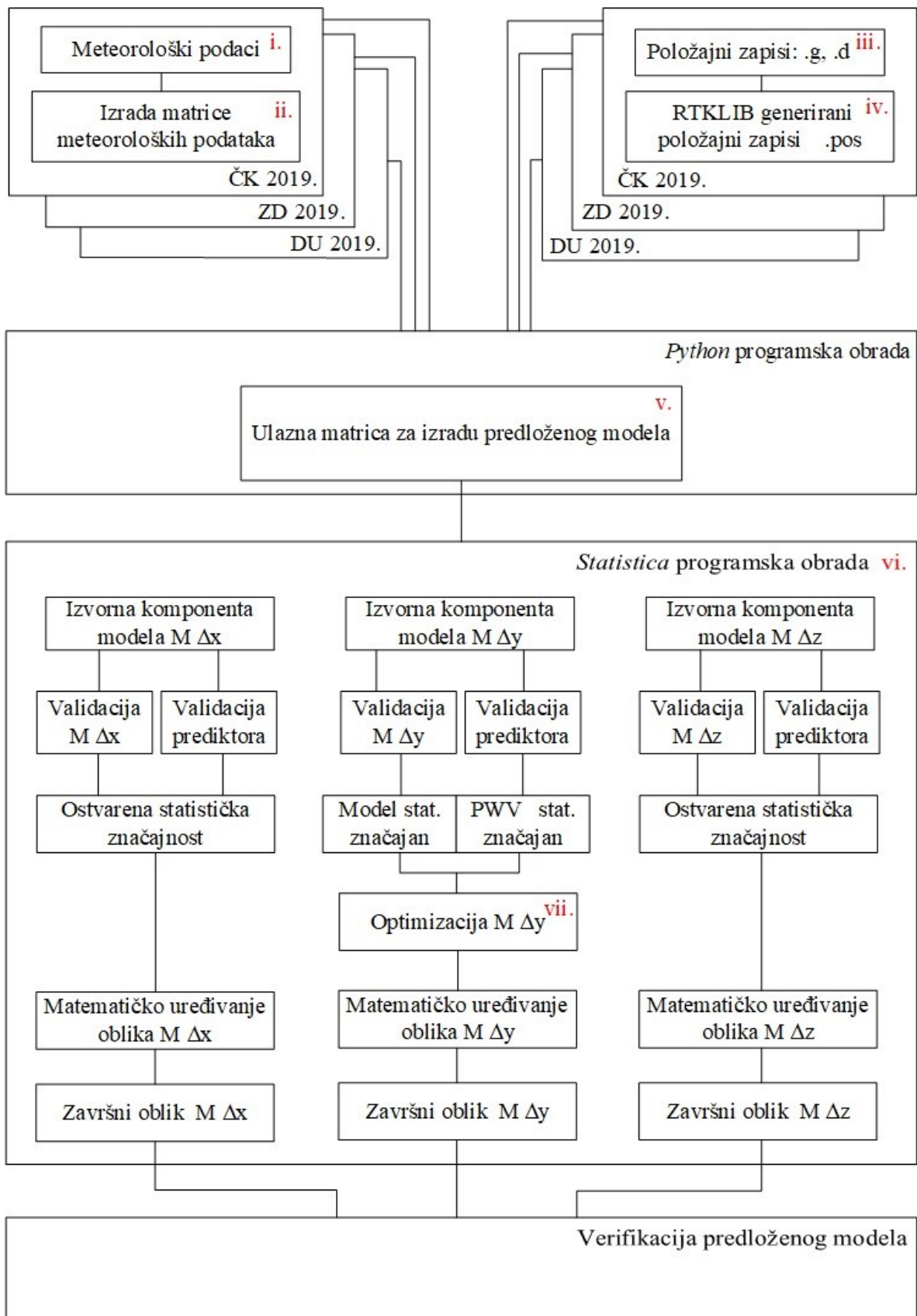
5.6. Izrada matematičkog modela zenitne komponente troposferske refrakcije GLONASS-ovih satelitskih radionavigacijskih signala

Određivanje troposferske greške mjerenje pseudoudaljenosti moguće je obaviti na dva osnovna načina [6]: (i) određivanjem i uklanjanjem svih sistemskih i slučajnih grešaka te (ii) određivanjem odstupanja od poznatog položaja uz korištenje unaprijed izabranog troposferskog modela i procjenjujući ostatak odstupanja kao nepoznati parametar [122].

Prvim se načinom pseudoudaljenost računa prema općoj formuli [6]:

$$R_A^i = \rho_A^i + \delta\rho_{mul} + \delta\rho_{rel} + c\delta_A - c\delta^i + I_A^i + T_A^i + e_A^i \quad (5.32)$$

pri čemu je: R_A^i ...pseudoudaljenost od položaja A do satelita i , ρ_A^i ...geometrijska udaljenost, c ...brzina gibanja svjetlosti, I_A^i, T_A^i ...ionosfersko i troposfersko kašnjenje, $c\delta_A, c\delta^i$... greška satelitske orbite i sata, $\delta\rho_{mul}$...greška višestaznih putanja, $\delta\rho_{rel}$...relativistička greška, e_A^i ...slučajna greška.



Slika 5.3. Hodogram obrade ulaznih podataka do faze verifikacije predloženog modela

Geometrijska udaljenost ρ_A^i računa se prema izrazu (2.3) uz unaprijed poznate točne koordinate korisničkog položaja. Greška višestaznih putanja $\delta\rho_{mul}$ može se odrediti programski, najčešće od proizvođača prijamnika i antenske opreme (npr. program Leica GNSSQC). Izvori vrijednosti ionosferskog kašnjenja, relativističke greške, greške satelitske orbite i sata sadržani su u navigacijskom zapisu RINEX ili se, u slučaju naknadne obrade, mogu koristiti iz odgovarajućih IGS-ovih zapisa. U svakom slučaju, potrebno je provesti programsku obradu uz nužnost osiguranja adekvatnih izvora podataka za obavljanje dodatnih korekcija. S ciljem dodatne verifikacije tako ostvarene vrijednosti izoliranog i određenog troposferskog kašnjenja poznatog položaja uspoređuju se s vrijednostima određenim signalima radiosondā ili kojeg drugog sustava. Studija provedenog na takav način ostvarila je vrijednosti troposferskog kašnjenja do 14 metara (Prilog A). Sukladno usvojenim ograničenjima određenih izborom mjernih postaja i formatom dostupnih zapisa RINEX, u istraživanju je usvojen alternativni pristup. Upotrijebljen je Saastamoinenov model troposferske zenitne korekcije te prisutni parametri odaslani u navigacijskoj poruci kao zajednički izvor ulaznih programskih korekcija za sve mjerne postaje i razdoblja, uz uniformiranje ostalih programskih postavkā. Tako izolirano odstupanje od poznatog položaja podvrgnuto je procesu statističke analize s ciljem razvoja predloženog modela koji bi smanjio ostatak ukupne greške preko funkcije troposferskog kašnjenja (ovdje Saastamoinenov modela u zenitnom smjeru), odnosno koji bi primijenjen uz postojeći Saastamoinenov model smanjio troposfersku komponentu ukupne greške položaja određenog GLONASS-ovim sustavom za promatrane lokacije.

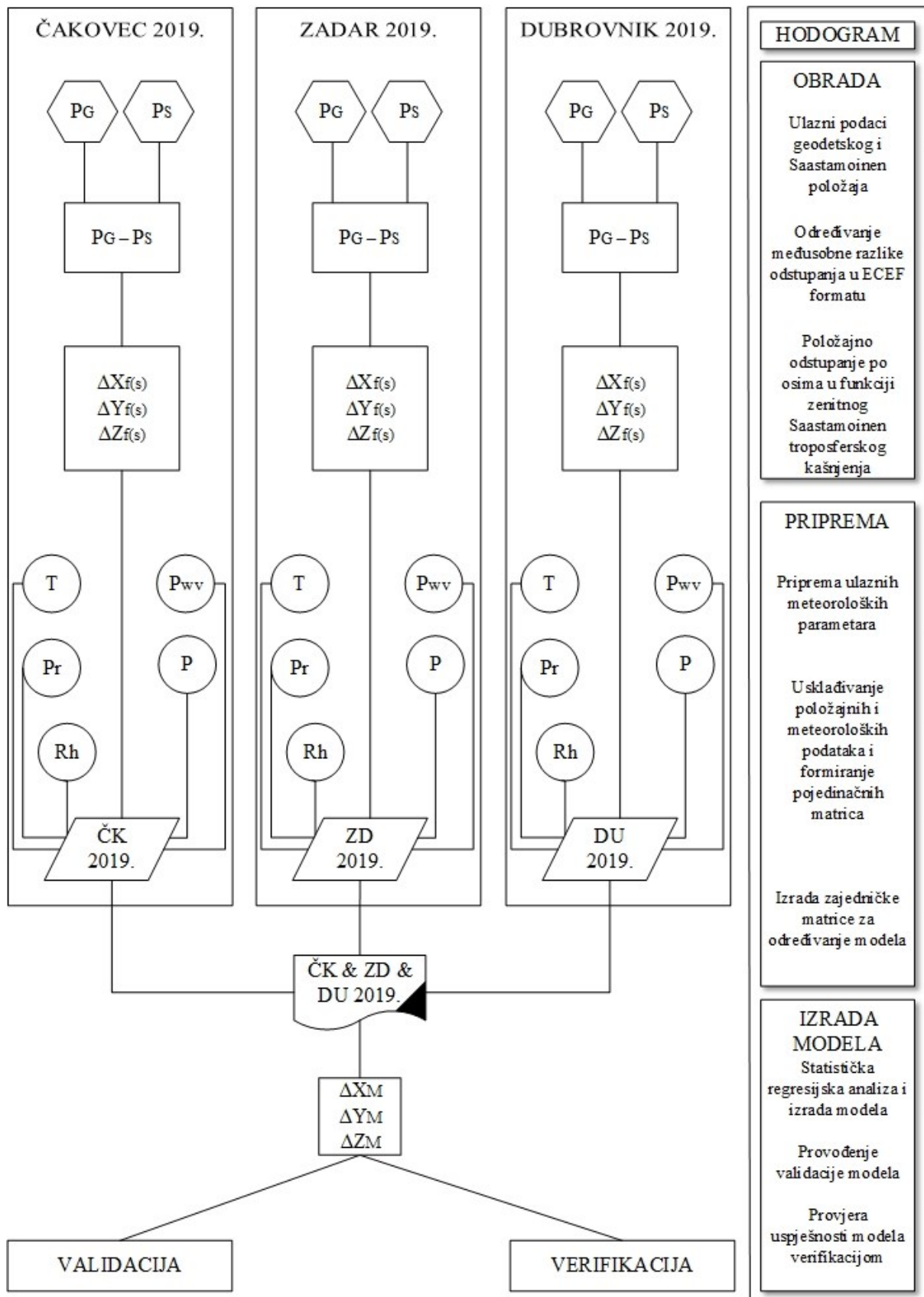
Cilj provedene regresijske statističke analize bio je ustvrditi postoji li zakonitost, oblik i sadržaj međusobne povezanosti promatranih meteoroloških varijablā i odstupanja korisničkog položaja. Rezultati mogu varirati od potpune nezavisnosti do potpune funkcionalne povezanosti, pri čemu se regresijskom analizom spoznaje stupanj, smjer i intenzitet povezanosti te međusobna mjera kretanja varijacija onih obilježja koja ispoljavaju međusobnu povezanost [134]. S obzirom na opću prirodu odnosa ulaznih nezavisnih varijablā s izlaznom zavisnom varijablom primjereno je određen niz nužnih instrumenata statističke analize koji će se koristiti u statističkoj obradi. Određen je i dodatni skup deskriptivnih statističkih pokazatelja koji će se primijeniti ovisno o stupnju obuhvaćenosti i interpretacije pojave promatrane prvom skupinom statističkih instrumenata.

Regresijska analiza treba rezultirati dvama saznanjima: (i) pokazati prosječan kvantitativni odnos promatranih pojava izražen veličinom i rasporedom ostvarenih podataka te

(ii) oblikovati matematičku funkciju koja izražava navedeni odnos. Stoga primjena predviđenih statističkih instrumenata uključuje:

- postavljanje linearnog i/ili nelinearnog modela međusobne povezanosti zavisne varijable te promatranih ulaznih nezavisnih varijabla (prediktora) za svaku prostornu koordinatu položaj
- određivanje značajnosti ulaznih prediktora te izračun njihovih koeficijenata korelacije, determinacije te b -pondera regresijskog modela zajedno s pridruženom značajnošću i vrijednošću F , uzimajući u obzir ukupnost promatranih odnosa prediktora i zavisne varijable; budući da nema objektivnih pretpostavka za sumnju u integritet prikupljenih prediktora, rezultati će se smatrati značajnim ako je vrijednost parametra $p < 0,05$
- uspješnost modela procjenjivat će se temeljnim kriterijima: ostvarenje smanjenja srednje kvadratne greške točnosti promatranih položaja primjenom predloženog modela te smanjenjem apsolutnog odstupanja predloženim modelom u odnosu na promatrani model troposferske greške; srednja kvadratna greška odstupanja korisničkog položaja najvažnija je mjera točnosti i uspješnosti predloženog modela
- dodatni kriteriji promatrat će smanjene greške aproksimacije (smanjenja varijacije parametrom standardne devijacije) uz kretanje ekstrema te, po potrebi, dodatnih statističkih parametara.

Metodološki tijek razvoja predloženog modela prikazan je na Slici 5.4, pri čemu je: P_G ...geodetski položaj, P_S ...položaj određen sa Saastamoinenovom funkcijom troposferskog kašnjenja, $\Delta X_{f(S)}$, $\Delta Y_{f(S)}$, $\Delta Z_{f(S)}$...odstupanje po x, y i z osi po Saastamoinenovu modelu, T ...temperatura ($^{\circ}C$), Pr ...oborine (mm), Rh ...relativna vlažnost (postotak), Pwv ...oboriva voda (mm), P ...tlak (hPa), ΔX_M , ΔY_M , ΔZ_M ... odstupanje po x, y i z osi predloženim modelom.



Slika 5.4.: Metodološki tijek razvoja predloženog modela

Izbor predviđenih statističkih alata u pojedinim koracima izrade modela može se argumentirati kako slijedi:

- srednje vrijednosti statističke analize frekvencija distribucija ističu karakterističnu prosječnu veličinu promatrana fenomena u promatranom trenutku; budući da ulazni položajni podaci pokazuju dostatnu homogenost bez izraženih amplitudnih ekstrema (ne izvan uobičajenih odstupanja položajnih vrijednosti za upotrijebljenu GNSS-ovu konfiguraciju), aritmetička sredina je optimalna za primjenu
- za mjerenja varijabiliteta regresijske analize upotrijebljena je standardna greška s ciljem opisivanja homogenosti, odnosno odstupanja (odnosa) točnosti položaja regresijske funkcije i ulazne funkcije poznatih položajnih koordinata te usporedbe s odstupanjem točnosti ulazne funkcije izmjerenih GLONASS-ovih položaja; dodatni alat prikaz je apsolutnih odstupanja ulazne funkcije položaja i regresijske funkcije
- za ulazne zapise i zapise položaja dobivenih predloženim modelom izračunata je vrijednost medijana kako bi se ustanovio položaj centralne vrijednosti položaja s obzirom na razdiobu vrijednosti; Dodatno, unutar tih granica određena su daljnja odstupanja (kvartil) čime je ustanovljeno kako su vrijednosti položaja grupirane unutar svojih zapisa; ovakva raspodjela pružila je dublji uvid u raspodjelu točnosti položaja ulaznih i dobivenih položajnih zapisa.

Definirajući sve alate i korake regresijske analize te metodološki razvijajući ulaznu matricu, obradom u namjenskom programu za statističku obradu podataka *Statistica* [135] uz daljnje optimiziranje i testiranje dobiven je matematički oblik predloženog modela. Matematički oblik sastoji se od triju odvojenih komponenata po koordinatnim osima koje zajednički tvore predloženi P_{Si} model.

Za os X komponenta modela $M_{\Delta X}$ ima oblik:

$$M_{\Delta X} = \sqrt{-4,66541 - 0,01108Rh + 0,07062P + 0,11806Pr} - 0,05187T + 0,1246PWW \quad (5.33)$$

Za os Y komponenta modela $M_{\Delta Y}$ ima optimizirani oblik:

$$M_{\Delta Y} = - \left(\sqrt{0,06656 - 0,000046Rh - 0,000031P + 0,000418Pr + 0,000047T - 0,00345PWV} \right) \quad (5.34)$$

Za os Z komponenta modela $M_{\Delta Z}$ ima oblik:

$$M_{\Delta Z} = - \frac{1}{7,17152 - 0,01049Rh - 0,00407P + 0,12603Pr - 0,03837T + 0,01937PWV} \quad (5.35)$$

Konstante u modelima (engl. *intercept*) programski su generirane te dodatno optimizirane. One predstavljaju vrijednost modela ako je vrijednost prediktora nula. Završni oblik predloženog modela temeljena na proširenju postojećeg Saastamoinenova modela ima oblik:

$$P_{Si} = M_S + \begin{cases} M_{\Delta X} \\ M_{\Delta Y} \\ M_{\Delta Z} \end{cases} \quad (5.36)$$

pri čemu je M_S ...postojeći Saastamoinenov model.

5.7. Validacija razvijenog modela zenitne komponente troposferske refrakcije GLONASS-ovih satelitskih radionavigacijskih signala

Rezultati statističkih parametara predloženog modela prikazani su odvojeno za svaku koordinatnu os. Kriterijima značajnosti odvojeno su podvrgnute komponente modela svih koordinatnih osi te ulazni parametri komponenata modela po svim koordinatnim osima.

Zajednički statistički pokazatelji značajnosti predloženih modela za pojedinu koordinatnu os jesu: vrijednost p , koeficijenti višestruke korelacije (engl. *multiple correlation*), koeficijent višestruke determinacije (engl. *multiple determination*) te korigirani koeficijent determinacije (engl. *adjusted determination coefficient*). Rezultati su prikazani u Tablici 5.2.

Tablica 5.2.: Statistički pokazatelji značajnosti predloženog modela za os x

Koef. višestruke korelacije	Koef. višestruke determinacija	Koef. korigirane determinacije	Koeficijent značajnosti p
0,11571	0,01338	0,01332	0,00037

Ostvarena vrijednost p , koja je značajno ispod postavljene 0,05 (5 %), govori da je model statistički značajan, tj. ako se prihvati nulta hipotezu H_0 (model je statistički neznačajan), tada se čini greška od iznad 99 %. Važno je primijetiti da se ista vrijednost parametra p (0,05) primjenjuje na sve koeficijente čime se pokazuje: (i) postojanje statistički značajne korelacije

ulaznih prediktora i zavisne varijable (0,115), (ii) prisutno je statistički značajno predviđanje kriterijske varijable ulaznim prediktorima (0,013), (iii) odnos ostvarene korelacije, broja uzoraka (ulaznih zapisa) i broja ulaznih varijabla (prediktora) statistički je značajan.

Statistički pokazatelji značajnosti prediktora unutar predloženog modela za os x uključuju brojčane vrijednosti pojedinih prediktora, standardnu grešku pojedinog koeficijenta, vrijednost p pojedinog prediktora te raspon unutar kojih se stvarna vrijednost koeficijenta nalazi s vjerojatnošću od 95 %. Statistička analiza prediktora komponente predloženog modela za os x prikazana je u Tablici 5.3.

Tablica 5.3.: Statistički pokazatelji značajnosti prediktora predloženog modela za os x

Prediktori osi x predloženog modela	Iznos prediktora	Standardna greška	ponder b	vrijednost p	Interval unutar kojeg se prediktor nalazi s vjerojatnošću od 95 %	
					- 95 %	+ 95 %
Rh	-0,009865	0,001361	-0,0085	0,00061	-0,01093	-0,00559
P	0,006285	0,001181	0,0062	0,00070	0,00397	0,008601
Pr	0,104985	0,047711	0,1051	0,02778	0,01147	0,198497
T	-0,051871	0,005468	-0,0307	0,00060	-0,06059	-0,01915
PWV	0,124607	0,044893	0,1183	0,00551	0,21260	0,03661

Iznosi parametara prediktora pokazuju da su svi prediktori statistički značajni te da svi ulaze u komponentu predloženog modela za os x .

Statistički rezultati predloženog modela i prediktora za os y prikazani su tablicama 5.4. i 5.5 s istim promatranim pokazateljima kao i za os x .

Tablica 5.4.: Statistički pokazatelji značajnosti predloženog modela za os y

Koef. višestruke korelacije	Koef. višestruke determinacija	Koef. korigirane determinacije	Koeficijent značajnosti p
0,03491	0,00121	0,00115	0,00273

Navedeni podatci pokazuju da je aproksimirani statistički model predložen za os y statistički značajan i da postoji međusobni stupanj korelacije. Međutim, nizak stupanj determinacije očitovao se prilikom određivanja statističke značajnosti pojedinih prediktora unutar modela prikazanih u Tablici 5.5.

Tablica 5.5.: Statistički pokazatelji značajnosti prediktora predloženog modela za os y

Prediktori osi y predloženog modela	Iznos prediktora	Standardna greška	ponder b	vrijednost p	Interval unutar kojeg se prediktor nalazi s vjerojatnošću od 95 %	
					- 95 %	+ 95 %
Rh	-0,001050	0,000931	-0,0016	0,25952	-0,002874	0,000775
P	-0,000713	0,000808	-0,0004	0,37732	-0,002297	0,000870
Pr	0,009439	0,032628	0,0103	0,77236	-0,054511	0,073388
T	0,001086	0,003739	-0,0011	0,77139	-0,006243	0,008416
PWV	-0,078043	0,030701	-0,0628	0,01102	-0,138215	-0,017871

Ovdje je potrebno naglasiti: premda analiza pokazuje statističku značajnost samo prediktora PWV (ostale su vrijednosti koeficijenta p iznad 0,05) zbog toga što je cijeli model statistički značajan nastavljeno je testiranje svih potencijalnih prediktora. Stoga je prikazan konačan oblik modela osi y s vrijednostima koeficijenata ostalih ulaznih prediktora (osim PWV), rezultat poluempirijskog karaktera koji najbolje opisuje kretanje promatrane troposferske greške po osi y .

Statistički rezultati predloženog modela i prediktora za os z prikazani su u tablicama 5.6. i 5.7.

Tablica 5.6.: Statistički pokazatelji značajnosti predloženog modela za os z

Koef. višestruke korelacije	Koef. višestruke determinacija	Koef. korigirane determinacije	Koeficijent značajnosti p
0,09235	0,00852	0,00846	0,00019

Koeficijent p pokazuje značajnost modela i koeficijenata determinacije i korelacije. Rezultati pojedinih prediktora prikazani su u Tablici 5.7.

Tablica 5.7.: Statistički pokazatelji značajnosti prediktora predloženog modela za os z

Prediktori osi z predloženog modela	Iznos prediktora	Standardna greška	ponder b	vrijednost p	Interval unutar kojeg se prediktor nalazi s vjerojatnošću od 95 %	
					- 95 %	+ 95 %
Rh	-0,010598	0,001380	-0,0109	0,00032	-0,077169	-0,045783
P	-0,004111	0,001198	-0,0039	0,00059	-0,020847	-0,005692
Pr	0,127232	0,048380	0,1277	0,00854	0,002438	0,167074
T	0,038741	0,005545	-0,0403	0,00941	-0,119044	0,066889
PWV	0,019567	0,045522	0,0312	0,66730	-0,020536	0,032074

U komponenti osi y predloženog modela također je vidljiva statistička neznačajnost ulazne varijable PWV, međutim, s obzirom na ukupnu značajnost modela, konačan oblik predloženog

modela za os z sadrži testiranu poluempirijsku vrijednost prediktora PWV s koeficijentom koji doprinosi najadekvatnijem opisu kretanja troposferske greške po osi z .

Validacija je provedena za svaku os posebno metodom unakrsne validacije (engl. *cross validation*), pri čemu je na polovici ulaznih zapisa kreiran model te testiran na drugoj polovici ulaznih podataka. Parametri za usporedbu rezultati su generiranih modela na svakoj polovici ulaznih podataka, pri čemu aritmetičke sredine generiranih rezultata (kretanja ukupnog odstupanja troposferske greške za svaku os) ne smiju značajnije međusobno odstupati. Pokazatelj je uspješnosti tako provedene validacije [39] pokazatelj p , pri čemu se razlike ostvarenih aritmetičkih sredina smatraju značajnim ako je vrijednost parametra $p < 0,05$. Ostvareni parametri validacije prikazani su u Tablici 5.8.

Tablica 5.8.: Pokazatelji validacije komponenata predloženog modela

		Ukupno odstupanje [m]	vrijednost p	Broj ulaznih zapisa
os x	Postojećim modelom	3,476385	0,816480	75642
	$M_{\Delta X}$ komponenta predloženog modela	3,479087		
os y	Postojećim modelom	0,546783	0,780964	
	$M_{\Delta Y}$ komponenta predloženog modela	0,551984		
os z	Postojećim modelom	1,812444	0,574859	
	$M_{\Delta Z}$ komponenta predloženog modela	1,819029		

Ostvarene vrijednosti provedene validacije pokazuju da su svi modeli prikladni za predviđenu svrhu, bez ocjenjivanja uspješnosti tako formirana predviđena modela. Time su ostvareni početni predviđeni uvjeti te se pristupilo procesu verifikacije.

6. VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG TROPOSFERSKOG MODELA

Sukladno navedenim koracima te provedenom procesu validacije, uspješnost predloženog modela testirana je meteorološkim i GLONASS-ovim položajnim zapisima istih lokacija za 2014. i 2015. godinu.

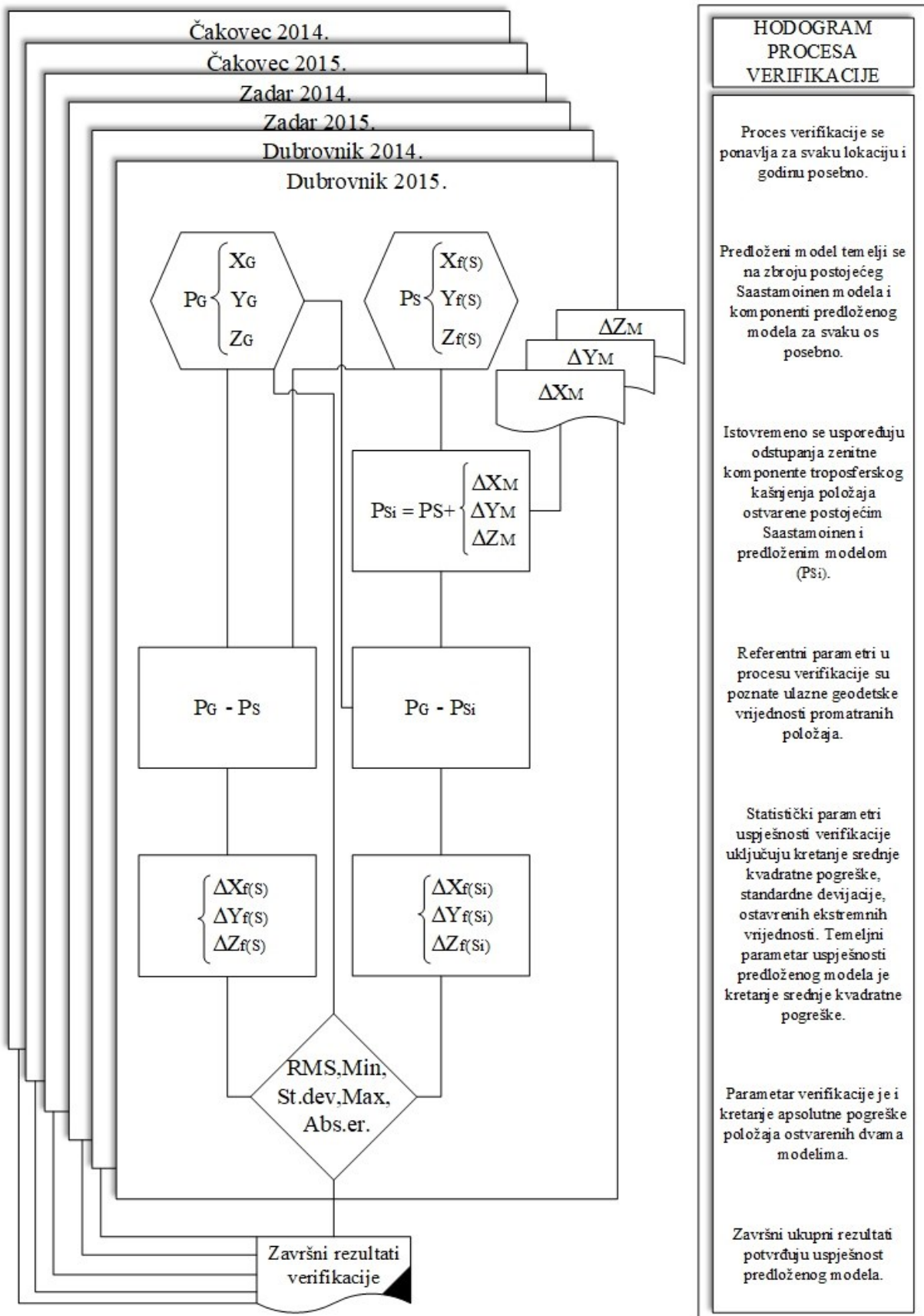
Proces verifikacije prikazan je na Slici 6.1 s navedenim parametrima:

1. P_G ...geodetski položaj određen koordinatama X_G, Y_G i Z_G
2. P_S ...položaj određen prijamom GLONASS-ova satelitskog navigacijskog signala s primjenom Saastamoinenova modela troposferske korekcije, izražen ECEF-ovim koordinatama $X_{f(S)}, Y_{f(S)}, Z_{f(S)}$
3. $M_{\Delta X}, M_{\Delta Y}, M_{\Delta Z}$... koordinatno odstupanje predloženim modelom za svaku os posebno
4. P_{Si}položaj određen GLONASS-ovim satelitskim navigacijskim signalom korištenjem predloženog modela temeljena na postojećem Saastamoinenovu modelu troposferske korekcije uz uključeni razvijeni model koordinatnog odstupanja
5. $\Delta X_{f(Si)}, \Delta Y_{f(Si)}, \Delta Z_{f(Si)}$...odstupanje predloženog modela troposferskog kašnjenja od geodetskog položaja
6. $RMS, St. dev, Min, Max$...statistički parametri verifikacije uspješnosti predloženog modela: standardna kvadratna greška, standardna devijacija, minimum, maksimum.

Navedeni proces verifikacije ponovljen je pojedinačno za svaku lokaciju (Čakovec, Zadar i Dubrovnik) te za svaki period (2014. i 2015. godinu). Proces verifikacije proveden je sukladno priloženom funkcionalnom dijagramu (Slika 6.1.).

6.1. Analiza točnosti položaja za odabrane referentne postaje

Rezultati uspješnosti predloženog modela prezentirani su usporedbom navedenih statističkih parametara ostvarenih GLONASS-ovim položajem s uključenim Saastamoinenovim modelom te predloženim modelom P_{Si} temeljenim na izvornom Saastamoinenovu modelu uz pridodanu vrijednost ostvarenu predloženim modelom (za svaku os pojedinačno). Rezultati su prikazani za svaku lokaciju pojedinačno za promatrani period, 2014. i 2015. godinu.



Slika 6.1.: Postupak provedenog procesa verifikacije

6.1.1. Parametri točnosti položaja za postaju u Čakovcu, 2014. i 2015. godina

Prikazi parametara točnosti usporedbom postojećeg i predloženog modela ostvarenih na EUREF-ovoj mjernoj postaji u Čakovcu u promatranom dvogodišnjem periodu prikazani su u tablicama 6.1. i 6.2. Oznake ΔX , ΔY i ΔZ prikazuju odstupanja od osi x , y i z postojećim Saastamoinenovim modelom, a DX , DY i DZ označuju odstupanja promatranih parametara od osi x , y i z prema predloženom modelu P_{Si} .

Tablica 6.1.: Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Čakovcu 2014. godine

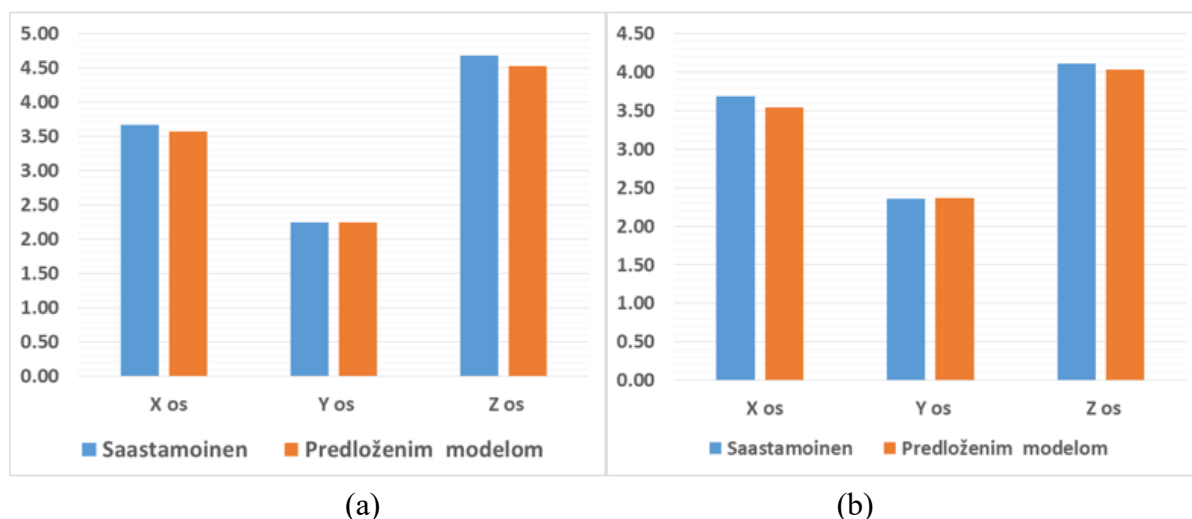
	Položaj postojećim Saast. modelom (m)			Položaj predloženim modelom P_{Si} (m)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	DX	DY	DZ
Max	27,73115	15,08702	26,67167	27,11036	15,25799	27,16800
Min	-21,00346	-17,84306	-20,91992	-21,18623	-17,69049	-20,32884
RMS	3,66612	2,24665	4,67690	3,56569	2,24570	4,51838
St. dev.	3,59378	2,24453	4,40005	3,55357	2,24487	4,39674
Median	0,75338	-0,11349	-1,51736	0,35540	0,04520	-0,96918
3. kvartil	3,19588	1,36449	1,29419	2,74422	1,52324	1,83903
1. kvartil	-1,69002	-1,53354	-4,41035	-2,08405	-1,37659	-3,85932
raspon	4,88590	2,89803	5,70454	4,82828	2,89983	5,69835

Tablica 6.2.: Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Čakovcu 2015. godine

	Položaj postojećim Saast. modelom (m)			Položaj predloženim modelom P_{Si} (m)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	DX	DY	DZ
Max	23,42991	12,39400	20,61098	22,65370	12,54960	21,03653
Min	-15,53354	-15,78221	-23,51577	-15,84262	-15,62186	-22,95808
RMS	3,68185	2,35526	4,11190	3,53918	2,36285	4,03620
St. dev.	3,46487	2,35508	4,02775	3,43620	2,35524	4,02582
Median	1,31839	-0,02429	-0,81569	0,92502	0,13616	-0,28051
3. kvartil	3,56389	1,48014	1,86337	3,16012	1,64104	2,39937
1. kvartil	-1,01504	-1,46700	-3,52370	-1,39599	-1,30652	-2,98161
raspon	4,57893	2,94714	5,38707	4,55612	2,94757	5,38098

Primjenom predloženog modela vidljivo je da se vrijednosti minimuma i maksimuma odstupanja nisu značajnije promijenile te da su rasponi ostali unutar približno istih vrijednosti. Primjetna je tendencija kojom se prilikom smanjivanja vrijednosti jednog ekstrema povećava

vrijednost drugog, pri čemu se nigdje ne povećavaju vrijednosti obaju ekstrema. Štoviše, za promatranu 2014. godinu predloženim modelom smanjene su vrijednosti obaju ekstrema osi z. Rezultati za 2014. godinu pokazuju istovremeno poboljšanje točnosti srednje kvadratne greške položaja koja predstavlja osnovni parametar uspješnosti predloženog modela. Pritom su ostvarena poboljšanja točnosti za os x (10,04 cm/2,73 %), os y (0,09 cm/0,04 %) i os z (15,85 cm/3,38 %). Istovremeno su poboljšani i parametri standardne devijacije (st. dev.) za osi x i z , a vrijednost je st. dev. smanjena za os y (-0,03 cm/-0,01 %). Uočava se i poboljšanje raspodjele frekvencija mjerenja; u 2014. godini predloženim modelom ostvarena vrijednost medijana za sve osi smanjena je i približila se početnoj (nultoj) vrijednosti odstupanja, a u 2015. je godini ostvareno poboljšanje vrijednosti medijana osi x i z te degradacija osi y . Poboljšanje određivanja točnosti položaja vidljivo je uspoređujući vrijednosti srednje kvadratne greške u navedenom razdoblju; za 2015. godinu predloženim modelom ostvareno je istovremeno poboljšanje točnosti položaja osi x (14,26 cm/3,87 %), poboljšanje točnosti osi z (7,56 cm/1,84 %) dok je istovremeno degradirana točnost položaja osi y (-0,75 cm/-0,32 %). Promatrajući istovremeno odnose poboljšanja i degradacije točnosti ukupnog položaja, vidljivo je da je ostvareno ukupno poboljšanje točnosti položaja. Navedeni rezultati srednje kvadratne greške ostvarene postojećim Saastamoinenovim i predloženim modelom prikazani su na Slici 6.2. (a) i (b). Grafovi parametara medijana i standardne devijacije prikazani su Prilogu B.



Slika 6.2.: Usporedba ostvarenih iznosa srednje kvadratne greške za Čakovec u 2014. (a) i 2015. (b) godini

Ulazne vrijednosti apsolutnih iznosa korekcije troposferskog kašnjenja generirane predloženim modelom po pojedinim osima za postaju u Čakovcu u promatranom razdoblju prikazane su u Tablici 6.3.

Tablica 6.3.: Apsolutne vrijednosti korekcija ostvarenih predloženim modelom za postaju u Čakovcu

Iznosi korekcije predloženog modela (m)				
		D X	D Y	D Z
2014.	Max	1,69333319	-0,13524813	-0,31703812
	Min	-0,64968074	-0,17664432	-0,71152456
2015.	Max	1,61088222	-0,12884981	-0,35744625
	Min	-0,85180084	-0,18102236	-0,75545367

Vidljivo je da predloženi model generira negativne vrijednosti korekcije troposferske greške u cijelosti za 2014. i 2015. godinu za koordinatne osi y i z , a za os x ostvarene su korekcije u rasponu od -0,64 do 1,69 m (za obje godine). Apsolutni iznosi korekcija kreću se od 0,04 m (os y u 2014. godini) do 2,46 (os x u 2015. godini).

6.1.2. Parametri točnosti položaja za postaju u Zadru, 2014. i 2015. godina

Tablice 6.4. i 6.5. prikazuju ostvarenu točnost GLONASS-ovih položaja GNSS-ove postaje u Zadru u razdoblju verifikacije 2014. i 2015. godine.

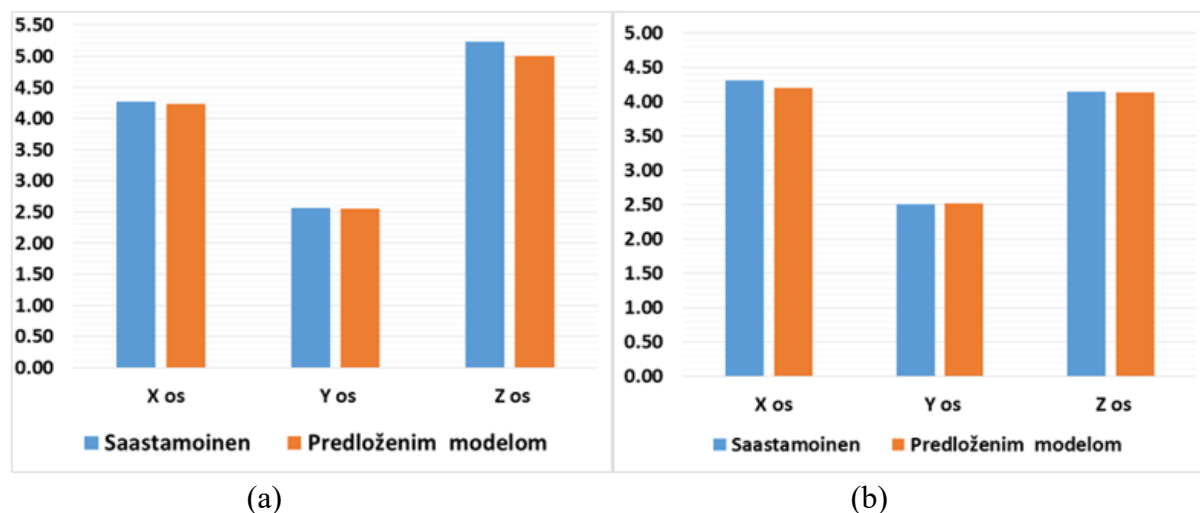
Tablica 6.4.: Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Zadru, 2014. godina

	Položaj postojećim Saast. modelom (m)			Položaj predloženim modelom P_{Si} (m)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	D X	D Y	D Z
Max	24,00748	14,92447	43,55147	23,98748	15,07051	43,99549
Min	-68,8146	-28,2622	-69,9788	-69,1457	-28,0937	-69,4375
RMS	4,26663	2,56564	5,23592	4,23327	2,55602	5,00875
St. dev.	4,25709	2,55415	4,73781	4,23271	2,55447	4,73788
Median	0,28439	-0,27942	-2,12906	0,07670	-0,12453	-1,52017
3. kvartil	3,06276	1,29124	0,75995	2,84876	1,44596	1,35862
1. kvartil	-2,44933	-1,77079	-5,11139	-2,64047	-1,61695	-4,50220
raspon	5,51210	3,06204	5,87134	5,48923	3,06291	5,86082

Tablica 6.5: Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Zadru, 2015. godina

	Položaj postojećim Saast. modelom (m)			Položaj predloženim modelom P _{Si} (m)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	D X	D Y	D Z
Max	31,53612	16,82090	25,55032	31,41088	16,97125	25,97807
Min	-50,77795	-20,13467	-37,99012	-50,93706	-19,98811	-37,36530
RMS	4,31245	2,50501	4,14783	4,23327	2,52154	4,13307
St. dev.	3,83699	2,49818	4,13005	3,80916	2,49852	4,12776
Median	2,05127	0,10514	-0,37209	1,85945	0,26011	0,21961
3. kvartil	4,53065	1,70834	2,36754	4,32927	1,86254	2,96380
1. kvartil	-0,53164	-1,41505	-3,11810	-0,71216	-1,26163	-2,52723
raspon	5,06230	3,12339	5,48565	5,04144	3,12417	5,49103

Usporedba parametara pokazuje da predloženi model nije značajnije utjecao na smanjenje krajnjih vrijednosti odstupanja te je raspon vrijednosti minimuma i maksimuma ostao približno jednak. S druge strane, primjetna je promjena vrijednosti grupiranja frekvencija mjerenja za 2014. godinu u svim koordinatnim osima. Za 2015. godinu ostvaren je pozitivan pomak medijana za osi x i z , a za os y zabilježeno je dodatno udaljavanje od nulte vrijednosti (0,26 m prema 0,10 m). Rezultati za 2014. godinu pokazuju ostvareno poboljšanje točnosti srednje kvadratne greške položaja istovremeno za sve osi (Slika 6.3 (a)).



Slika 6.3: Usporedba ostvarenih iznosa srednje kvadratne greške za Zadar u 2014. (a) i 2015. (b) godini

Ostvarena su poboljšanja točnosti za os x (3,33 cm/0,78 %), os y (0,9 cm/0,37 %) i os z (22,71 cm/4,33 %). Istovremeno je poboljššan i parametar standardne devijacije za os x , a vrijednost je standardne devijacije smanjena za os y (-0,03 cm/ -0,01 %) te za os z (-0,006 cm/-0,001 %). Za 2015. godinu rezultati ostvareni predviđenim modelom pokazuju poboljšanje srednje kvadratne

greške u osi x (11,21 cm/2,6 %) i osi z (1,45 cm/0,35 %), a u osi y zabilježeno je smanjivanje srednje kvadratne greške (-1,65 cm/-0,65 %), što je prikazano na Slici 6.3. (b). Ista je tendencija prisutna i u parametra standardne devijacije: osi x i z ostvarile su poboljšanja, a u osi y zabilježena je degradacija vrijednosti standardne devijacije (-0,03 cm/-0,01 %).

Vrijednosti apsolutnog iznosa korekcije troposferskog kašnjenja predloženim modelom po pojedinim osima za postaju u Zadru u promatranom razdoblju prikazani su u Tablici 6.6.

Tablica 6.6.: Apsolutne vrijednosti korekcija ostvarenih predloženim modelom za postaju u Zadru

Iznosi korekcije predloženog modela (m)				
		D X	D Y	D Z
2014.	Max	-0,678258606	-0,17945013	-0,80546779
	Min	0,908608077	-0,12435666	-0,29145924
2015.	Max	-0,855004798	-0,18040006	-0,86628201
	Min	0,888369819	-0,11664904	-0,28102617

U vrijednostima generiranih korekcija za GNSS-ovu postaju u Zadru također je vidljivo to da su one negativne za osi y i z u promatranom periodu, a za os x u rasponu su od -0,85 do 0,9 metara. Apsolutni iznosi raspona korekcija kreću se od 0,055 m (os y u 2014. godini) do 1,74 m (os x u 2015. godini).

6.1.3. Parametri točnosti položaja za postaju u Dubrovniku, 2014. i 2015. godina

Rezultati usporedbe parametara točnosti ostvarenih predloženim modelom i postojećim Saastamoinenovim modelom za GNSS-ovu postaju u Dubrovniku u 2014. i 2015. godini prikazani su u Tablicama 6.7. i 6.8.

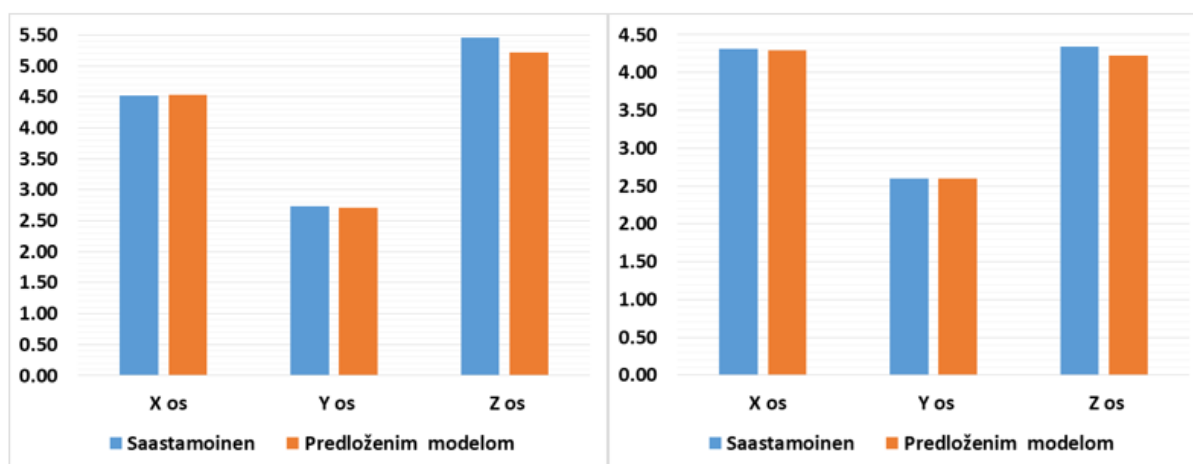
Tablica 6.7.: Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Dubrovniku za 2014. godinu

	Položaj postojećim Saast. modelom (m)			Položaj predloženim modelom P_{Si} (m)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	D X	D Y	D Z
Max	56,47126	43,66021	66,97587	56,23846	43,82038	67,51907
Min	-40,47070	-34,88867	-49,83357	-41,07709	-34,73307	-49,26452
RMS	4,51926	2,73622	5,45763	4,53283	2,71104	5,21889
St. dev.	4,51498	2,68772	4,79690	4,49715	2,68776	4,79818
Median	-0,17653	-0,45578	-2,42416	-0,54265	-0,29714	1,86714
3. kvartil	2,71615	1,20747	0,52221	2,32479	1,36576	1,07935
1. kvartil	-3,09952	-2,11378	-5,59028	-3,43955	-1,95655	5,03894
raspon	5,81567	3,32125	6,11249	5,76434	3,32231	6,11830

Tablica 6.8.: Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Dubrovniku za 2015. godinu

	Položaj postojećim Saast. modelom (m)			Položaj predloženim modelom P _{Si} (m)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	D X	D Y	D Z
Max	47,84765	13,00695	24,05125	47,52519	13,18442	24,49455
Min	-28,60660	-21,63082	-21,45625	-29,16711	-21,45838	-20,92203
RMS	4,31366	2,60205	4,3377	4,29133	2,59861	4,22613
St. dev.	4,18086	2,59819	4,185	4,17586	2,59855	4,18645
Median	1.13443	-0.12022	1.09661	1,04752	0,03850	-0,53850
3. kvartil	3.74559	1.42488	1.62721	3,67675	1,58521	2,18656
1. kvartil	-1.60748	-1.67909	-3.84251	-1,67541	-1,51940	-3,27252
raspon	5.35307	3.10397	5.46973	5,35216	3,10461	5,45908

Analiza prikazanih parametara točnosti pokazuje da za os x u 2014. godini predloženi model doprinosi pogoršanju srednje kvadratne greške (-1,35 cm/-0,3 %) dok istovremeno poboljšava točnost ostalih dviju osi: poboljšanju srednje kvadratne greške u osi y (2,5 cm/ 0,92 %) te posebno u osi z (23,87 cm/4,37 %), što je prikazano na Slici 6.4. (a).



(a)

(b)

Slika 6.4.: Usporedba ostvarenih iznosa srednje kvadratne greške za Dubrovnik u 2014. (a) i 2015. (b) godini

Kao i u prethodnim dvama promatranim položajima, nije došlo do značajnije promjene vrijednosti raspona ekstremnih odstupanja. Ostvareno poboljšanje točnosti promatrano parametrom median u 2014. godini prisutno je u osi y i z , a za os x zabilježeno je povećanje odstupanja (s -0,17 m na 0,54 m). Parametar standardne devijacije poboljššan je u osi x (1,78 cm/0,39 %), a pogoršan je u y osi (-0,004 cm/-0,001 %) i osi z (-0,12 cm/-0,02 %).

Za 2015. godinu (Slika 6.4. (b)) predloženi model ostvaruje poboljšanje točnosti (parametrom srednje kvadratne greške) u osi x (2,2 cm/0,57 %), osi y (0,3 cm/0,13 %) i u osi z (11,15 cm/2,52 %). Pritom je poboljšana i vrijednost standardne devijacije u osi x , a smanjena je u osi y (-0,03 cm/-0,01 %) te u osi z (-0,14 cm/-0,03 %). Istovremeno su ostvareni pomaci vrijednosti medijana prema centralnoj vrijednosti za sve osi, pri čemu se ističu ostvareni pomaci u osi y (s -1,679 na 0,03 m) i osi z (s -3,84 na -0,53 m).

Vrijednosti korekcija generiranih predloženim modelom za postaju u Dubrovniku za promatrani period prikazane su u apsolutnim iznosima u Tablici 6.9.

Tablica 6.9.: Apsolutne vrijednosti korekcija ostvarenih predloženim modelom za postaju u Dubrovniku za period u 2014. i 2015. godini

Iznosi korekcije predloženog modela (m)				
		D X	D Y	D Z
2014.	Max	1,69333319	-0,13524813	-0,36341397
	Min	-0,64968074	-0,18241407	-0,71152455
2015.	Max	0,80997517	-0,11809400	-0,29821588
	Min	-0,96322010	-0,18245740	-0,82675986

Prikazane vrijednosti pokazuju da model generira negativne iznose korekcije za osi y i z u promatranome dvogodišnjem razdoblju, a za os x generira vrijednosti unutar granica od -0,96 m do 1,69 m. Vrijednosti apsolutnih iznosa raspona korekcija jesu od 0,047 m (os y u 2014. godini) do 2,33 m (os x u 2014. godini).

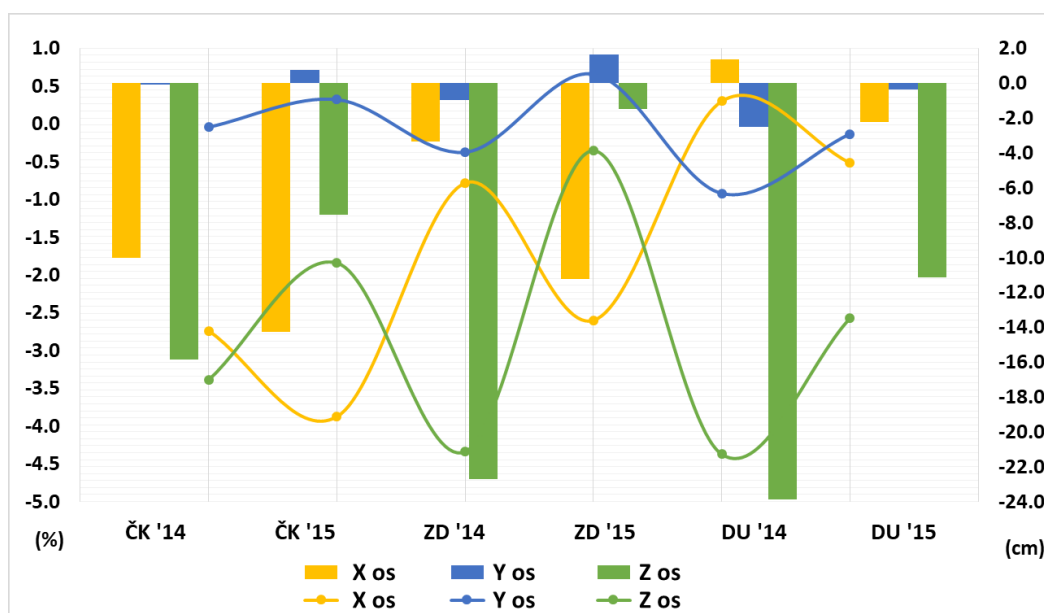
Zbirni rezultati provedenog postupka verifikacije za promatrane lokacije prikazani su u Tablici 6.10. Tablica sadrži podatke ostvarene usporedbom parametara srednje kvadratne greške i standardne devijacije ostvarenih Saastamoinenovim i predloženim modelom za sve promatrane lokacije unutar promatranog vremenskog okvira. Cjelovitiji prikazi točnosti odstupanja promatranih položaja ostvarenih Saastamoinenovim i predloženim modelom nalaze se u Prilogu C.

Tablica 6.10.: Ukupni rezultati vrijednosti srednje kvadratne greške i standardne devijacije ostvarenih predloženim modelom

Položaj, godina	Pomak srednje kvadratne greške i st. devijacije	os x		os y		os z	
		[%]	[cm]	[%]	[cm]	[%]	[cm]
	RMS	-2,7395	-10,0433	-0,0424	-0,0945	-3,3893	-15,851

Čakovec, 2014.	St. dev.	-1,1188	-4,0209	0,0146	0,0336	-0,0752	-0,3311
Čakovec, 2015.	RMS	-3,8751	-14,2674	0,3220	0,7581	-1,8409	-7,5696
	St. dev.	-0,8275	-2,8673	0,0070	0,0160	-0,0478	-0,1924
Zadar, 2014.	RMS	-0,7817	-3,3350	-0,3747	-0,9620	-4,3387	-22,717
	St. dev.	-0,5728	-2,4384	0,0125	0,0313	0,0014	0,0065
Zadar, 2015.	RMS	-2,6005	-11,2144	0,6598	1,6523	-0,3558	-1,4758
	St. dev.	-0,7254	-2,7833	0,0135	0,0332	-0,0555	-0,2290
Dubrovnik, 2014.	RMS	0,3002	1,3569	-0,9201	-2,5182	-4,3743	-23,873
	St. dev.	-0,3950	-1,7835	0,0017	0,0041	0,0267	0,1278
Dubrovnik, 2015.	RMS	-0,5174	-2,2321	-0,1321	-0,3438	-2,5721	-11,156
	St. dev.	-0,1196	-0,5001	0,0140	0,0364	0,0346	0,1448

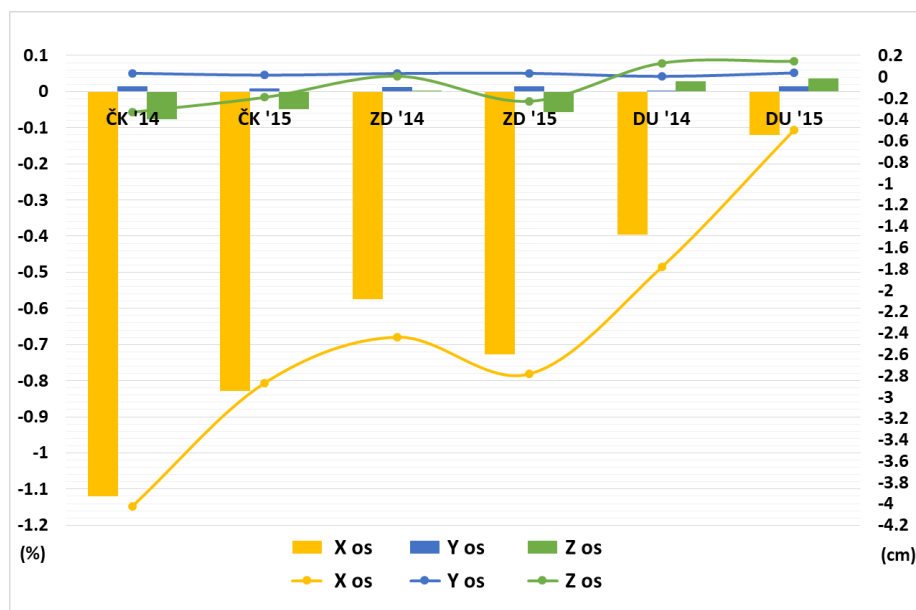
Pozitivni iznosi označavaju povećanje vrijednosti srednje kvadratne greške i standardne devijacije, tj. ostvareno smanjivanje točnosti položaja, a negativni iznosi predstavljaju smanjenje navedenih statističkih parametara i time poboljšanje točnosti položaja. Grafički rezultati prikazani su na slikama 6.5. i 6.6., pri čemu krivulja predstavlja relativnu vrijednost (u postotcima), a stupci apsolutni iznos (u cm). Negativne vrijednosti u grafu označavaju smanjenje greške točnosti položaja, odnosno pozitivni doprinos točnosti položaja.



Slika 6.5.: Kretanje parametra srednje kvadratne greške promatranih lokacija, izraženo u apsolutnim i relativnim iznosima

Prikazani rezultati srednje kvadratne greške kao ključnog parametra uspješnosti pokazuju da predloženi model poboljšava ukupnu točnost promatranih položaja. Položajna odstupanja osi x smanjuju se u pet mjerenja, pri čemu se istovremeno smanjuju odstupanja u osi y te posebno u

osi z (Dubrovnik, 2014. godina). Model za os y ostvaruje smanjenje odstupanja u četirima mjerenjima, pri čemu je u preostalim mjerenjima u kojih je došlo do povećanja odstupanja (Čakovec, 2014. godina i Zadar, 2015. godina) ostvareno višestruko poboljšanje točnosti položaja po drugoj horizontalnoj osi x uz ostvareno poboljšanje i po vertikalnoj osi z. Rezultat modela time je značajniji jer je poznato da je visinska komponenta GNSS-ova položaja najpodložnija sistemskim greškama: neodgovarajućem prostornom rasporedu satelita, greškama orbite i sata te atmosferskim turbulencijama, posebno varijacijama atmosferskog tlaka [70].



Slika 6.6.: Kretanje parametra standardne devijacije promatranih lokacija izraženo u apsolutnim i relativnim iznosima

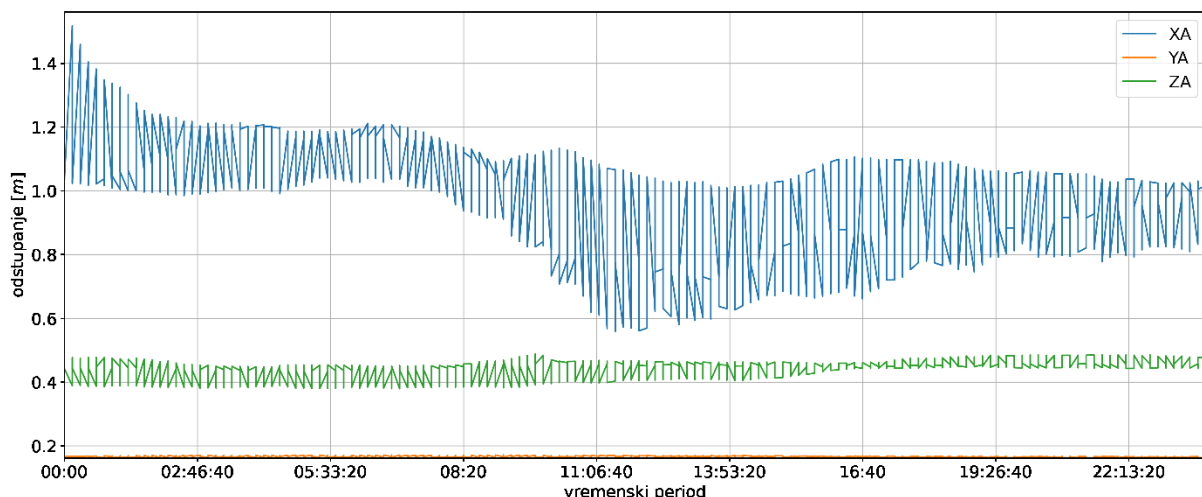
Dodatni razlog značaja modela za os y leži u tome što je rezultat ostvaren optimizacijom modela koji, premda statistički značajan, sadrži pojedine statistički neznačajne prediktore. Time model, promatrajući promjenjivost nezavisnih prediktora modela i izlaznih zavisnih varijablā, predstavlja višedimenzionalan teorijski raspored čiji stupanj točnosti nije istovjetan stupnju točnosti empirijskog modela. Stupanj njihove podudarnosti ovisi o stupnju međusobne usuglašenosti empirijskog zakona i zakona teorijskog rasporeda [134], što se očituje u različitom stupnju uspješnosti modela za osi x i z, ali i u činjenici da je moguće ostvariti prikladan model za os y sa zadovoljavajućim stupnjem uspješnosti.

Rezultati ostvarenih vrijednosti standardne varijacije kao mjere varijabiliteta ostvarenih rezultata polovične su; ostvareno je poboljšanje u devet mjerenja, a lošiji su rezultati ostvareni u ostalih devet mjerenja. Pritom je važno istaknuti da, premda nominalno lošiji od vrijednosti

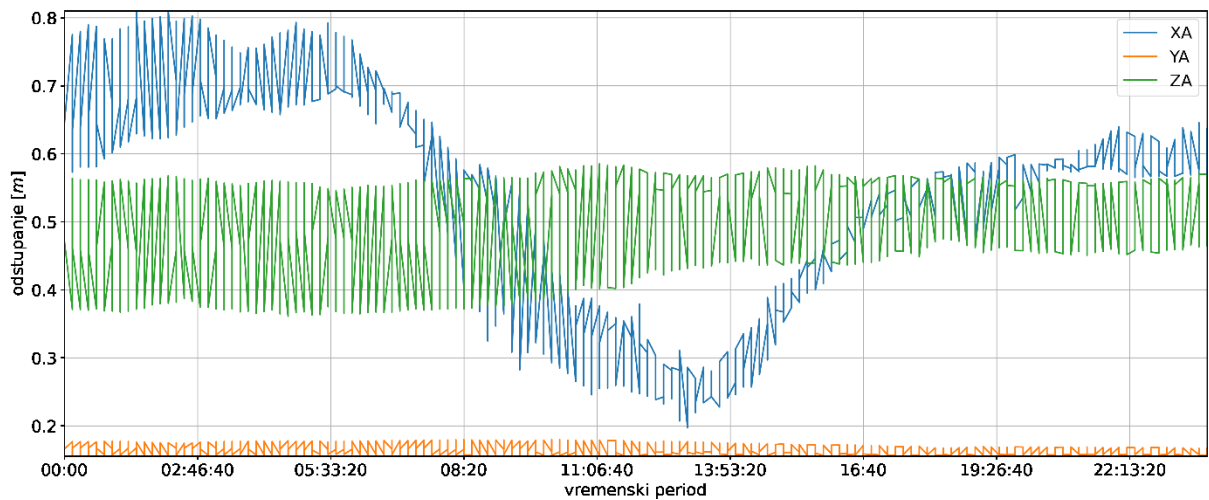
standardne devijacije ostvarene Saastamoinenovim modelom, apsolutni iznosi ostvarenih lošijih rezultata u granicama su od 0,0014 do 0,1448 cm. Uzevši u obzir navedene iznose, dobiveni lošiji rezultati mogu se zanemariti u daljnjoj interpretaciji rezultata i procjeni uspješnosti.

6.2. Dodatne osobine kretanja točnosti predloženog modela

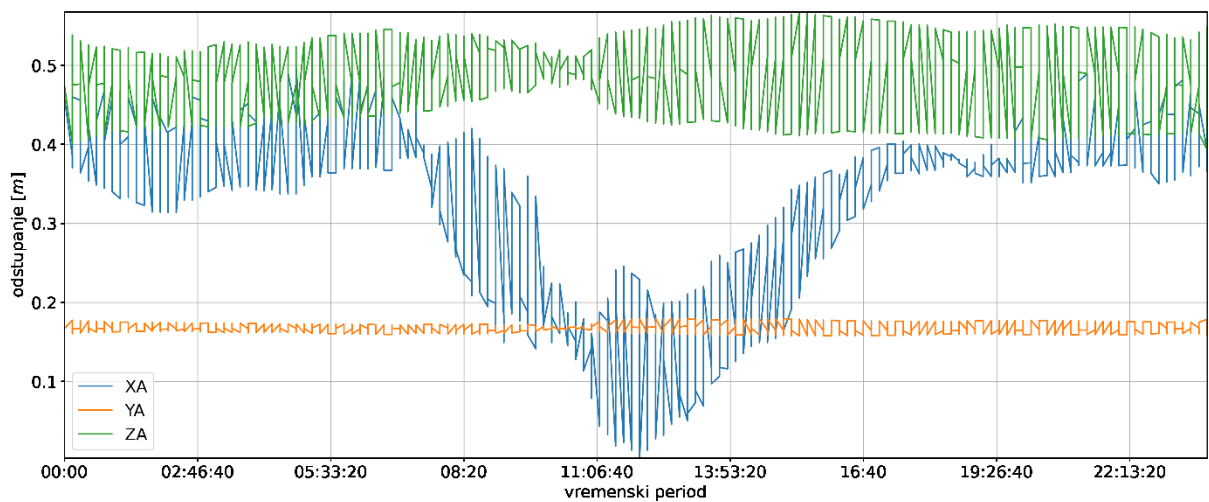
Osim ukupne točnosti promatranih položaja u navedenom razdoblju, istraživanje je uključilo i promatranje hoda troposferske greške. Budući da ovisi o atmosferskim parametrima (uz kut elevacije), predmet istraživanja predstavljaju ne samo kvantitativna svojstva troposferske greške već i njezina kvalitativna obilježja. Predloženim je modelom demonstrirana mogućnost kvantitativnog utjecaja na dodatno smanjivanje troposferske greške (uz određena ograničenja), ali je nije moguće izbjeći. Iako je, temeljeći se na prirodnim uzrocima, troposferska greška pojava stohastičke naravi, dodatni je predmet istraživanja i vremenska dinamika troposferske greške, pri čemu se promatra njezin hod u različitim vremenskim intervalima s ciljem ustanovljenja cikličke zakonitosti kretanja. Rezultati, prikazani na seriji slika od 6.7. do 6.21., ostvareni su bilježenjem kretanja razlika apsolutnih vrijednosti troposferskog odstupanja korištenjem Saastamoinenova i predloženog modela za svaku položajnu os. Kretanja su prikazana u trodnevnom uzorku (slike od 6.7 do 6.12.) i godišnjem uzorku (slike od 6.13. do 6.15.). Cjelovitiji prikaz hoda razlike apsolutnih odstupanja nalazi se u Prilogu D.



Slika 6.7.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Čakovcu 1. – 3. siječnja 2015. godine

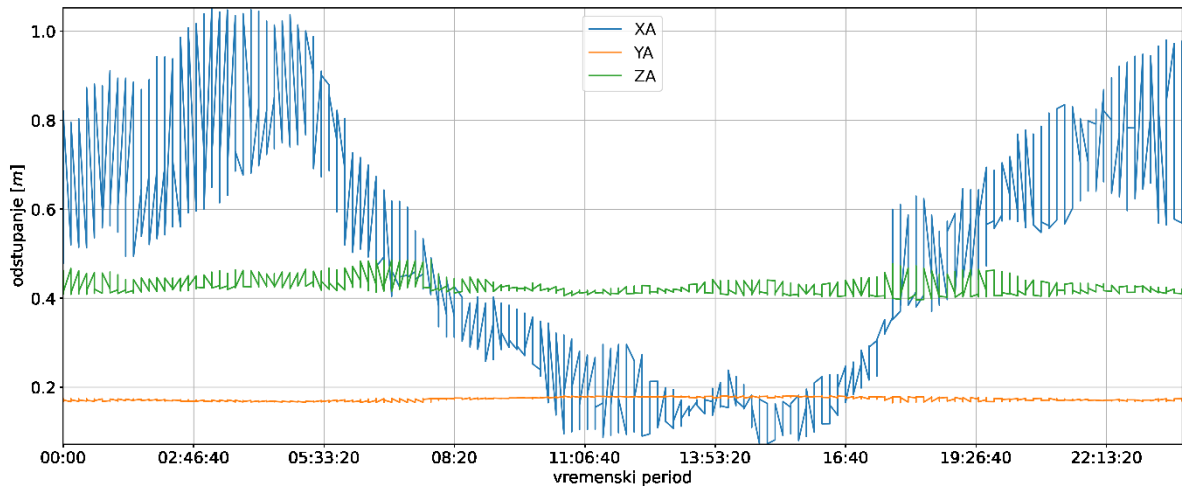


Slika 6.8.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Zadru 1. – 3. siječnja 2015. godine

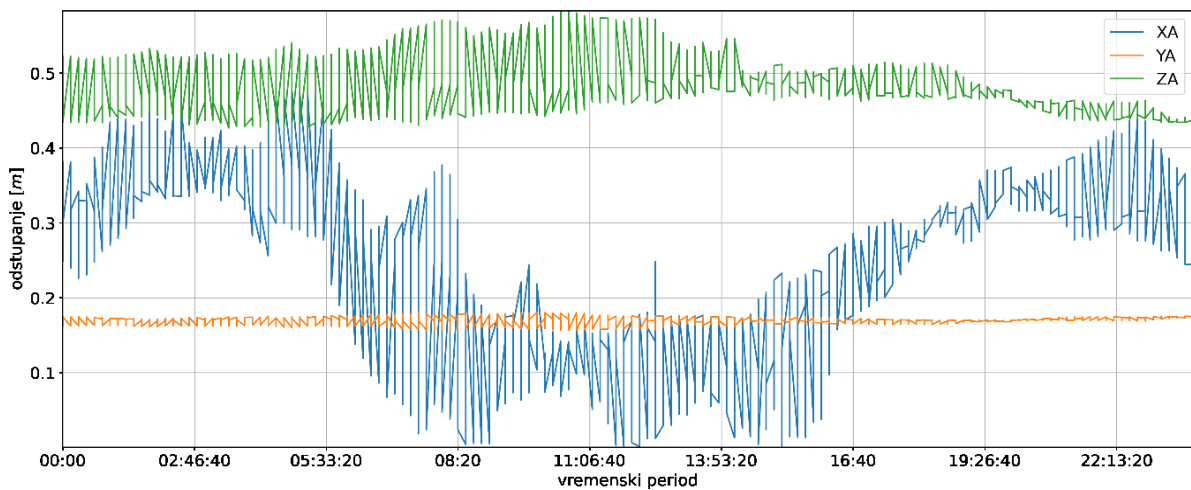


Slika 6.9.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Dubrovniku 2. – 4. siječnja 2015. godine

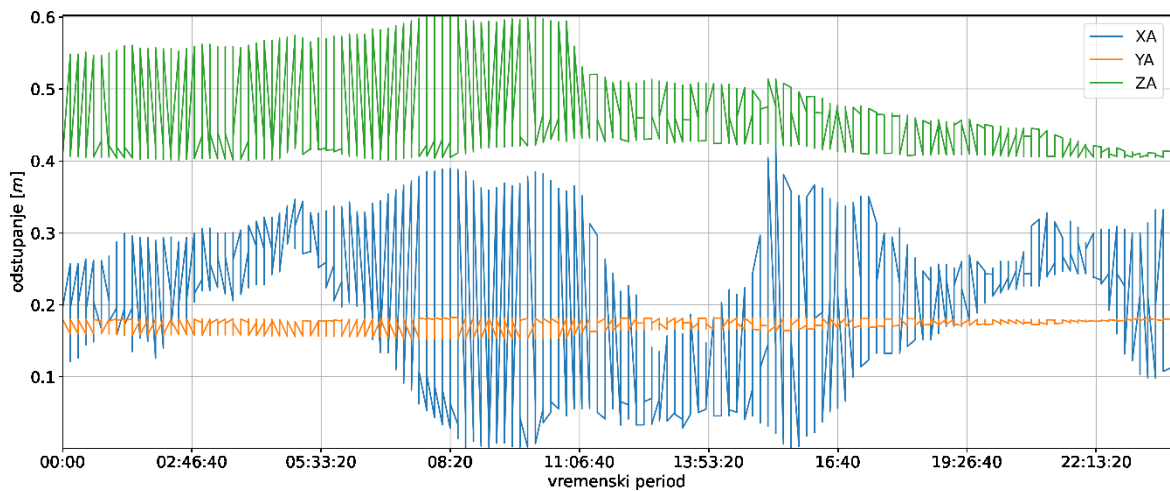
Na prikazanim slikama (uključujući i Prilog D) siječanjskog uzorka uočava se periodična zakonitost dnevnog hoda troposferske greške koja je po apsolutnom iznosu veća tijekom noćnog perioda te se smanjuje tijekom dana. U apsolutnom iznosu najveće vrijednosti ostvaruju u horizontalnoj ravnini položaja po osi x te potom po osi y . Vrijednosti oscilacija po vertikalnoj osi z najmanja su tijekom prikazanih zimskih perioda.



Slika 6.10.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Čakovcu 1. – 3. travnja 2015. godine



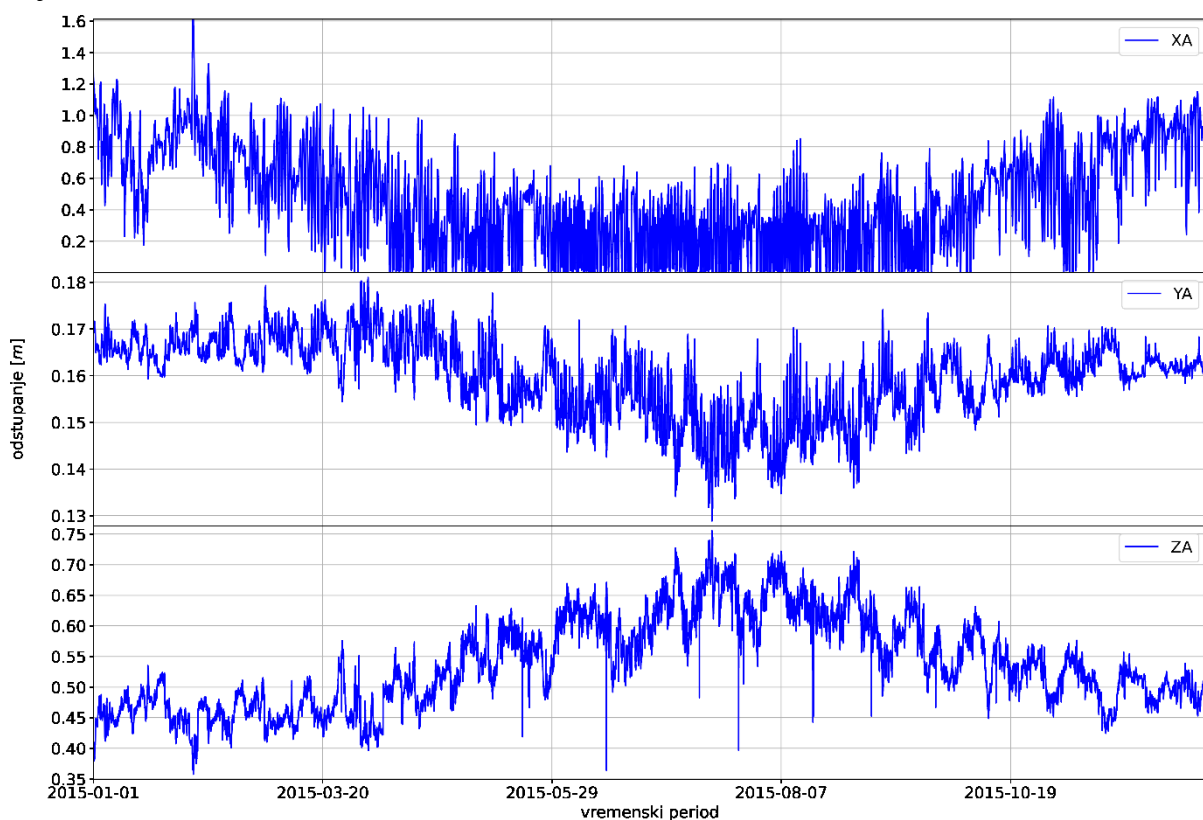
Slika 6.11.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Zadru 1. – 3. travnja 2015. godine



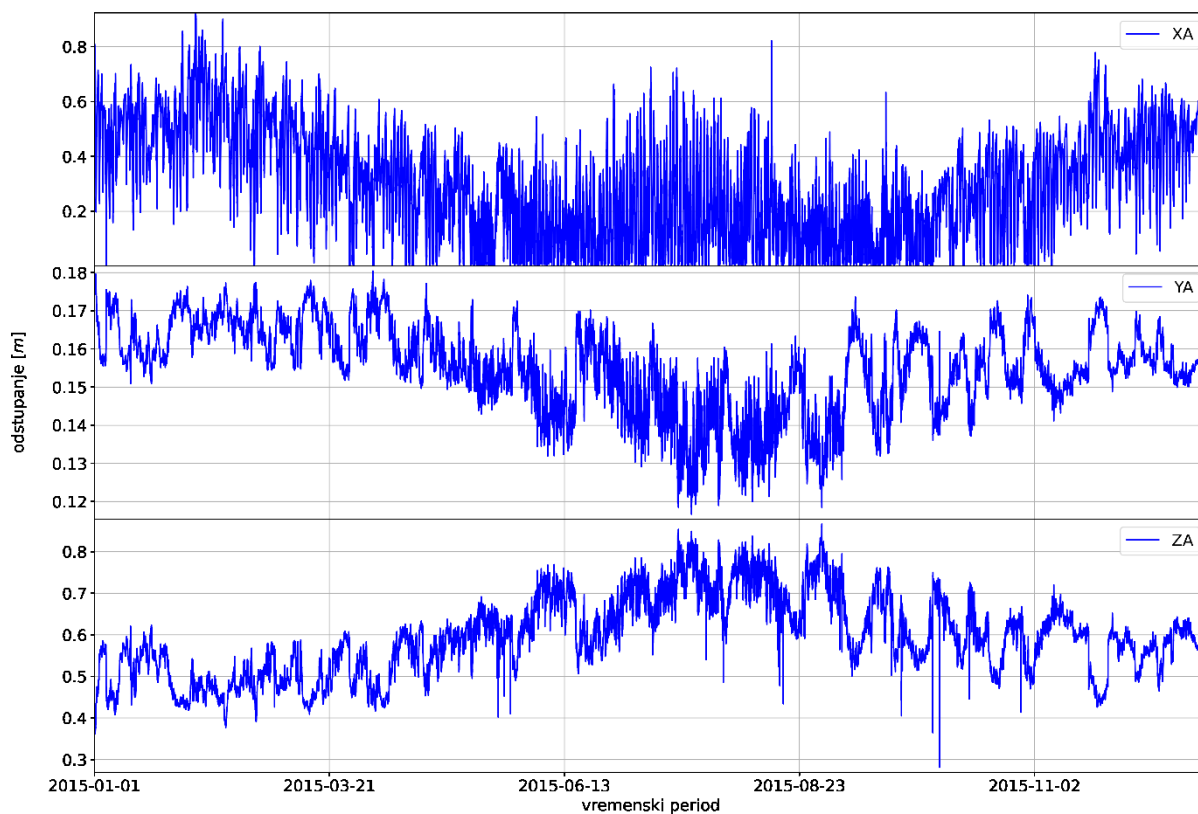
Slika 6.12.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Dubrovniku 1. – 3. travnja 2015. godine

Tendencija je izraženija u periodu zime, proljeća i jeseni, a srpanjske su oscilacije izraženije tijekom dana te mogu imati veća odstupanja nego tijekom noćnog perioda. Vidljivo je da se najveća kretanja razlike apsolutnih odstupanja ostvaruju po osi x , a os y ima značajno manja kretanja odstupanja. Os z pokazuje dnevnu stabilnost. Pažljivijim promatranjem kretanja odstupanja uočava se usklađenost razlike apsolutnih odstupanja po svim osima, pri čemu po osi x uz značajnije promjene apsolutnog iznosa odstupanja ostvaruju i značajnu unutarnju varijaciju. Po osima y i z razlika apsolutnih odstupanja ostvaruje približno istu dnevnu nominalnu vrijednost odstupanja, pri čemu se uočava prisutna međusobna usklađenost iznosa varijacija odstupanja po objema osima.

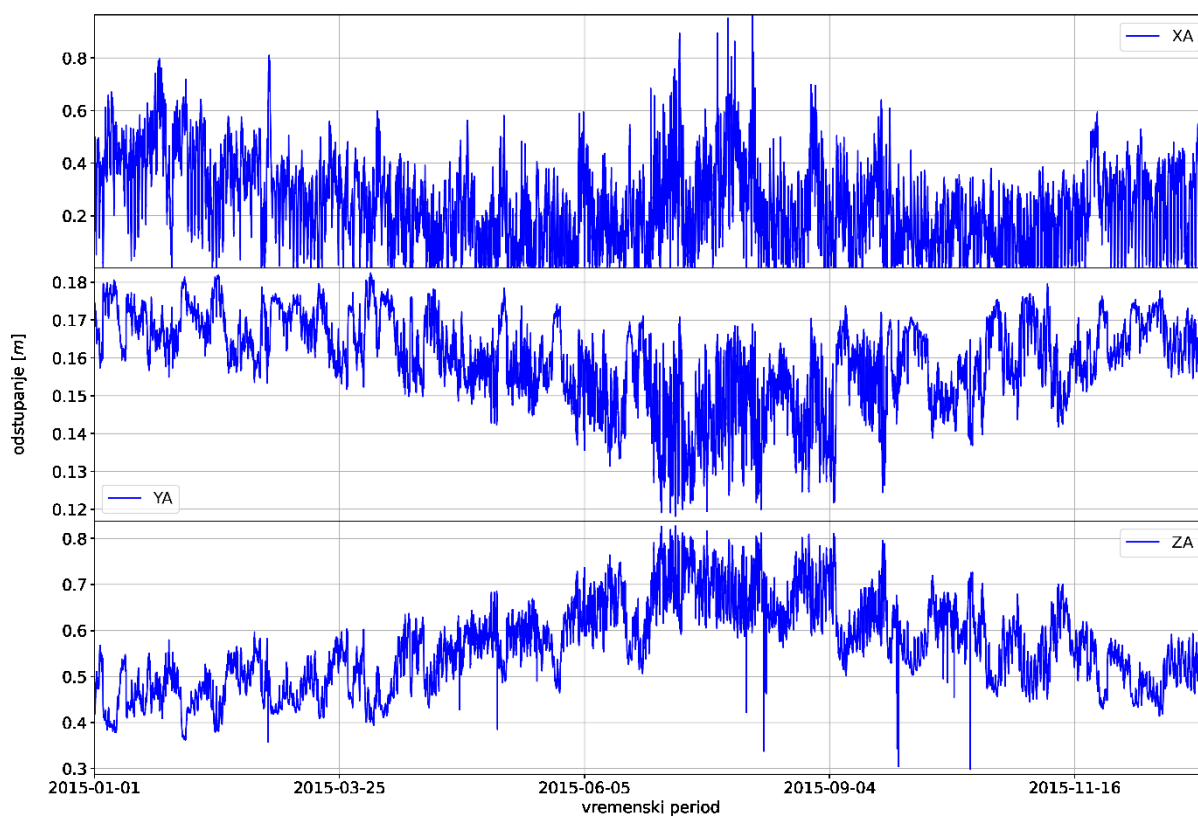
Za promatranje dnevnog satnog hoda trodnevni je interval optimalan period s obzirom na grafički prikaz. Sezonska i godišnja periodičnost uočavaju se unutar mjesečnog i godišnjeg promatranog intervala, što je prikazano na idućim slikama te dodatno u Prilogu D. Grafovi sadrže istovremeni prikaz razlika apsolutnih odstupanja točnosti položaja ostvarenih predloženim i Saastamoinenovim modelom za sve osi. Vrijednost za os x prikazana je na vrhu grafa, srednji dio grafa prikazuje vrijednosti za os y , a zadnji dio grafa prikazuje ostvarene vrijednosti za os z .



Slika 6.13.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svim osima za postaju u Čakovcu u 2015. godini



Slika 6.14.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svim osima za postaju u Zadru u 2015. godini



Slika 6.15.: Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svim osima za postaju u Dubrovniku u 2015. godini

Prikazani godišnji hodovi razlike apsolutnih odstupanja točnosti položaja jasno upućuju na sezonski karakter troposferske greške. Po osi x razlika apsolutnih odstupanja tipično ostvaruje maksimum u zimskim mjesecima, s time da gornje vrijednosti odstupanja može imati i u kasnijim periodima proljeća ili jeseni, odnosno i ljeti u slučaju pojave klimatološkog odstupanja za navedena godišnja doba.

Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po osi y znatno je uniformiranije; minimalna odstupanja u pravilu se ostvaruju sredinom godine tijekom ljetnog perioda, a najveća se odstupanja javljaju u periodu od prosinca do proljeća. Kretanje razlike apsolutnih odstupanja po osi z također pokazuje jasan obrazac, pri čemu ostvaruje jedan lokalni maksimum sredinom ljeta na svim promatranim lokacijama, uz nesimetričan hod u jesenskom i proljetnom periodu.

Povezanost razlike apsolutnih odstupanja po osima y i z pokazuje da je sustav (satelitski navigacijski sustav GLONASS promatran preko ostvarenog parametra točnosti položaja s obzirom na učinak zenitne komponente troposferskog kašnjenja) ostvario stanje *statističke ravnoteže*. Da bi se točno opisalo postignuto stanje statističke ravnoteže, potrebno je poznavati međusobnu povezanost i pretvorbu Kartezijevih (engl. *Cartesian*) pravokutnih i geografskih koordinata. Pretvaranje geografskih koordinata u Kartezijeve prikazano je izrazima [136]:

$$X = \frac{a \cos \varphi \cdot \cos \lambda}{(1 - e l^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{0,5}} \quad (6.5)$$

$$Y = \frac{a \cos \varphi \cdot \sin \lambda}{(1 - e l^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{0,5}} \quad (6.6)$$

$$Z = \frac{a(1 - e^2) \cdot \sin \varphi}{(1 - e l^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{0,5}} \quad (6.7)$$

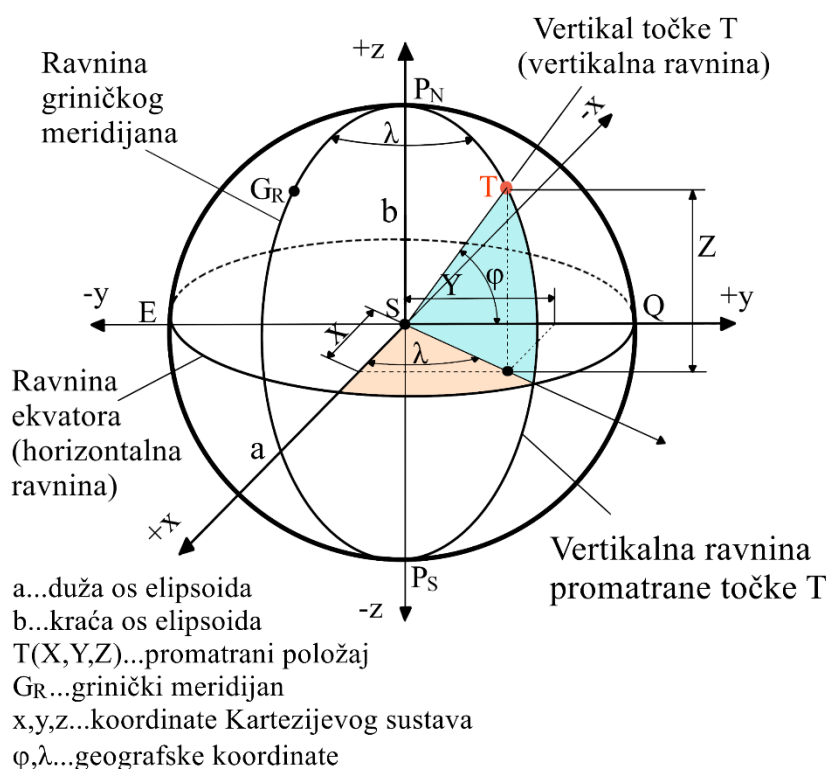
pri čemu je: X, Y i Z ...koordinate Kartezijeva koordinatnog sustava, $e l^2$...prvi numerički ekscentricitet elipsoida, a ...ekvatorska (duža) poluos referentnog elipsoida.

Iz navedenih izraza vidljivo je da su X i Y koordinate vezane za horizontalnu ravninu (geografske koordinate φ i λ), a koordinata Z vezana je za vertikalnu ravninu (geografska koordinata φ), čime su formirane dvije ravnine koje određuju prostor unutar kojeg se nalazi promatrani položaj. Sukladno se obavlja i pretvaranje Kartezijevih koordinata u geografske:

$$\varphi = \arctg \frac{Z}{(1 - e l^2)(x^2 + y^2)^{0,5}} \quad (6.8)$$

$$\lambda = \arctg \frac{X}{Y} \quad (6.9)$$

Geografska koordinata φ povezana je sa svim trima Kartezijevim koordinatama, a koordinata λ povezana je samo s Kartezijevim koordinatama X i Y . Prikazani izrazi pokazuju da je geografska koordinata zemljopisne dužine λ položena (leži) sukladno koordinatnoj osi x u horizontalnoj ravnini, a geografska koordinata zemljopisne širine φ položena je sukladno koordinatnoj osi y u horizontalnoj ravnini. Geografska koordinata Z u funkciji je zemljopisne širine te je samostalno položena u vertikalnoj ravnini, što je zajednički prikazano na Slici 6.16.



Slika 6.16: Kartezijev koordinatni sustav s prikazom geografskih koordinata

Veza između geografskih i Kartezijevih koordinata koje se odnose na meridijansku elipsnu vezu prikazana je izrazima [136]:

$$x = \frac{a \cos \varphi}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{0,5}} \quad (6.10)$$

$$y = \frac{a(1 - e^2) \cdot \sin \varphi}{(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi)^{0,5}} \quad (6.11)$$

Prvi numerički ekscentricitet elipsoida računa se po izrazu:

$$el^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (6.12)$$

gdje je b ...meridijanska (kraća) poluos referentnog elipsoida.

Ostvarena povezanost statističke ravnoteže točnosti položaja i utjecaja zenitne komponente troposferskog kašnjenja manifestira se u vertikalnoj ravnini u smjeru osi z (s obzirom na povezanost sa zenitnim kutom dolaznog radionavigacijskog signala) te istovremeno i u horizontalnoj ravnini u smjeru osi y . Budući da je vertikalna ravnina definirana osima y i z , postignuto stanje statističke ravnoteže položaja iskazuje povezanosti kretanja točnosti položaja na način da povećanje odstupanja po osi y prati smanjivanje odstupanja po osi z i obrnuto.

Prikazani grafovi pokazuju statističku ravnotežu promatranih položaja u prostoru. Osnova je polučene statističke ravnoteže promatrane stohastičke pojave oscilacija odstupanja oko centralnih vrijednosti za svaku koordinatnu os. U horizontalnoj ravnini odstupanje po osi x pokazuje izvjestan stupanj proporcionalne povezanosti s vrijednošću ostvarene po osi y . Istovremena odstupanja po osima y i z iskazuju snažnu međusobnu povezanost ostvarenu vertikalnom ravninom koju zajednički definiraju unutar promatranog prostora ishodišne točke. Sukladno izrazima (6.5. – 6.9.) može se smatrati da ostvarenu statističku ravnotežu položaja odlikuje svojstvo projekcije s obzirom na osi vertikalne ravnine y i z .

Dobiveni rezultati pokazuju da je satelitski navigacijski sustav GLONASS (ostvarena točnost položaja s obzirom na učinak promatrane zenitne komponente troposferskog kašnjenja) ostvario stanje statističke ravnoteže. Ona je posljedica stohastičke prirode promatranog procesa te je njome iskazana vjerojatnost raspršenja korisničkog položaja određenog navigacijskim sustavom GLONASS. Dobiveni položaji u funkciji su zenitne komponente troposferskog kašnjenja određenog Saastamoinenovim modelom. Budući da je proces verifikacije proveden unutar dvogodišnjeg perioda na trima mjernim položajima, frekvencija ostvarenih mjerenja pokazala je da su se odstupanja ustalila unutar stabilnih graničnih vrijednosti. Svojstvo tehničkih sustava jest to da se, nakon određenog perioda, njihovi promatrani parametri ustale oko svojstvene centralne nominalne vrijednosti s postojanim oscilacijama. Sukladno prikazanim rezultatima, vidljivo je da je predloženi model pridonio smanjenju oscilacija točnosti trodimenzionalnog položaja oko centralnih vrijednosti odstupanja. Time je dokazana korelacija promatranih meteoroloških ulaznih parametara i utjecaja zenitne komponente troposferske greške iskazane predloženim modelom, predloženom ostvarenim rezultatima

mjerenja. Prosječne vrijednosti ostvarenih razlika apsolutnih odstupanja točnosti za promatrane lokacije prikazane su u Tablici 6.11.

Tablica 6.11.: Prosječne vrijednosti razlika apsolutnog odstupanja točnosti promatranih lokacija

Lokacija/period		x os [m]	y os [m]	z os [m]
DU	2014	0,414036	0,158408	0,550085
	2015	0,243923	0,15957	0,563009
ČK	2014	0,476642	0,158714	0,543839
	2015	0,484809	0,159731	0,538353
ZD	2014	0,262726	0,153436	0,604071
	2015	0,303265	0,155099	0,592975

Ostvareni rezultati pokazuju ispravnost postavljenih dodatnih hipoteza o dnevnom i sezonskom hodu troposferske greške. Budući da je troposferska greška u izravnoj korelaciji s meteorološkim parametrima koji se mogu izraziti preko njihovih površinskih vrijednosti, obrazac kretanja vrijednosti meteoroloških parametara utječe na vrijednosti kretanja troposferskog odstupanja.

7. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I ANALITIČKA RAZMATRANJA

U ovom poglavlju iznesene su završne ocjene ne samo predloženog modela već i svrsishodnosti istraživanja. Predstavljeni model predstavlja trodijelnu matematičku funkciju kojom se predlaže nova funkcionalna povezanost promatranih meteoroloških parametara i fenomena troposferske greške, konkretno u širenju GLONASS-ova radionavigacijskog signala. Nad predloženim modelom provedena je njegova validacija te verifikacija. Proces verifikacije temeljen je na usporedbi parametara uspješnosti, prvenstveno srednje kvadratne greške odstupanja ostvarenih položaja, te kretanja ostalih statističkih parametara koji opisuju unutarnju dinamiku varijabilnosti troposferske greške.

Uz validaciju i verifikaciju predloženog modela, za dublje razumijevanje troposferske greške, potrebno je imati uvid i u njezine vremensko-sezonske zakonitosti. Budući da

vremensko prostorni okvir sadrži dostatan broj meteorološko-položajnih zapisa, analizirana je i temporalna pojavnost troposferske greške.

Završni dio poglavlja pruža uvid u prihvaćene kompromise i ograničenja prilikom provođenja istraživanja. Iako višestruka, njihova interakcija ne dovodi u pitanje integritet istraživanja, što je detaljno obrazloženo. Dodatno, iznesena su razmatranja podobnosti primjene predloženog modela u području pomorske elektroničke navigacije uz osvrt na daljnje mogućnosti primjene predloženog modela. Argumentirana je mogućnost primjene pristupa i metodologije usvojenih u ovom istraživanju u području razvoja autonomnih plovila te pomorstvu općenito.

7.1. Razmatranja i primjene predloženog modela troposferske greške zenitne komponente u satelitskom određivanju položaja

Promatrajući predloženi model unutar zadanog okvira istraživanja te uvažavajući u cijelosti početna ograničenja, predloženi model troposferske greške zenitne komponente potvrdio je ali i nadmašio očekivanja inicijalnih istraživanja. Preliminarna istraživanja provedena su unutar znatno manjeg vremenskog okvira (četiri do pet tjedana) te unutar istog klimatološkog razdoblja. Tada kada se pokazala prisutna korelacija prediktora i zavisne varijable modela (troposfersko odstupanje), ostvareno je značajno poboljšanje položaja te je identificirana jednostavna linearna povezanost svih osi. Proširivanjem vremenskog razdoblja na tri godine (izrada te verifikacija) forma se modela usložila, pojavio se problem statističkog nesuglasja modela i većine prediktora modela osi y te su ostvareni rezultati došli na razine očekivanih vrijednosti. Poseban problem predstavljala je komponenta modela za os y . Premda je moguće poboljšati postojeći model intervencijom u dvije osi, zbog toga što je odabrano područje istraživanja trodimenzionalna točnost položaja te s obzirom na rezultate validacije statističke značajnosti modela osi y , nastavljeno je optimiziranje modela za os y . Osnove svih komponenata modela statistički su generirane odgovarajućim statističkim programom, ali treba imati na umu da su sve vrijednosti zapravo aproksimirane vrijednosti – koje trebaju potvrditi svoju usuglašenost empirijskom potvrdom. Isti je pristup primijenjen i u razvoju većine postojećih troposferskih modela te se smatraju empirijskim ili poluempirijskim modelima, čiji su koeficijenti modelirani tako da odgovaraju određenom području, odnosno izabranom modelu atmosfere. Takvim pristupom ostvarena je funkcionalna komponenta modela za os y te uz komponente za osi x i z tvori ukupni predloženi model.

Predloženi model pokazao je svoju uspješnost smanjujući odstupanje od točnih položaja djelovanjem na troposfersku grešku. Ostvarena smanjenja (Tablica 6.10.) uklapaju se u slična istraživanja troposferskih modela. Osnova je predloženog modela i dalje postojeći Saastamoinenov model kojemu treba pribrojiti vrijednosti korekcije (ostvarenu predloženim modelom) za pojedinu os. Predloženi model zahtijeva ulazne meteorološke parametre koji se, ovisno o dostupnosti, mogu interpolirati iz pojedinog standardnog vremenskog modela, ili se koriste standardne, unaprijed predviđene ulazne vrijednosti (kao u slučaju izostanka meteoroloških parametara kod Saastamoinenova modela).

Predloženi model može se upotrijebiti kao dodatak Saastamoinenovu modelu uz određena ograničenja vezana za geografske područje primjene (ograničenja su detaljnije definirana u idućim potpoglavljima). Pritom optimalna područja primjene predloženi model nalazi u sustavima određivanja korisničkog položaja u stvarnom vremenu s nižim razinama točnosti. Ako se traži centimetarska točnost, u pravilu se upotrebljavaju diferencijски podsustavi, sustav SBAS s metodama određivanja položaja PPP ili RTK, ovisno o potrebi određivanja u stvarnom vremenu ili naknadnom određivanju točnog položaja. Stoga je razvidno da se predloženi model može upotrijebiti unutar postojećih područja upotrebe Saastamoinenova modela sa svim postojećim ograničenjima i prednostima. To uključuje primjenu u stacionarnim korisničkim položajima te dinamičkim korisničkim sustavima kojima dostaje točnost određivanja GNSS-ovih parametara sa Saastamoinenovim algoritmom.

7.2. Mogućnosti primjene predloženog modela u pomorskoj navigaciji

Satelitska navigacija predstavlja okosnicu suvremenog pomorstva te je povratak na dosadašnja sredstva astronomske i terestričke navigacije u svojoj biti nepojmljiv. Premda je uvijek moguć gubitak GNSS-ova signala (prvenstveno sustava GPS kao i dalje najzastupljenijeg), prisutnost nekoliko globalnih satelitskih navigacijskih sustava omogućava korisniku stalnu mogućnost pozicioniranja. Osnovni su GNSS-ovi parametri u upotrebi u pomorstvu položaj plovne jedinice te brzina (vrijeme te kurs i brzina preko dna) te se najčešće ostvaruju upotrebom diferencijских podsustava. Korisnici u pomorstvu (izuzimajući zahtjeve odobalnog inženjerstva te pojedinih specifičnih djelatnosti u pomorstvu) [65], ne zahtijevaju visoku centimetarsku točnost. Uzevši pritom u obzir prisutnu tendenciju smanjivanja plovidbenih brzina [137] uz istovremenu potrebu određivanja parametara u stvarnom vremenu, primjena predloženog modela nalazi svoju opravdanost u takvu okruženju. Predloženi model može se primijeniti u svakom modelu GNSS-ova prijmnika (jednofrekvencijskog ili

dvofrekvencijskog) koji upotrebljava Saastamoinenov algoritam za korekciju troposferskog kašnjenja, neovisno o prijemu GNSS-ova radionavigacijskog signala. Nužno je pritom ukazati na prethodno nužno utvrđivanje uspješnosti predloženog modela na položajnim zapisima drugih GNSS-ovih sustava.

7.2.1. Mogućnosti primjene predloženog modela integracijom u primarno pozicioniranje sustava ECDIS

Obaveznim uvođenjem Informacijskog sustava i prikaza elektroničkih karata (engl. *Electronic Chart Display and Information System* – ECDIS) posljedice netočno određenog položaja plovila dodatno su naglašene. Položaj plovila u sustavu ECDIS prilikom odobalne plovidbe isključivo se određuje sustavom GNSS, pri čemu trenutačno nije ostvarena funkcija označavanja brodskog položaja temeljem astronomske opažanja. Trenutačno je jedino u terestričkom dosegom moguće položaj plovila odrediti metodom koja ne uključuje sustav GNSS te ga označiti na zaslonu sustava ECDIS na odgovarajućoj podlozi (službenoj elektroničkoj karti). Posebnost je pomorskog prometa to što se uobičajeno odvija u područjima bez pristupa točnim meteorološkim podacima te se potrebni ulazni meteorološki podaci troposferskih algoritama određuju kao standardne vrijednosti ili se interpoliraju iz pripadajućih tablica pojedinog modela. U tom smislu i predloženi model može se upotrebljavati na isti način, zato što je razvijen temeljem podataka s područja izabranog meteorološkog profila čime ispunjava uvjete pouzdanosti u istovjetnim klimatskim područjima. Testiranjem ostvarene točnosti položaja u područjima različitih klimatskih profila polučila bi se saznanja o zemljopisnom dosegom primjenjivosti predloženog modela.

7.2.2. Mogućnosti primjene predloženog modela u razvoju autonomnih plovila

Područje autonomnih plovila podrazumijeva najvišu razinu točnosti i pouzdanosti primijenjenih elektroničkih senzornih, programskih i upravljačkih sustava, značajno iznad postojećih parametara pouzdanosti i točnosti elektroničkih sustava u upotrebi na plovilima. Pritom se informacije o položaju plovila neće ostvarivati samo GNSS-ovim radionavigacijskim signalima već i mrežom dodatnih senzora temeljenih na laserskoj, radarskoj te optičkoj tehnologiji [138]. Potreba za najvećom dostupnom točnošću položaja plovila bit će izraženija prilikom obalne navigacije, lučkog i terminalskog manevriranja, za što je nužna i odgovarajuća obalna informacijska infrastruktura. S druge strane, oceanska plovidba i dalje će zahtijevati postojeće razine točnosti položaja plovila, ali uz znatno viši stupanj pouzdanosti te redundanciju

svih uključenih sustava. Unutar različitih kategorija autonomnosti plovila [139] trenutačno se testira više od tisuću jedinica autonomnih plovila [138] različitih konfiguracija i namjena te razina autonomnosti.

Primjena predloženog troposferskog modela punu afirmaciju može ostvariti u autonomnim plovilima namijenima upotrebi na unaprijed poznatom području – plovidba definiranim plovnim putevima, gradskim kanalima, tj. [139] unutar područja s poznatim klimatskim profilima. Time bi se ulazni parametri predloženog modela mogli temeljiti na lokalnoj meteorološkoj dinamici bez potrebe za interpolacijom ili upotrebom standardnih meteoroloških vrijednosti, čime bi predloženi model ostvario najvišu razinu potencijalne točnosti. Prilikom potencijalne primjene u autonomnim plovilima u oceanskoj plovidbi, predloženi model može se uklopiti u postojeći sustav GNSS na isti način kao u sadašnjim plovilima s istim ograničenjima.

7.3. Prostorna ograničenja predloženog modela

Predloženi model nije razvijan temeljem podataka koji bi mu od početka pružili legitimitet globalne primjenjivosti iz više razloga. Osnovni je razlog potreba za određenom vremenskom rezolucijom meteoroloških podataka (u provedenom istraživanju desetominutna učestalost) čija je dostupnost unaprijed odredila izbor promatranih GNSS-ovih postaja s područjem međusobne pokrivenosti od $2,1^{\circ}$ N ($\Delta\phi$) x $2,9^{\circ}$ E ($\Delta\lambda$). Prethodno opisani troposferski modeli koji su upotrebljavali podatke radiosondā uobičajeno su se koristili podjelom $10^{\circ}\times 10^{\circ}$ do $15^{\circ}\times 15^{\circ}$. Time predloženi model poprima karakter lokalnog (engl. *tailor made*) modela. Međutim, promatrana vremenska dinamika nije ograničena na navedeno područje mjernih postaja te se model može primijeniti na područjima gdje klimatološki parametri ne odstupaju značajnije od promatranih, odnosno u području srednjih zemljopisnih širina, prvenstveno Europe. Primijenjena metodologija omogućava dopunjavanje ulaznim položajno-vremenskim zapisima i time proširenu verifikaciju uspješnosti modela. Fleksibilnost predviđenog modela i korištenih statističkih programskih alata omogućava efikasno prilagođavanje, validaciju i verifikaciju komponenata modela.

Predloženi matematički oblik modela ostvaruje svoju uspješnosti unutar prostorno-vremenskog okvira korištenog za verifikaciju modela, temeljenu na sustavu GLONASS kao izvoru položajnih zapisa. Točnost ostvarenog korisničkog položaja (uz pretpostavku jednakog intenziteta greške prijenosnog medija) razlikuje se ovisno o tehničkim parametrima pojedinog

sustava (prikazano u drugom poglavlju) zajednički prikazanu kao korisničku razdiobu UERE-ina položaja te geometrijskoj razdiobi satelita GDOP. Shodno tomu, primjena predloženog modela i u drugom GNSS-ovu sustavu može polučiti varijabilne rezultate ovisno o prostornom rasporedu ulaznih radionavigacijskih signala (međusobni odnos zenitne komponente troposferske greške i komponente troposferske greške funkcije preslikavanja za horizontalni smjer).

Daljnje mogućnosti razvoja predloženog modela mogu se odvijati u dvama smjerovima: (i) upotpunjavanjem vremensko-položajnih ulaznih zapisa u razvojnu matricu modela i daljnji razvoj modela na postojećim osnovama te (ii) uključivanjem i drugih zastupljenijih modela troposferskog kašnjenja osim, Saastamoinenova modela.

- i. Opisana prostorna ograničenja modela mogu se smanjivati uvođenjem ulaznih podataka s dostupnih lokacija te time širiti promatrano klimatološko područje, čime bi model dobio potvrdu šire geografske primjenjivosti. Budući da bi analiza obuhvaćala područja približno istovjetnih klimatoloških profila, realno je očekivati i korekcije koeficijenata korelacije prediktora i/ili matematičkog oblika korelacije – ako bi dodatne promjene adekvatnije opisivale međusobnu korelaciju prediktora i zavisne varijable.
- ii. Izborom drugog troposferskog modela prilikom obrade položajnog zapisa dobit će se drugačije vrijednosti postojeće troposferske korekcije, koje bi tada bile osnova za testiranje predloženog modela, uz uvijek prisutnu mogućnost daljnjeg razvoja na prethodno navedeni način.

Navedene mogućnosti odnose se na nastavak razvoja predloženog modela uz postojeća inicijalna programska ograničenja, odnosno ograničenja postojećeg dostupnog formatskog zapisa RINEX s promatranih postaja. Nastavkom tendencije dostupnosti novijih formata RINEX (postaja u Dubrovniku omogućava format zapisa RINEX 3 od sredine 2021. godine) omogućilo bi se znatno preciznije izoliranje troposferske greške u okviru mjerenja pseudoudaljenosti, čime se model može dodatno razvijati.

7.4. Primjena rezultata istraživanja

Tijekom provedenog istraživanja predviđeni ciljevi uspješno su ostvareni primjenom poznatog pristupa mjerenjem pseudoudaljenosti, ali novim programskim rješenjima za pripremu ulaznih podataka te statističkih alata. Predložen je novi prediktivni model određivanja

greške troposferskog kašnjenja empirijskog karaktera. Potvrđena uspješnost modela čini relevantnom metodologiju primijenjenu u istraživanju. Važnost primjene korištenih programskih alata očituje se na primjeru komponente predloženog modela za os y kao pokazatelj potrebe za detaljnim kvalitativnim razumijevanjem povezanosti kretanja troposferske greške zenitnog smjera i ulaznih meteoroloških parametara.

Predloženi model prikazan je matematičkim izrazom koji se može dograditi na Saastamoinenov troposferski model na kojem se temelji, međutim nastavkom istraživanja otvara se mogućnost ispitivanja učinkovitosti i kompatibilnosti s drugim troposferskim modelima. Premda je projekt u okviru kojeg je ostvareno istraživanje izvorno usmjeren na područje pomorstva, točnije segment pomorske elektroničke navigacije, primjena ostvarenih rezultata nadilazi primjenu isključivo u pomorstvu. Model je podoban za primjenu u stvarnom vremenu onim korisnicima koji ne zahtijevaju centimetarsku točnost položaja (te ostalih povezanih GNSS-ovih korisničkih parametara) te koji raspolažu osnovnim GNSS-ovim prijamnikom, što ga čini primjenjivim u širokim područjima tehnoloških djelatnosti.

Rezultati provedenog istraživanja uključuju i detaljnije razumijevanje pojave statističke ravnoteže stohastičkih sustava. Navedena pojava rezultat je kretanja točnosti položaja s obzirom na troposfersko kašnjenje uzrokovano promatranom zenitnom komponentom. Dodatno, rezultati istraživanja uključuju dinamiku elemenata troposfere koji utječu na točnost GNSS-ova položaja, njihovo vremensko-prostorno kretanje te međusobnu povezanost. Budući da su povezanost troposferskog kašnjenja i količina oborive vode te matematička pretvorba neupitno definirani [77], [124], [140], rezultati i metodologija istraživanja postaju relevantni u radiometeorološkim istraživanjima omogućujući točnije određivanje ukupne dinamike sadržaja oborive vode na promatranom području.

8. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Troposferska greška radionavigacijskog signala jedna je od grešaka prijenosnog medija koju nije moguće izbjeći, ali moguće je pokušati predvidjeti. Premda djelovanje elemenata troposfere na širenje radionavigacijskog signala rezultira proširenjem njegove putanje te usporavanjem njegova širenja, općenito se zajednički učinak opisuje pojmom troposfersko kašnjenje. Ono se sastoji od dviju osnovnih komponenata: kašnjenje u zenitnom smjeru dolaznog radiosignala te u horizontalnom smjeru (za sve ostale kutove). Uzevši u obzir da se

javlja dvije grupe meteoroloških uzroka troposferskog kašnjenja: hidrostatski (suhi) i nehidrostatski (mokri), idealni troposferski model sastoji se od četiriju komponenata – posebno za zenitni i horizontalni smjer te odvojeno za suhe i mokre ulazne meteorološke parametre. Fizikalna pozadina djelovanja meteoroloških parametara na radionavigacijski signal pružena je u okviru doktorskog rada. Javljaju se različiti pristupi modeliranja troposferskog kašnjenja: modeli koji odvojeno modeliraju obje kutne i meteorološke komponente, modeli koji modeliraju samo horizontalnu komponentu ili međuvarijante. Razlike postoje i među ulaznim varijablama pojedinih modela – dio postojećih modela zahtijeva površinske meteorološke parametre, a dio ih interpolira iz pripadajućih tablica ili modela atmosfere temeljem geografske širine i dana u godini kao ulaznim parametrima.

Motiv provedenog istraživanja pokušaj je razvoja modela lokalnog karaktera s ulaznim meteorološkim i GLONASS-ovim položajnim podacima koji bi se temeljio na postojećem Saastamoinenovu modelu zenitne komponente troposferske greške kao jednom od najreferentnijih troposferskih modela. Pritom je usvojen pristup temeljen na određivanju pseudoudaljenosti. Meteorološki i položajni GLONASS-ovi podatci ostvareni su s postaja unutar Republike Hrvatske, međusobno usklađeni i svedeni na desetominutnu vremensku rezoluciju te korelirani s kretanjem troposferskog odstupanja. Rezultat je predloženi višekomponentni matematički model posebno za svaku položajnu os. Predloženi model verificiran je na istim GNSS-ovim postajama unutar ranijeg dvogodišnjeg razdoblja, pri čemu je pokazao poboljšanje točnosti položaja ostvareno smanjivanjem troposferske greške. Premda model nije polučio istovremeno poboljšanje po svim osima za sve lokacije tijekom čitava period verifikacije, ostvarena su poboljšanja horizontalnih osi položaja do maksimalnih 3,87 posto (14,26 cm), pri čemu je u dvama navratima smanjena točnost druge horizontalne osi za 0,65 posto (1,65 cm). Istovremeno je točnost visinske komponente položaja poboljšana u svim mjerenjima do maksimalnih 4,37 posto (23,87 cm). Time je ispunjena svrha provedenog istraživanja te su, uz korake poduzete u razvoju predloženog modela, ostvareni rezultati i planirani ciljevi istraživanja. Tijekom provedenih istraživanja, izrade predloženog modela te procesu njegove verifikacije ostvarena je potvrda postavljenih hipoteza o naravi troposferskog kašnjenja te istovremenoj interakciji troposferskog kašnjenja s meteorološkim parametrima te posljedično i točnošću položaja.

Predviđeni znanstveni doprinosi teorijskog i praktičnog karaktera ostvareni su u doktorskoj disertaciji. Predloženi model ostvaruje poboljšanje točnosti položaja korisnika te se njegov algoritam može integrirati u postojeće algoritme GNSS-ovih prijamnika (ako se temelje

na Saastamoinenovu modelu) za ispravak troposferske greške. Naravno, prethodno je nužno ispitati uspješnost predloženog modela za područja drugih zemljopisnih širina i klimatoloških profila te time utvrditi podobnost predloženog modela za širu primjenu. S obzirom na prilagodljivost modela te statistički razvoj, to može predstavljati temelj budućih istraživanja. Praktično područje primjene predloženog modela nije ograničeno na pomorstvo. Budući da najznačajnije i stalno poboljšanje ostvaruje u vertikalnoj komponenti geodetskog položaja, dobar je za sve terestričke namjene određivanja položaja u stvarnom vremenu unutar pripadajuće razine točnosti.

Teorijski doprinos uključuje definiranje kvalitativnih i kvantitativnih osobina statističke ravnoteže ostvarenih rezultata promatranog navigacijskog sustava u promatranom periodu verifikacije. S obzirom na stohastičku naravu procesa određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima i ulaznih meteoroloških parametara, jasno je definirana pojava statističke ravnoteže. Pritom je kvantitativno opisana te kvalitativno obrazložena po položajnim koordinatama, čime je dokazano postojanje statističke ravnoteže promatranih položaja u funkciji zenitne komponente troposferskog kašnjenja određenog Saastamoinenovim modelom. Daljnji doprinos s teorijskog aspekta ostvaren je s obzirom na metodologiju kreiranja lokalnog troposferskog modela primjenjivog na bilo koji GNSS-ov sustav te njegovo povezivanje s elementima lokalne dinamike meteoroloških parametara. Navedeni odnosi mogu se podvrgnuti procesima strojnog učenja unoseći proširene meteorološke i položajne zapise s ciljem daljnjeg prilagođavanja predloženog modela.

Provedeno istraživanje i polučeni rezultati predstavljaju temelj budućih aktivnosti u području troposferske greške. Moguće je ostvariti napredak u više segmenata: širenjem ulaznih meteoroloških i položajnih podataka može se ispitati primjena modela na širem području, te posljedično i modificirati model. Time bi se ostvarilo i obuhvatnije razumijevanje relevantne meteorološke dinamike (sa stanovišta GNSS-ove točnosti) na širem području. Drugi segment istraživanja koji je moguće razvijati odnosi se na izvor meteoroloških podataka. Budući da predloženi model zahtijeva ulazne meteorološke podatke (sukladno Saastamoinenovu modelu na kojem se temelji), otvorena mogućnost provjere podobnosti ulaznih podataka iz standardnih vremenskih modela. Osim toga, dostupom podataka novijih standarda položajnih zapisa moguće je razvijati model i u obliku funkcije mapiranja.

S obzirom na prisutne mogućnosti, provedeno istraživanje te ostvareni rezultati prezentirani u doktorskoj disertaciji predstavljaju osnovu budućih znanstvenih aktivnosti u navedenom području.

POPIS LITERATURE

- [1] "A Presentation at the United Nations /Russian Federation Workshop on the Applications of GNSS," 18–22 May 2015, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2015.
- [2] J. Saastamoinen, "Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites," vol. 15, no. 4, 2013, pp. 247–251.
- [3] J. Saastamoinen, "Contributions to the theory of atmospheric refraction," *Bull. Géodésique 1972 1051*, vol. 105, no. 1, pp. 279–298, Nov. 2008, doi: 10.1007/BF02521844.
- [4] H. S. Hopfield, "Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range: Prediction from Surface Weather Data," *Radio Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 357–367, Mar. 1971, doi: 10.1029/RS006I003P00357.
- [5] H. S. Hopfield, "Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data," *J Geophys Res*, vol. 74, no. 18, 1969, doi: 10.1029/jc074i018p04487.
- [6] S. Katsougiannopoulos, C. Pikridas, D. Rossikopoulos, I. M. Ifadis, and A. Fotiou, "Tropospheric Refraction Estimation Using Various Models, Radiosonde Measurements and Permanent GPS Data," 2006.
- [7] J. Askne and H. Nordius, "Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data," *Radio Sci.*, vol. 22, no. 3, pp. 379–386, May 1987, doi: 10.1029/RS022I003P00379.
- [8] H. B. Baby, P. Golé, and J. Lavergnat, "A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements," *Radio Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 1023–1038, Nov. 1988, doi: 10.1029/RS023I006P01023.
- [9] K. Davies, D. M. Baker, and N. J. F. Chang, "Comparison Between Formulas for Ionospheric Radio Propagation and Atmospheric Wave Propagation," *Radio Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 231–234, Mar. 1969, doi: 10.1029/RS004I003P00231.
- [10] C. C. Chao, "A model for tropospheric calibration from daily surface and radiosonde balloon measurements," *JPL Technical Memorandum, Jet Propulsion Laboratory*, Pasadena, CA, pp. 391–350, 1972.
- [11] A. E. Niell, "Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 101, no. B2, pp. 3227–3246, Feb. 1996, doi: 10.1029/95JB03048.
- [12] D. Y. Pershin, "Comparative analysis of tropospheric delay models in precise point positioning in satellite navigation systems GLONASS / GPS," *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии*, vol. 7, no. 1, pp. 84–91, 2009.
- [13] E. Krueger, T. Schueler, and B. Arbesser-rastburg, "The Standard Tropospheric Correction Model for the European Satellite Navigation System ...," no. January 2005, pp. 2–5, 2013.
- [14] J. Webb, F., Zumberge, "An Introduction to the GIPSY/OASIS-II," *Environ. Sci. Geol.*, 1993.
- [15] V. B. Mendes, "Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques," University of New Brunswick, Fredericton, N.B. Canada, 1999.
- [16] H. D. Black, "An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 83, no. B4, pp. 1825–1828, Apr. 1978, doi: 10.1029/JB083IB04P01825.
- [17] H. D. Black and A. Eisner, "Correcting satellite Doppler data for tropospheric effects.," *J. Geophys. Res.*, vol. 89, no. D2, pp. 2616–2620, 1984, doi: 10.1029/JD089iD02p02616.

- [18] J. W. Marini, "Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile," *Radio Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 223–231, Feb. 1972, doi: 10.1029/RS007I002P00223.
- [19] J. W. Marini and C. W. Murray, "Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees," Greenbelt, MD, 1973.
- [20] A. E. Niell, "Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models," *Phys. Chem. Earth, Part A Solid Earth Geod.*, vol. 26, no. 6–8, pp. 475–480, 2001, doi: 10.1016/S1464-1895(01)00087-4.
- [21] K. Snajdrova, J. Boehm, P. Willis, R. Haas, and H. Schuh, "Multi-technique comparison of tropospheric zenith delays derived during the CONT02 campaign," *J. Geod. 2005 7910*, vol. 79, no. 10, pp. 613–623, Dec. 2005, doi: 10.1007/S00190-005-0010-Z.
- [22] M. Honma, Y. Tamura, and M. J. Reid, "Tropospheric delay calibrations for VERA," *Publ. Astron. Soc. Japan*, vol. 60, no. 5, pp. 951–960, 2008, doi: 10.1093/pasj/60.5.951.
- [23] G. Chen and T. A. Herring, "Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 102, no. B9, pp. 20489–20502, Sep. 1997, doi: 10.1029/97JB01739.
- [24] J. Boehm, B. Werl, and H. Schuh, "Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 111, no. B2, p. 2406, Feb. 2006, doi: 10.1029/2005JB003629.
- [25] V. S. Gubanov, "Tropospheric Delay from VLBI and GNSS Measurements," *Astron. Lett. 2018 442*, vol. 44, no. 2, pp. 126–138, Feb. 2018, doi: 10.1134/S1063773718020032.
- [26] L. Morel *et al.*, "Validity and behaviour of tropospheric gradients estimated by GPS in Corsica," *Adv. Sp. Res.*, vol. 55, no. 1, pp. 135–149, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.ASR.2014.10.004.
- [27] A. Nabil Mohammed, M. A. Abdelfatah, A. E. K. Mousa, and G. S. El-Fiky, "Regional Egypt tropospheric mapping function model," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 4157–4165, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.10.017.
- [28] S. A. M. Younes and H. A. Afify, "Accuracy improvement of tropospheric delay correction models in space geodetic data. Case study: Egypt," *Geod. Cartogr.*, vol. 40, no. 4, pp. 148–155, 2014, doi: 10.3846/20296991.2014.987465.
- [29] J. D. Dodo, U. O. Ekeanyanwu, and M. N. Ono, "Evaluation of Five Tropospheric Delay Models on Global Navigation Satellite System Measurements in Southern Nigeria," *J. Geosci. Geomatics*, vol. 7, no. 4, pp. 201–211, 2019, doi: 10.12691/jgg-7-4-5.
- [30] S. Y. Dodo, J. D., Ojigi, L. M., and Tsebeje, "Determination of the best-fit Tropospheric Delay Model on the Nigerian Permanent GNSS Network.," *J. Geosci. Geomatics*, vol. 3, no. 4, pp. 88–95, 2015, doi: https://portal.issn.org/resource/ISSN/2373-6690.
- [31] Y. F. Yang, X. P. Chen, M. H. Yao, C. L. Zhou, and C. M. Liao, "Research on zenith tropospheric delay modeling of regional cors network," in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, vol. XLII-3/W10, no. 3/W10, pp. 1197–1200, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-1197-2020.
- [32] I. M. Ifadis, "The excess propagation path of radio waves: study of the influence of the atmospheric parameters on its elevation dependence," <http://dx.doi.org/10.1179/sre.1992.31.243.289>, vol. 31, no. 243, pp. 289–298, 2013, doi: 10.1179/SRE.1992.31.243.289.
- [33] U. M. Ustinov, A. P. Gorobtsov, V. V. Afanasev, and A. V. Pripotnyuk, *Technical means of navigation, volume 3. Ship electronic navigation devices*. Sankt-Peterburg: Morsar, Sankt-Peterburg, 2016.

- [34] U. M. Ustinov, V.V.Afanasev, A.V.Pripotnyuk, and A. N. Marinich, *Судовые радиолокационные системы*, 3rd ed. Sankt-Petersburg: Веленара, 2009.
- [35] “Access to Products – International GNSS Service.” <https://www.igs.org/products-access/#glonass-satellite-ephemerides> (accessed Nov. 19, 2021).
- [36] ICD GLONASS CDMA, “Информационно-аналитический центр контроля ГЛОНАСС и GPS.” <https://www.glonass-iac.ru/> (accessed Aug. 16, 2021).
- [37] “Stat GLONASS.” <https://stat.glonass-iac.ru/#loginEn> (accessed Aug. 16, 2021).
- [38] “Direction 2018: GLONASS focuses on user needs: GPS World.” <https://www.gpsworld.com/direction-2018-glonass-focuses-on-user-needs/> (accessed Nov. 21, 2021).
- [39] Z. Deng *et al.*, “Validation of tropospheric slant path delays derived from single and dual frequency GPS receivers,” *Radio Sci.*, vol. 46, no. 6, p. 6007, Dec. 2011, doi: 10.1029/2011RS004687.
- [40] G. J. Haltiner and F. L. Martin, *Dynamical and physical meteorology*. John Wiley & Sons, Ltd, 1958.
- [41] G. Ajayi, “Physics of the tropospheric radiopropagation,” Trieste, Italy, 1989.
- [42] G. D. Thayer, “An improved equation for the radio refractive index of air,” *Radio Sci.*, vol. 9, no. 10, pp. 803–807, 1974, doi: 10.1029/RS009i010p00803.
- [43] A. H. Taylor and E. O. Hulburt, “The Propagation of Radio Waves Over the Earth,” *Phys. Rev.*, vol. 27, no. 2, p. 189, Feb. 1926, doi: 10.1103/PhysRev.27.189.
- [44] E. K. Smith and S. Weintraub, “The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies,” *J. Res. Notional Bur. Stand.*, vol. 50, no. 1, 1953.
- [45] J. C. Owens, “Optical Refractive Index of Air: Dependence on Pressure, Temperature and Composition,” *Appl. Opt. Vol. 6, Issue 1, pp. 51-59*, vol. 6, no. 1, pp. 51–59, Jan. 1967, doi: 10.1364/AO.6.000051.
- [46] A. Datta, “How GNSS signals work within specific frequency bands – Geospatial World,” 2019. <https://www.geospatialworld.net/blogs/gnss-frequency-bands-for-constellations> (accessed Jul. 23, 2021).
- [47] J. Sanz Subirana, J. M. J. Zornoza, and M. Hernández-Pajares, *GNSS DATA PROCESSING Volume I: Fundamentals and Algorithms Acknowledgements*. Leiden, the Netherlands: ESA Communications ESTE, 2013.
- [48] P. K. Enge and A. J. Dierendonck, “Wide Area Augmentation System,” in *Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996, pp. 117–142.
- [49] Alain L. Kornhauser, “Global Navigation Satellite System (GNSS),” 2006.
- [50] S. S. Van Leeuwen and N. Aerospace, “Validation of SBAS MOPS Troposphere Model over the EGNOS Service Area,” in *European Navigation Conference GNSS-2004*, 2004, no. May, pp. 1–15.
- [51] K. Su and S. Jin, “Impacts of tropospheric delays on multi-GNSS PPP from empirical and numerical weather models,” 2019, doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021661.
- [52] “How GPS Receivers Work - Trilateration vs Triangulation - GIS Geography.” <https://gisgeography.com/trilateration-triangulation-gps/> (accessed Aug. 12, 2021).
- [53] “Insight article: GNSS Corrections Demystified | Septentrio.” <https://www.septentrio.com/en/learn-more/insights/gnss-corrections-demystified> (accessed Dec. 09, 2022).
- [54] C. Satirapod, “Improving the GPS Data Processing Algorithm for Precise Static Relative Positioning,” The University of New South Wales, 2002.

- [55] M. Filić, R. Filjar, and M. Ševrović, “Expression of GNSS Positioning Error in Terms of Distance,” *Promet - Traffic&Transportation*, vol. 30, no. 3, pp. 305–310, Jul. 2018, doi: 10.7307/PTT.V30I3.2304.
- [56] C. Qian, “Tropospheric Correction Modeling in SAPOS Reference Network under Large Height Difference Condition,” Technische Universität München, 2016.
- [57] “GLONASS Future and Evolutions - Navipedia.” https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Future_and_Evolutions (accessed Aug. 27, 2021).
- [58] C. Ferencz, “Electromagnetic wave propagation in inhomogeneous, moving media: A general solution of the problem,” *Radio Sci.*, vol. 46, no. 5, p. 5006, Oct. 2011, doi: 10.1029/2011RS004686.
- [59] T. Schüler, “On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation,” Universität der Bundeswehr München, 2001.
- [60] S. Le Maistre, “Martian Lander Radio Science Data Calibration for Mars Troposphere,” *Radio Sci.*, vol. 55, no. 12, p. e2020RS007155, Dec. 2020, doi: 10.1029/2020RS007155.
- [61] S. P. Jin, E. Cardellach, and F. Xie, “GNSS Atmospheric and Multipath Delays,” in *GNSS Remote Sensing*, Vol 19., Springer, Dordrecht, 2014, pp. 17–30.
- [62] “Tehnička enciklopedija,” *Tehnička enciklopedija*. LZMIK, Zagreb, pp. 623–627.
- [63] S.M. Shrestha, “Investigations into the Estimation of Tropospheric Delay,” University of Calgary, 2003.
- [64] J. Zhang, “Investigations into the Estimation of Residual Tropospheric Delays in a GPS Network,” University of Calgary, 1999.
- [65] D. Brčić, “Model nespecificnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja,” University of Rijeka, 2015.
- [66] M. B. El-Arini, “Tropospheric Effects on GNSS Bertram Arbesser-Rastburg,” in *The Atmosphere and its Effect on GNSS Systems*, 2018, no. April.
- [67] E. G. Davis J.L., Herring T.A., Shapiro I.I., Rogers A.E.E., “Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length,” *Radio Sci.*, vol. 20, no. 6, pp. 1593–1607, 1985.
- [68] A. M. El-Naggar, “DOP prediction over Egypt from SP3 file for long-term,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 51, no. 3, pp. 221–228, 2012, doi: 10.1016/j.aej.2012.06.001.
- [69] J. G. Speight, “Water systems,” *Nat. Water Remediat.*, pp. 1–51, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-803810-9.00001-2.
- [70] F. Kleijer, “Troposphere Modeling and Filtering for Precise GPS Leveling,” Delft University of Technology, 2004.
- [71] J. R. Holton, “Stratosphere/troposphere exchange & structure | Global Aspects,” *Encycl. Atmos. Sci. Second Ed.*, pp. 257–261, Jan. 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00394-7.
- [72] M. J. Astudillo, L. Lau, Y. T. Tang, and T. Moore, “A novel approach for the determination of the height of the tropopause from ground-based GNSS observations,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 2, 2020, doi: 10.3390/rs12020293.
- [73] M. Cavcar, “The International Standard Atmosphere,” Eskisehir, 2017. doi: 10.1016/b978-0-08-100194-3.00017-1.
- [74] G. C. Bower, D. C. Backer, R. L. Plambeck, and M. C. H. Wright, “Removal of tropospheric path length variations in very long baseline interferometry with measurement of tropospheric emission,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 102, no. 14, pp. 16773–16781, 1997, doi: 10.1029/97jd00147.
- [75] P. Herckes and J. L. Collett, “Tropospheric chemistry & composition|Cloud Chemistry,”

- Encycl. Atmos. Sci. Second Ed.*, pp. 218–225, Jan. 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00030-X.
- [76] P. Yang and B. A. Baum, “Satellites and satellite remote sensing | Remote Sensing: Cloud Properties,” *Encycl. Atmos. Sci. Second Ed.*, pp. 116–127, Jan. 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00503-X.
- [77] I. D. Thomas, M. A. King, P. J. Clarke, and N. T. Penna, “Precipitable water vapor estimates from homogeneously reprocessed GPS data: An intertechnique comparison in Antarctica,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 116, no. D4, p. 4107, Feb. 2011, doi: 10.1029/2010JD013889.
- [78] D. H. Christian Rocken, Sergey Sokolovskiy, James M. Johnson, “Improved Mapping of Tropospheric Delays,” *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 8, no. 7, pp. 1205–1213, 2001.
- [79] N. A. Space Administration, “U.S. Standard Atmosphere Supplements,” Washington D.C., 1966.
- [80] J. W. Yang and Y. F. Wu, “Measurements of upper atmosphere wind and temperature from meteorological rocket experiments during winter 1979,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 2, no. 10, pp. 177–180, Jan. 1982, doi: 10.1016/0273-1177(82)90386-6.
- [81] M. Grabner and V. Kvicera, “Atmospheric Refraction and Propagation in Lower Troposphere,” *Electromagn. Waves*, Jun. 2011, doi: 10.5772/16379.
- [82] C. J. Coleman, “A direction-sensitive model of atmospheric noise and its application to the analysis of HF receiving antennas,” *Radio Sci.*, vol. 37, no. 3, 2002, doi: 10.1029/2000rs002567.
- [83] B. R. Bean and G. D. Thayer, *CRPL Exponential reference Atmosphere*, National B. Washington D.C.: National Bureau of Standards Monograph 4, 1959.
- [84] J. L. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered, “Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length,” *Radio Sci.*, vol. 20, no. 6, pp. 1593–1607, Nov. 1985, doi: 10.1029/RS020I006P01593.
- [85] Z. W. Li, X. L. Ding, W. Chen, G. X. Liu, Y. K. Shea, and N. Emerson, “Comparative Study of Empirical Tropospheric Models for the Hong Kong Region,” <http://dx.doi.org/10.1179/003962608X325394>, vol. 40, no. 310, pp. 328–341, 2013, doi: 10.1179/003962608X325394.
- [86] R. J. Hill, R. S. Lawrence, and J. T. Priestley, “Theoretical and calculational aspects of the radio refractive index of water vapor,” *Radio Sci.*, vol. 17, no. 5, pp. 1251–1257, Sep. 1982, doi: 10.1029/RS017I005P01251.
- [87] S. P. Mason, “Atmospheric effects on radio frequency (RF) wave propagation in a humid, near-surface environment,” Monterey, California. Naval Postgraduate School, 2010.
- [88] M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier, and L. D. Travis, *Light scattering by nonspherical particles: theory, measurements, and applications*, vol. 11, no. 12. Academic Press, 2000.
- [89] F. Zus *et al.*, “A methodology to compute GPS slant total delays in a numerical weather model,” *Radio Sci.*, vol. 47, no. 2, p. 2018, Apr. 2012, doi: 10.1029/2011RS004853.
- [90] S. Y. Mak, “A closer look at Fermat’s principle,” *Phys. Educ.*, vol. 21, no. 6, p. 365, Nov. 1986, doi: 10.1088/0031-9120/21/6/005.
- [91] J. P. Collins and R. B. Langley, “A Tropospheric Delay Model for the user of the Wide Area Augmentation System,” 1996.
- [92] P. Tregoning, R. Boers, D. O’Brien, and M. Hendy, “Accuracy of absolute Precipitable Water vapor estimates from GPS observations,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 103, no. D22, pp. 701–710, 1998, doi: 10.1029/98JD02516.

- [93] K. Kazmierski, M. Santos, and J. Bosy, “Tropospheric delay modelling for the EGNOS augmentation system,” <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2016.1180798>, vol. 49, no. 357, pp. 399–407, Nov. 2016, doi: 10.1080/00396265.2016.1180798.
- [94] S. Jin, J.-U. Park, J.-H. Cho, and P.-H. Park, “Seasonal variability of GPS-derived zenith tropospheric delay (1994–2006) and climate implications,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 112, no. D9, p. 9110, May 2007, doi: 10.1029/2006JD007772.
- [95] K. Liu *et al.*, “Integrated High-Accuracy Correction Technology of Radio-Wave Refraction for Deep-Space (High-Orbit) Targets,” *Atmos. 2021, Vol. 12, Page 1151*, vol. 12, no. 9, p. 1151, Sep. 2021, doi: 10.3390/ATMOS12091151.
- [96] J. S. Mandeep, “Slant path rain attenuation comparison of prediction models for satellite applications in Malaysia,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 114, no. 17, 2009, doi: 10.1029/2009JD011852.
- [97] M. O. Odedina and T. J. Afullo, “Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment,” *Radio Sci.*, vol. 45, no. 1, p. 1003, Feb. 2010, doi: 10.1029/2009RS004192.
- [98] P. Beckmann, “The Depolarization of Electromagnetic Waves,” *Am. J. Phys.*, vol. 40, no. 10, p. 1557, Jul. 2005, doi: 10.1119/1.1986903.
- [99] F. S. Solheim, J. Vivekanandan, R. H. Ware, and C. Rocken, “Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 104, no. D8, pp. 9663–9670, 1999, doi: 10.1029/1999JD900095.
- [100] A. O. Kupriyanov, D. A. Kuznetsov, D. A. Morozov, and D. E. Leve, “Tropospheric correction of radio-dimensional measurement using digital model of meteorological data,” *Geod. Aerophotosurveying*, vol. 64, no. 1, pp. 15–24, 2020.
- [101] T. Tuchband, “Evaluation of the EGNOS troposphere model in precise point positioning applications,” *Pollack Period.*, vol. 5, no. 2, pp. 27–38, 2010, doi: 10.1556/Pollack.5.2010.2.3.
- [102] G. Xu, *GPS: Theory, algorithms and applications*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [103] K. Wilgan, W. Rohm, and J. Bosy, “Multi-observation meteorological and GNSS data comparison with Numerical Weather Prediction model,” *Atmos. Res.*, vol. 156, pp. 29–42, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2014.12.011.
- [104] J. Dousa and M. Elias, “An improved model for calculating tropospheric wet delay,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 41, no. 12, pp. 4389–4397, Jun. 2014, doi: 10.1002/2014GL060271.
- [105] B. R. Bean and E. J. Dutton, “Radio Meteorology,” New York: Dover Publications, 1966.
- [106] S. Rózsa, “Creative Commons Attribution Modelling Tropospheric Delays Using the Global Surface Meteorological Parameter Model GPT2,” *Civ. Eng.*, vol. 58, pp. 301–308, 2014, doi: 10.3311/PPci.7267.
- [107] A. E. Niell, “Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS,” *Earth, Planets Sp.*, vol. 52, no. 10, pp. 699–702, 2000, doi: 10.1186/BF03352267.
- [108] A. H. Dodson *et al.*, “Wet tropospheric effects on precise relative GPS height determination,” *JGeod*, vol. 70, no. 4, pp. 188–202, 1996, doi: 10.1007/BF00873700.
- [109] F. Li, Q. Zhang, S. Zhang, J. Lei, and W. Li, “Evaluation of Spatio-Temporal Characteristics of Different Zenith Tropospheric Delay Models in Antarctica,” *Radio Sci.*, vol. 55, no. 5, May 2020, doi: 10.1029/2019RS006909.
- [110] S. Masoumi, S. McClusky, A. Koulali, and P. Tregoning, “A directional model of tropospheric horizontal gradients in Global Positioning System and its application for

- particular weather scenarios,” *J. Geophys. Res.*, vol. 122, no. 8, 2017, doi: 10.1002/2016JD026184.
- [111] I. Tetsuya, S. Miyazaki, K. Heki, I. Naito, and Y. Hatanaka, “An impact of estimating tropospheric delay gradients on tropospheric delay estimations in the summer using the Japanese nationwide GPS array,” *J. Geophys. Res.*, vol. 108, 2003, doi: 10.1029/2002JD002214.
- [112] V. V. Chukin, “Remote sensing of water vapor in atmosphere with the help of differential subsystem of Global Navigation Satellite Systems,” *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, vol. 2, no. 2, pp. 244–249, 2009.
- [113] J. B. Moffett, “Program requirements for two-minute integrated Doppler satellite navigation solution,” 1973.
- [114] Dennis D. McCarthy and Gérard Petit, Ed., “Tropospheric Model,” Frankfurt am Main, 2004.
- [115] T. A. Herring, “Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data,” in *Proceedings of the Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, 1992, pp. 157–164.
- [116] J. Boehm and H. Schuh, “Vienna mapping functions in VLBI analyses,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, no. 1, Jan. 2004, doi: 10.1029/2003GL018984.
- [117] T. Tsujii, J. Wang, and C. Rizos, “A new tropospheric delay model for high-altitude vehicle positioning,” *Syst. Res.*, 2001.
- [118] P. Willis, Y. E. Bar-Sever, and G. Tavernier, “DORIS as a potential part of a Global Geodetic Observing System,” *J. Geodyn.*, vol. 40, no. 4–5, pp. 494–501, Nov. 2005, doi: 10.1016/J.JOG.2005.06.011.
- [119] K. Parameswaran, K. Saha, and S. C. Raju, “Development of a regional tropospheric delay model for GPS-based navigation with emphasis to the Indian Region,” *Radio Sci.*, vol. 43, no. 4, p. n/a-n/a, 2008, doi: 10.1029/2007rs003782.
- [120] K. Parameswaran, C. S. Raju, and K. Saha, “Region-specific Tropospheric Delay Model for the Indian Subcontinent,” 2007.
- [121] O. A. Isioye, L. Combrinck, and J. Botai, “Performance Evaluation of Blind Tropospheric Delay correction Models over Africa,” *South African J. Geomatics*, vol. 4, no. 4, p. 502, 2015, doi: 10.4314/sajg.v4i4.10.
- [122] Y. Hu and Y. Yao, “A new method for vertical stratification of zenith tropospheric delay,” *Adv. Sp. Res.*, vol. 63, no. 9, pp. 2857–2866, 2019, doi: 10.1016/j.asr.2018.10.035.
- [123] P. Meunram and C. Satirapod, “Spatial variation of precipitable water vapor derived from GNSS CORS in Thailand,” *Geod. Geodyn.*, vol. 10, no. 2, pp. 140–145, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.GEOG.2019.01.003.
- [124] J. Ildikó and R. Szabolcs, “Developing a global model for the conversion of zenith wet tropospheric delays to integrated water vapour,” *Acta Geod. Geophys. 2018 532*, vol. 53, no. 2, pp. 259–274, Apr. 2018, doi: 10.1007/S40328-018-0215-2.
- [125] P. Collins, Y. Mireault, and P. Héroux, “Strategies for estimating tropospheric delays with GPS,” in *2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 2002, pp. 120–127, doi: 10.1109/PLANS.2002.998898.
- [126] B. Volarić and I. Lisac, “Klimatska podjela Hrvatske prema značajkama godišnjeg hoda temperature zraka,” *Acta Geogr. Croat.*, vol. 19., no. 1., pp. 3–11, Dec. 1984.
- [127] “DHMZ - Državni hidrometeorološki zavod.” <http://meteo.hr/index.php> (accessed Nov. 28, 2021).
- [128] M. P. Tadić, G. M. Čapka, K. Zaninović, and K. Cindrić, “Drought Vulnerability in Croatia,” *Agric. Conspec. Sci.*, vol. 79, no. 1, pp. 31–38, 2014.

- [129] “EUREF Permanent GNSS Network.” <http://www.epncb.oma.be/index.php> (accessed Aug. 16, 2021).
- [130] “RTKLIB: Documents.” http://www.rtklib.com/rtklib_document.htm (accessed Nov. 10, 2021).
- [131] M. J. Astudillo, L. Lau, Y. T. Tang, and T. Moore, “Analysing the Zenith Tropospheric Delay Estimates in On-line Precise Point Positioning (PPP) Services and PPP Software Packages,” 2018, doi: 10.3390/s18020580.
- [132] “RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning.” <http://www.rtklib.com/> (accessed Nov. 29, 2021).
- [133] G. Blewitt, “Basics of the GPS Technique: Observation Equations,” in *Geodetic Applications of GPS*, Newcastle upon Tyne, NE 1 7RU, United Kingdom: Swedish Land Survey, 1997.
- [134] M. R. Blažić, *Opšta statistika osnovi i analiza*, 5th ed. Beograd: Savremena Administracija, 1982.
- [135] “Data Science and Streaming | TIBCO Software.” <https://www.tibco.com/data-science-and-streaming> (accessed Nov. 18, 2021).
- [136] N. Čubranić, *Viša geodezija*, 2nd ed. Zagreb: Geodetski fakultet, 1974.
- [137] F. Abbasov, “Shipping industry highlights ‘urgent need’ for speed limits - Campaigning for cleaner transport in Europe | Transport & Environment,” 2019. <https://www.transportenvironment.org/discover/shipping-industry-highlights-urgent-need-speed-limits/> (accessed Dec. 01, 2021).
- [138] R. Dougherty, Jack, “Autonomous Vessels are Becoming a Commercial Reality,” 2021. <https://www.maritime-executive.com/editorials/autonomous-vessels-are-becoming-a-commercial-reality> (accessed Nov. 16, 2021).
- [139] De Vlaamse Waterweg NV, “Smart Shipping Code of Practice for testing in Flanders,” Hasselt, 2018.
- [140] International Telecommunication Union., *Handbook on radiometeorology*. Geneva, Switzerland: The Union, 1996.

POPIS KRATICA

2D – two dimensional

3D – three dimensional

ARNS – Aeronautical Radio Navigation Service

BPSK – Binary Phase Shift Keying

C/A – Clear (coarse) acquisition

CCIR – International Radio Consultative Committee

CDMA – Code Division Multiple Access

CPA – Co-polarized path attenuation

DD – Double differences

DGPS – Differential GPS

DHMZ – Državni hidrometeorološki zavod Republike Hrvatske

DOP – Dilution of Precision

DORIS – Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite

DoY – the day of year

ECDIS – Electronic Chart Display and Information System

ECEF – Earth Centered, Earth Fixed coordinate system

EGNOS – European Geostationary Navigation Overlay Service

EKF – Extended Kalman filter

ESA – European Space Agency

EUREF – Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe

FDMA – Frequency Division Multiple Access

GAGAN – GPS Aided GEO Augmented Navigation

GDOP – Geometric Dilution of Precision

GLONASS – GLObal NAVigation Satellite System; rus. Глобальная навигационная спутниковая система

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS – Global Positioning System

HDOP – Horizontal Dilution of Precision

ICAO – International Civil Aviation Organization

IGS – International GPS Service

IRNSS-NAVICs – Indian Regional Navigation Satellite System – Navigation with Indian Constellation

ISA – The International standard Atmosphere

ISO – International Organization for Standardization

ITU – International Telecommunication Union

LHCP – Left-hand Circular Polarization

LM – Levenberg-Marquardt method

LOS – Line-of-sight

LRT1 – First Lapse-Rate Tropopauses

LRT2 – Second Lapse-Rate Tropopauses

MOPS – Minimum Operational Performance Standards

MSAS – Multi-functional Satellite Augmentation System

MTT – Mapping Temperature Test

NMF – Niell (New) Mapping Functions)

NWM – Numerical weather models

PDOP – Position Dilution of Precision

PPP – *Precise Point Positioning*
PRN – *Pseudorandom noise Code*
PWV – *Precipitable Water Vapor*
PZ-90 – *Parametry Zemli 1990 goda; rus. Параметры Земли 1990 года*
QZSS – *Quasi-Zenith Satellite System*
RDCP – *Right-hand Circular Polarization*
RHCP – *Right-hand Circular Polarization*
RINEX – *Receiver Indendant Exchange*
RMS – *Root Mean Square Error*
RNSS – *Radio Navigation Satellite Service*
RTCA – *Radio Transmission Commission for Aeronautics*
RTK – *Real-Time Kinematics*
SBAS – *Satellite-Based Augmentation Systems*
SDCM – *rus. Система Дифференциальной Коррекции и Мониторинга*
STD – *Slant Tropospheric Delay*
TEC – *Total Electron Content*
TECU – *Total Electron Content Unit*
UERE – *User Equivalent Ranging Error*
UN – *United Nations*
USSAS 66 – *U.S. Standard Atmospheric Supplements, 1966*
UTC – *Universal Time Coordinated*
VDOP – *Vertical Dilution of Precision*
VLBI – *Very long base interferometry*
WAAS – *Wide Area Augmentation System*
WGS84 – *World Geodetic System 1984*
WVR – *Water Vapor Radiometer*
ZHD – *Zenith Hydrostatic Delay*
ZTD – *Total Zenith Delay*
ZWD – *Zenith Wet Delay*

POPIS VAŽNIJIH OZNAKA I SIMBOLA

3. MORFOLOGIJA TROPOSFERE

dP ...razlika tlakova koji djeluju s obje strana sloja troposfere u hidrostatskoj ravnoteži

P_i ...parcijalni tlak (hPa),

P_d ...parcijalni tlak suhoga zraka (hPa)

ρ ...gustoća (kg m^{-3})

V ...volumen zraka (m^3)

T ...temperatura (K)

T_v ...virtualna temperatura (K)

R ...univerzalna plinska konstanta ($\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$)

R_i ...specifična plinska konstanta pojedinog plina ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

R_m ...specifična plinska konstanta plinske smjese

M_i ...molekularna masa (kg mol^{-1})

M_m ...srednja molekularna masa plinske smjese (kg mol^{-1})

g ...gravitacijsko ubrzanje (m s^{-2})

h ...visina sloja hidrostatske ravnoteže iznad razine mora (m),

k ...broj plinova unutar smjese

m ...omjer pomiješanosti

m_{sat} ...omjer zasićene pomiješanosti (g kg^{-1})

n_i ...množinski broj (mol) plina i

m_i ...masa plina (kg)

m_d ...masa suhoga zraka (kg)

α ...specifični volumen

M_m ...srednja molekularna masa plinske smjese (kg mol^{-1})

R_d ...srednja specifična plinska konstanta ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

R_m ...specifična plinska konstanta vlažnog zraka

ρ_d ...gustoća suhoga zraka (kg m^{-3})

ρ_m ...gustoća vlažnog zraka (kg m^{-3})

ρ_w ...gustoća vodene pare (kg m^{-3})

q ...specifična vlažnost (g kg^{-1})

R_w ...specifična plinska konstanta vodene pare ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

e ... parcijalni tlak vodene pare (hPa)

e_{sat} ...zasićeni tlak vodene pare (hPa)

δ_w ...apsolutna vlažnost (g m^{-3})

R_h ...relativna vlažnost (%)
 H ...visinska ljestvica (km)
 Υ_h ...prosječna stopa opadanja temperature s visinom za homogenu atmosferu (°C/100 m)
 P_v ...oboriva voda
 n ...indeks loma (refrakcije)
 ε ...dielektričnost medija
 μ ...magnetska permeabilnost
 c ...brzina širenja radio vala u vakuumu
 v_m ...brzina širenja u mediju
 N ...atmosferska refrakcija (N jedinica)
 e ...parcijalni tlak vodene pare (mbar)
 P ...atmosferski tlak (mbar)
 $N(h)$...vrijednost refrakcije na visini h
 N_s ...vrijednost refrakcije iznad visine h
 H ...visinska ljestvica (km)
 t ...temperatura (C)
 T_c ...temperatura (C)
 λ ...valna duljina u (μm)
 N_g ...grupna refrakcija
 ρ ...gustoća oborive vode
 R ...radijus zakrivljenosti (N jedinica / km)
 θ ...vrijednost kuta loma u odnosu na zenit
 N_d ...refrakcija suhog zraka
 N_w ...refrakcija vodene pare
 K_i ...konstante atmosferske refrakcije (K mbar^{-1})
 P_d ...parcijalni tlak suhih plinova
 T ...apsolutna temperatura (K)
 Z_d^{-1} ...inverzni faktor stlačivosti komponenti suhoga zraka
 Z_w^{-1} ...inverzni faktor stlačivosti vodene pare
 K_i ...konstante atmosferske refrakcije (K mbar^{-1})
 R_i ...specifična plinska konstanta plina i
 p_i ...tlak idealnog plina
 ρ_i ...gustoća plina i
 Z_i ...faktor stlačenosti plina i
 R_o ...univerzalna plinska konstanta

M_d ...molekularna masa suhoga zraka
 M_w ...molekularna masa vlažnog zraka
 $m(\varepsilon)$...ukupna funkcija mapiranja
 $m_d(\varepsilon)$...hidrostatska funkcija mapiranja
 $m_w(\varepsilon)$...nehidrostatska funkcija mapiranja
 ε ...kut elevacije radiosignala (rad)
 $r_s - r_a$...putanja signala kroz sferično simetričnu atmosferu
 r_o ...duljina putanje radio signala
 d_{na} ...kašnjenje širenja radionavigacijskog signala u neutralnoj atmosferi (m)
 d_{na}^z ...kašnjenje širenja radionavigacijskog signala u neutralnoj atmosferi u zenitnom smjeru (m)
 $\tau_a(r)$...specifično slabljenje (dB km⁻¹)
 $\tau_o(r)$...učinak kisika na slabljenje radio signala (dB km⁻¹)
 $\tau_w(r)$...učinak vodene pare na slabljenje signala (dB km⁻¹)
 A_a ...ukupna atmosferska apsorpcija radio signala (dB km⁻¹)
 h_o ...visinski ekvivalent kisika
 h_w ...visinski ekvivalent vodene pare
 ρ ...površinska koncentracija vodene pare (g m⁻³)
 Q_T ...ukupno povećanje poprečnog presjeka
 $N(D)$...broj kapi po jedinici volumena po jedinici promjera u promatranom intervalu (mm⁻¹m⁻³)
 $Q_S(D)$...dio površine poprečnog presjeka s učinkom raspršenja
 $Q_A(D)$...dio površine poprečnog presjeka s učinkom slabljenja

4. POSTOJEĆI MODELI ZA ISPRAVKU TROPOSFERSKOG KAŠNJENJA

g_m ...gravitacijsko ubrzanje s obzirom na centar mase vertikalnog stupca zraka promatrane visine (m s⁻²)
 φ ...zemljopisna širina korisničkog prijavnika (rad)
 H_s ...visina korisničkog prijavnika iznad razine mora (m)
 P_s ...površinski tlak (hPa)
 P_g ...površinski tlak (mbar)
 e ...parcijalni tlak vodene pare (hPa)
 e_s ...parcijalni tlak vodene pare na nivou površine prijavnika (hPa)
 e_g ...parcijalni tlak vodene pare na nivou površine prijavnika (mbar)
 α ...specifična stopa opadanja vrijednosti temperature s visinom (K/m)

T_s ...temperatura na nivou prijavnika (K)
 z ...zenitni kut
 N_{ds} ...refrakcija suhe komponente na površini
 N_{ws} ...refrakcija mokre komponente na nivou prijavnika
 H_d^e ...efektivna visina hidrostatske komponente (km)
 H_w^e ...efektivna visina mokre komponente (km)
 H_i^e ...efektivna visina suhe i mokre komponente (km)
 H ... visina iznad razine mora (km)
 H_s ...visina lokacije prijavnika (km)
 t_o ...površinska temperatura ($^{\circ}$ C)
 N_{ds}^{trop} ...model hidrostatske refrakcije pri površini Zemlje
 N_{ws}^{trop} ...model nehidrostatske refrakcije pri površini Zemlje
 d_d^z ...hidrostatsko zenitno kašnjenje (m)
 d_w^z ...nehidrostatsko zenitno kašnjenje (m)
 T_m ...srednja temperatura ($^{\circ}$ K)
 r_s ...srednji geocentrični radijus promatranog položaja (m)
 U_s ...relativna vlaga (%)
 β ...specifični toplinski omjer
 d_{ds}^z ...hidrostatska zenitna komponenta kašnjenja pri površini Zemlje (m)
 d_{ws}^z ...nehidrostatska zenitna komponenta kašnjenja pri površini Zemlje (m)
 H ...visina prijavnika iznad razine mora (m)
 $m_i(\varepsilon)$...funkcija mapiranja hidrostatske i nehidrostatske komponente
 d_{tro} ...ukupno troposfersko kašnjenje (m)
 H_t ...visina tropopauze (m)
 ΔR ...odstupanje satelitske udaljenosti (m)
 $f(\lambda)$...parametar frekvencije i valne duljine

5. METODOLOŠKE ODREDNICE ISTRAŽIVANJA

Cb ...oznaka za klimu po Köppenovoj klasifikaciji klime
 Ca ...oznaka za klimu po Köppenovoj klasifikaciji klime
 IP/E ...koeficijent vlažnosti po Thornthwaiteovoj klasifikaciji klime
 $P_{r,i}^S$... pseudoudaljenost i-tog satelita
 \bar{t}_r ...vrijeme prijama signala određeno satom prijavnika (s)
 \bar{t}^s ...vrijeme emitiranja signala određeno satelitskim satom (s)
 ρ_r^S ... geometrijska udaljenost između antena satelita i prijavnika

dt_r, dT^S ...neusklađenost satova prijamnika i satelita
 $I_{r,i}^S$...ionosferska greška
 T_r^S ...troposferska greška
 ε_p ...greška mjerenja
 λ_r ...geodetska zemljopisna dužina
 ϕ_r ...geodetska zemljopisna širina
 h ...elipsoidna visina
 a ...duža os referentnog Zemljina elipsoida
 f ...indeks spljoštenosti referentnog Zemljina elipsoida
 P ...ukupni tlak zraka (hPa)
 T ...temperatura ($^{\circ}$ K)
 h_{rel} ...relativna vlaga
 e ...parcijalni tlak zraka (hPa)
 h ... geodetska visina iznad razine mora
 ε ...kut elevacije signala
 z ...zenitni kut signala
 G_N ...troposferski gradijent u sjevernom usmjerenju
 G_E ...troposferni gradijent u istočnom usmjerenju
 m_w ...nehidrostatska funkcija mapiranja
 m_d ...hidrostatska funkcija mapiranja
 d_{tro} ...ukupno troposfersko kašnjenje
 d_d^z ...hidrostatska komponenta zenitnog troposferskog kašnjenja
 d_{na}^z ...ukupno troposfersko kašnjenje u zenitnom smjeru
 a_e ...duža os referentnog Zemljina elipsoida PZ-90 geodetskog datuma (6378136 m)
 μ ...gravitacijska konstanta Zemlje ($398600,44 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{s}^2$)
 ω_e ...kutna brzina Zemlje ($7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$)
 J_2 ...drugi geopotencijalni zonski harmonik ($1082625,7 \cdot 10^{-9}$)
 y ...vektor mjerenja
 H ...nepoznata ispravka parametra vektora x
 $(h)x$... mjerna vektorska funkcija vektora parametara x
 v ...slučajne greške mjerenja
 R_A^i ...pseudoudaljenost od položaja A do satelita i
 ρ_A^i ...geometrijska udaljenost
 I_A^i ...ionosfersko kašnjenje
 T_A^i ...troposfersko kašnjenje

$c\delta_A$...greška satelitske orbite

$c\delta^i$... greška sata

$\delta\rho_{mul}$...greška višestaznih putanja

$\delta\rho_{rel}$...relativistička greška

e_A^i ...slučajna greška

P_G ...geodetski položaj

P_S ...položaj određen Saastamoinenovom funkcijom troposferskog kašnjenja

P_{Si} ...predloženi model troposferskog zenitnog kašnjenje temeljen na postojećem

Saastamoinenovu modelu

M_S ...postojeći Saastamoinenov model

$\Delta X_{f(s)}$...odstupanje po osi X po Saastamoinenovu modelu

$\Delta Y_{f(s)}$...odstupanje po osi Y po Saastamoinenovu modelu

$\Delta Z_{f(s)}$...odstupanje po osi Z po Saastamoinenovu modelu

ΔX_M ...odstupanje po osi X predloženim modelom

ΔY_M ...odstupanje po osi Y predloženim modelom

ΔZ_M ...odstupanje po osi Z predloženim modelom

6. METODOLOŠKE ODREDNICE ISTRAŽIVANJA

x, y i z ...koordinate Kartezijeva koordinatnog sustava

$e l^2$...prvi numerički ekscentricitet elipsoida

b ...meridijanska (kraća) poluos referentnog elipsoida

Gm ...nulti meridijan

T ...promatrani položaj

POPIS SLIKA

Broj	Naziv slike	Stranica
2.1.	Određivanje korisničkog položaja upotrebom referentnih zemaljskih postaja	12
2.2.	Sjecište sfera određuje položaj GNSS-ova prijamnika	14
2.3.	Orbitalni prikaz grupiranja GLONASS-ova satelita	16
2.4.	Keplerovi parametri položaja GLONASS-ovih navigacijskih satelita	18
2.5.	Međusobni raspored satelita po orbitama	22
2.6.	Prikaz namjene i rasporeda odašiljanih GLONASS-ovih frekvencija	23
2.7.	Prikaz primijenjenih tehnika odvajanja frekvencija po valnim područjima GLONASS-ovih frekvencija s tipom navigacijske poruke	24
2.8.	Prikaz Snellova zakona loma	27
2.9.	Prikaz otklona stvarne putanje elektromagnetskog vala u odnosu na geometrijsku putanju pri širenju kroz različite slojeve atmosfere	27
2.10.	Visinski raspored slojeva ionosfere	29
2.11.	Višestazna putanja radionavigacijskog signala	35
2.12.	Dijagram usmjerenosti GLONASS-ove antene za brodske prijamnike	38
2.13.	Povoljni prostorni raspored (a) i nepovoljni prostorni raspored (b) GLONASS-ovih satelita s obzirom na određivanje korisničkog položaja	40
2.14.	Optimalni raspored minimalnog broja GLONASS-ovih satelita za ostvarivanje minimalnih koeficijenata DOP	41
3.1.	Potencijalna podjela Zemljine atmosfere	43
3.2.	Visinska struktura troposfere	44
3.3.	Visinska struktura troposfere po ISA-inu modelu atmosfere	54
3.4.	Struktura temperaturnih profila troposfere po modelu standardne atmosfere USSAS 66	55
3.5.	Raspodjela relativne vlage do 10 km visine troposfere po modelu standardne atmosfere USSAS 66	56
3.6.	Oboriva voda u sloju p1 – p2	57
4.1.	Vektori pozicije modificiranog Hopfieldova modela	78
4.2.	Vrijednosti troposferskog kašnjenja GPS-ova radionavigacijskog signala određeno po modificiranom Hopfieldovu modelu	79
5.1.	Širi geografski smještaj izabranih mjernih GNSS-ovih postaja	105
5.2.	Model određivanja pseudoudaljenosti	107

5.3.	Hodogram obrade ulaznih podataka do faze verifikacije predloženog modela	114
5.4.	Metodološki tijek razvoja predloženog modela	117
6.1.	Postupak provedenog procesa verifikacije	124
6.2.	Usporedba ostvarenih iznosa srednje kvadratne greške za Čakovec u 2014. (a) i 2015. (b) godini	126
6.3.	Usporedba ostvarenih iznosa srednje kvadratne greške za Zadar u 2014. (a) i 2015. (b) godini	128
6.4.	Usporedba ostvarenih iznosa srednje kvadratne greške za Dubrovnik u 2014. (a) i 2015. (b) godini	130
6.5.	Kretanje parametra srednje kvadratne greške promatranih lokacija, izraženo u apsolutnim i relativnim iznosima.	132
6.6.	Kretanje parametra standardne devijacije promatranih lokacija, izraženo u apsolutnim i relativnim iznosima	133
6.7.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Čakovcu 1. – 3. siječnja 2015. godine	134
6.8.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Zadru 1. – 3. siječnja 2015. godine	135
6.9.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Dubrovniku 1. – 3. siječnja 2015. godine	135
6.10.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Čakovcu 1. – 3. travnja 2015. godine	136
6.11.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Zadru 1. – 3. travnja 2015. godine	136
6.12.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja postaje u Dubrovniku 1. – 3. travnja 2015. godine	136
6.13.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svim osima za postaju u Čakovcu u 2015. godini	137
6.14.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svim osima za postaju u Zadru u 2015. godini	138
6.15.	Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svim osima za postaju u Dubrovniku u 2015. godini	138
6.16.	Kartezijev koordinatni sustav s prikazom geografskih koordinata	140

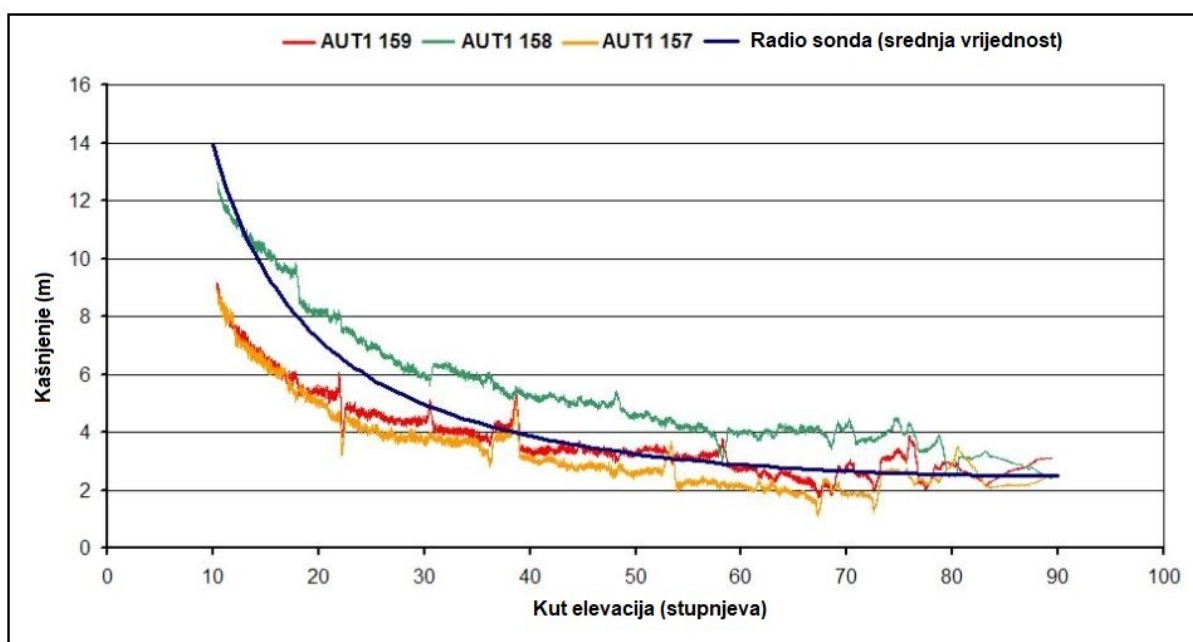
POPIS TABLICA

Broj	Naziv tablice	Stranica
2.1.	Dostupne tehničke karakteristike satelita sustava GLONASS u trenutačnoj upotrebi	16
2.2.	Pojedinačni izvori i pripadajući iznosi SKP pseudoudaljenosti u jednofrekvencijskih i dvofrekvencijskih GLONASS-ovih prijamnika	39
2.3.	Vrijednost koeficijenta DOP s pripadajućom točnosti korisničkih parametara položaja i brzine	41
3.1.	Prosječne vrijednosti udjela plinova suhoga zraka u donjim slojevima atmosfere	46
3.2.	Prikaz najznačajnijih konstanti atmosferske refrakcije	61
3.3.	Prikaz maksimalnih vrijednosti kašnjenja GPS-ova signala u neutralnoj atmosferi	72
4.1.	Tablica za interpolaciju koeficijenta B (H) Saastamoinenova modela	75
4.2.	Tablica za interpolaciju koeficijenta δR Saastamoinenova modela (m)	75
4.3.	Tablica vrijednosti koeficijenta λ za primjenu u Askneovu i Nordiusovu modelu	81
4.4.	Tablica vrijednosti koeficijenta v i γ za primjenu u poluempirijskom općem modelu Babyja i sur.	83
4.5.	Tablica vrijednosti koeficijenta K za primjenu u modelu 'Berman (D/N)' te 'Berman (TMOD)'	85
4.6.	Tablica prosječnih standardnih vrijednosti meteoroloških parametara	86
4.7.	Tablica prosječnih vrijednosti sezonskih varijacija meteoroloških parametara	87
4.8.	Tablica koeficijenta hidrostatske funkcije Niellova modela	89
4.9.	Tablica koeficijenta nehidrostatske komponente funkcije Niellova modela	89
5.1.	Opći podaci korištenih EUREF-ovih mjernih postaja	104
5.2.	Statistički pokazatelji značajnosti predloženog modela za os x	119
5.3.	Statistički pokazatelji značajnosti prediktora predloženog modela za os x	120
5.4.	Statistički pokazatelji značajnosti predloženog modela za os y	120
5.5.	Statistički pokazatelji značajnosti prediktora predloženog modela za os y	121
5.6.	Statistički pokazatelji značajnosti predloženog modela za os z	121
5.7.	Statistički pokazatelji značajnosti prediktora predloženog modela za os z	121
5.8.	Pokazatelji validacije komponenti predloženog modela	122

6.1.	Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Čakovcu 2014. godine	125
6.2.	Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Čakovcu 2015. godine	125
6.3.	Apsolutne vrijednosti korekcija ostvarenih predloženim modelom za postaju u Čakovcu	127
6.4.	Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Zadru, 2014. godina	127
6.5.	Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Zadru, 2015. godina	128
6.6.	Apsolutne vrijednosti korekcija ostvarenih predloženim modelom za postaju u Zadru	129
6.7.	Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Dubrovniku za 2014. godinu	129
6.8.	Apsolutni iznosi parametara točnosti za postaju u Dubrovniku za 2015. godinu	130
6.9.	Apsolutne vrijednosti korekcija ostvarenih predloženim modelom za postaju u Dubrovniku za period u 2014. i 2015. godini	131
6.10.	Ukupni rezultati vrijednosti srednje kvadratne greške i standardne devijacije ostvarenih predloženim modelom	131
6.11.	Prosječne vrijednosti razlika apsolutnog odstupanja točnosti promatranih lokacija	142

PRILOG

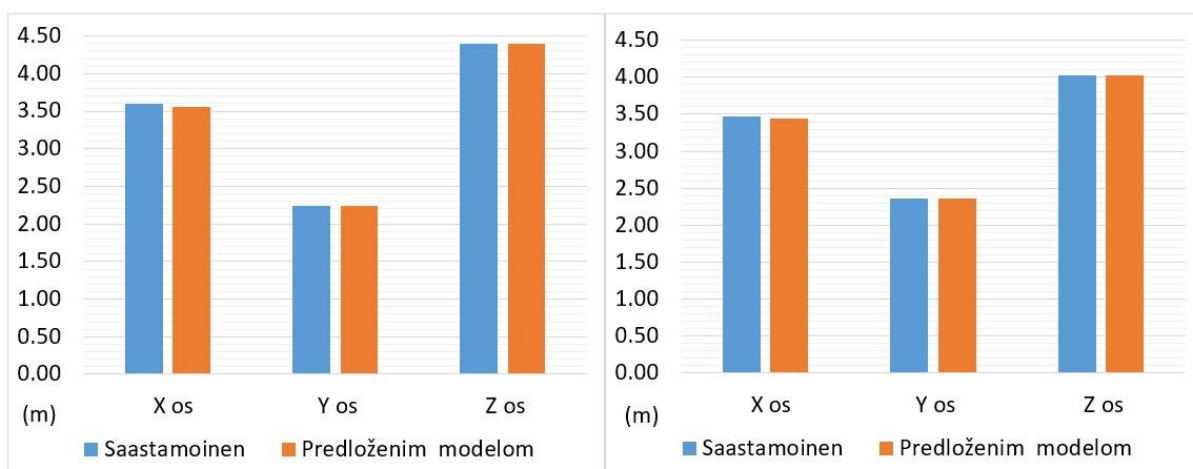
A) grafički prikaz troposferskog kašnjenja trodnevnog promatranja za mjernu postaju AUT 1 (Aristotele University of Thessaloniki) [6]



B) grafički prikaz usporedbe vrijednosti standardnih devijacija i medijana odstupanja položaja ostvarenih Saastamoinenovim i predloženim modelom troposferskog kašnjenja za postaje u Čakovcu, Zadru i Dubrovniku u razdoblju 2014. – 2015. godina

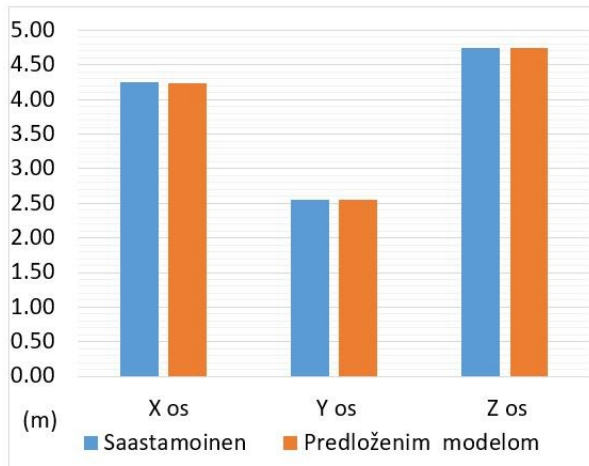
vrijednosti za 2014. godinu

vrijednosti za 2015. godinu

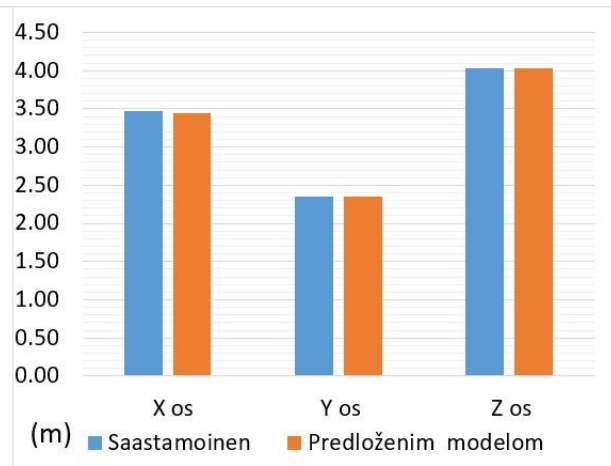


Vrijednosti standardne devijacije za postaju u Čakovcu u promatranom razdoblju

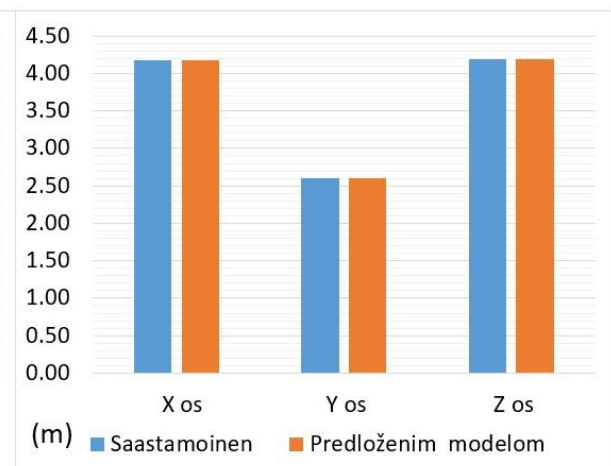
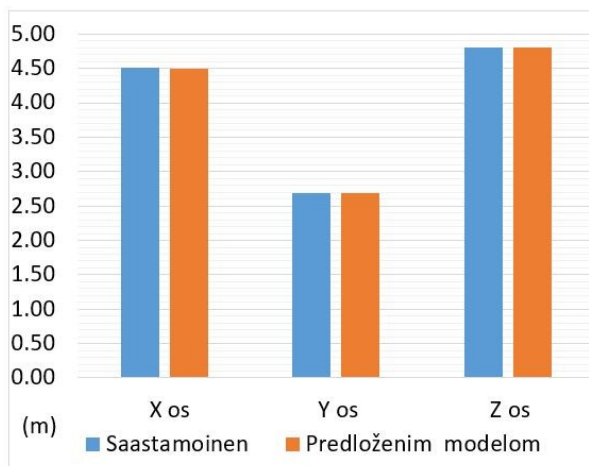
vrijednosti za 2014. godinu



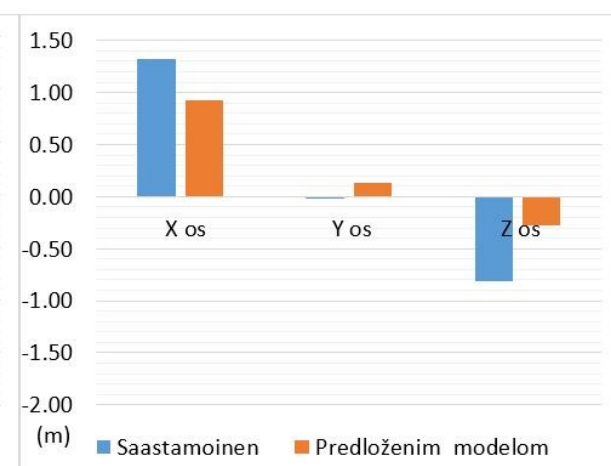
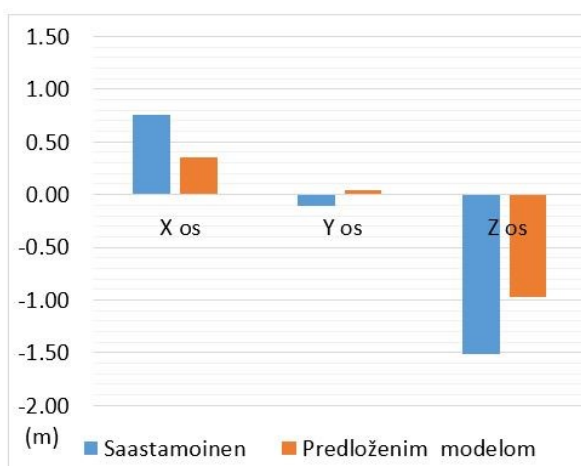
vrijednosti za 2015. godinu



Vrijednosti standardne devijacije za postaju u Zadru u promatranom razdoblju

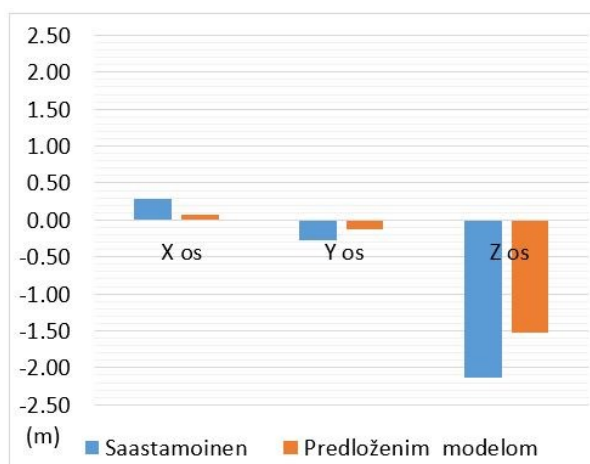


Vrijednosti standardne devijacije za postaju u Dubrovniku u promatranom razdoblju

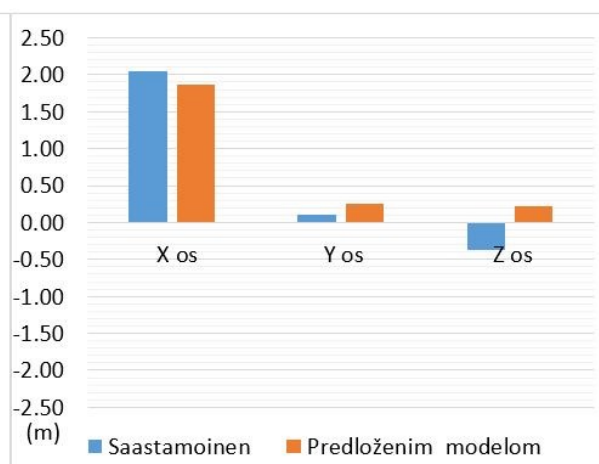


Vrijednosti medijan raspodjele za postaju u Čakovcu u promatranom razdoblju

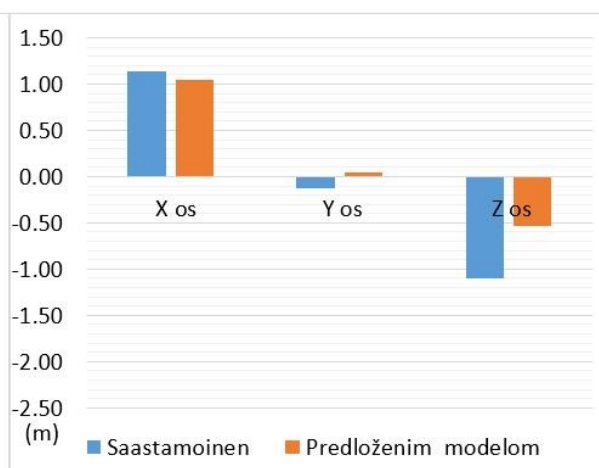
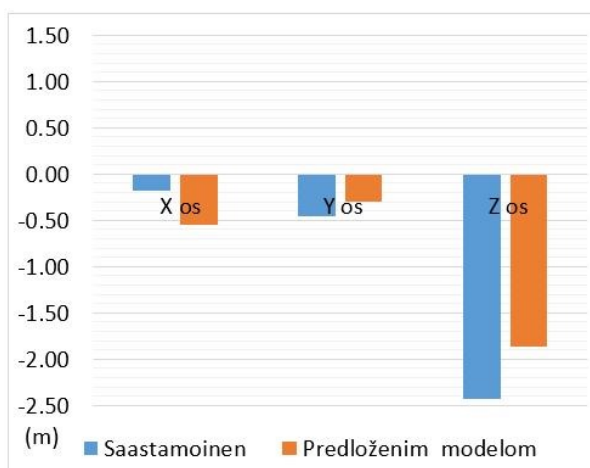
vrijednosti za 2014. godinu



vrijednosti za 2015. godinu

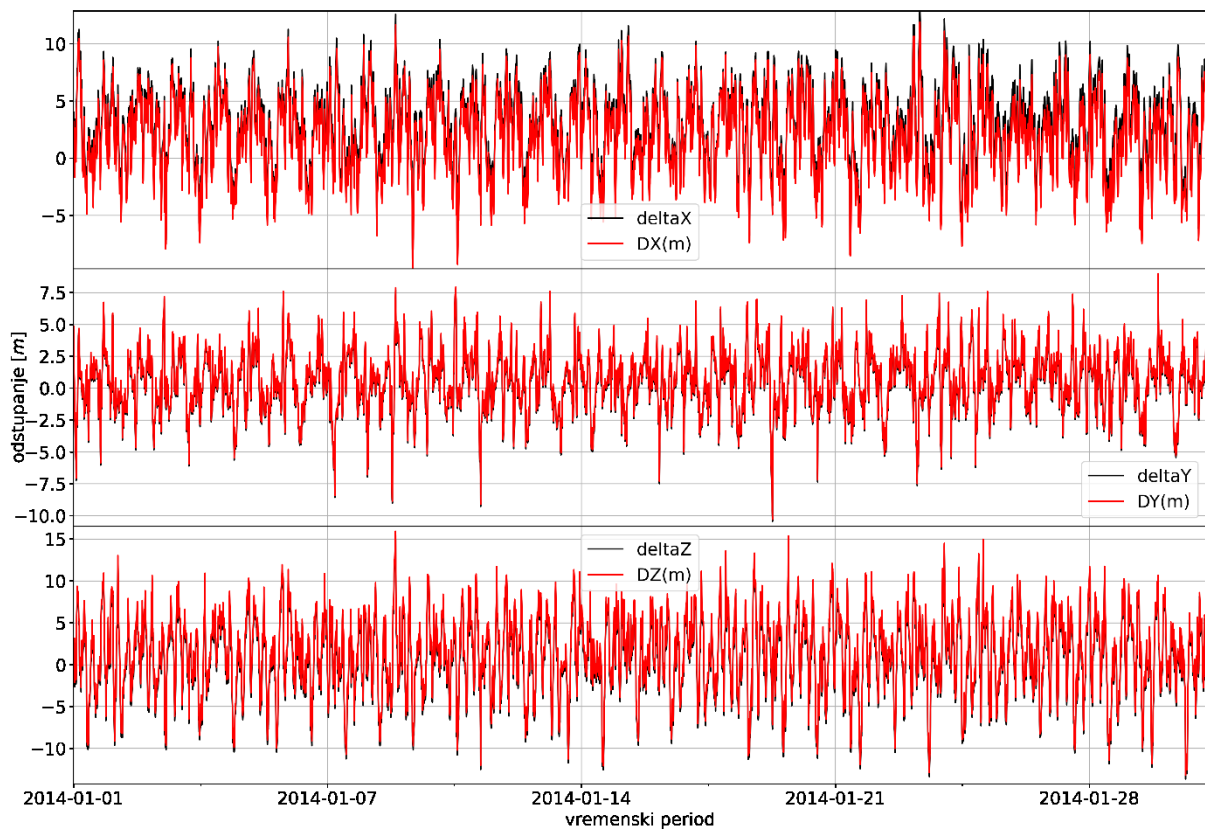


Vrijednosti medijan raspodjele za postaju u Zadru u promatranom razdoblju

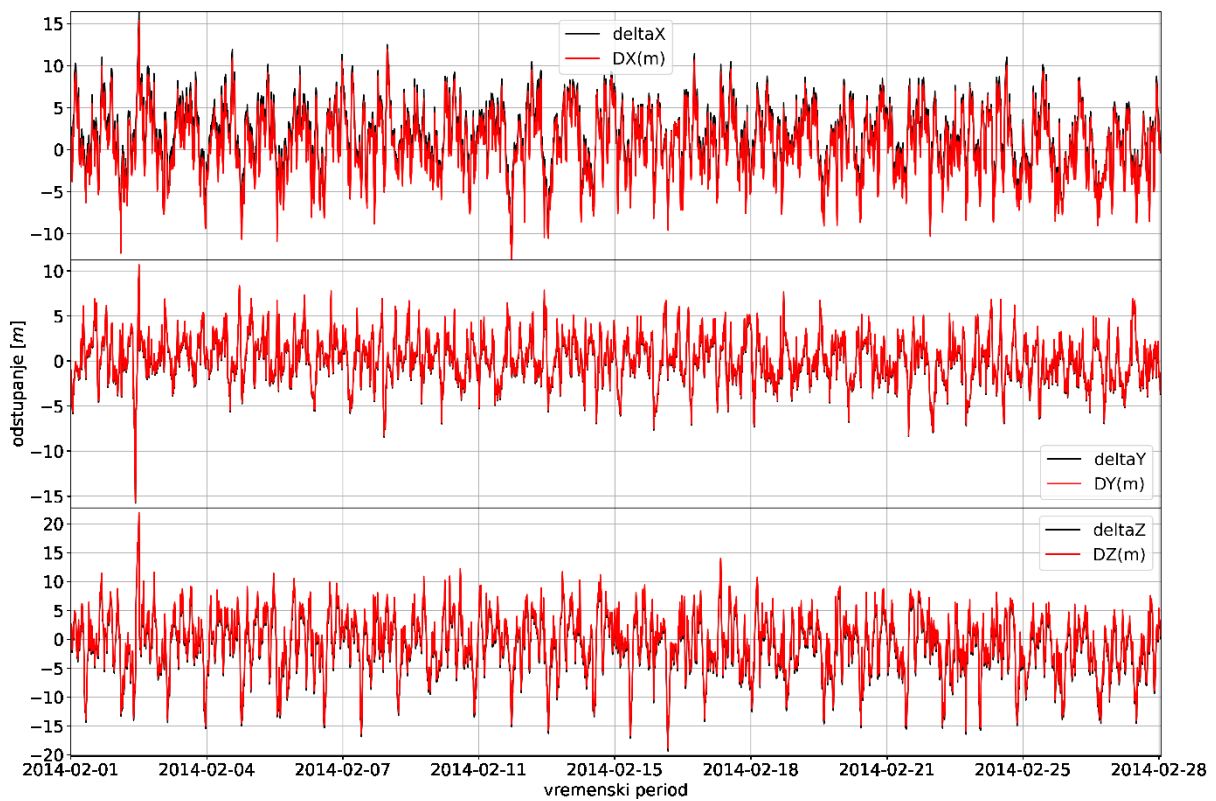


Vrijednosti medijan raspodjele za postaju u Dubrovniku u promatranom razdoblju

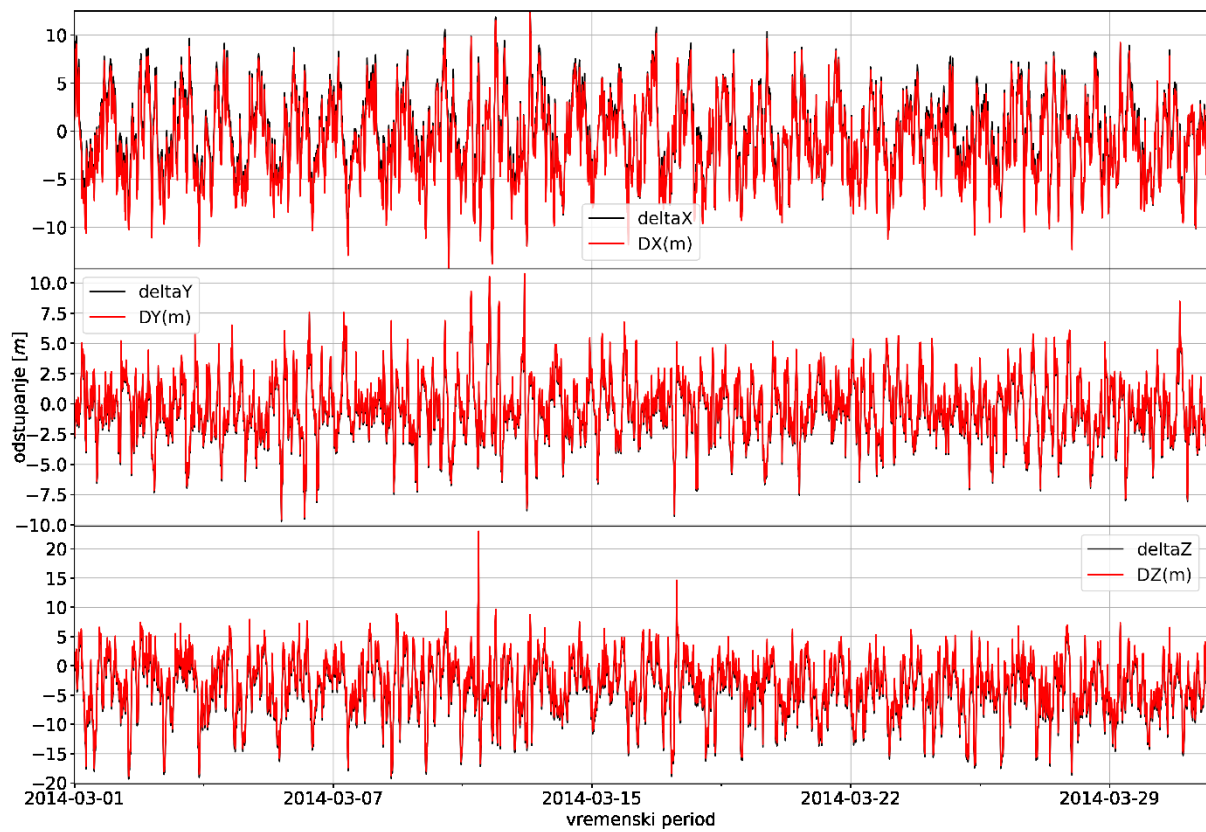
C) grafički prikaz usporedbe vrijednosti odstupanja položaja ostvarenih Saastamoinenovim (delta X, Y i Z) i predloženim modelom (DX, DY i DZ) troposferskog kašnjenja za postaje u Čakovcu, Zadru i Dubrovniku u razdoblju 2014. – 2015. godine. Grafovi odijeljeno prikazuju rezultate odstupanja za sve koordinatne osi; os x (gornji dio grafa), os y (srednji graf) te os z (donji dio grafa).



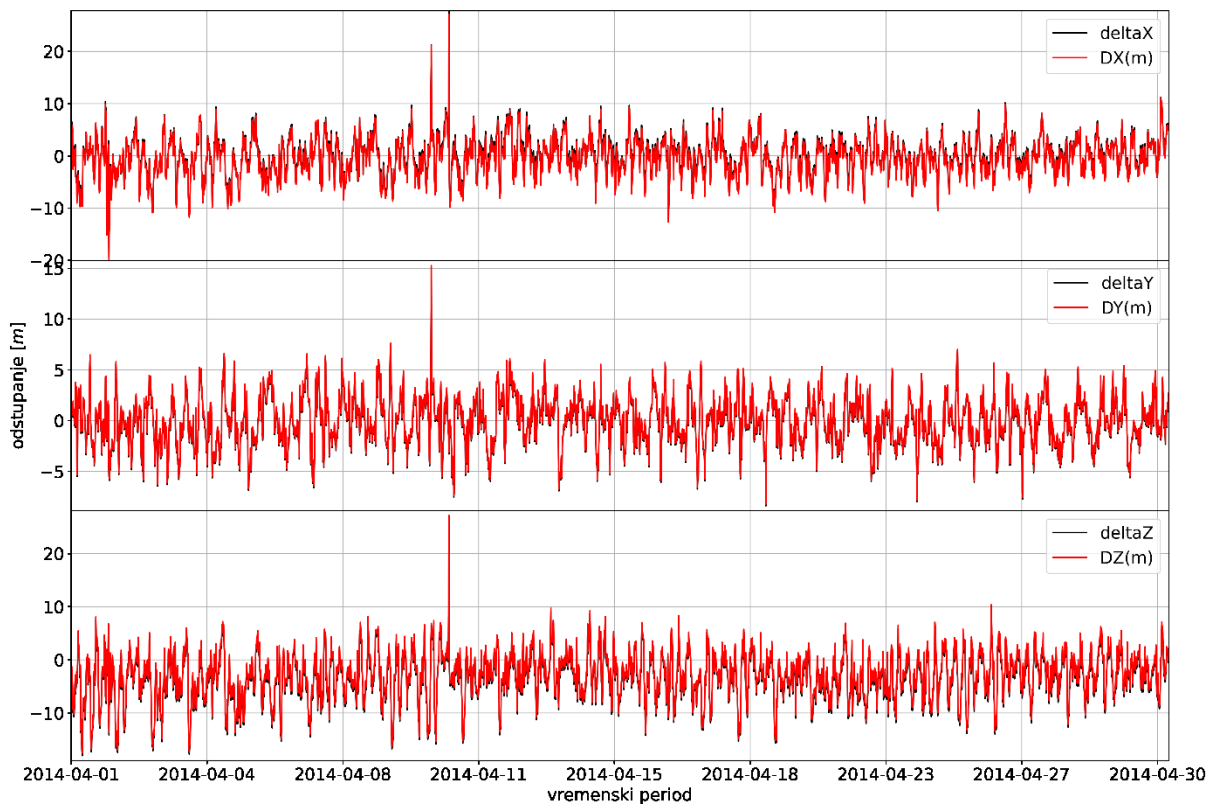
Odstupanja za postaju u Čakovcu za siječanj 2014. godine



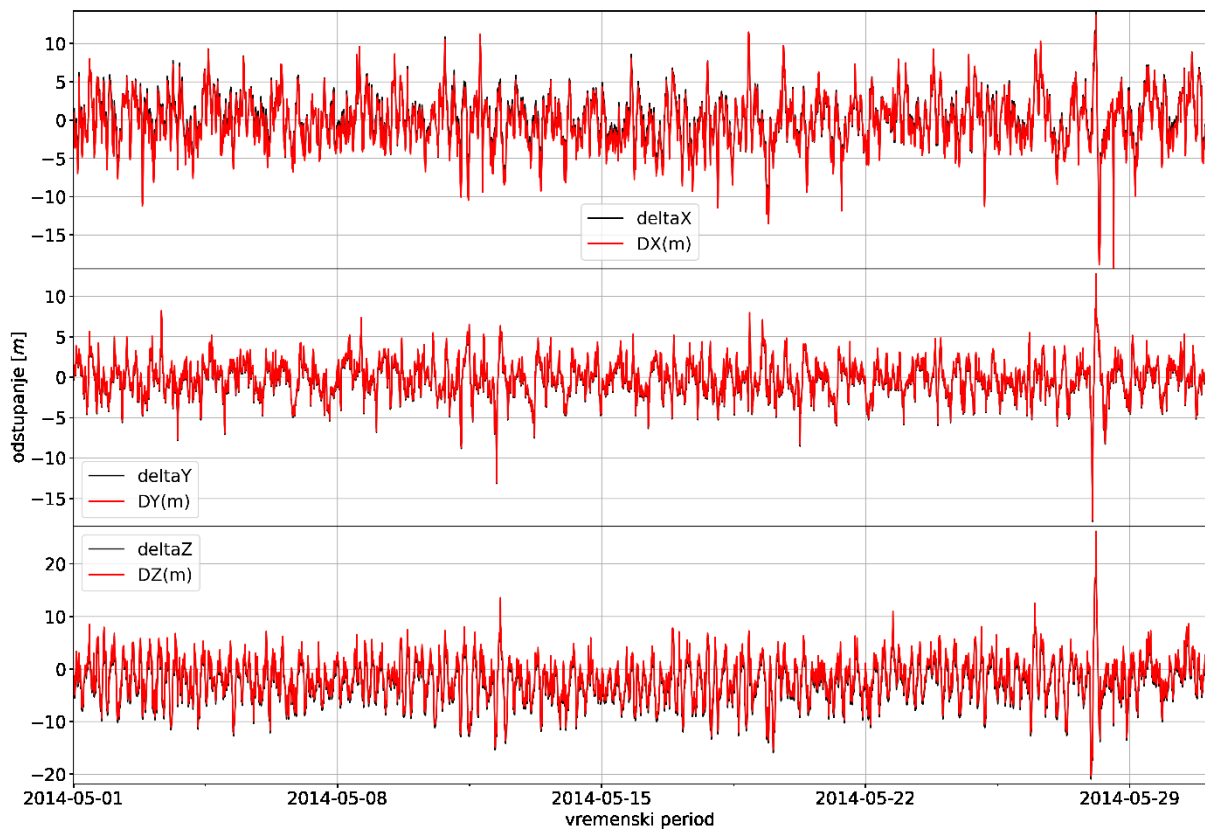
Odstupanja za postaju u Čakovcu za veljaču 2014. godine



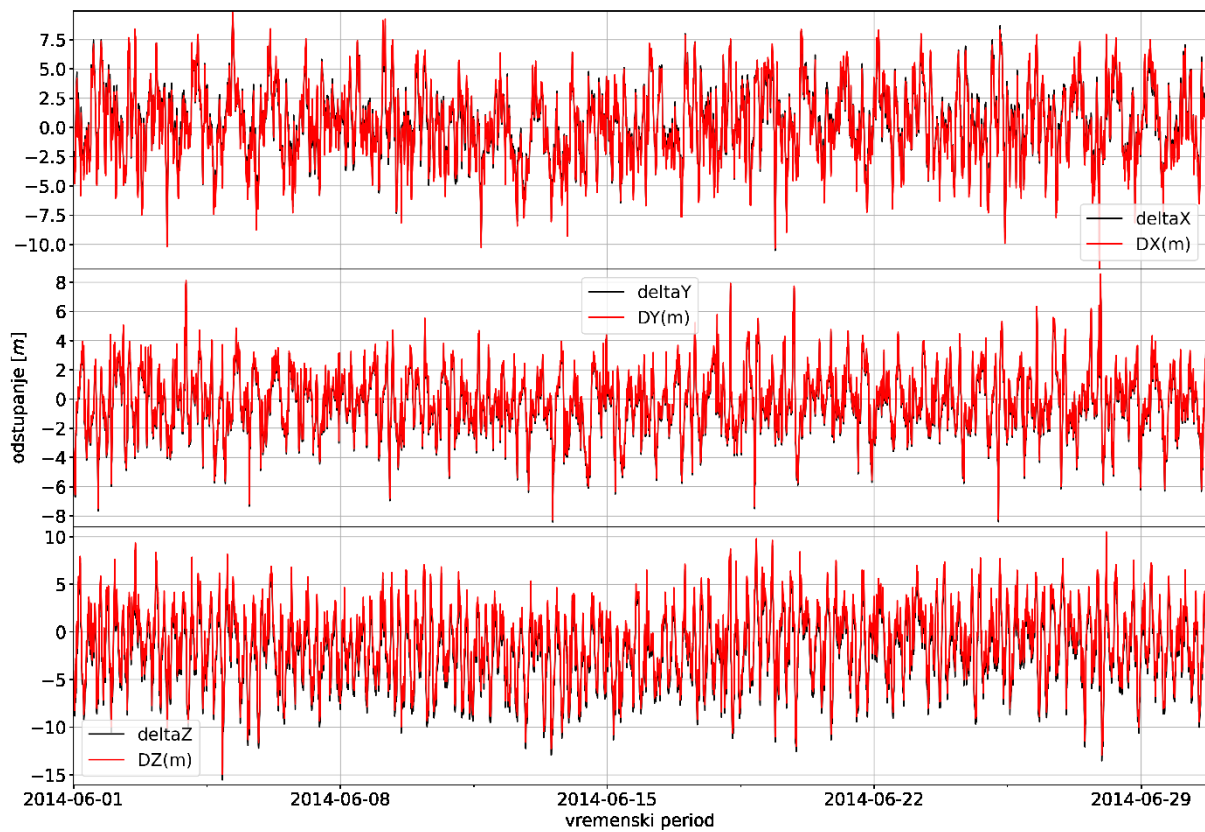
Odstupanja za postaju u Čakovcu za ožujak 2014. godine



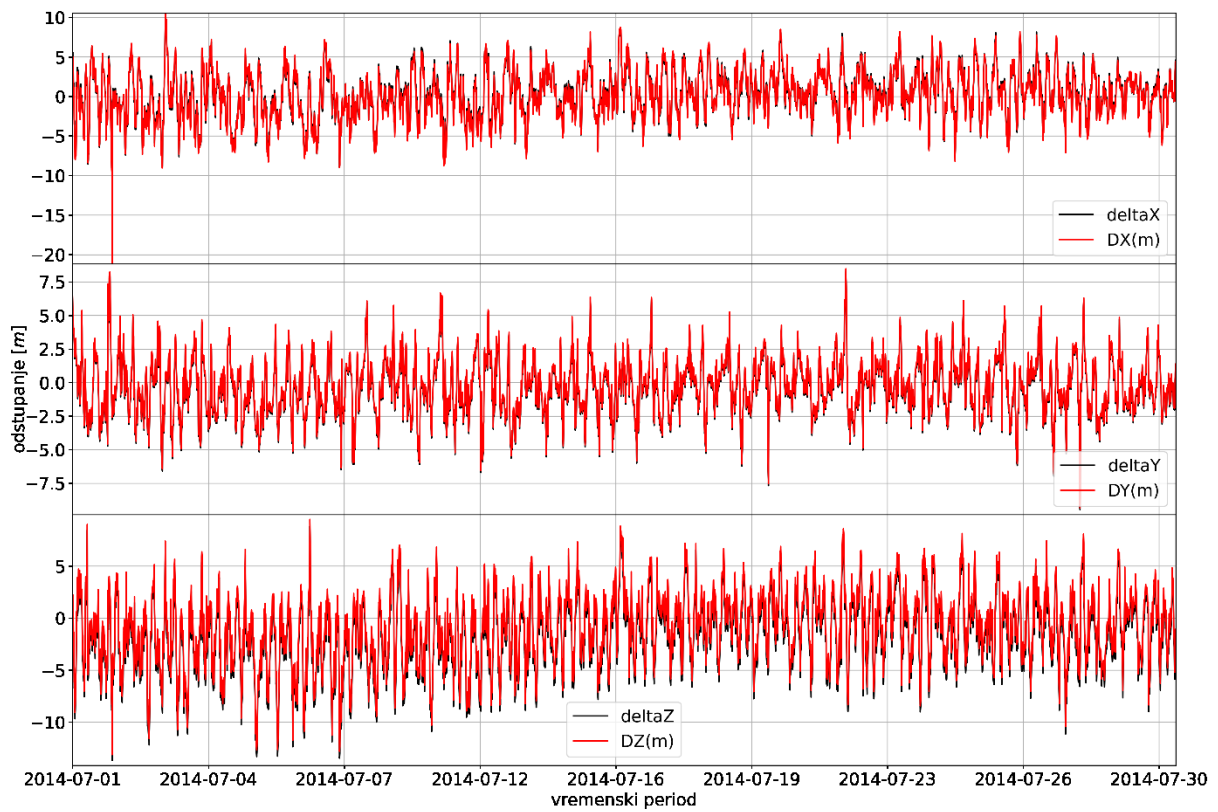
Odstupanja za postaju u Čakovcu za travanj 2014. godine



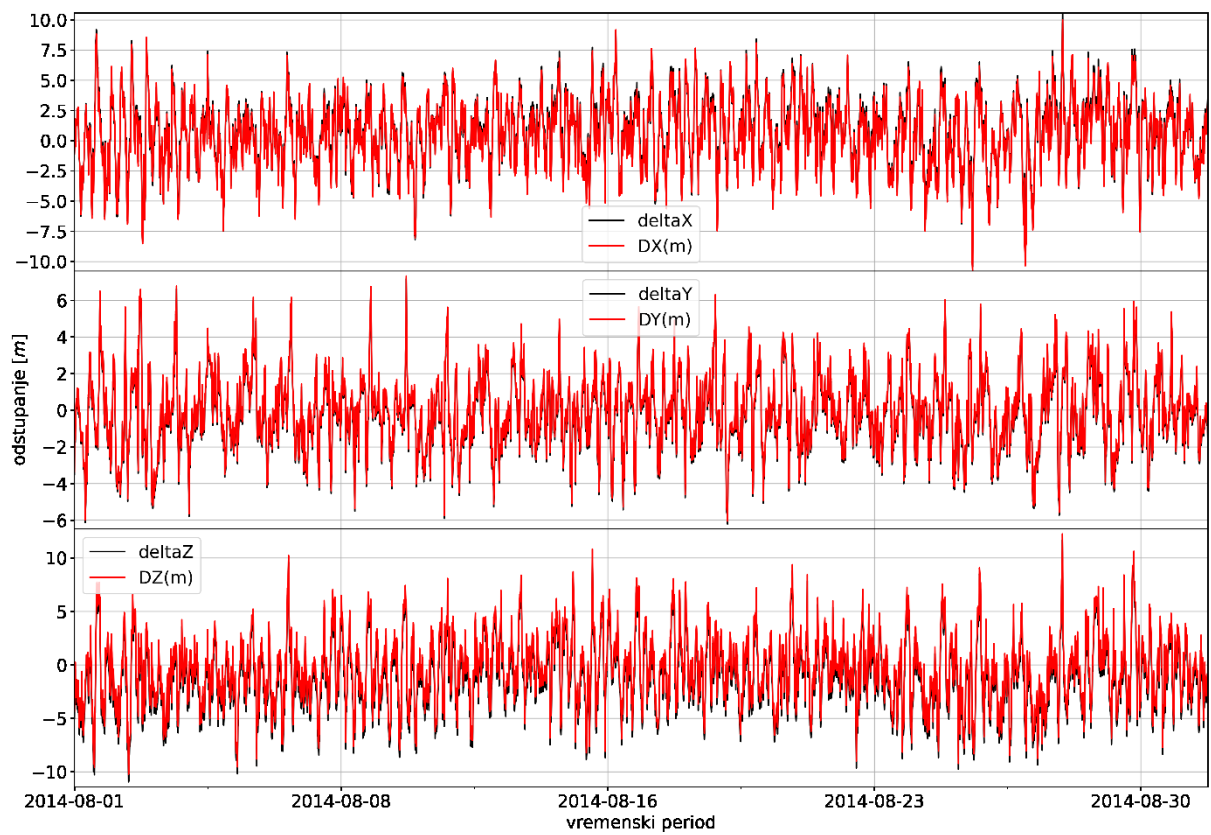
Odstupanja za postaju u Čakovcu za svibanj 2014. godine



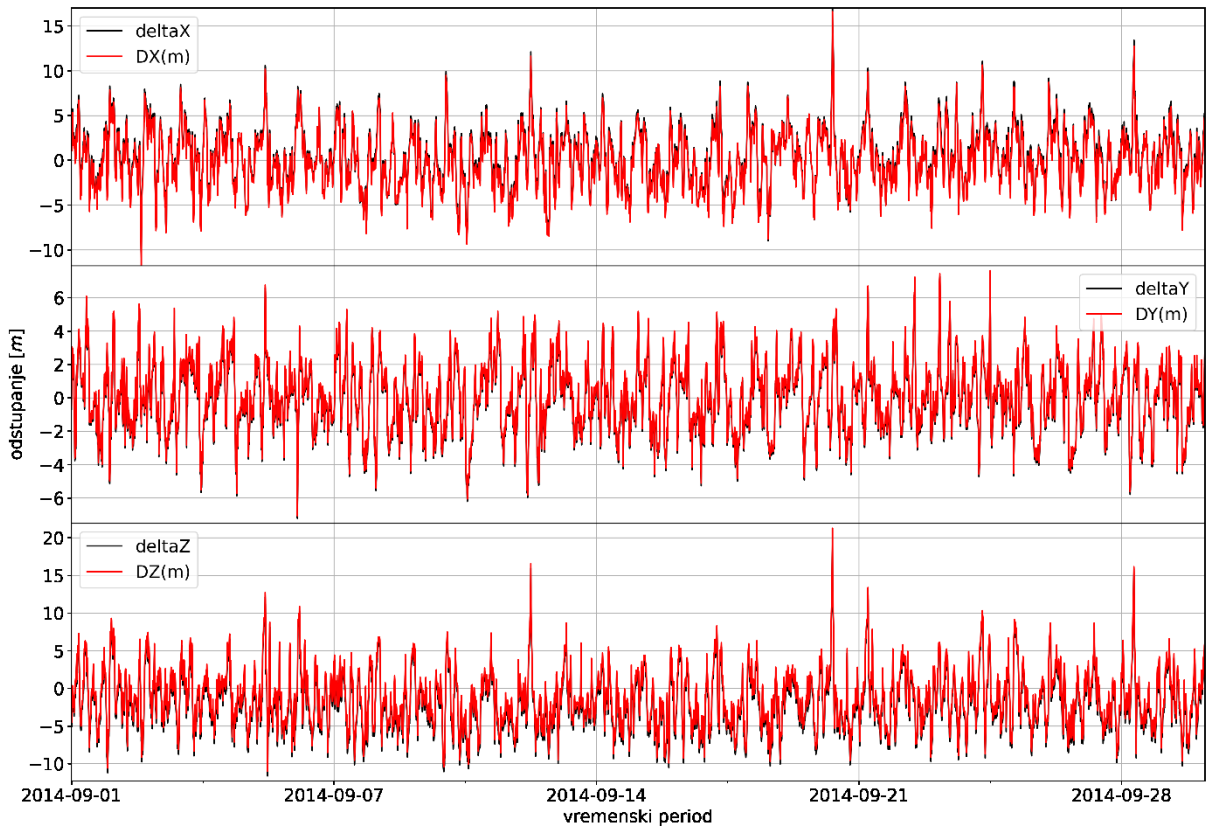
Odstupanja za postaju u Čakovcu za lipanj 2014. godine



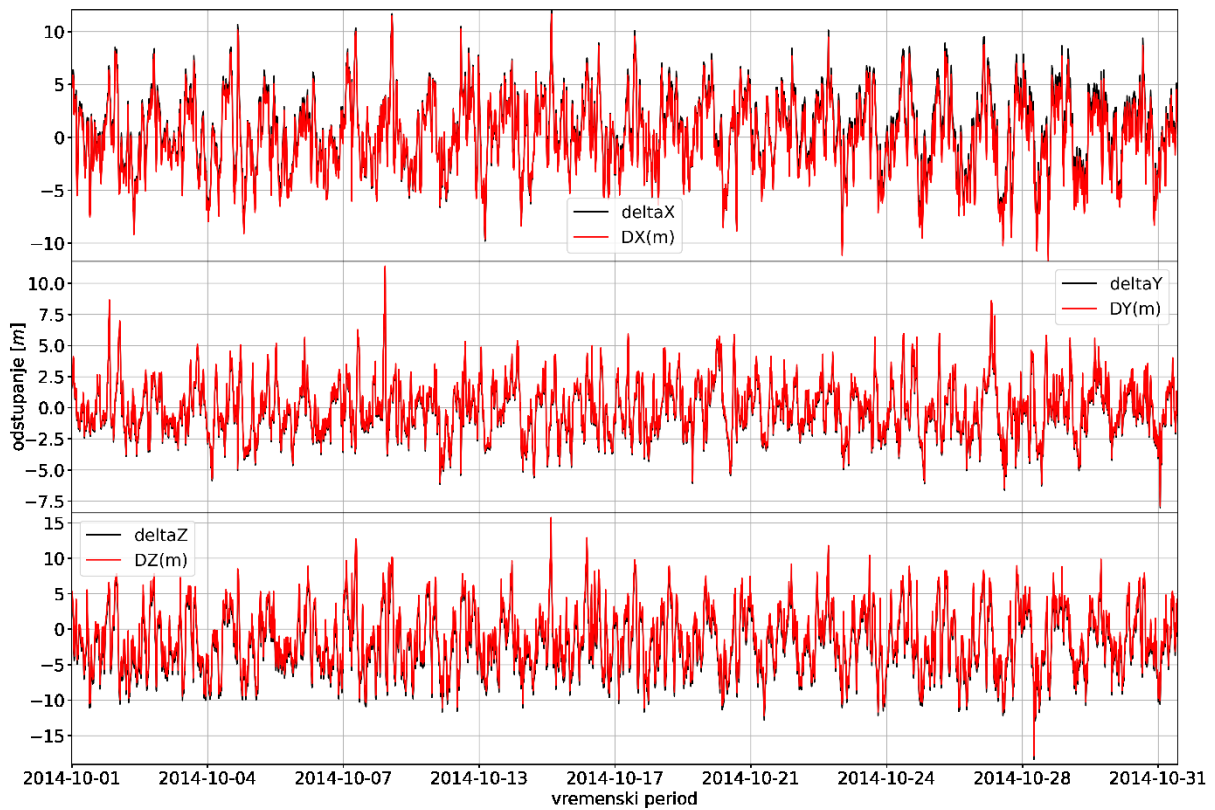
Odstupanja za postaju u Čakovcu za srpanj 2014. godine



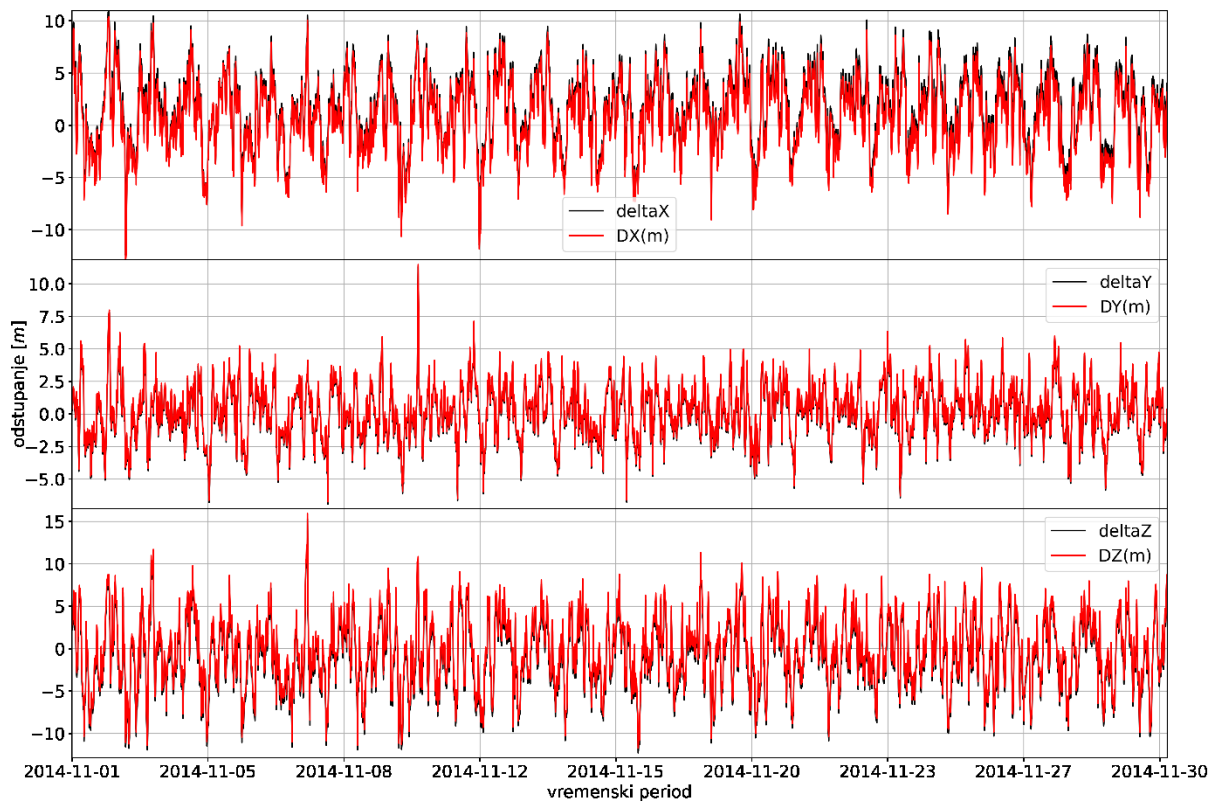
Odstupanja za postaju u Čakovcu za kolovoz 2014. godine



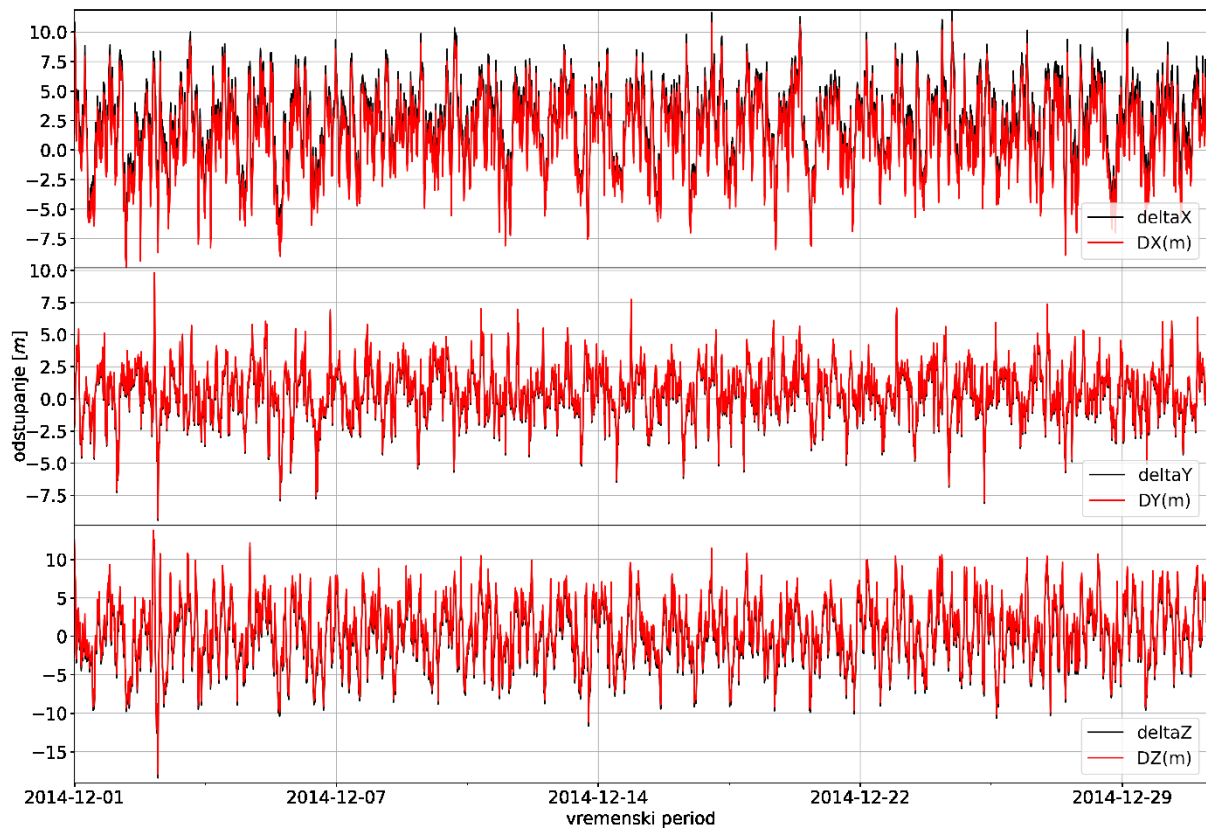
Odstupanja za postaju u Čakovcu za rujan 2014. godine



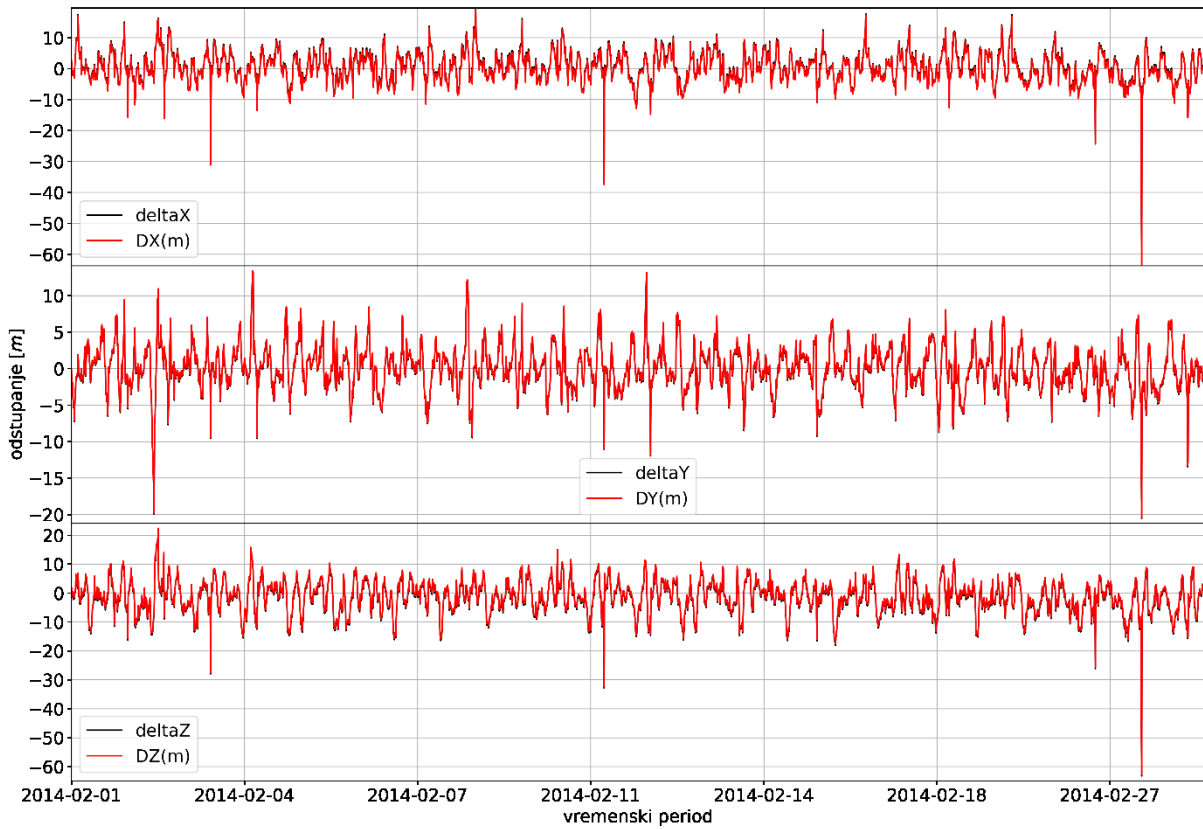
Odstupanja za postaju u Čakovcu za listopad 2014. godine



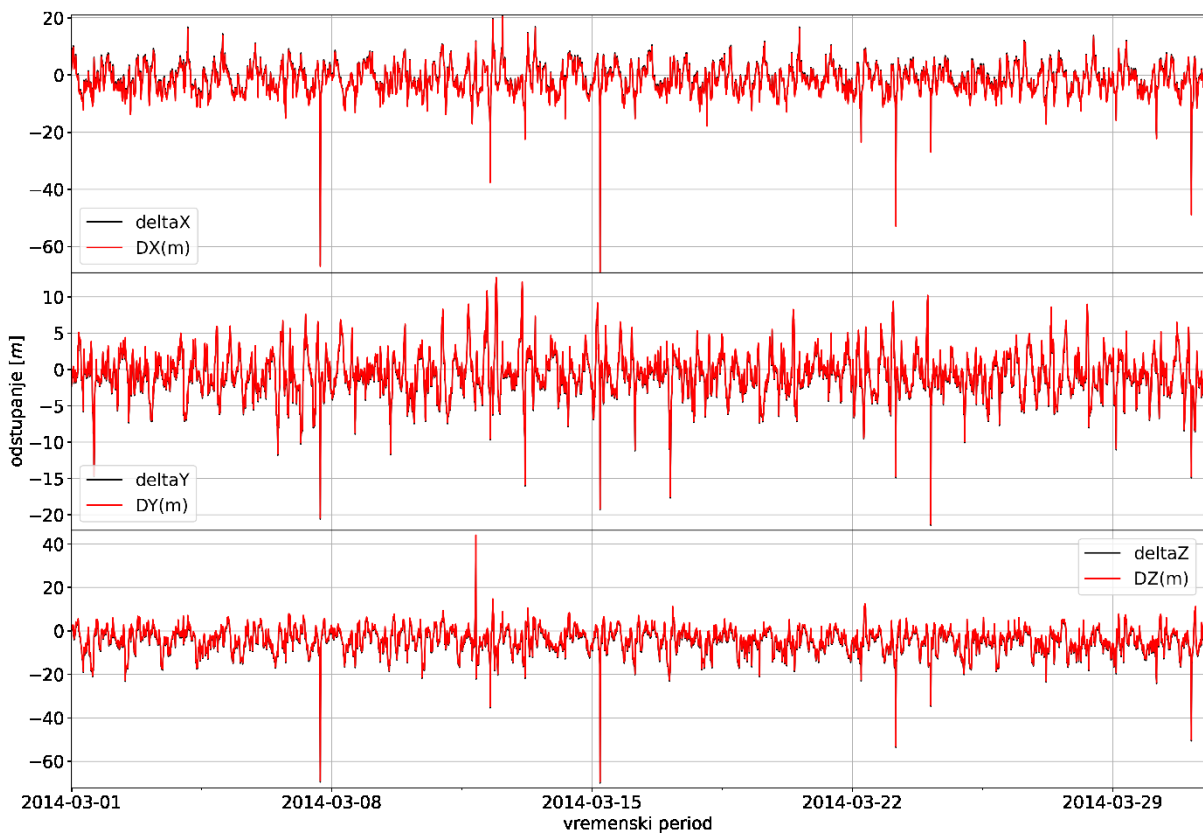
Odstupanja za postaju u Čakovcu za studeni 2014. godine



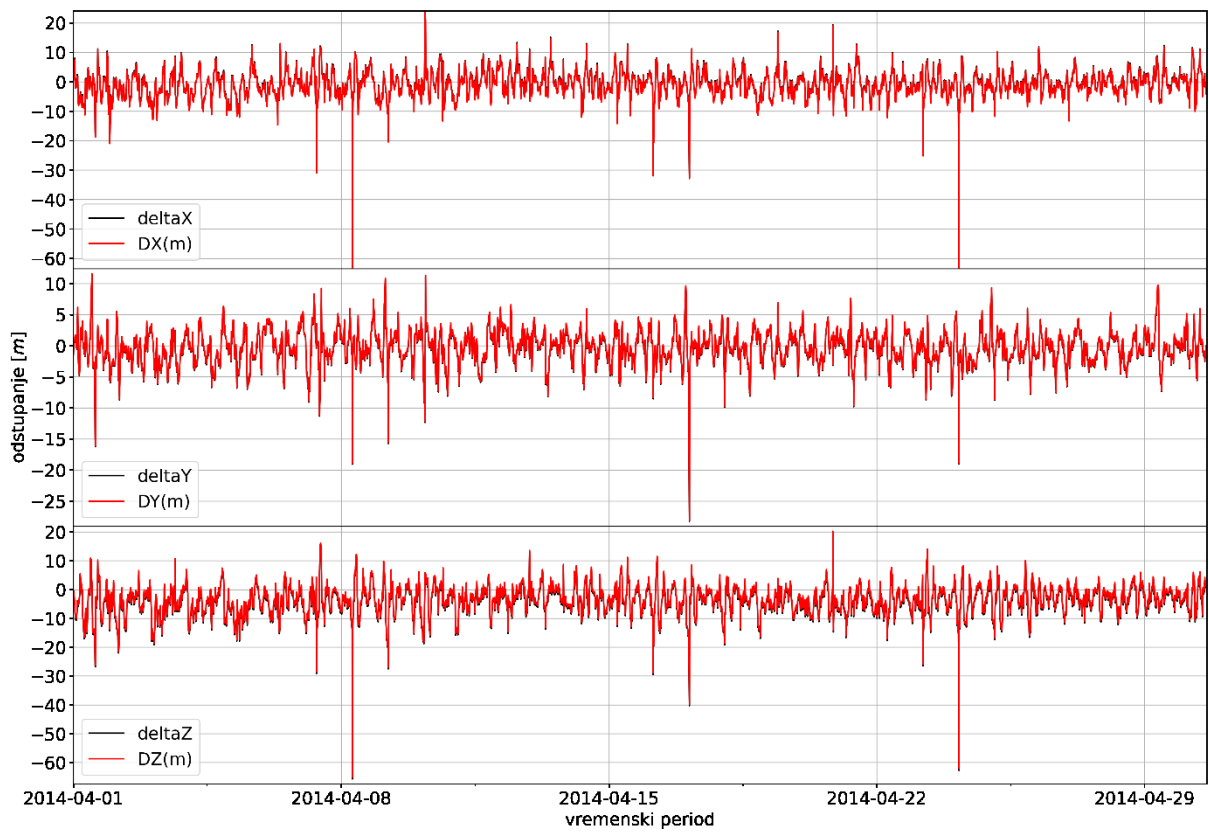
Odstupanja za postaju u Čakovcu za prosinac 2014. godine



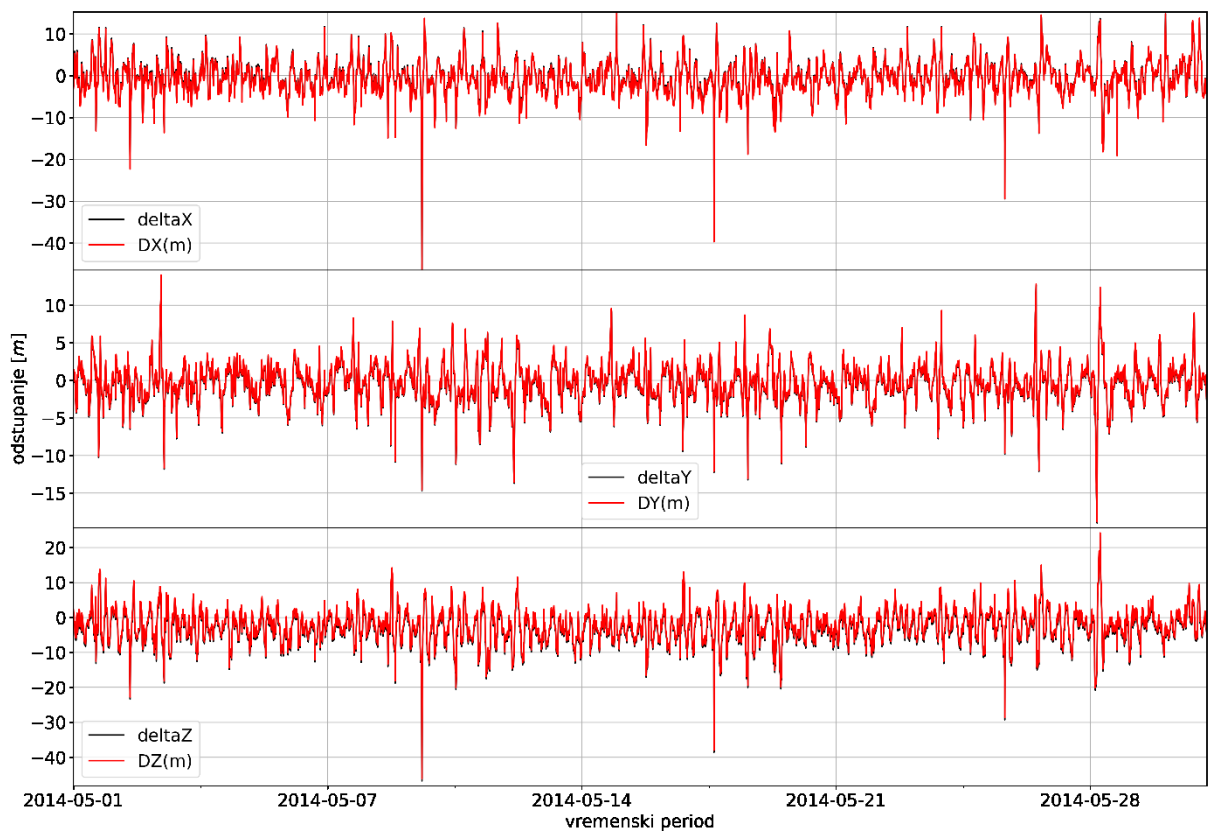
Odstupanja za postaju u Zadru za veljaču 2014. godine



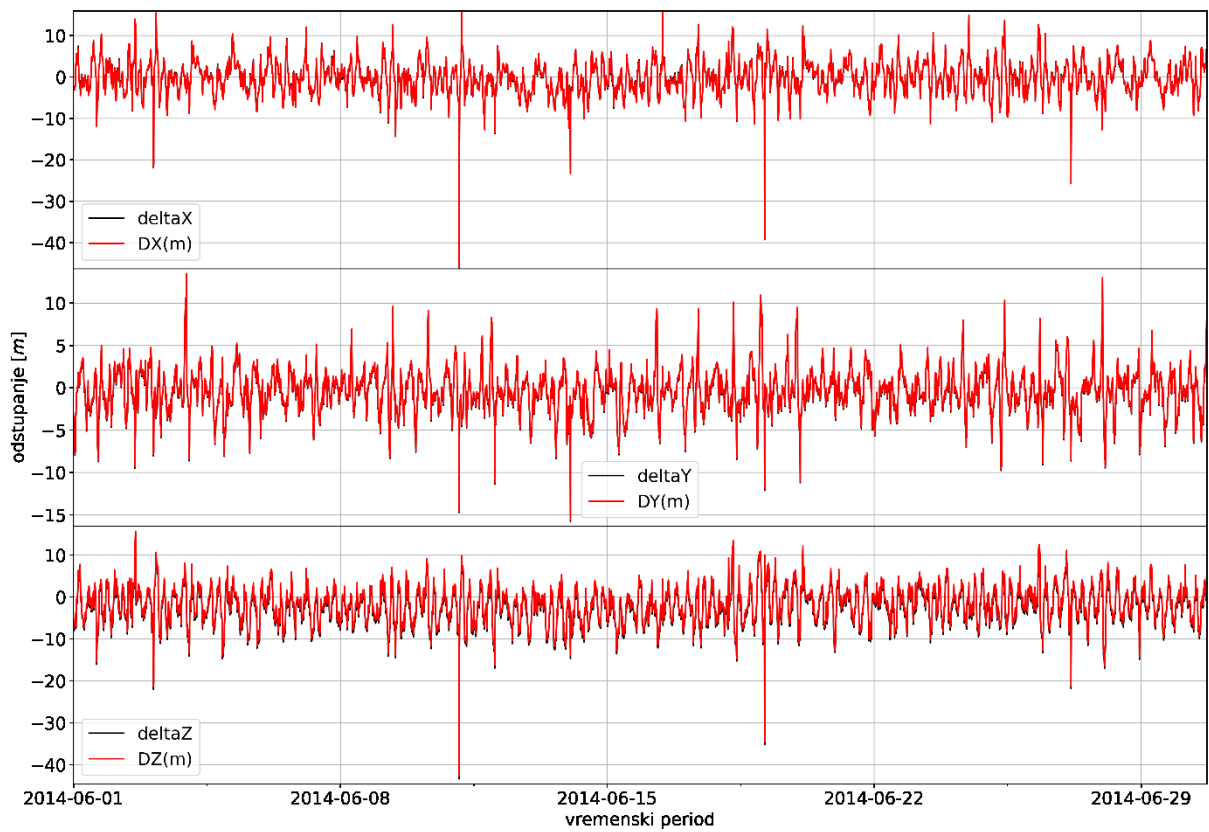
Odstupanja za postaju u Zadru za ožujak 2014. godine



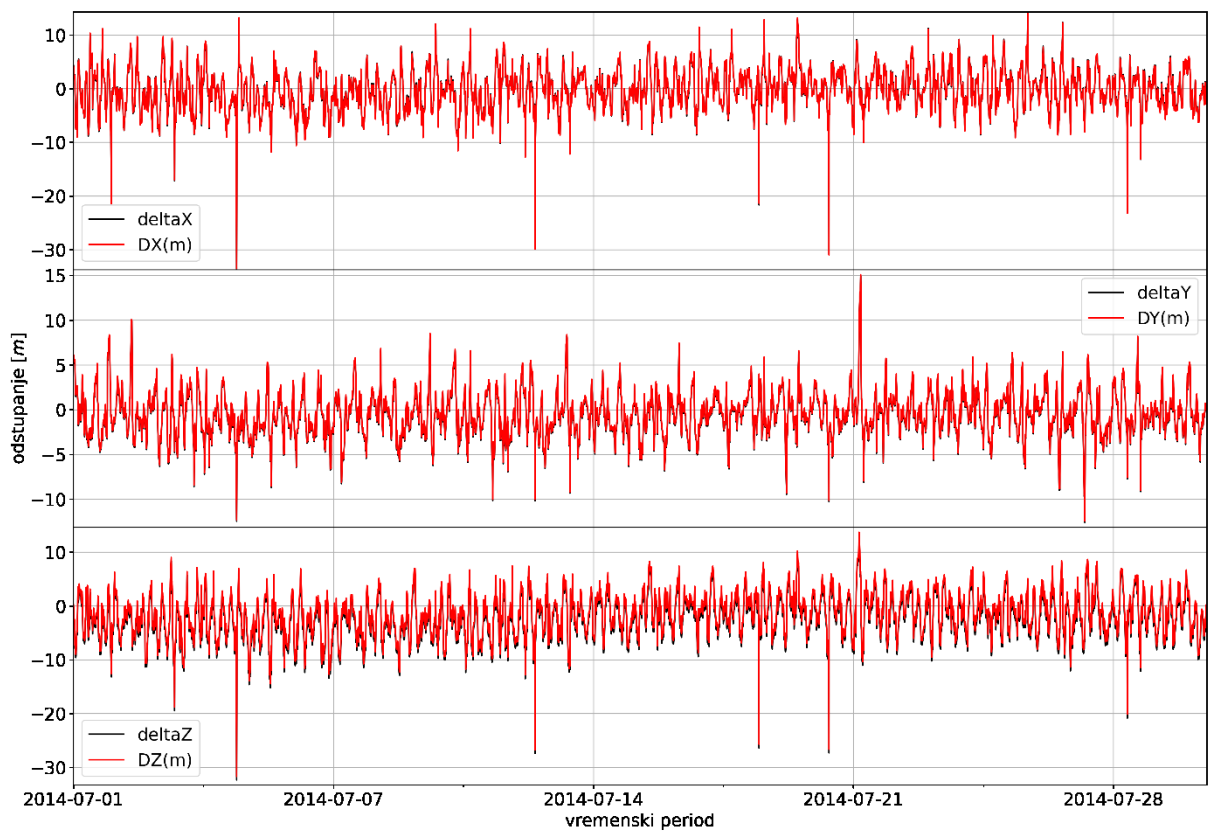
Odstupanja za postaju u Zadru za travanj 2014. godine



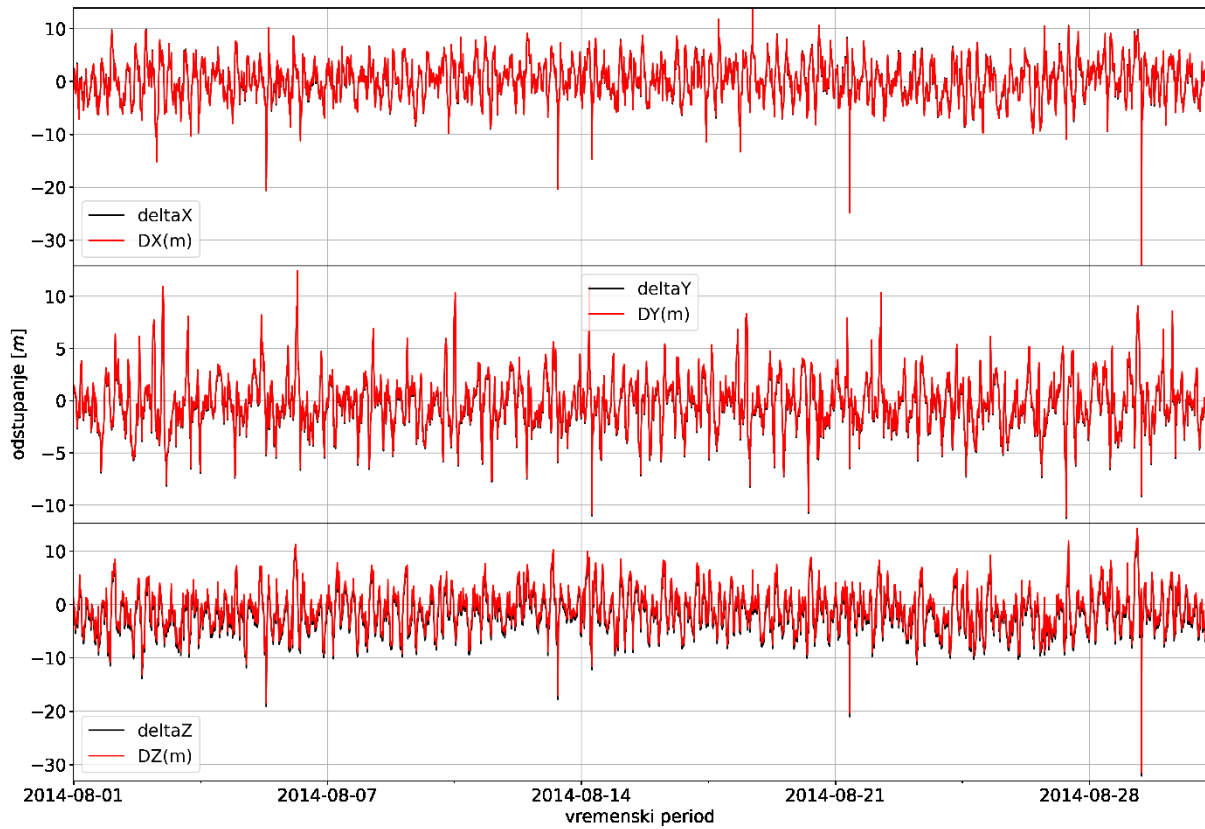
Odstupanja za postaju u Zadru za svibanj 2014. godine



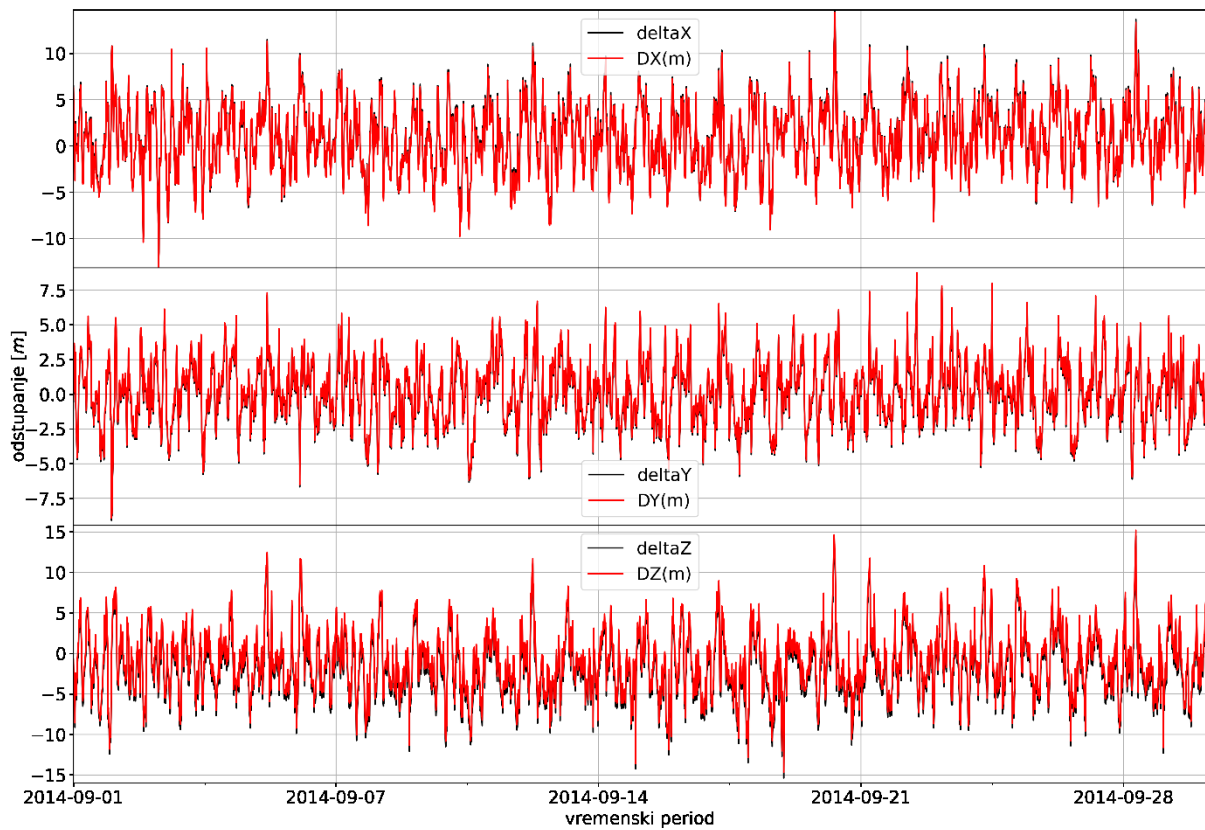
Odstupanja za postaju u Zadru za lipanj 2014. godine



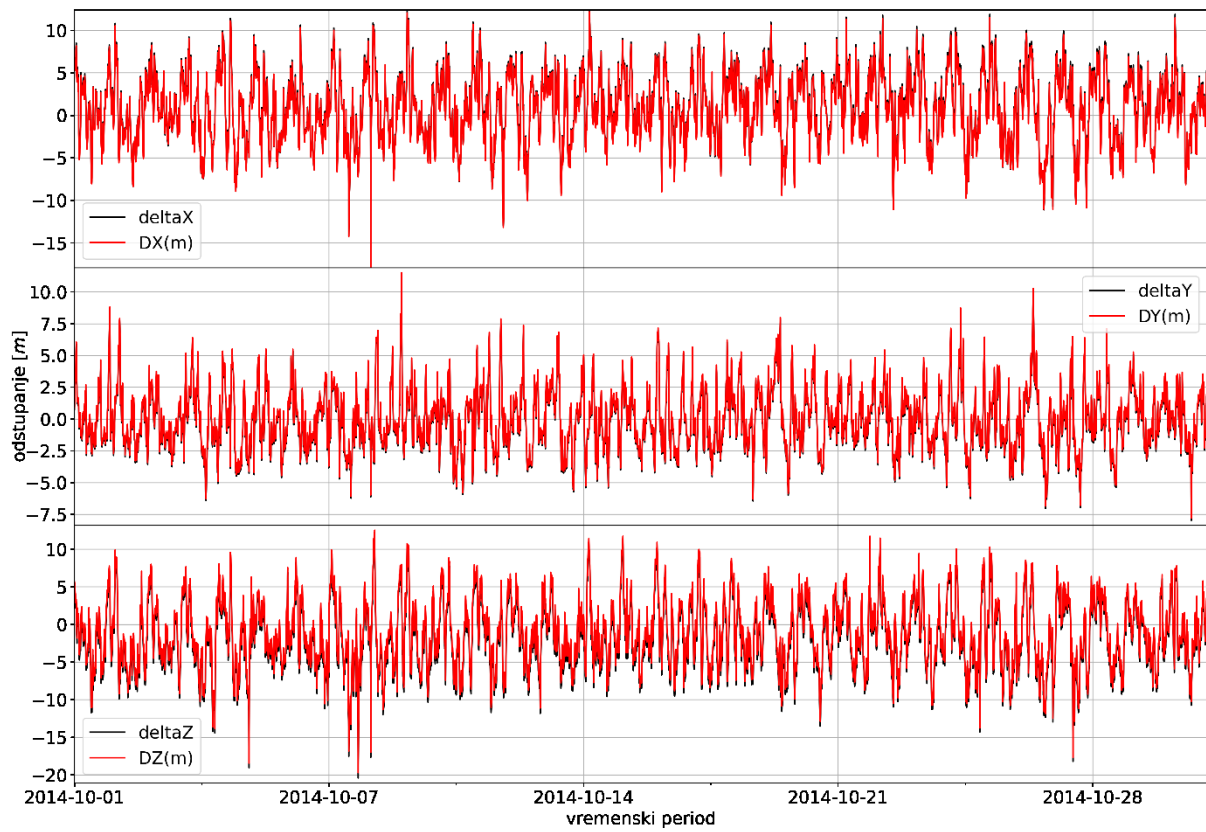
Odstupanja za postaju u Zadru za srpanj 2014. godine



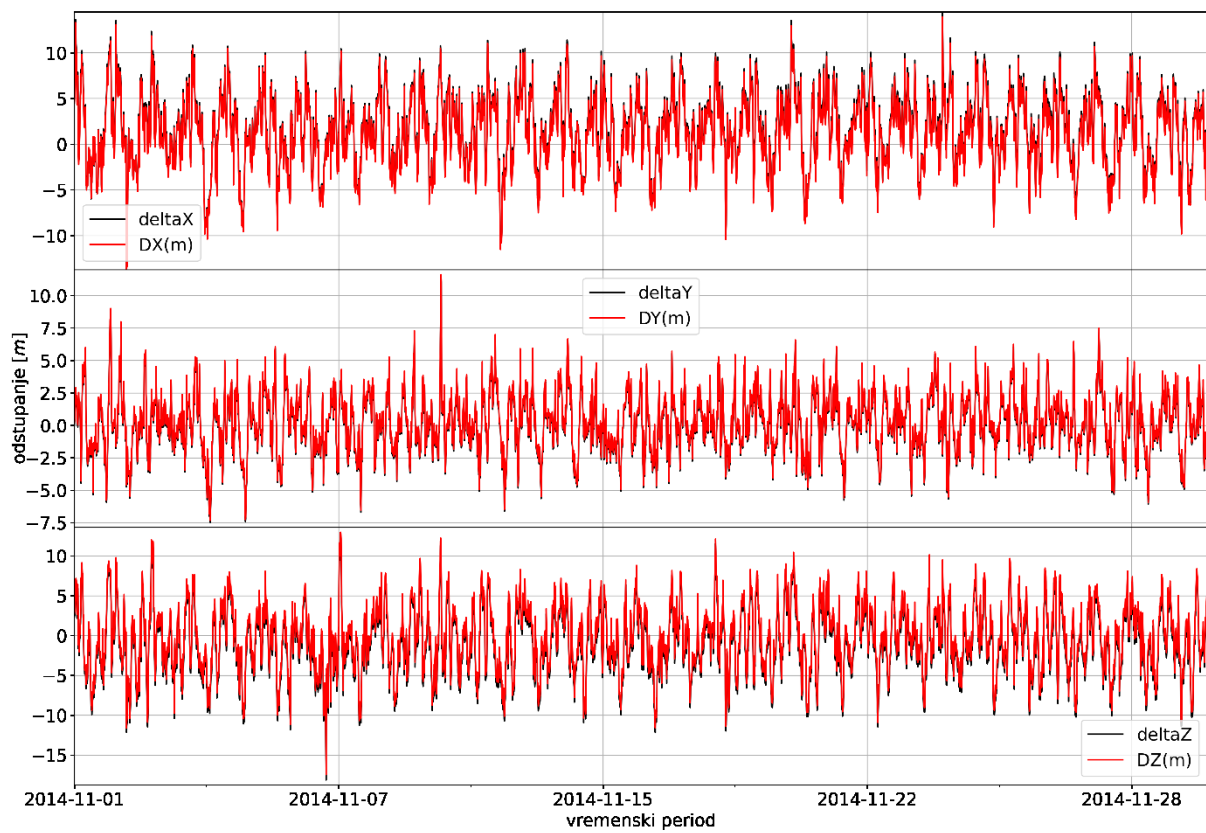
Odstupanja za postaju u Zadru za kolovoz 2014. godine



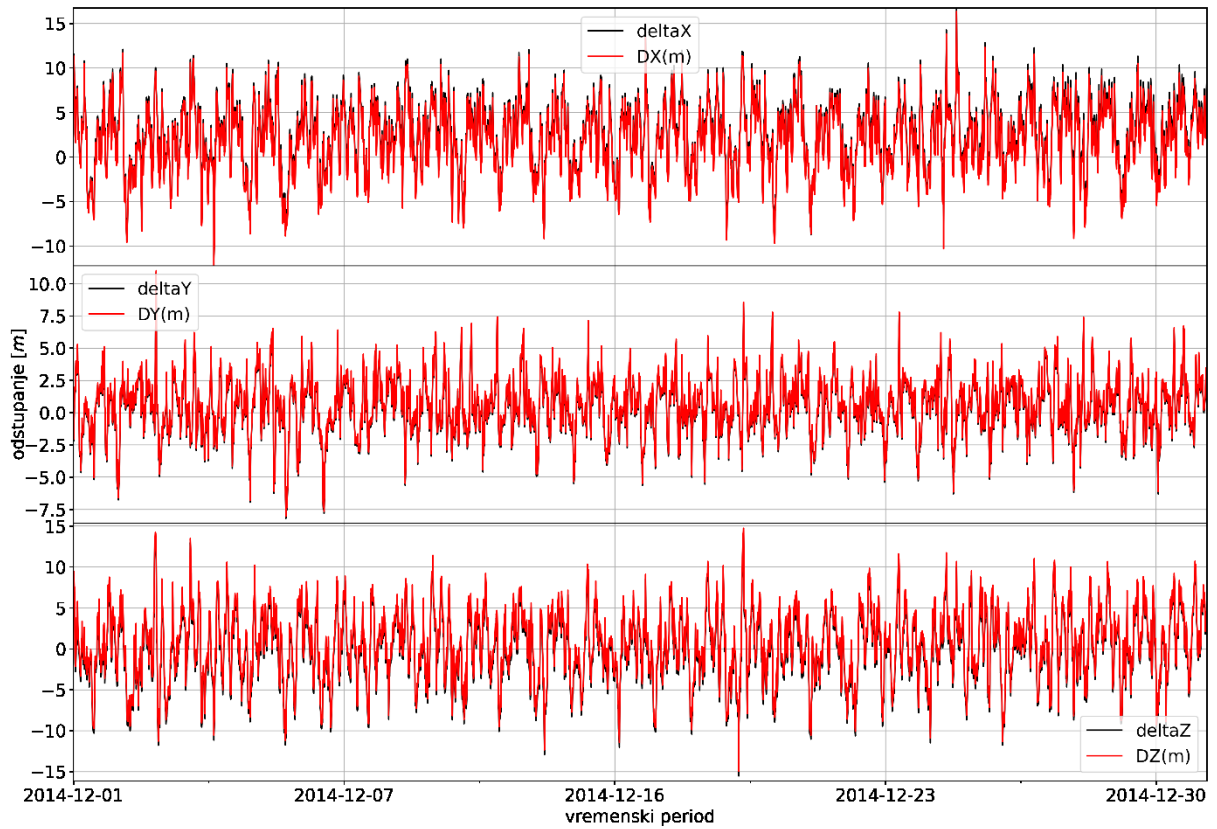
Odstupanja za postaju u Zadru za rujan 2014. godine



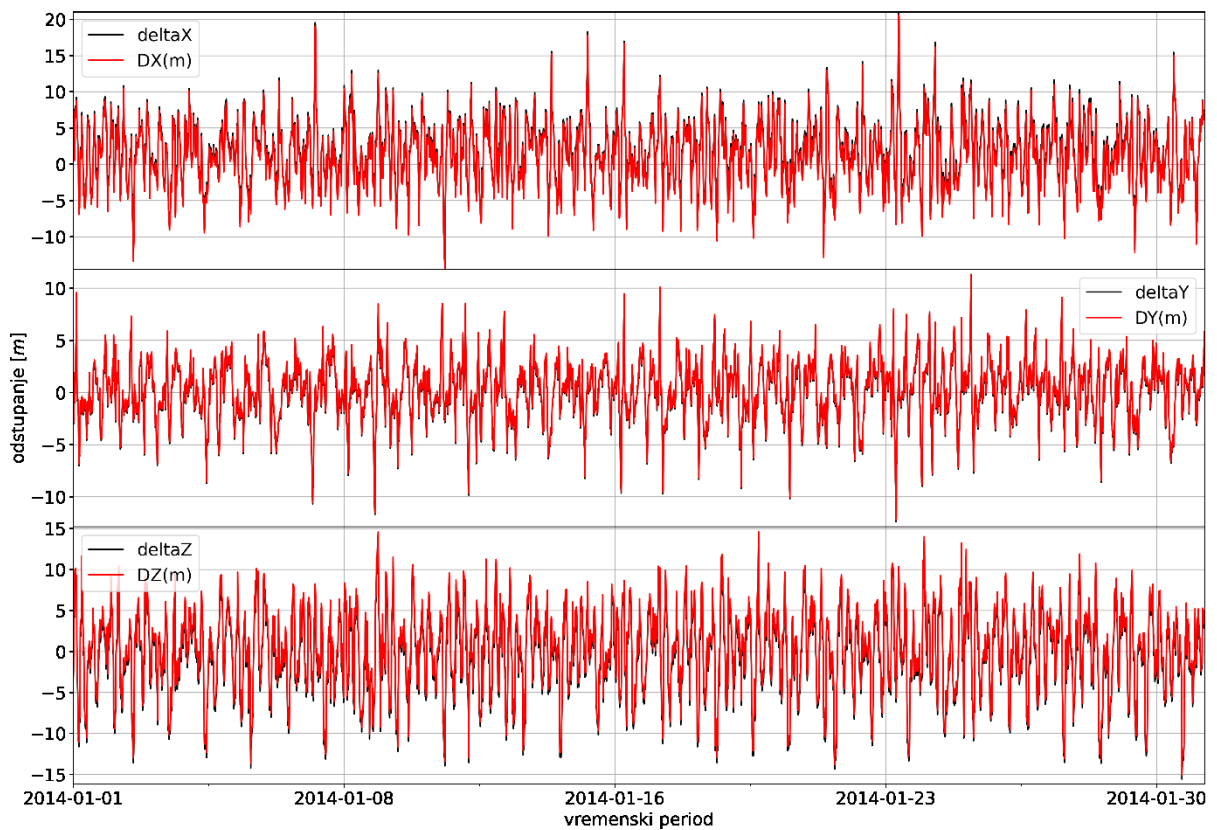
Odstupanja za postaju u Zadru za listopad 2014. godine



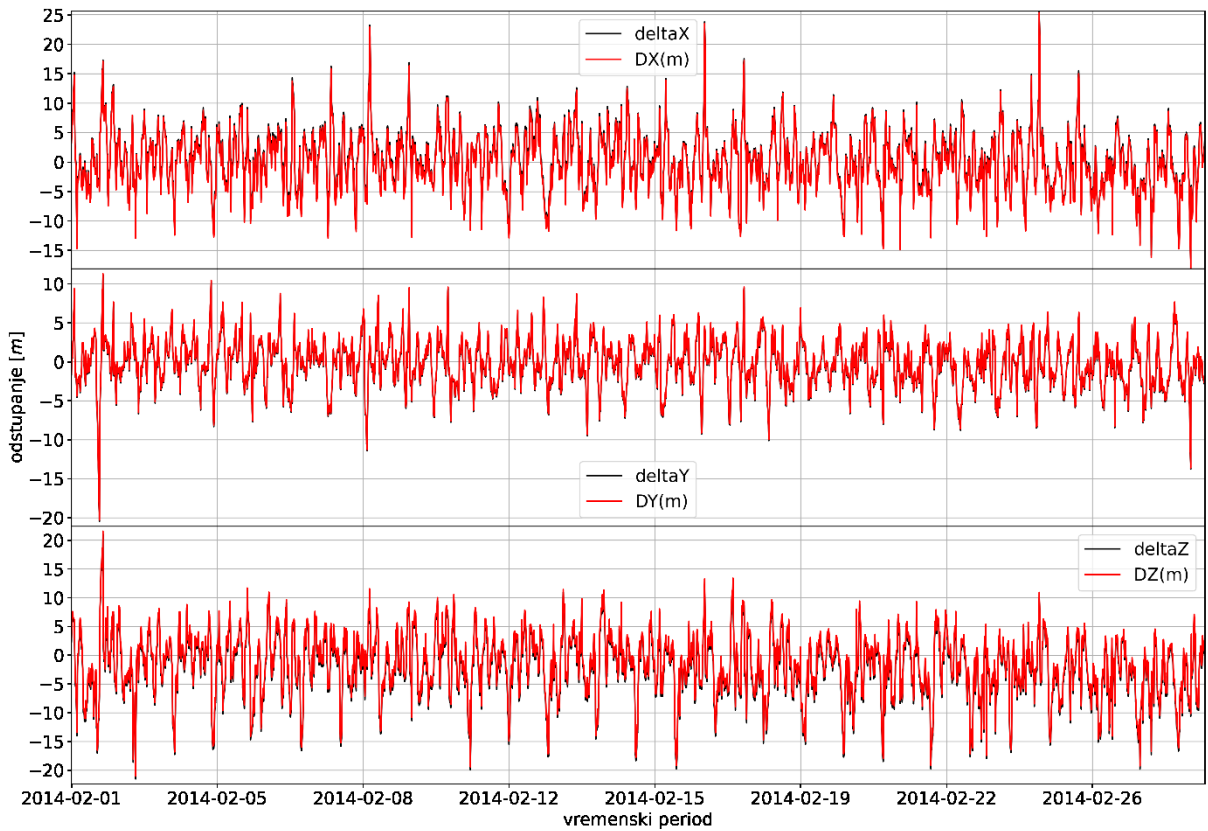
Odstupanja za postaju u Zadru za studeni 2014. godine



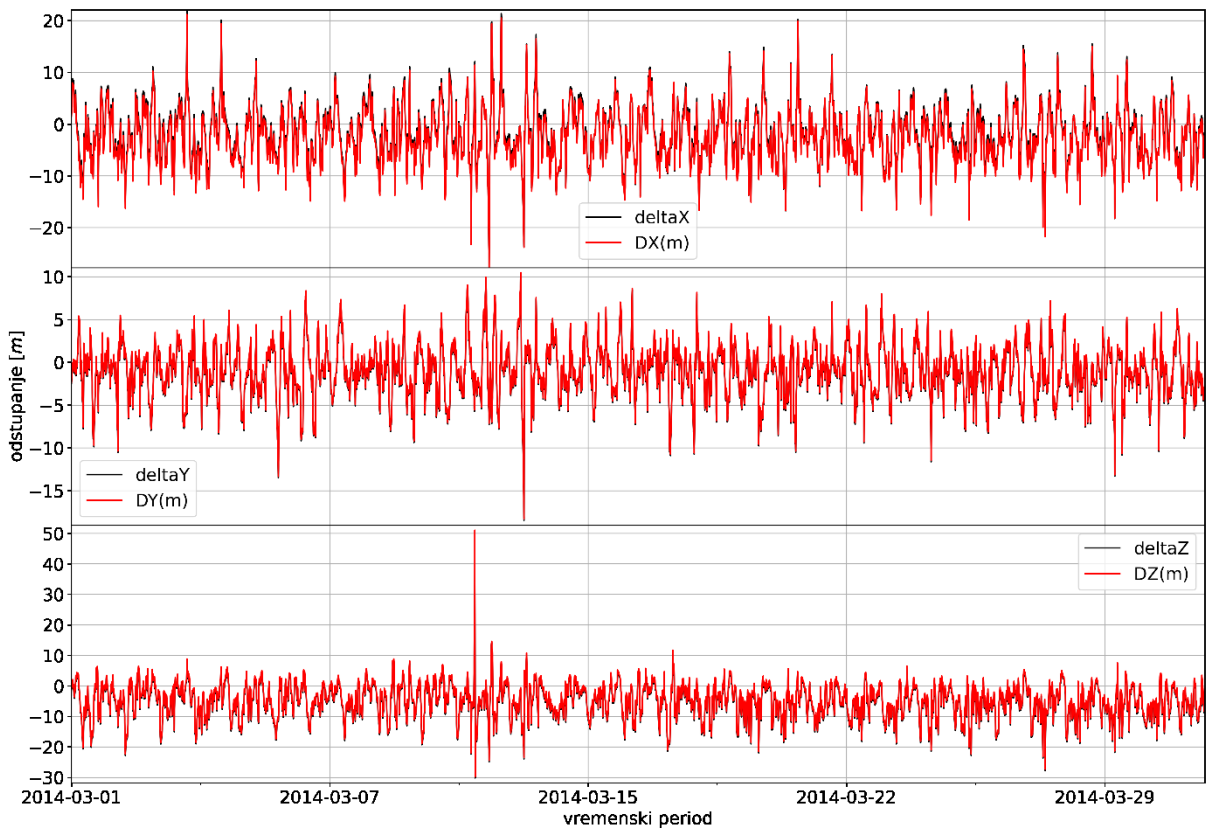
Odstupanja za postaju u Zadru za prosinac 2014. godine



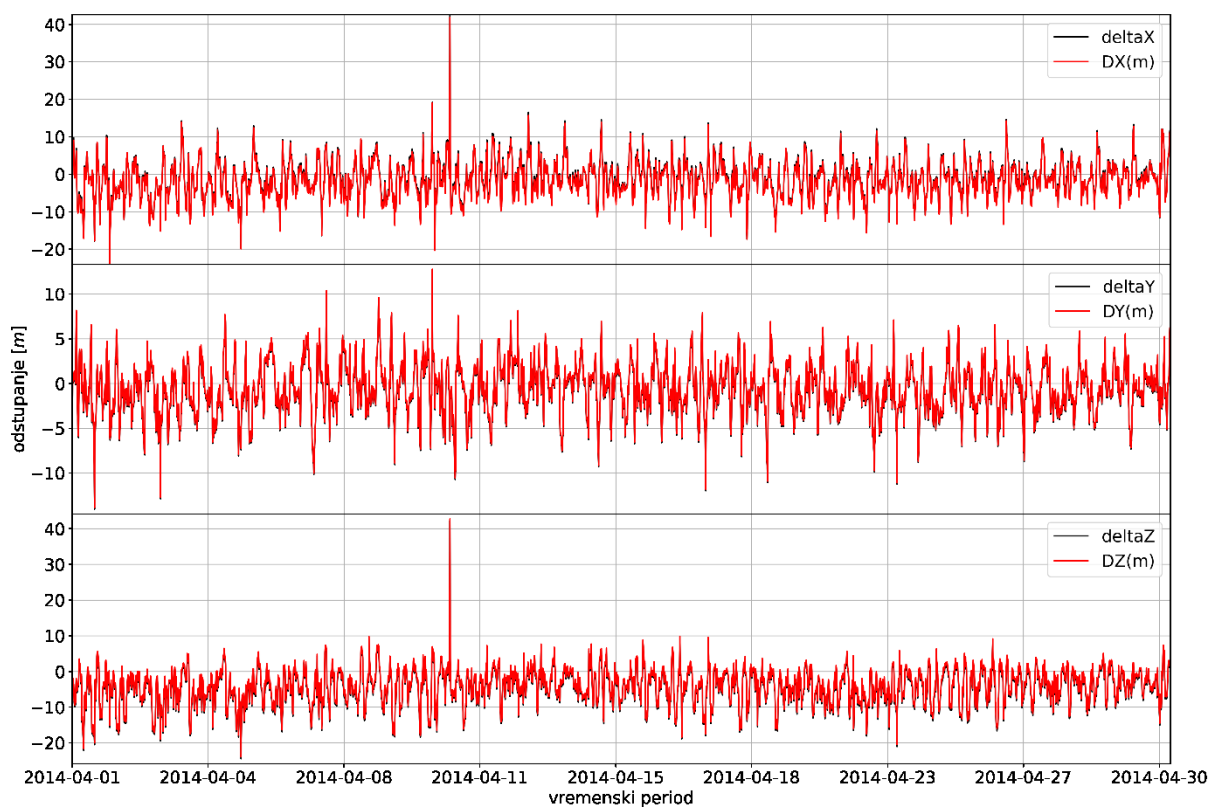
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za siječanj 2014. godine



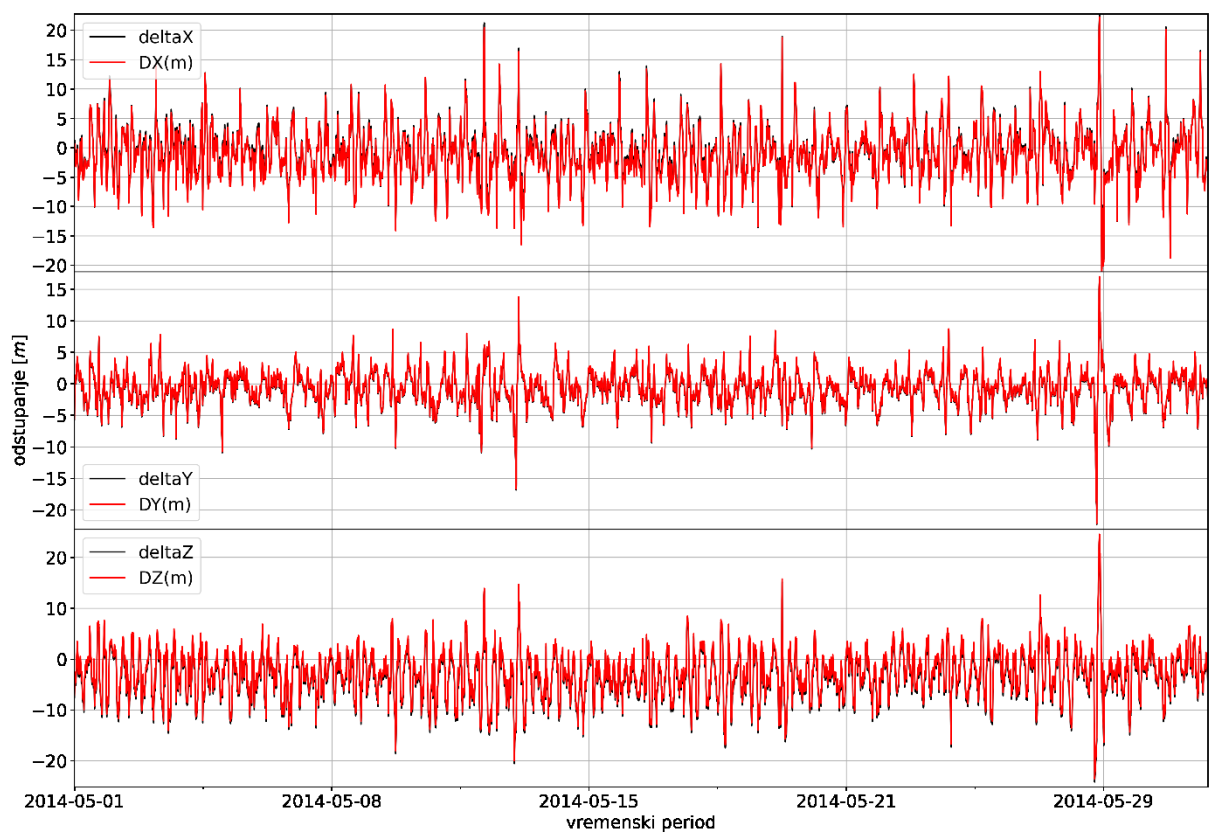
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za veljaču 2014. godine



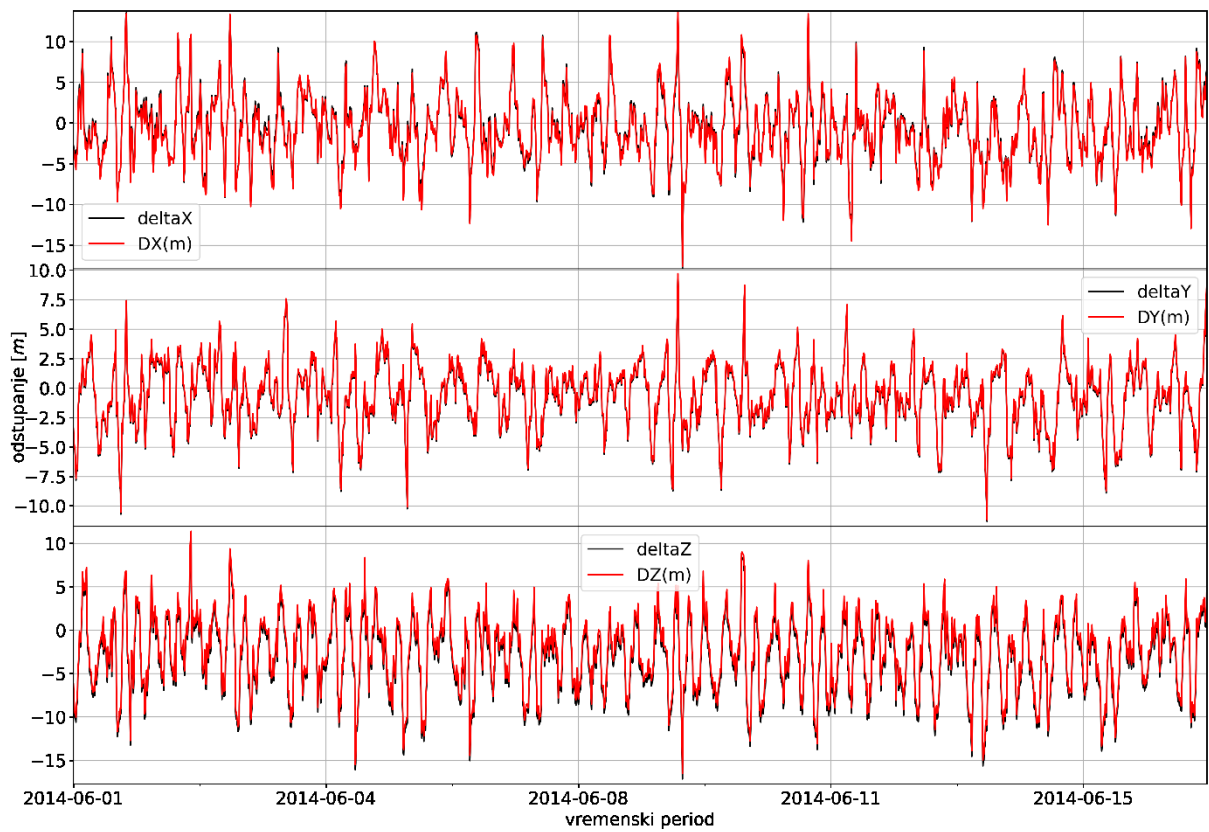
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za ožujak 2014. godine



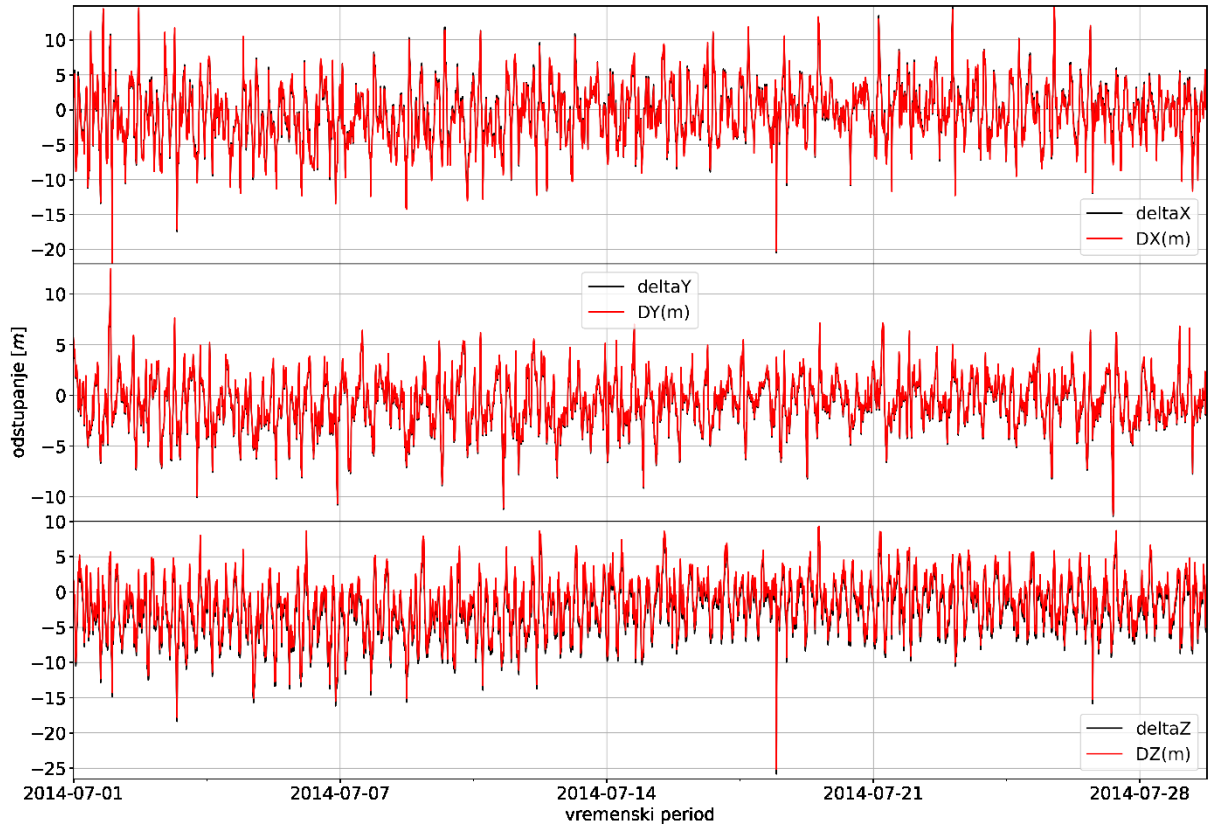
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za travanj 2014. godine



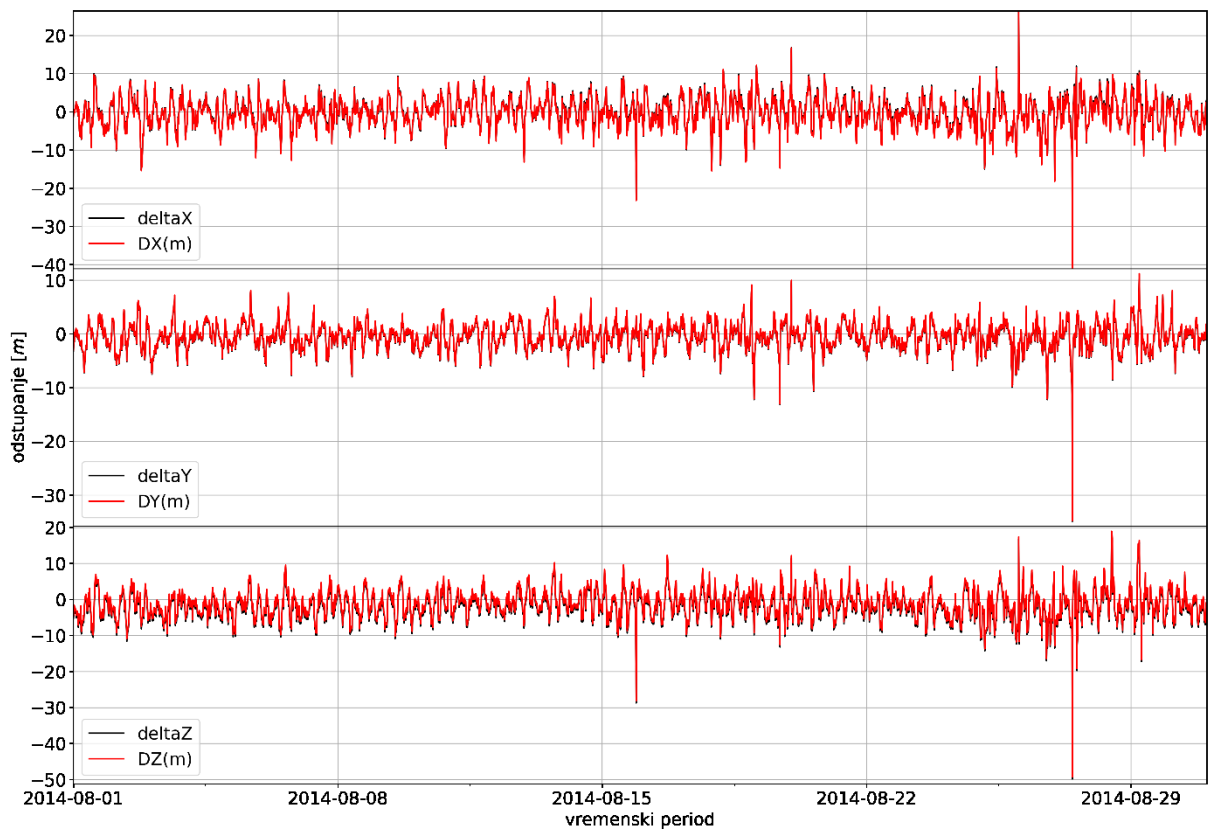
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za svibanj 2014. godine



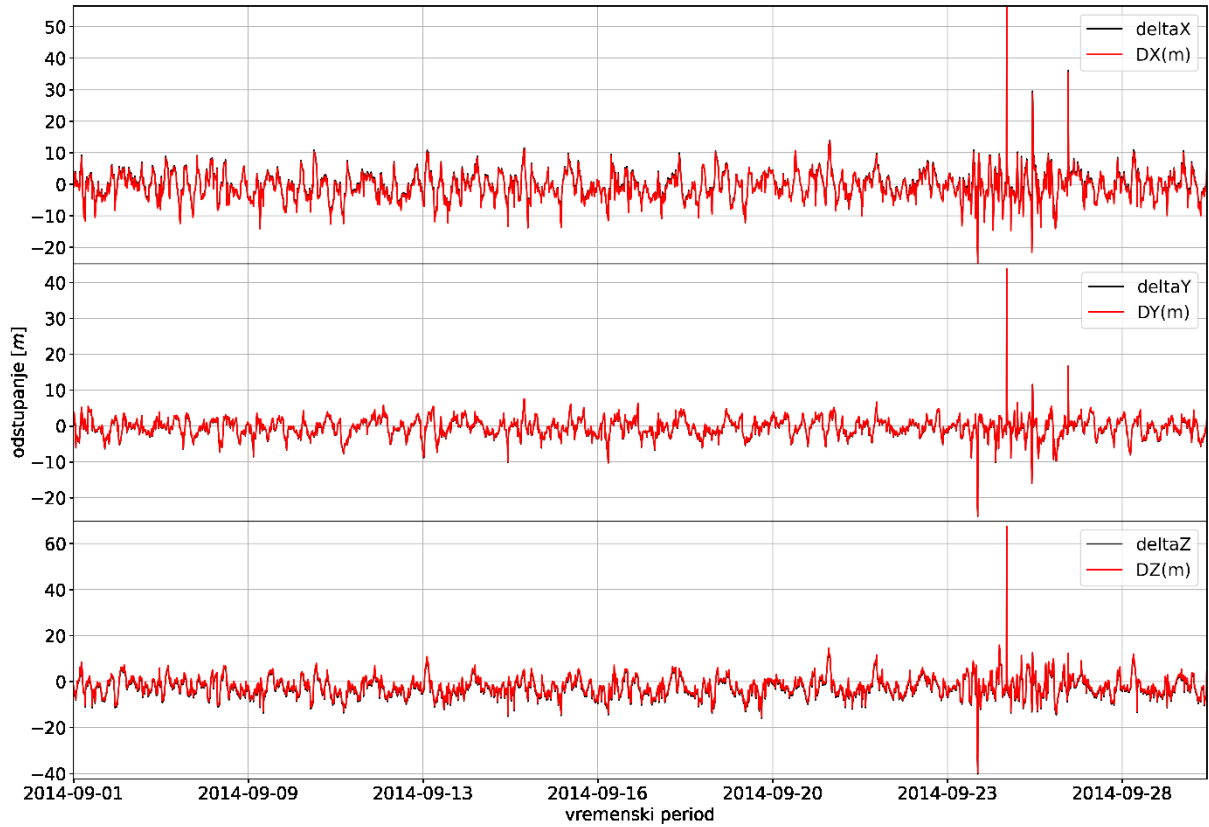
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za lipanj 2014. godine



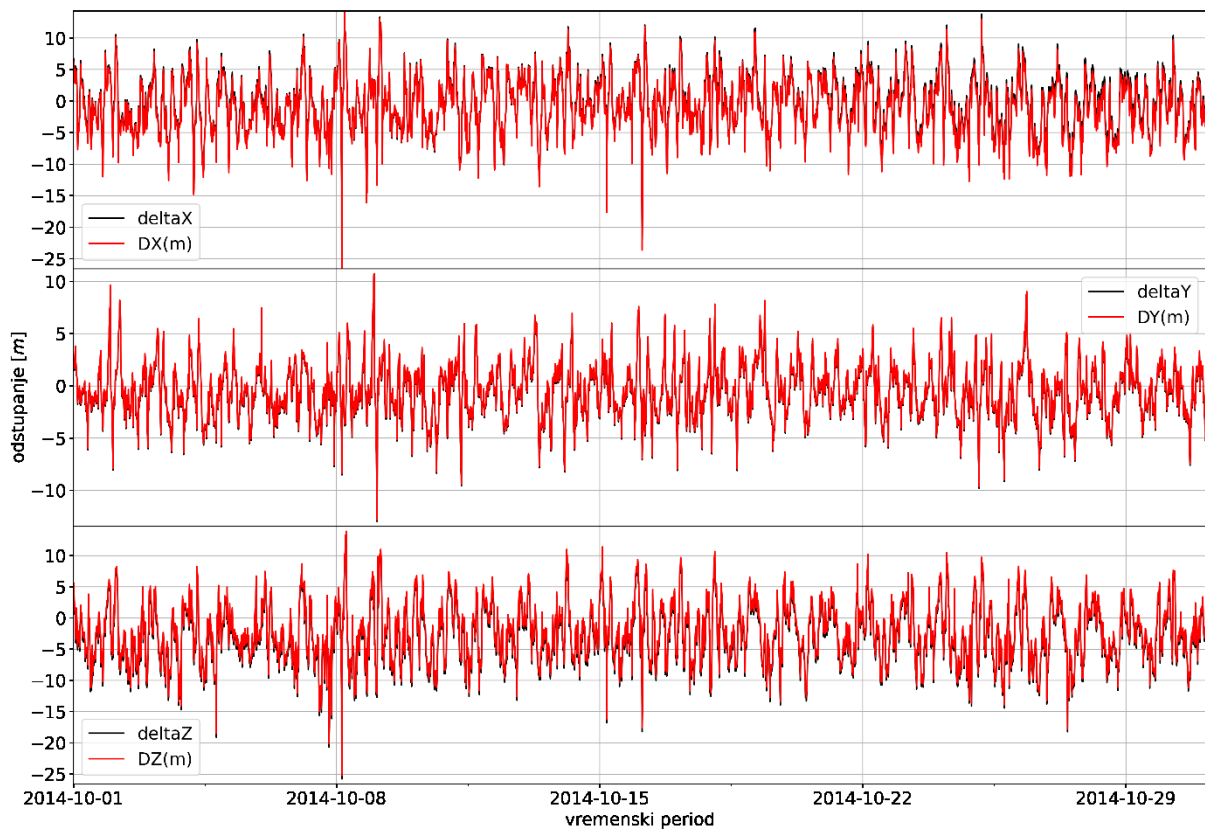
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za srpanj 2014. godine



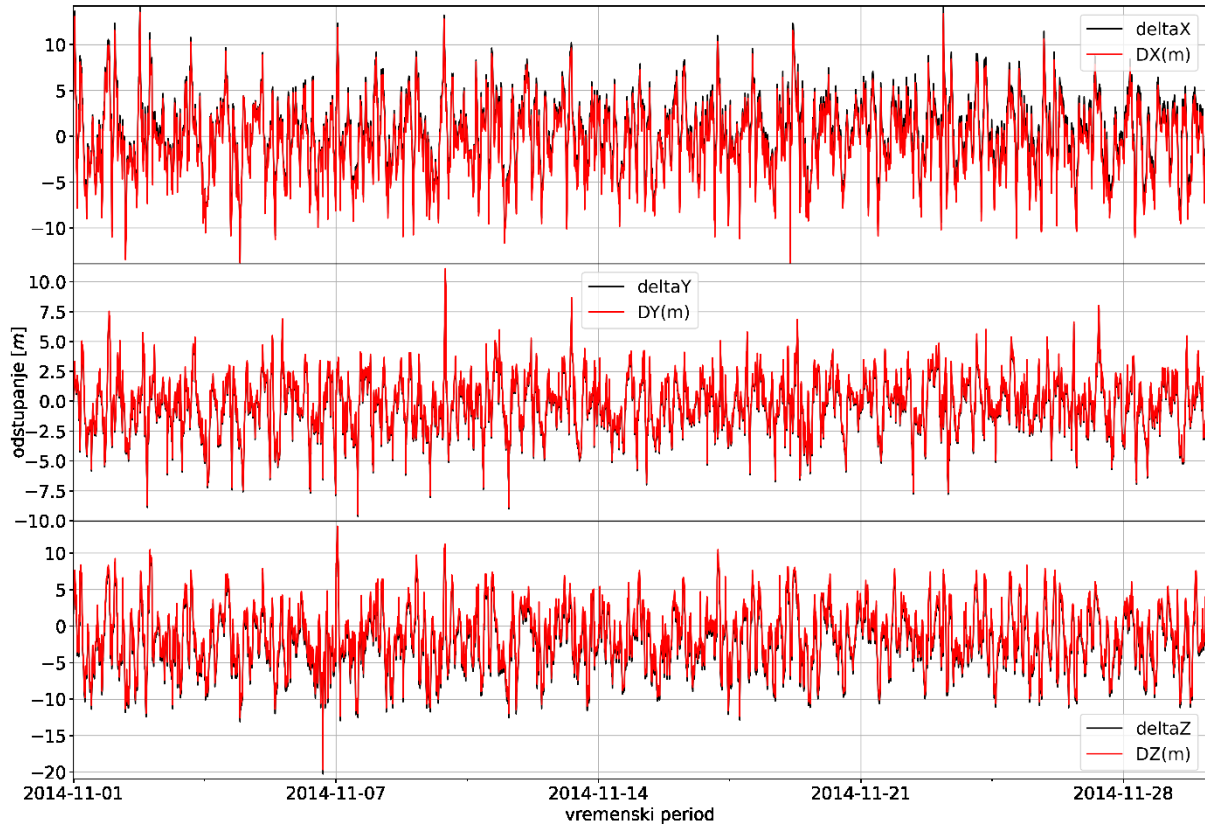
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za kolovoz 2014. godine



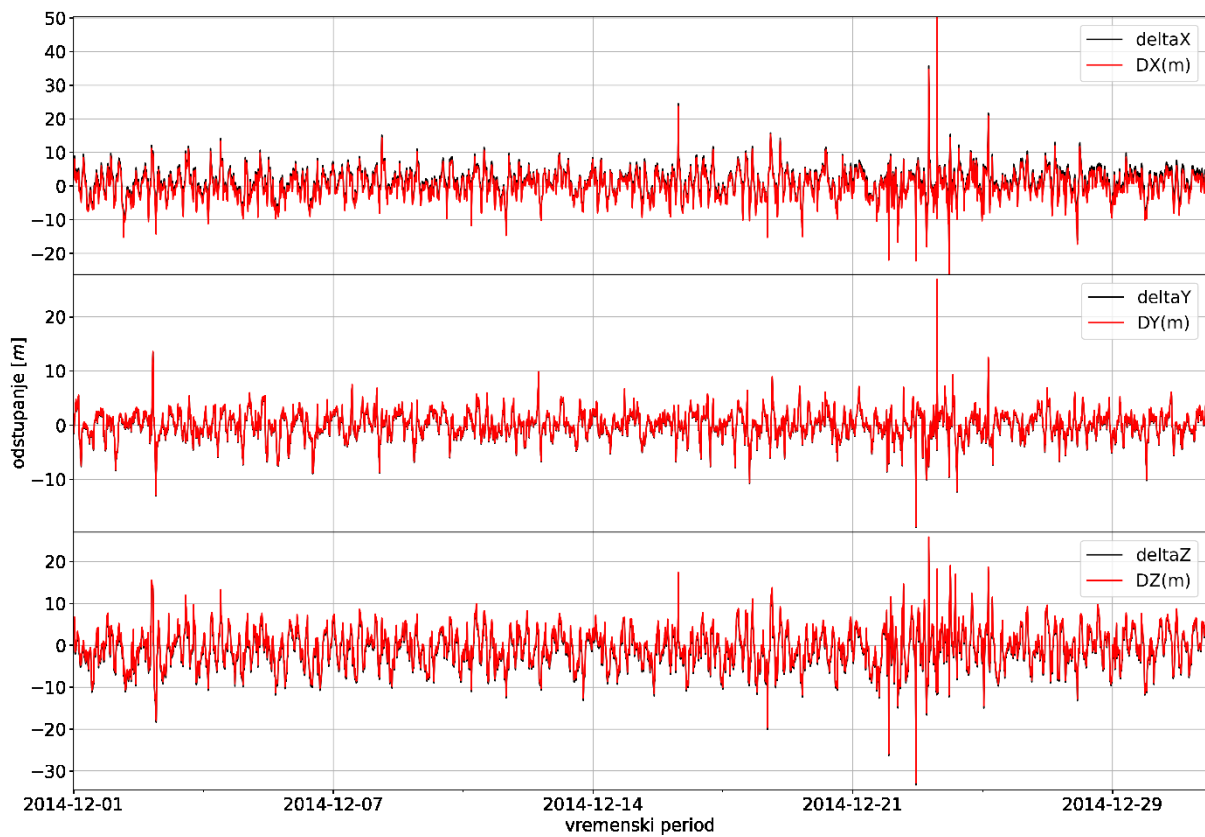
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za rujan 2014. godine



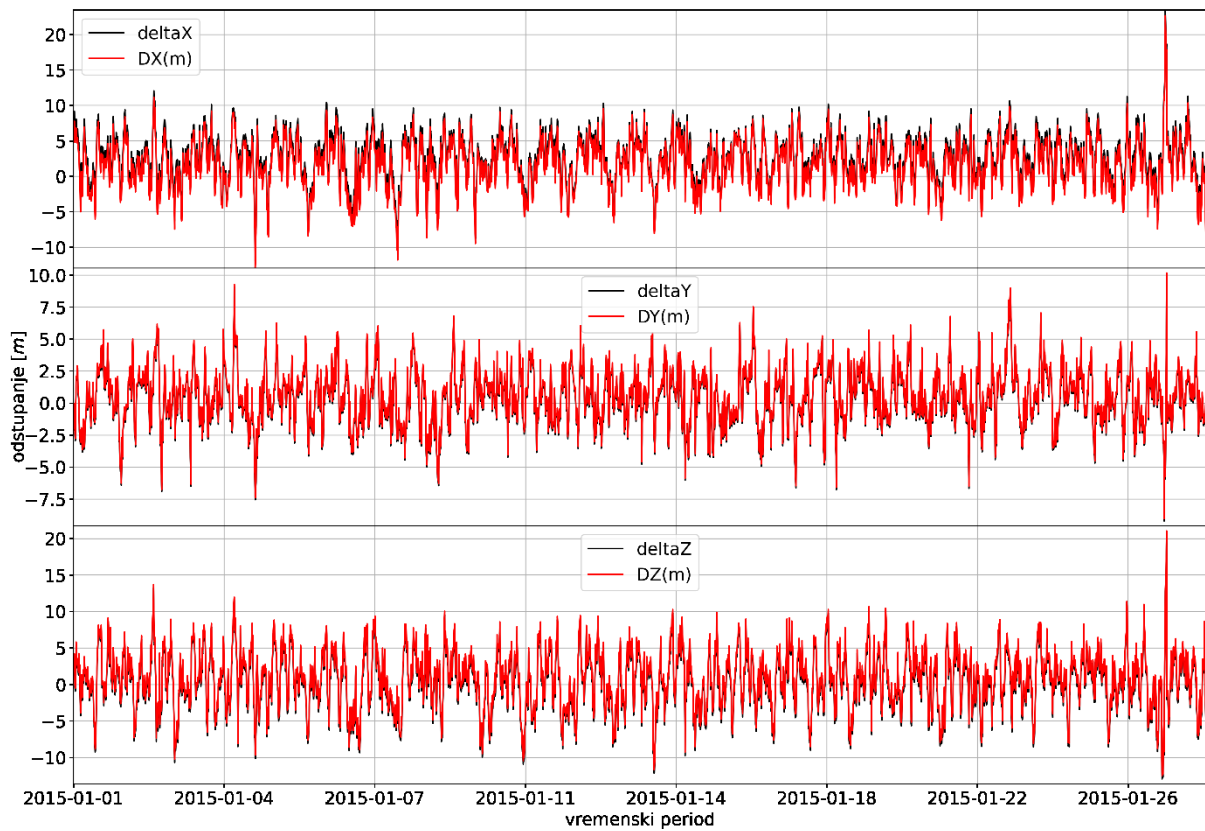
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za listopad 2014. godine



Odstupanja za postaju u Dubrovniku za studeni 2014. godine



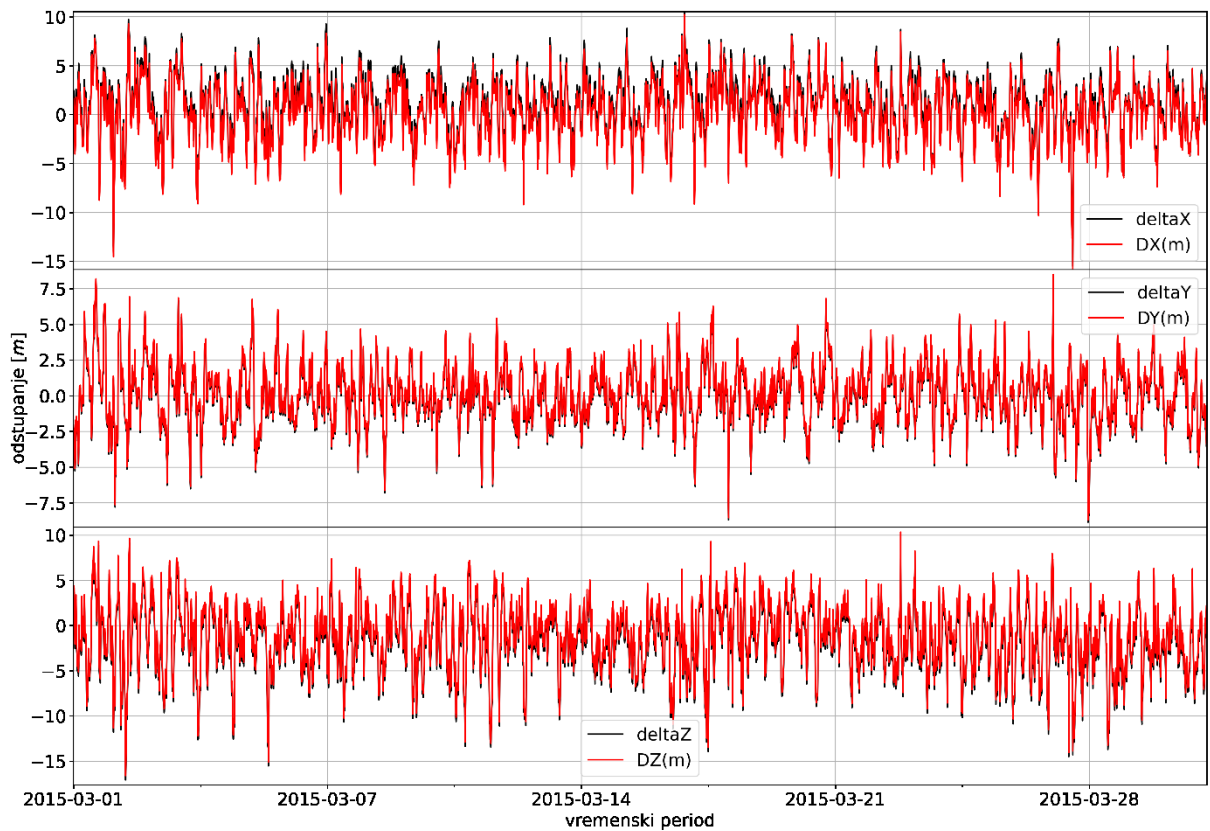
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za prosinac 2014. godine



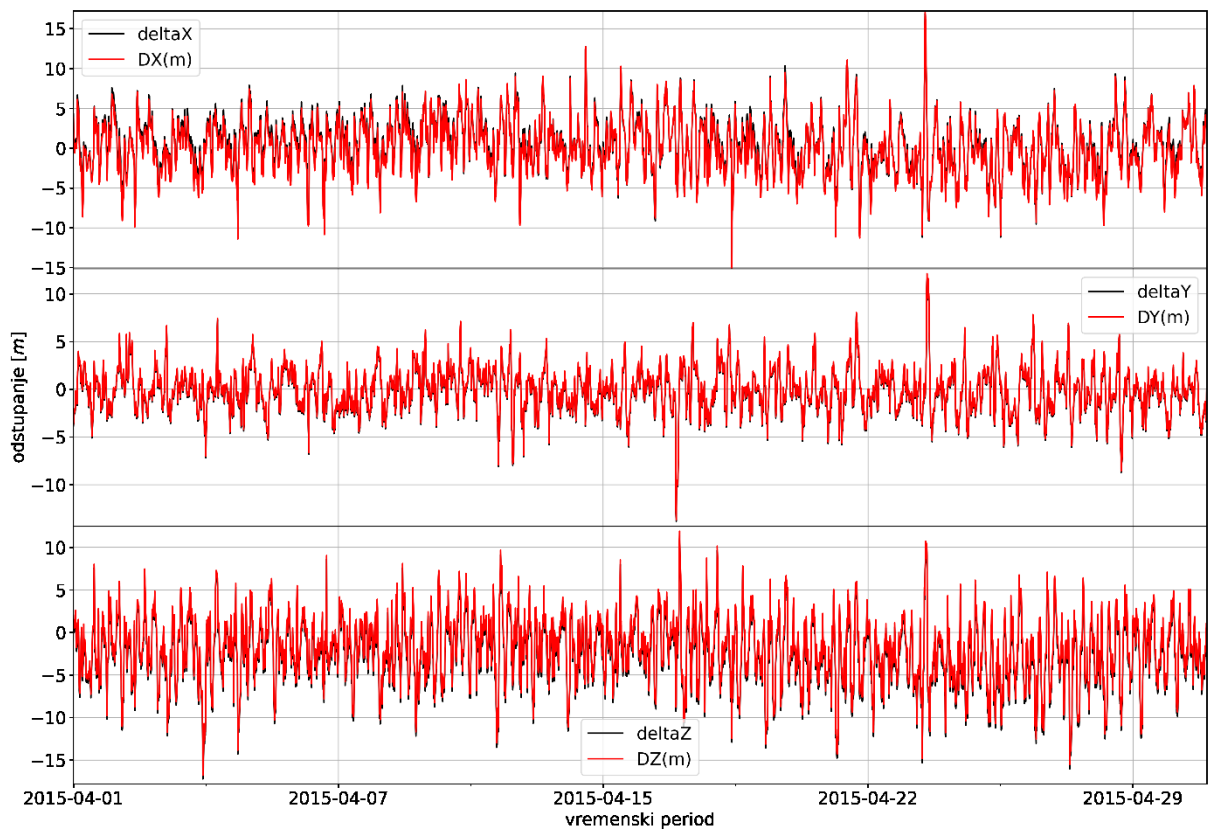
Odstupanja za postaju u Čakovcu za siječanj 2015. godine



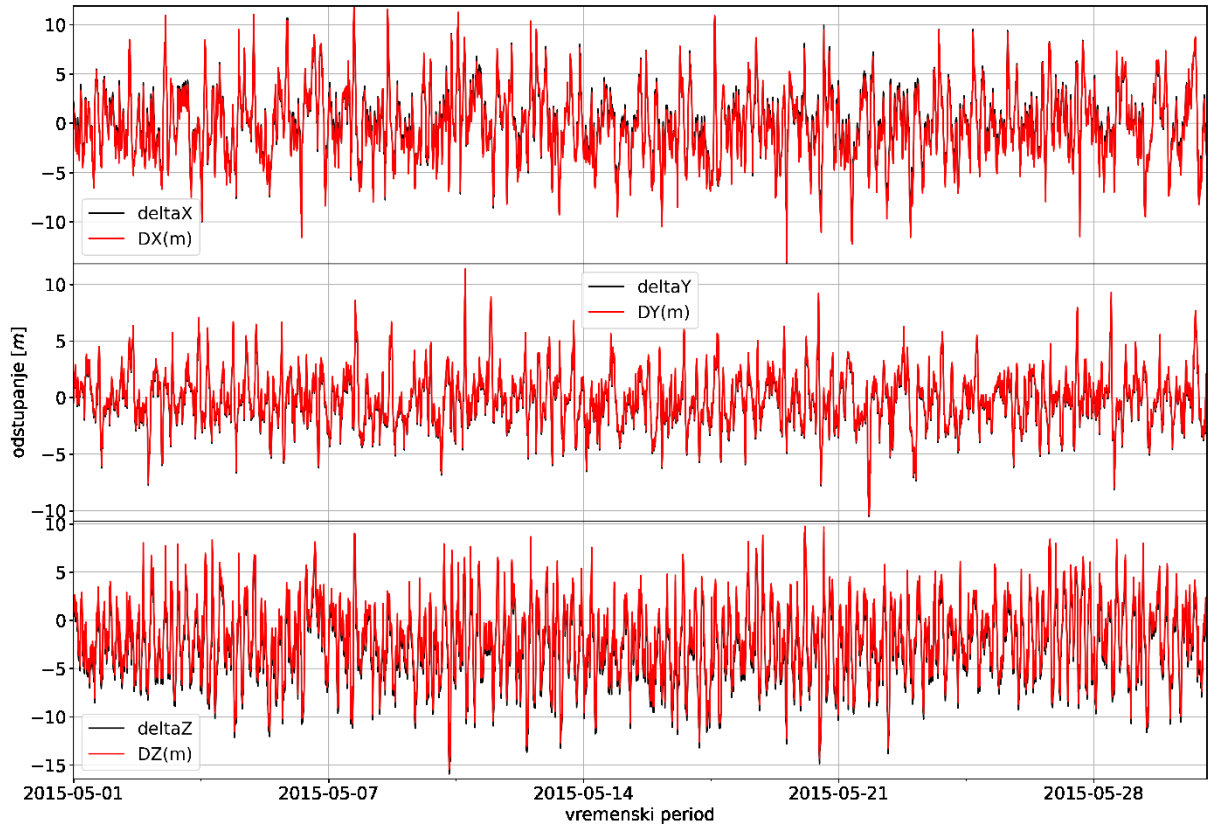
Odstupanja za postaju u Čakovcu za veljaču 2015. godine



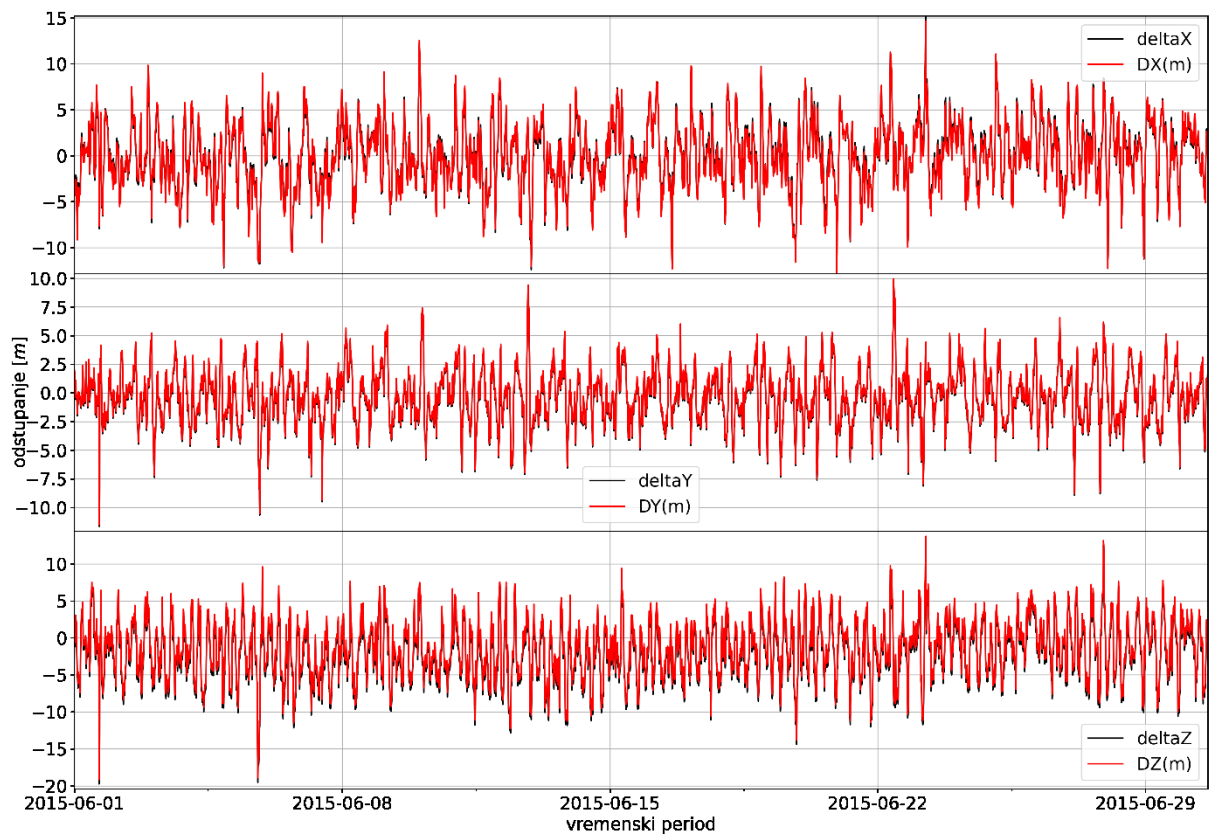
Odstupanja za postaju u Čakovcu za ožujak 2015. godine



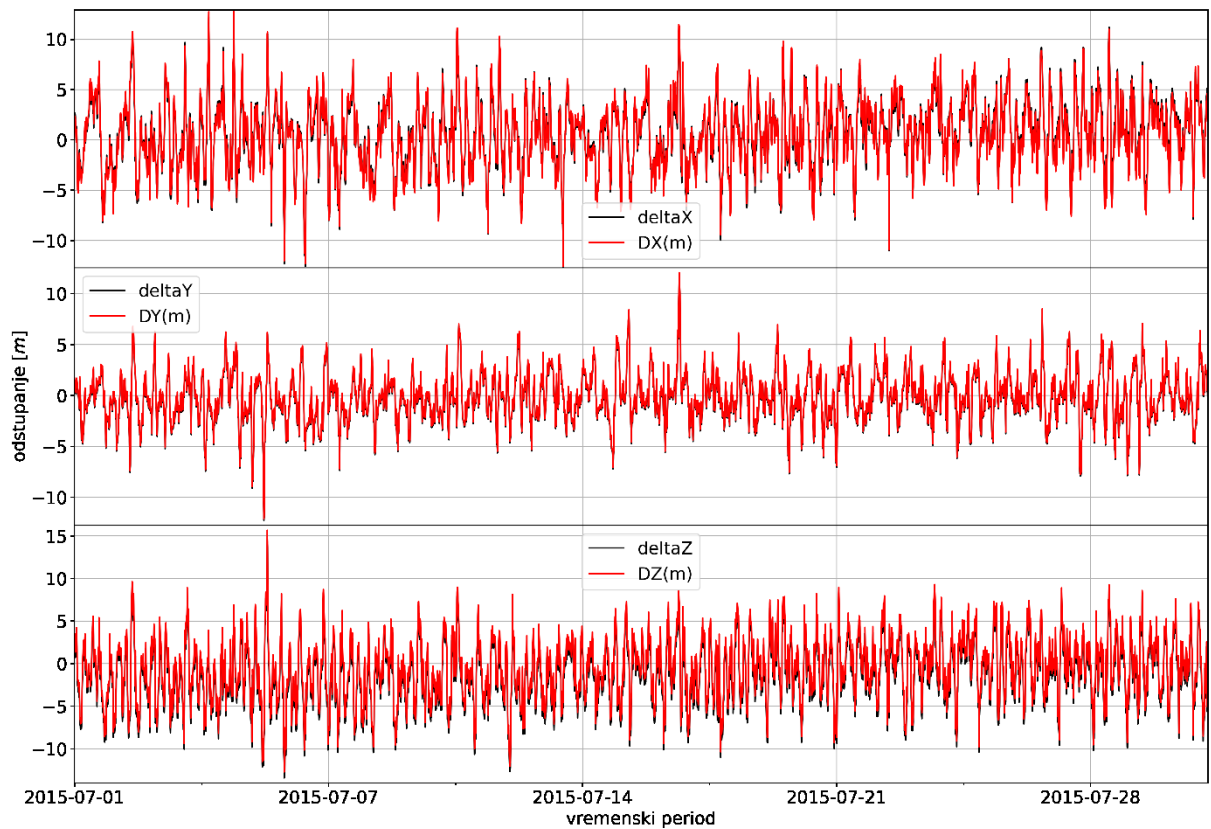
Odstupanja za postaju u Čakovcu za travanj 2015. godine



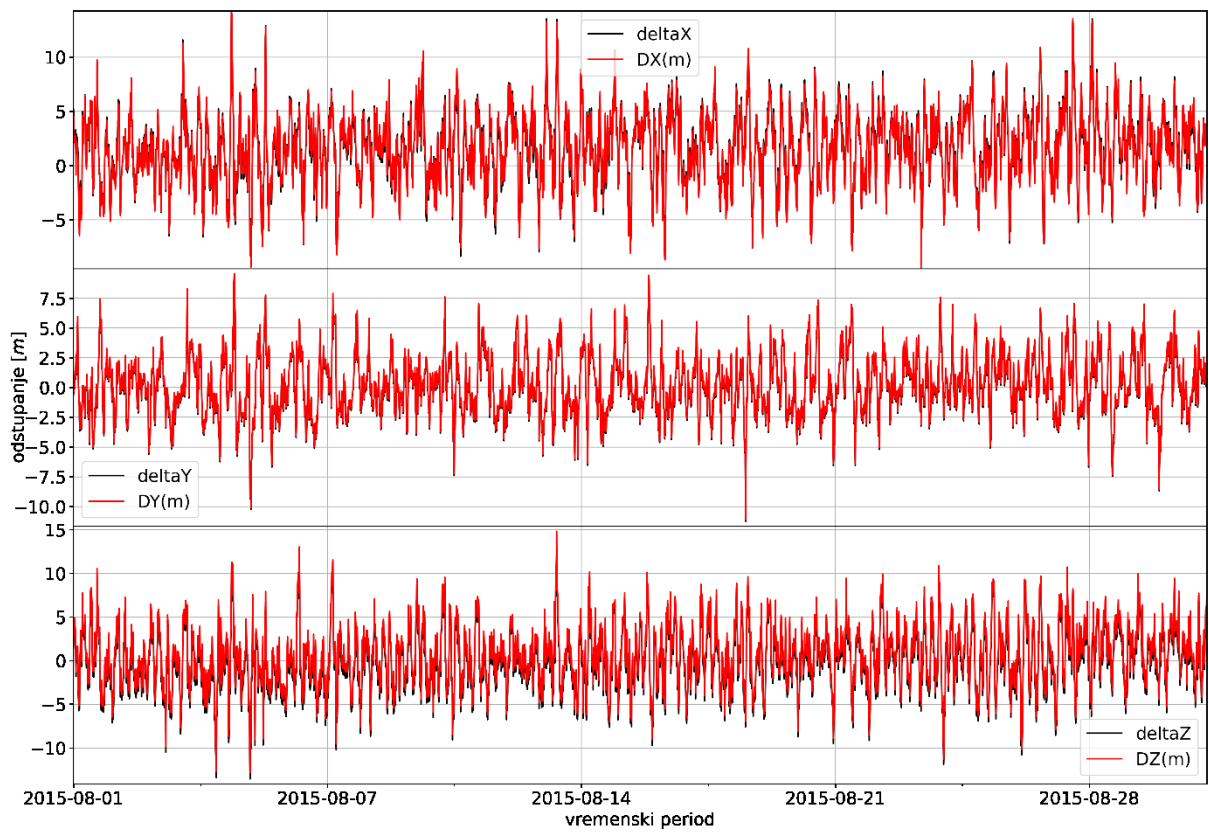
Odstupanja za postaju u Čakovcu za svibanj 2015. godine



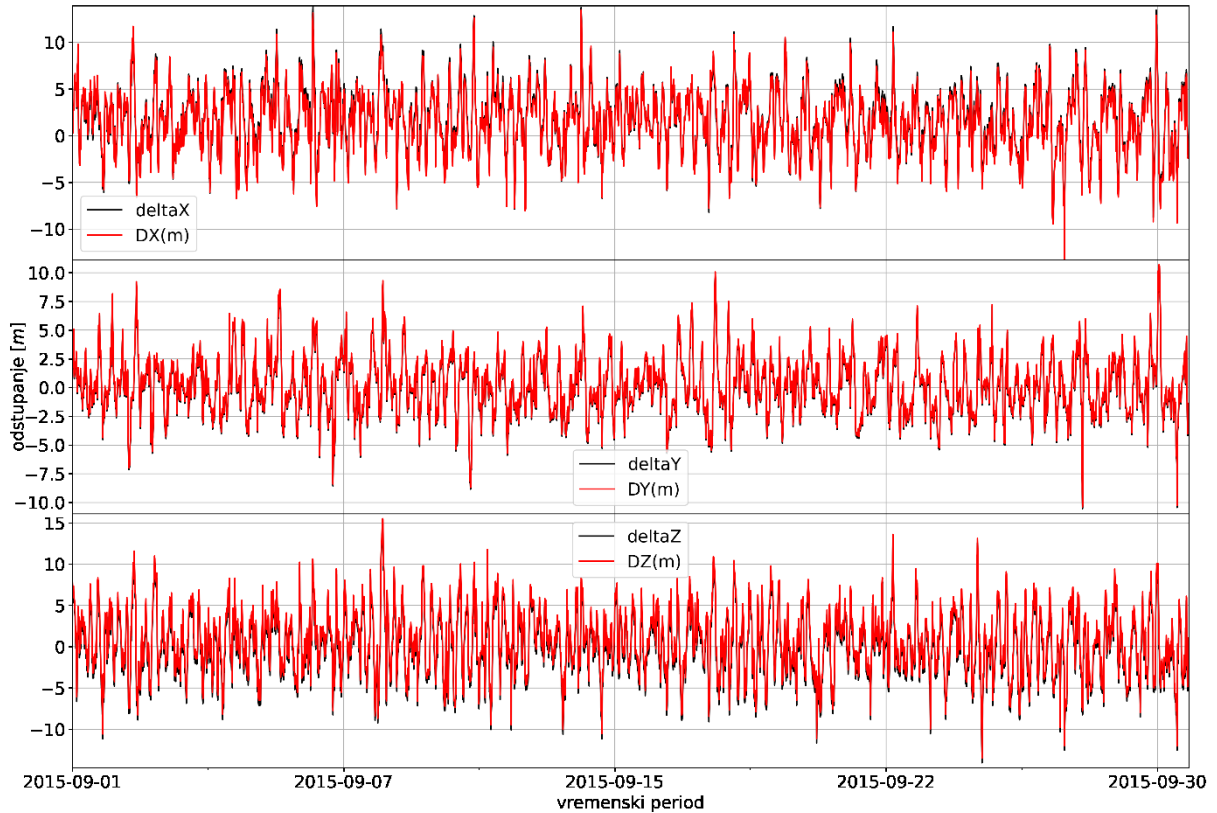
Odstupanja za postaju u Čakovcu za lipanj 2015. godine



Odstupanja za postaju u Čakovcu za srpanj 2015. godine



Odstupanja za postaju u Čakovcu za kolovoz 2015. godine



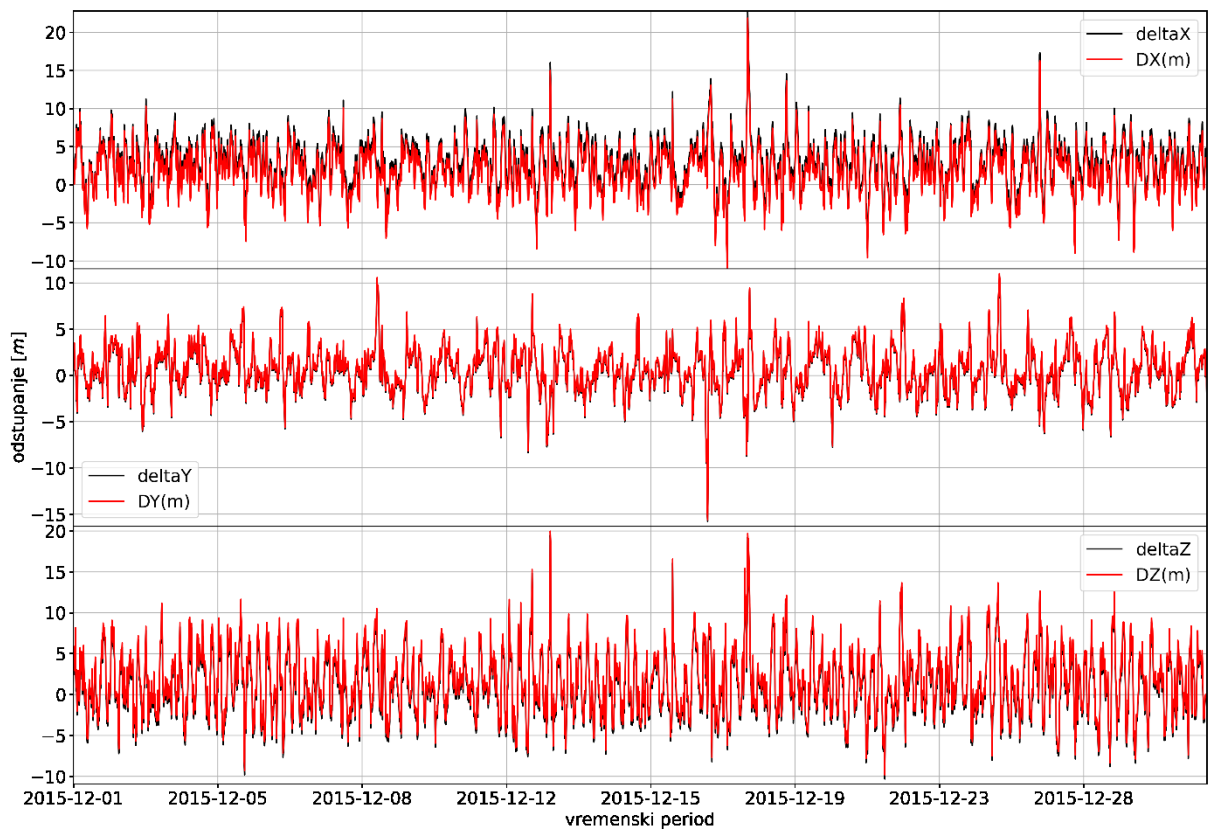
Odstupanja za postaju u Čakovcu za rujan 2015. godine



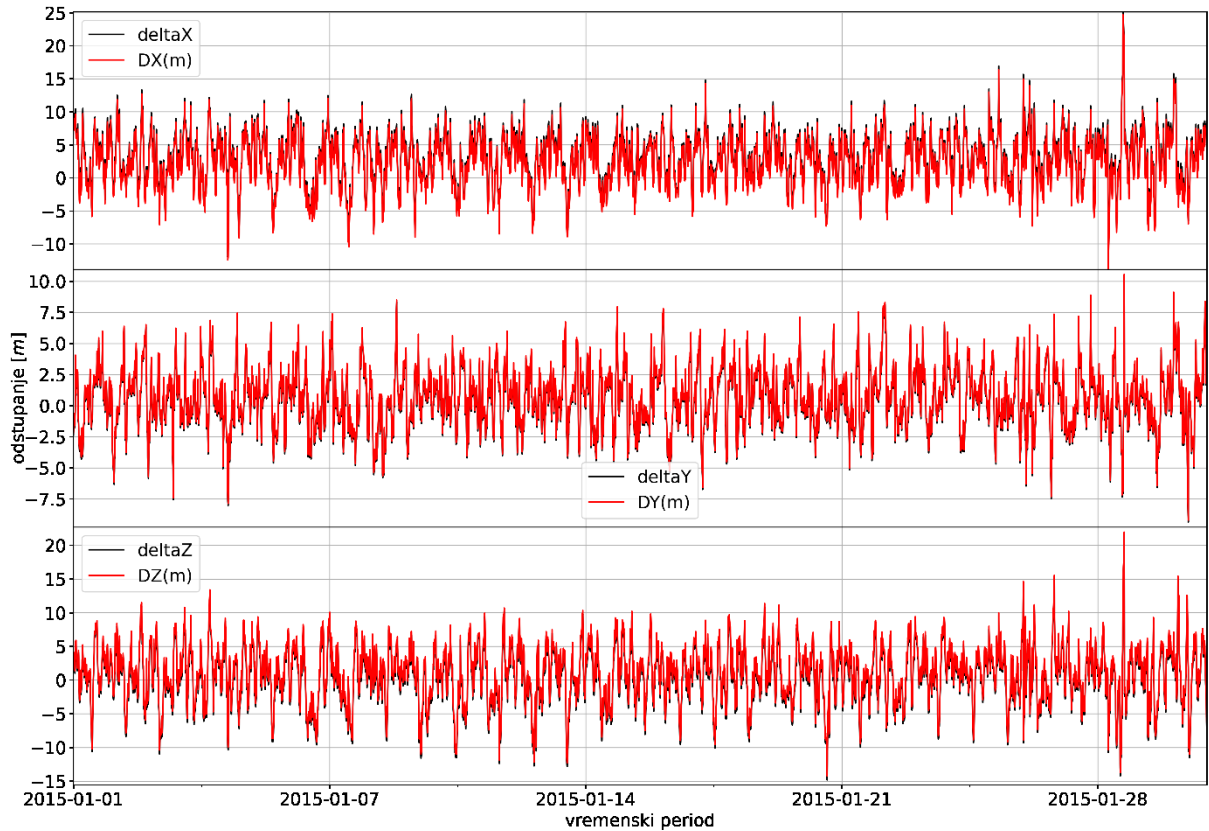
Odstupanja za postaju u Čakovcu za listopad 2015. godine



Odstupanja za postaju u Čakovcu za studeni 2015. godine



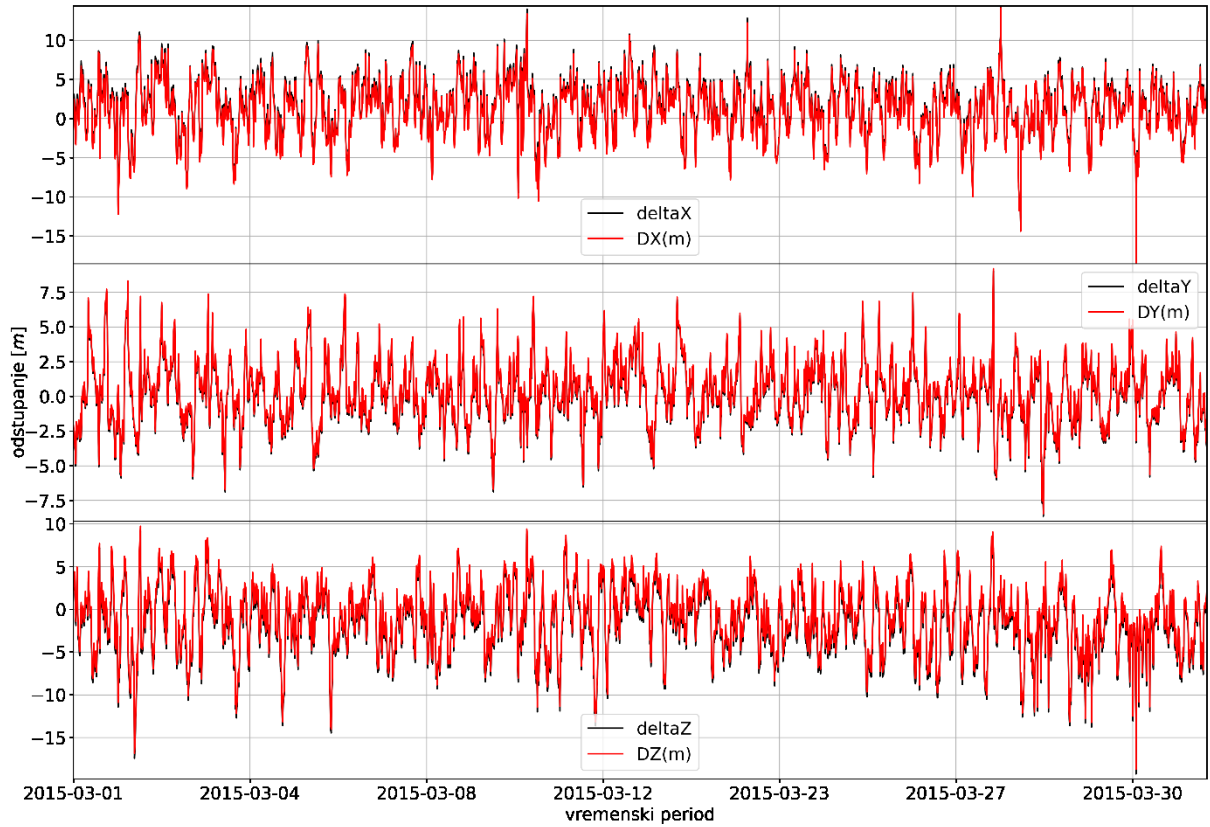
Odstupanja za postaju u Čakovcu za prosinac 2015. godine



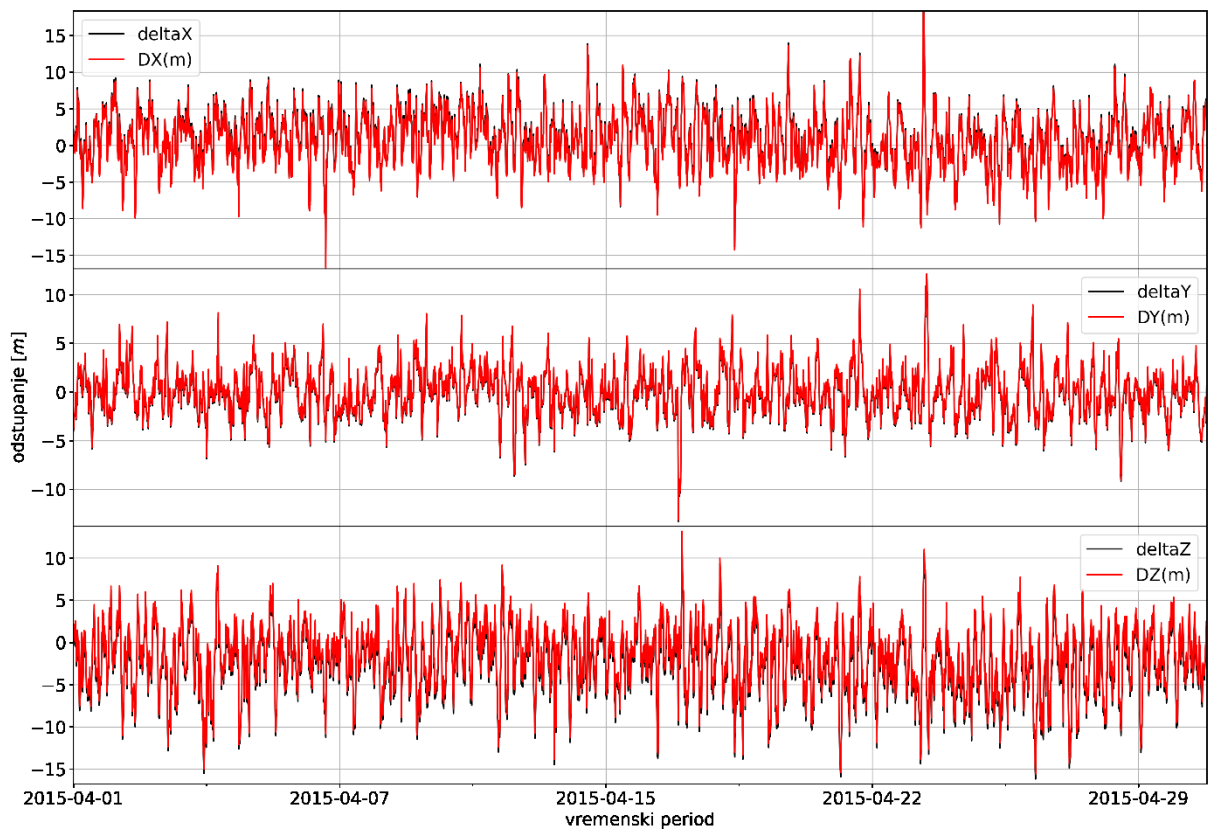
Odstupanja za postaju u Zadruga za siječanj 2015. godine



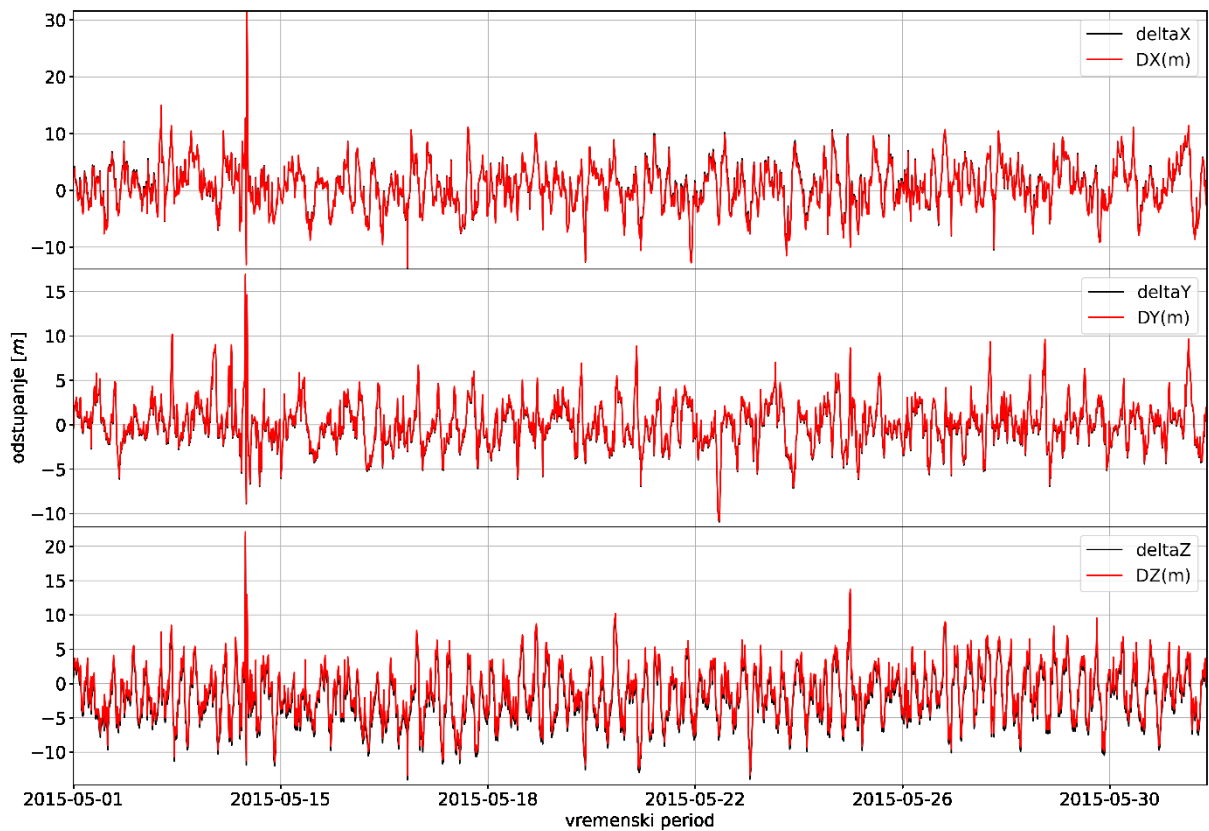
Odstupanja za postaju u Zadru za veljaču 2015. godine



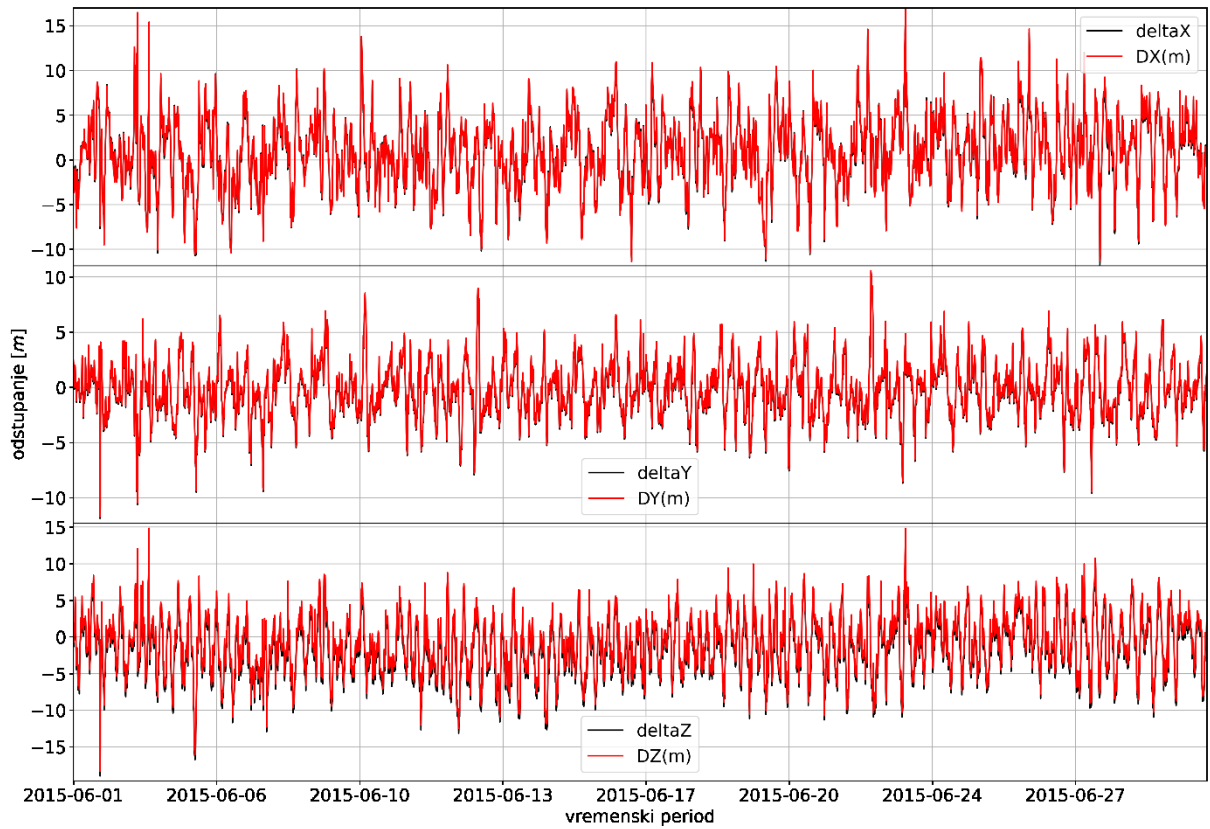
Odstupanja za postaju u Zadru za ožujak 2015. godine



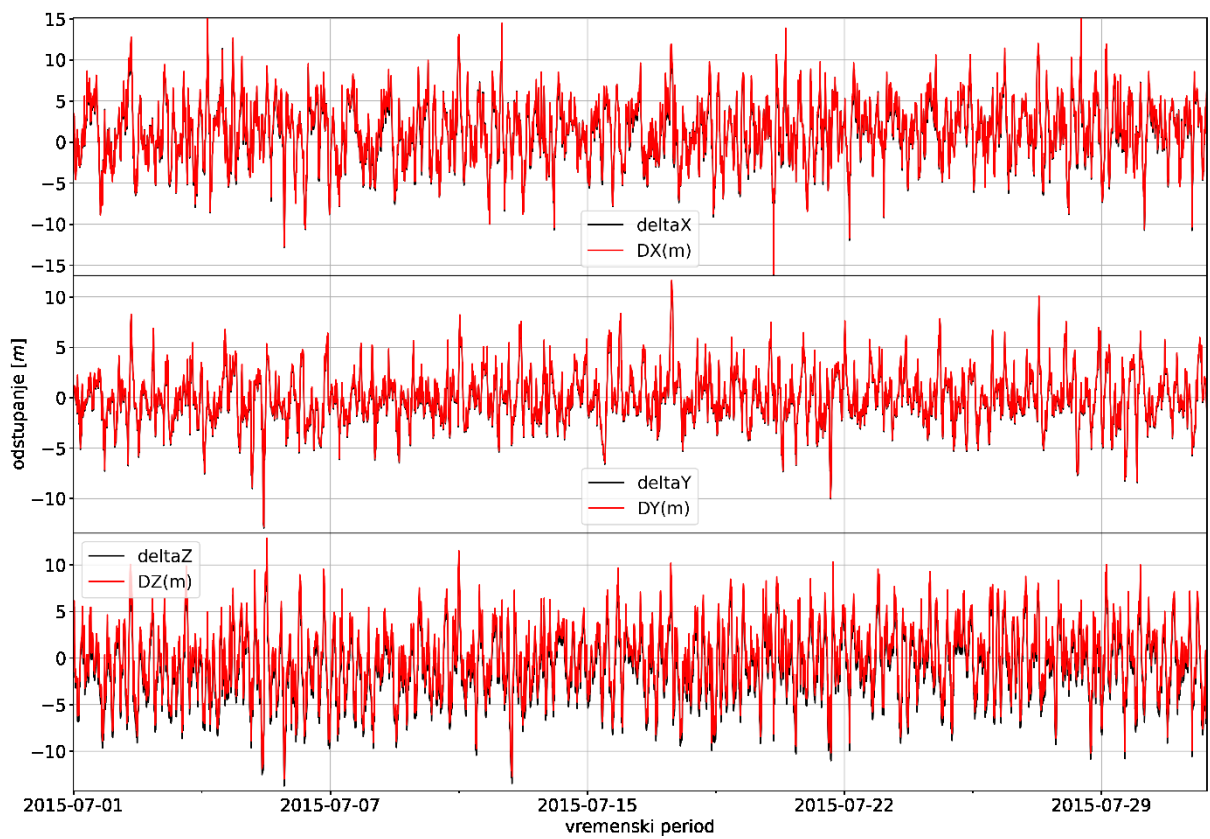
Odstupanja za postaju u Zadru za travanj 2015. godine



Odstupanja za postaju u Zadru za svibanj 2015. godine



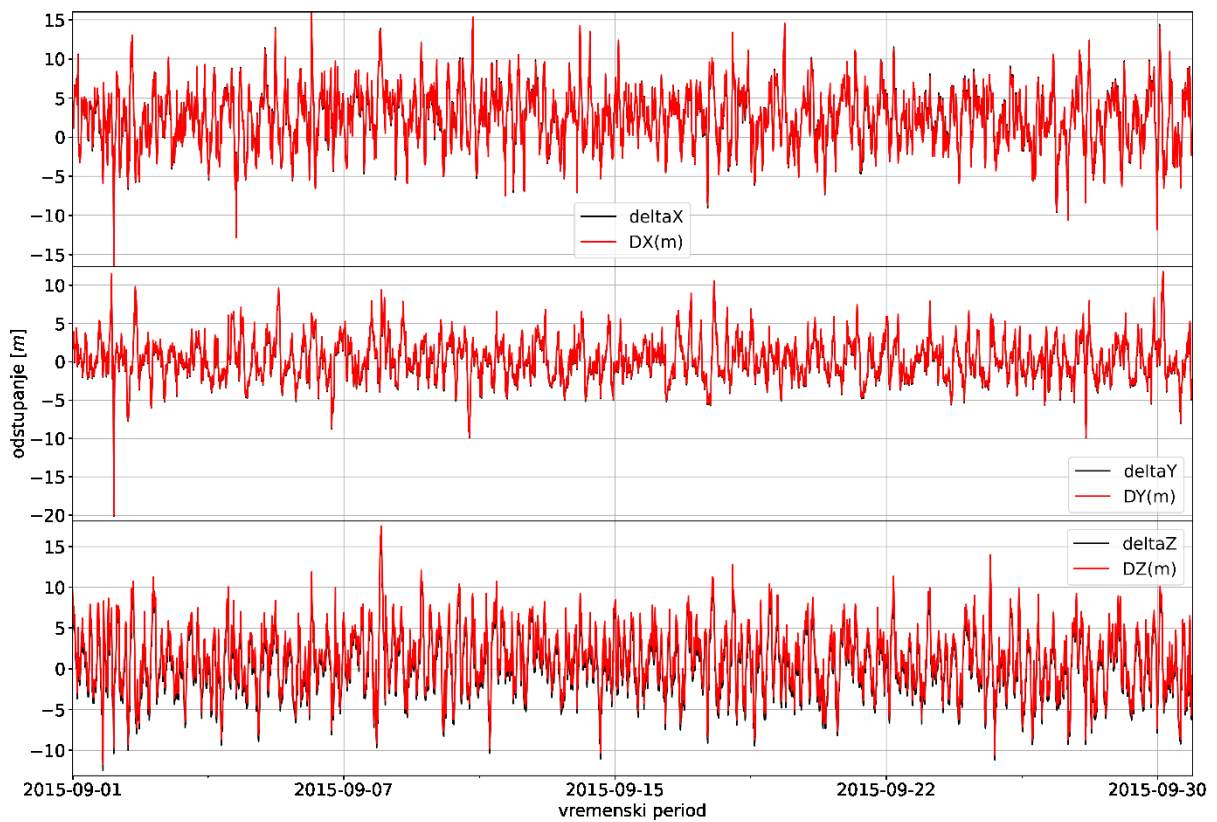
Odstupanja za postaju u Zadru za lipanj 2015. godine



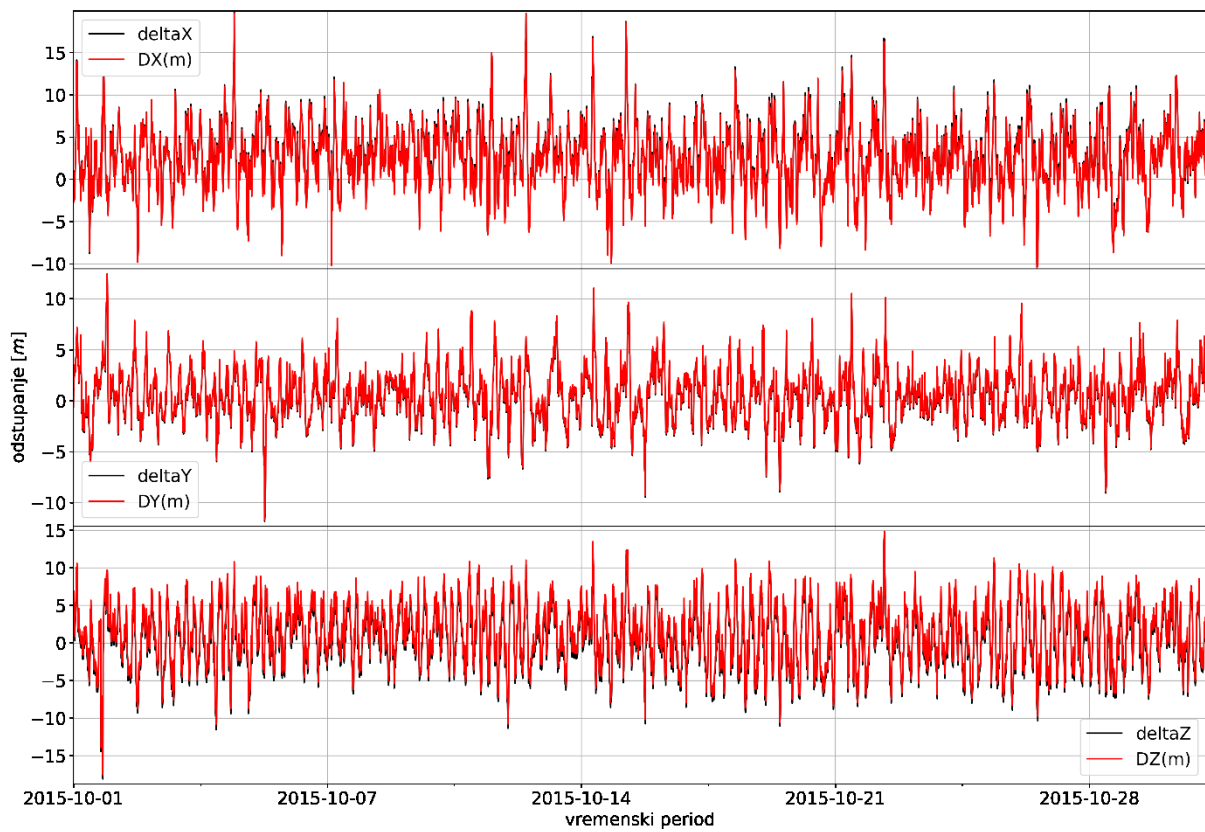
Odstupanja za postaju u Zadru za srpanj 2015. godine



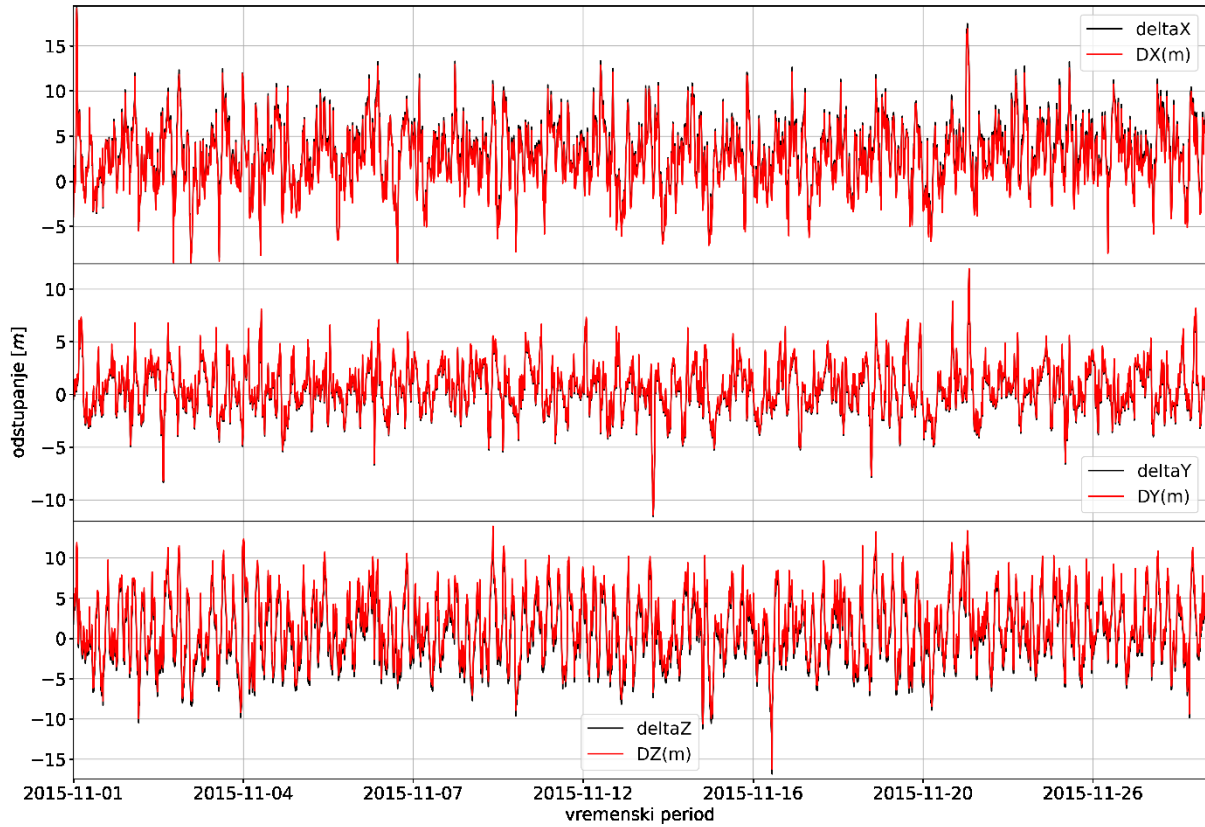
Odstupanja za postaju u Zadru za kolovoz 2015. godine



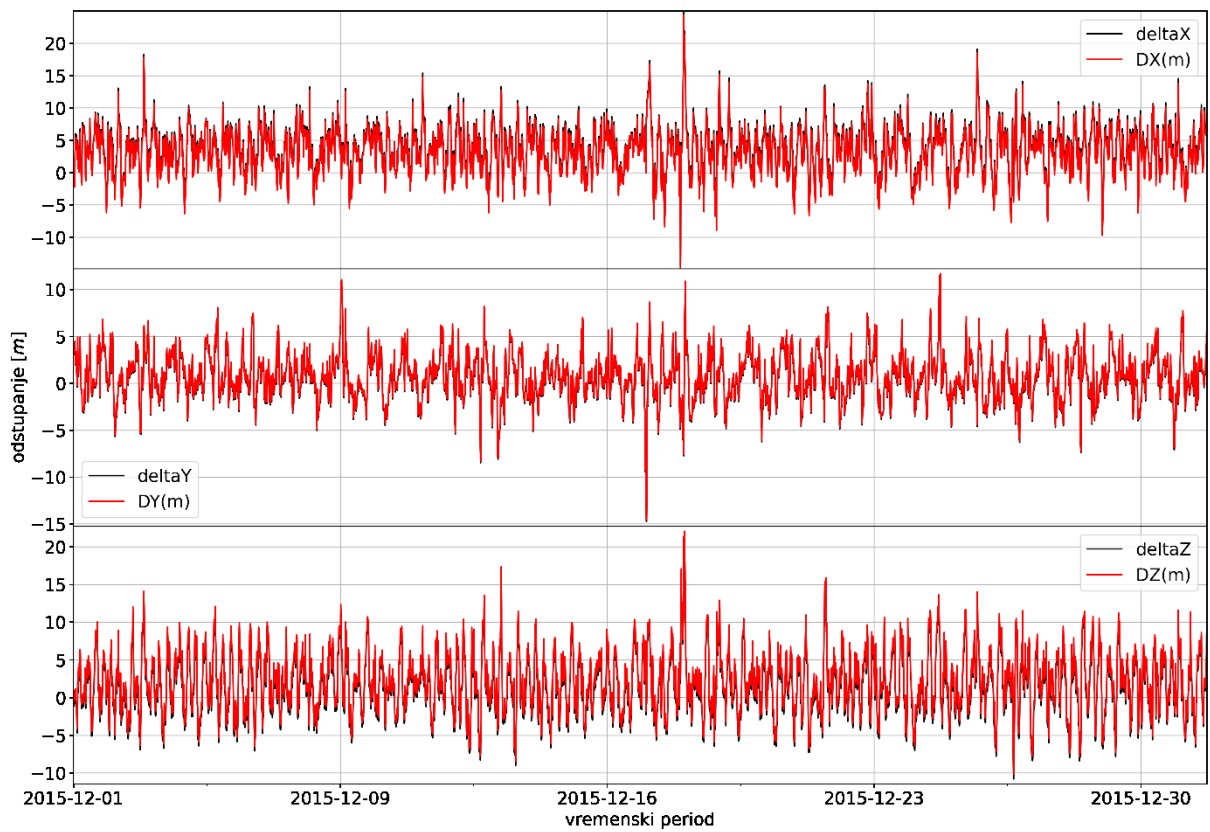
Odstupanja za postaju u Zadru za rujan 2015. godine



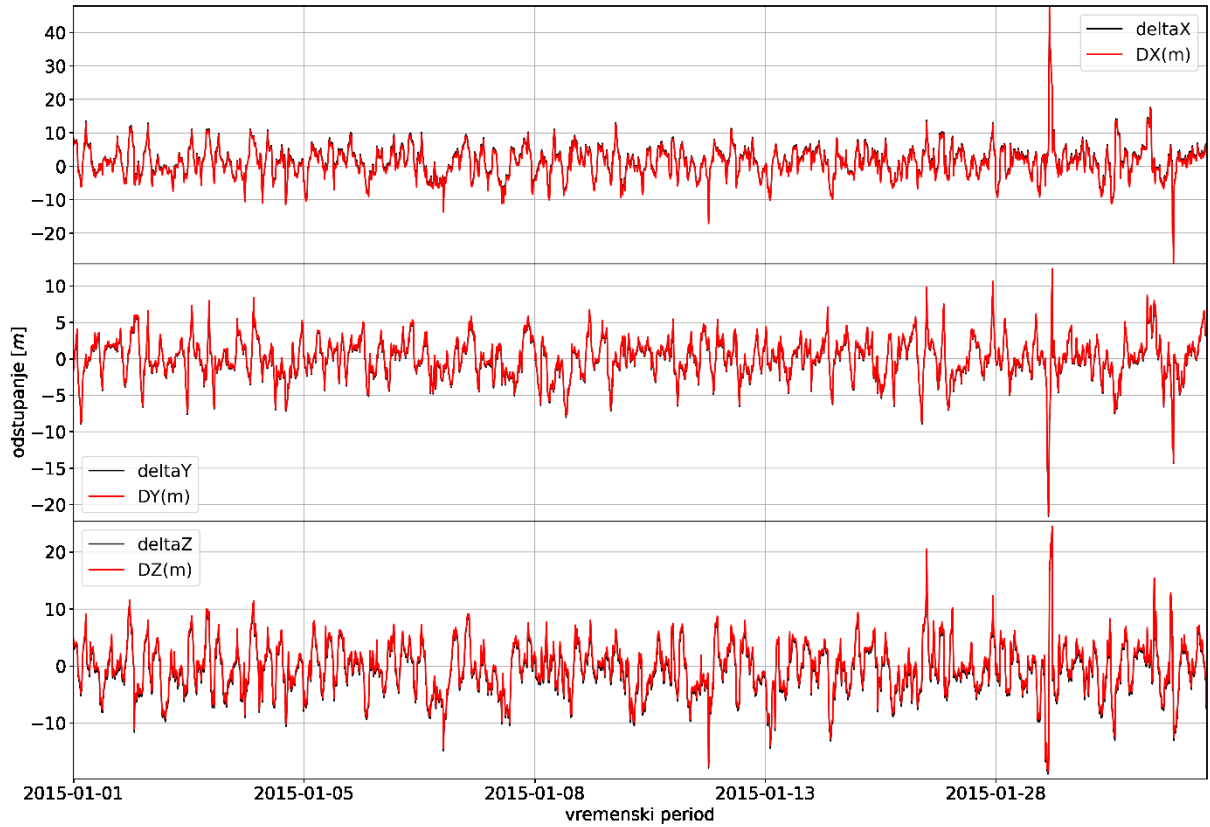
Odstupanja za postaju u Zadru za listopad 2015. godine



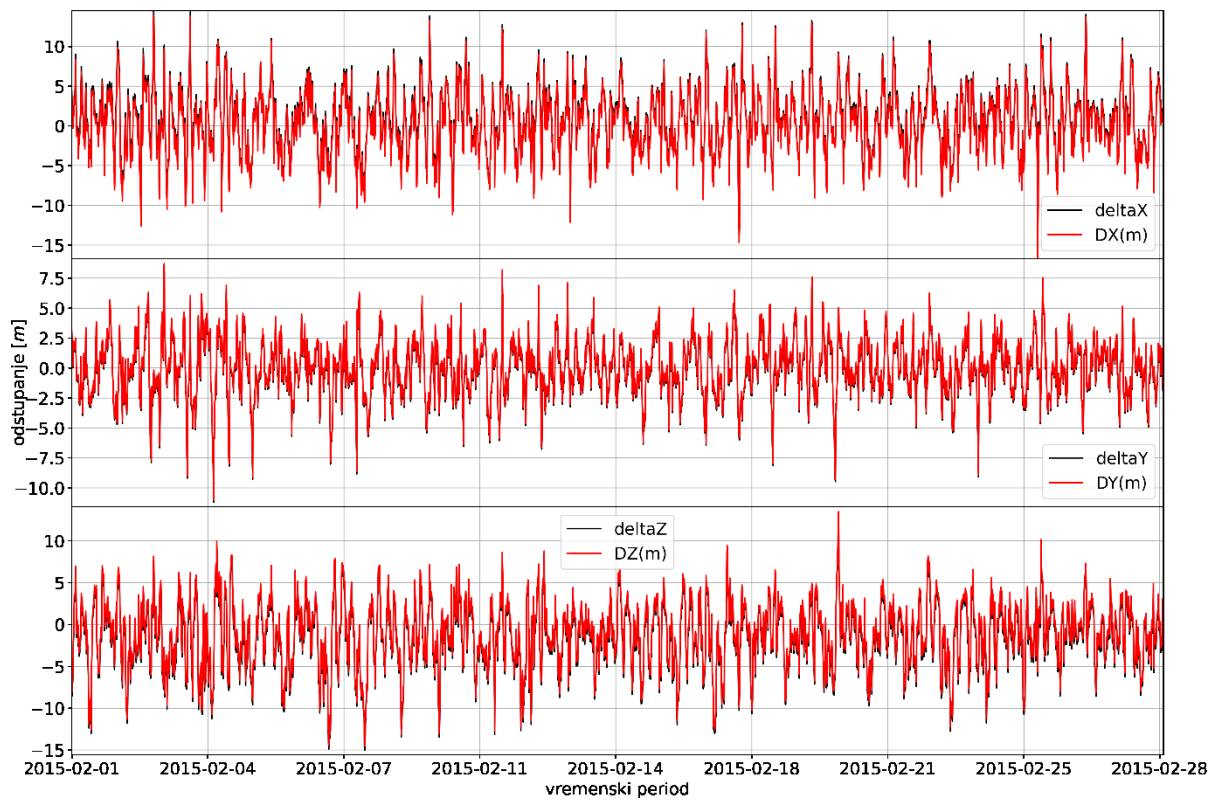
Odstupanja za postaju u Zadru za studeni 2015. godine



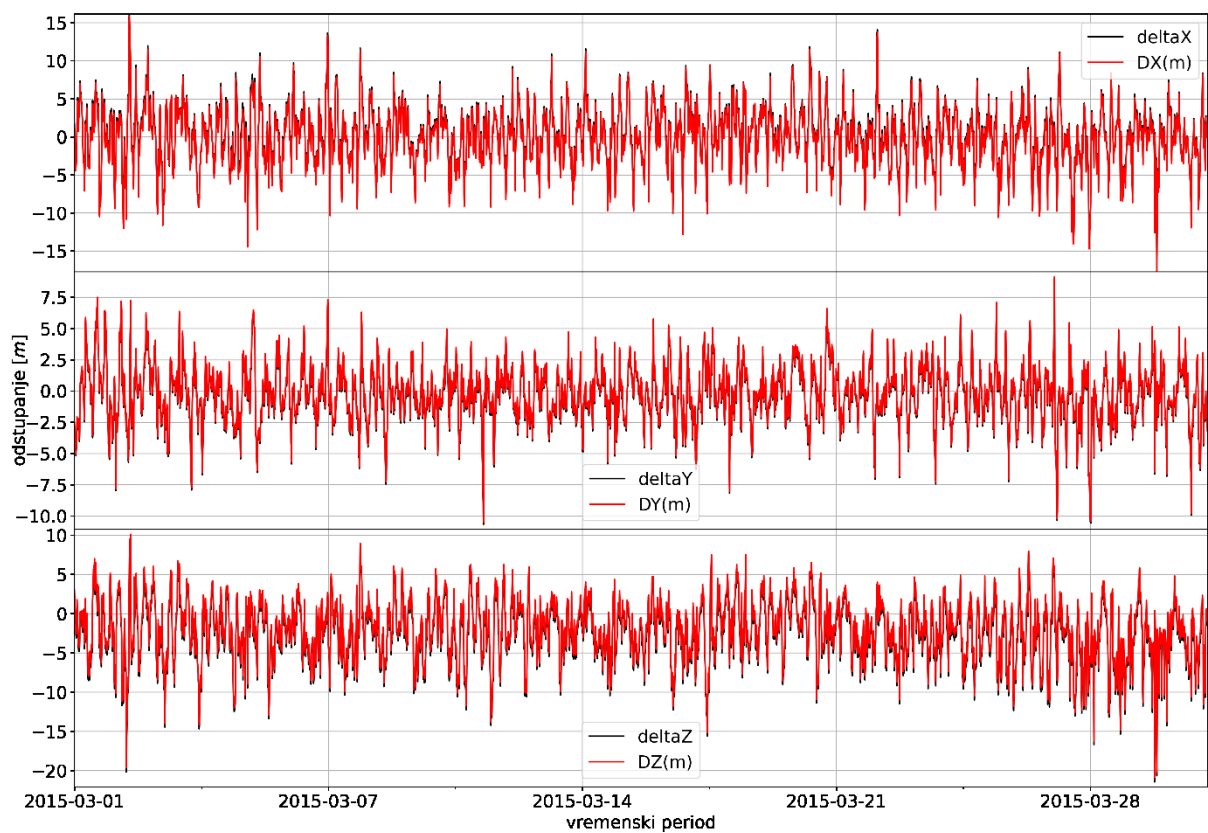
Odstupanja za postaju u Zadru za prosinac 2015. godine



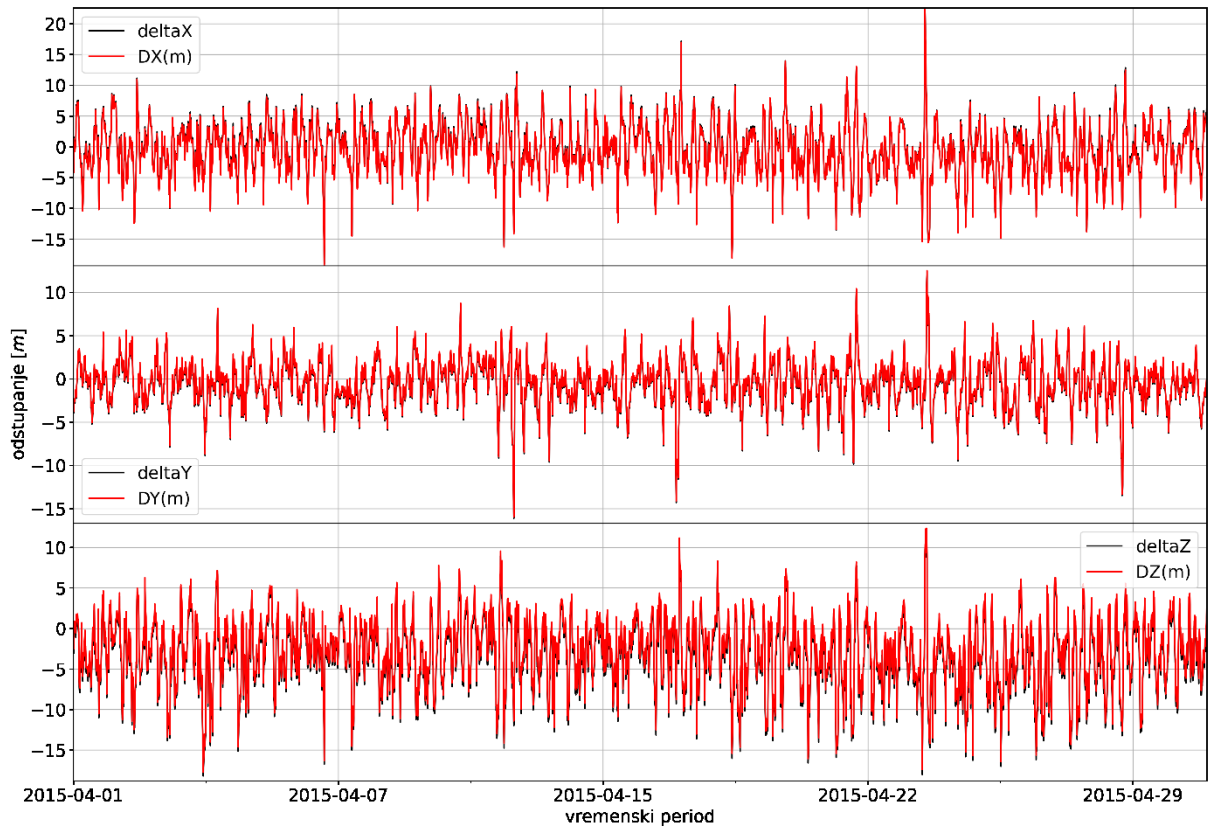
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za siječanj 2015. godine



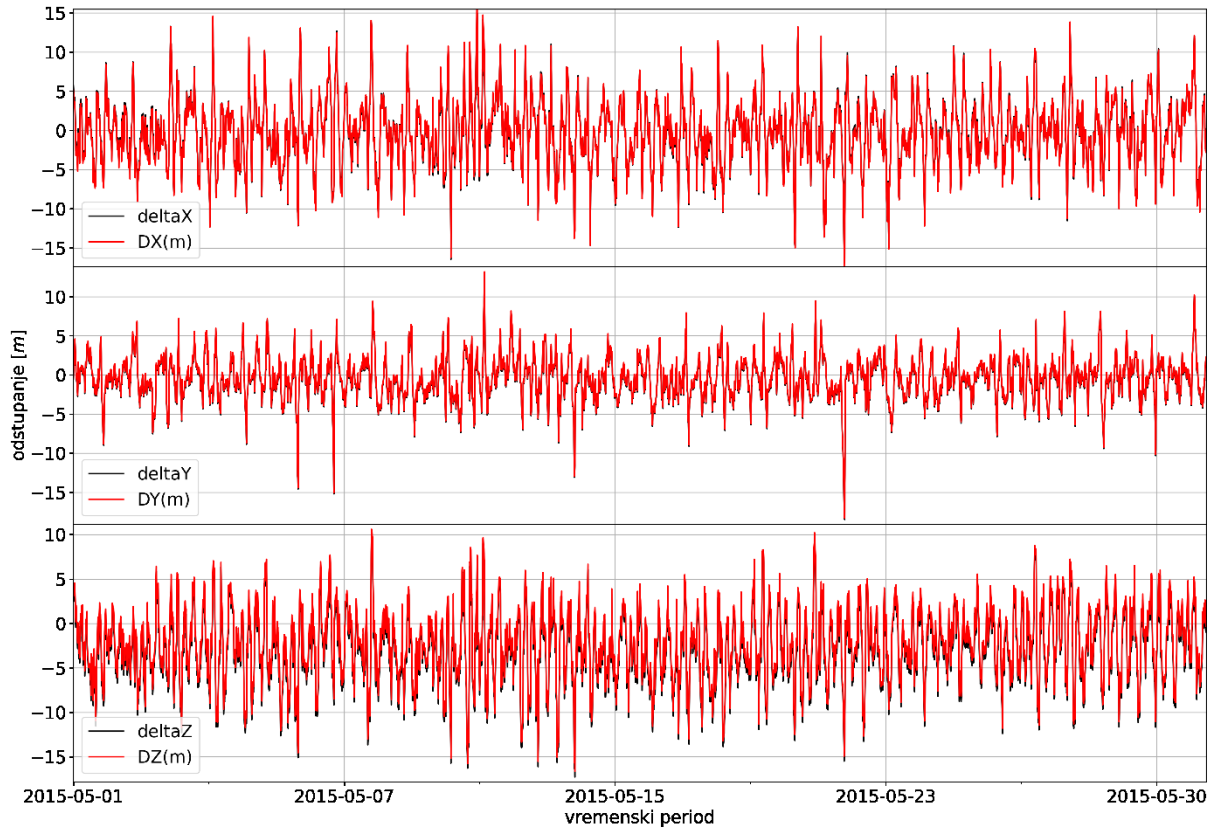
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za veljaču 2015. godine



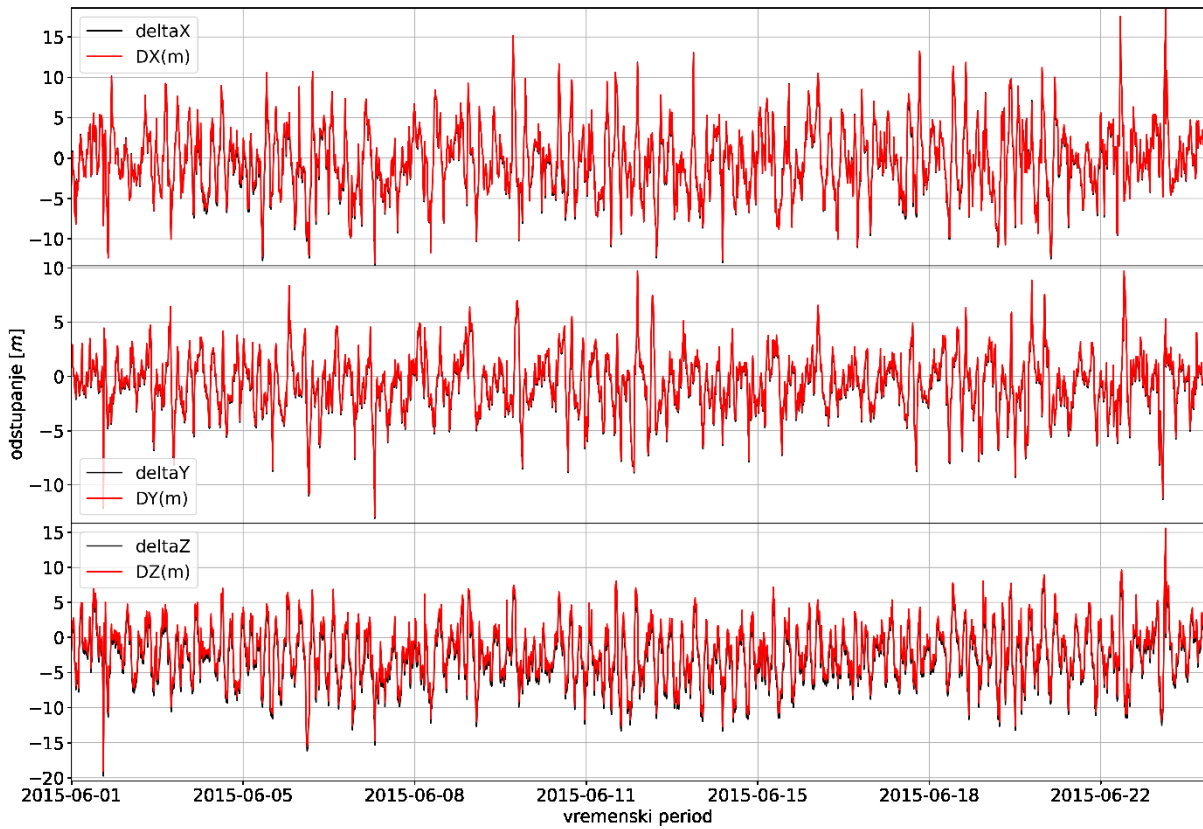
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za ožujak 2015. godine



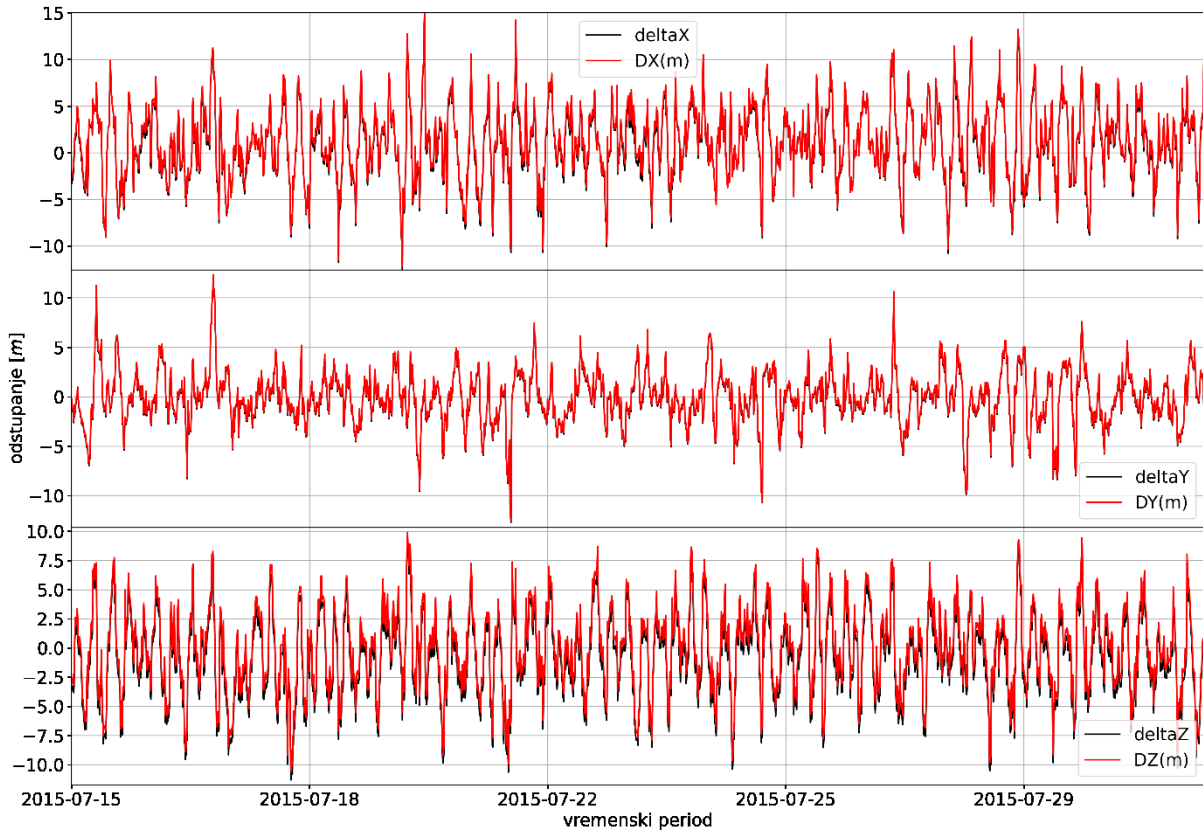
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za travanj 2015. godine



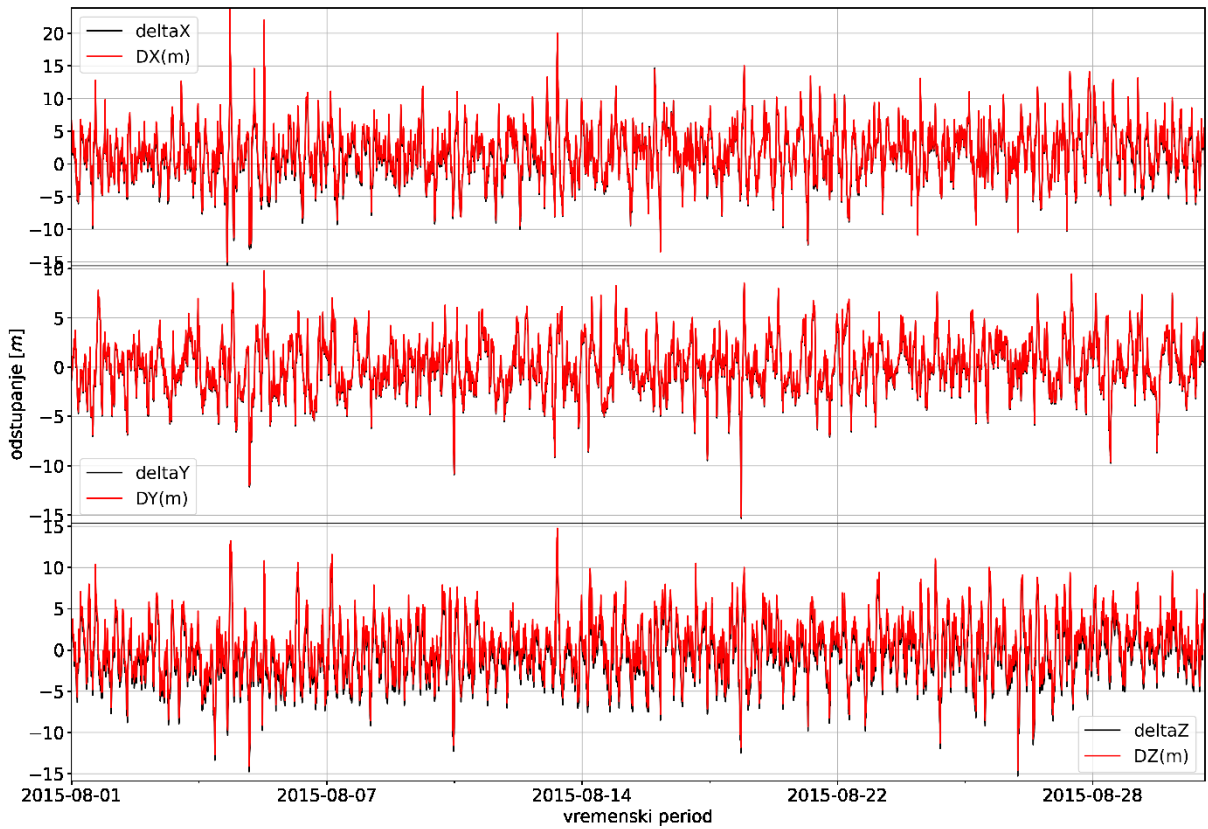
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za svibanj 2015. godine



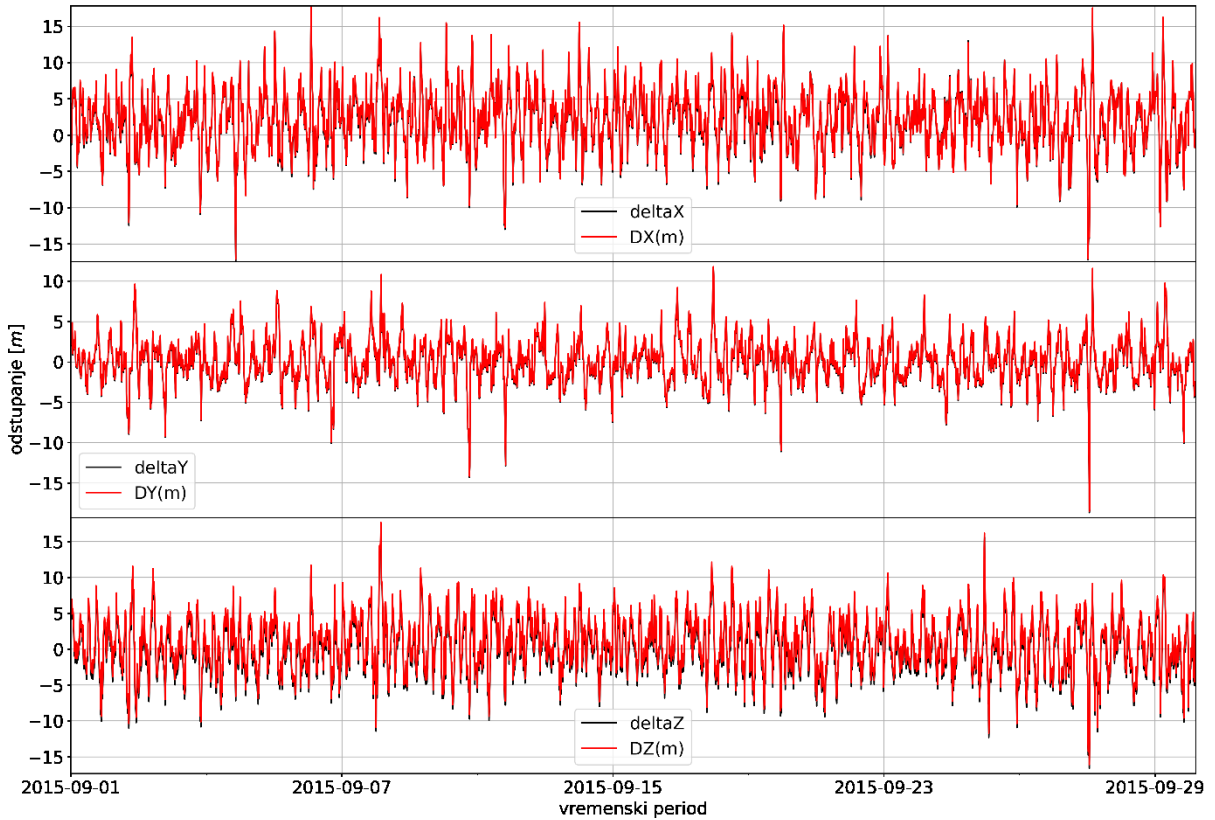
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za lipanj 2015. godine



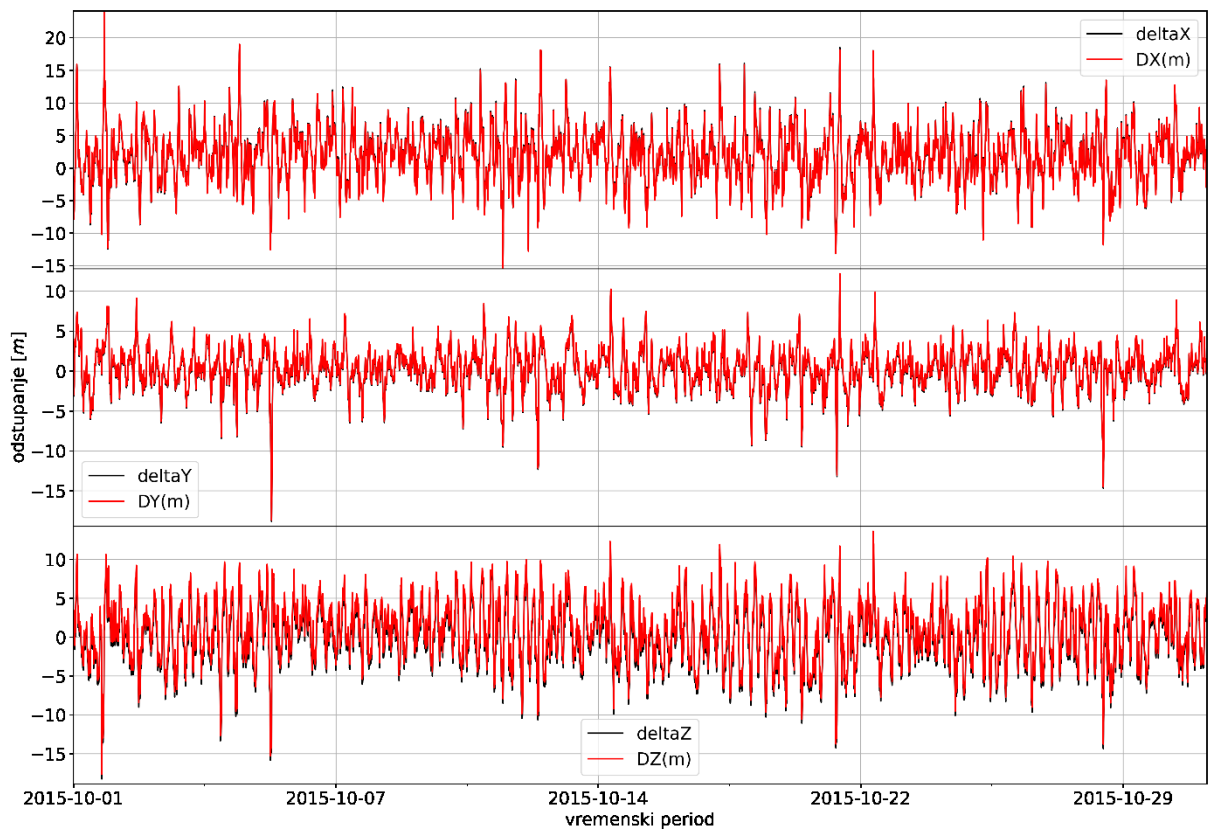
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za srpanj 2015. godine



Odstupanja za postaju u Dubrovniku za kolovoz 2015. godine



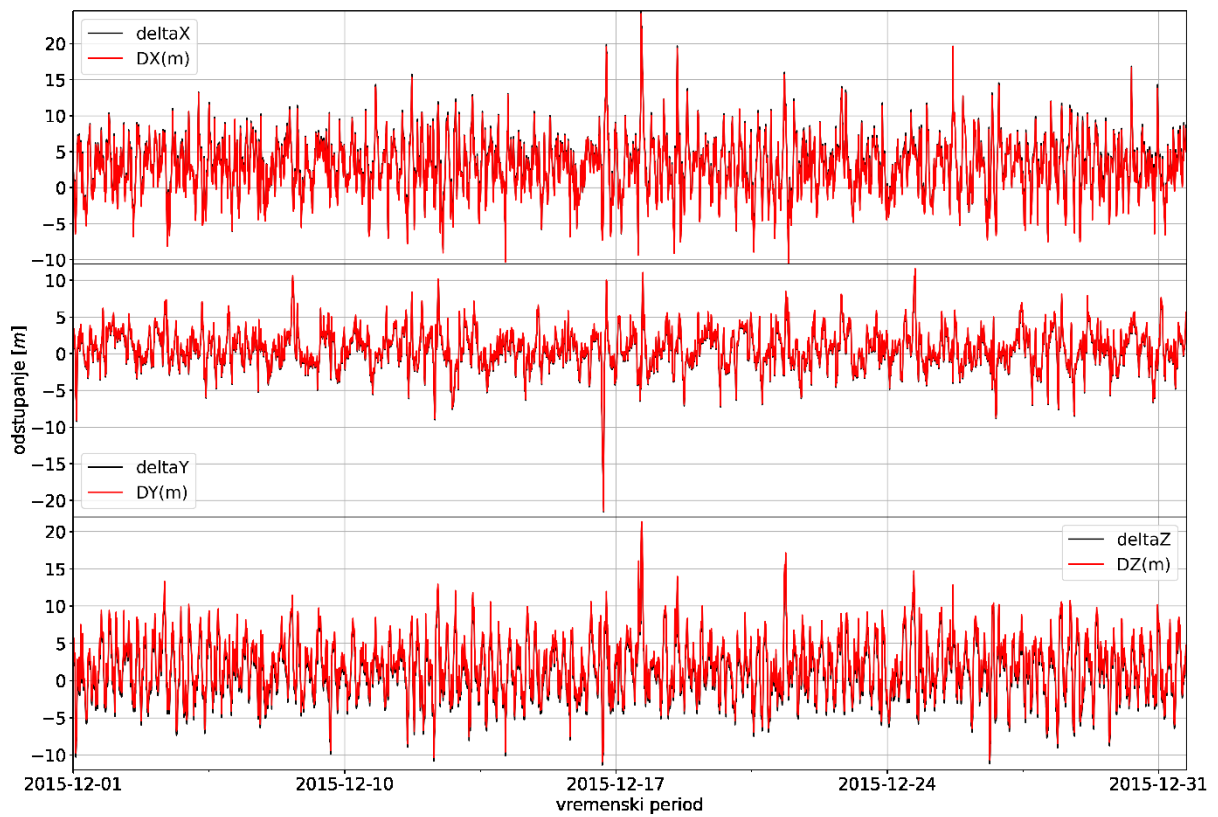
Odstupanja za postaju u Dubrovniku za rujan 2015. godine



Odstupanja za postaju u Dubrovniku za listopad 2015. godine

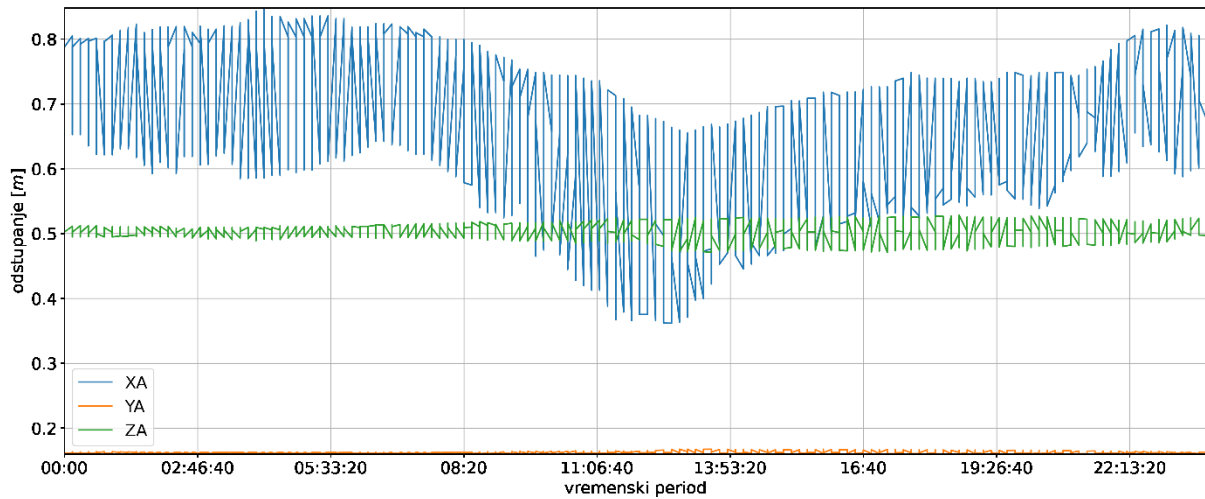


Odstupanja za postaju u Dubrovniku za studeni 2015. godine

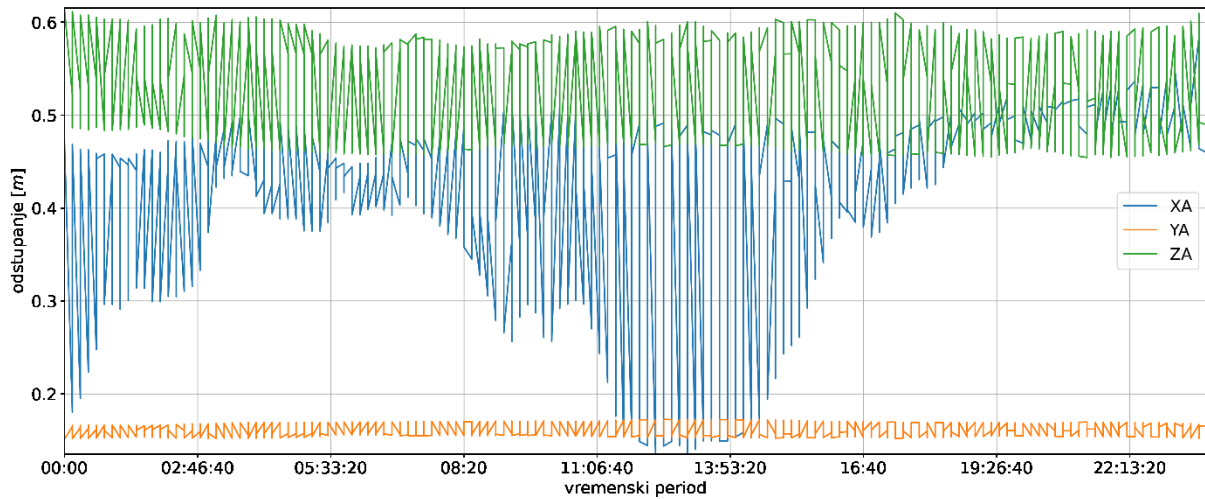


Odstupanja za postaju u Dubrovniku za prosinac 2015. godine

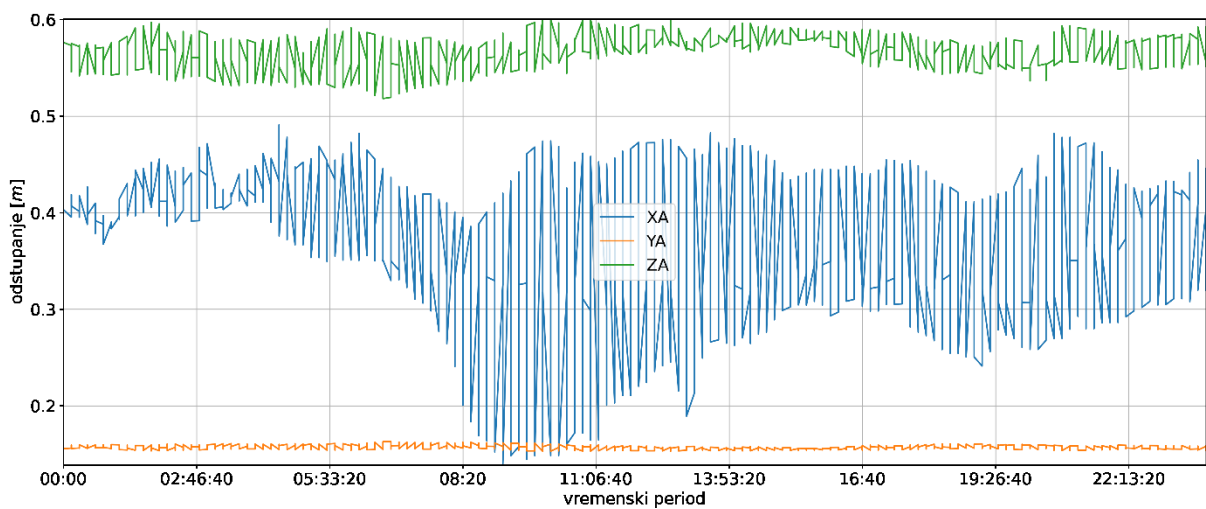
D) grafički prikaz usporedbe vrijednosti trodnevni, sezonskih i godišnjih razlika apsolutnih odstupanja točnosti položaja ostvarenih usporedbom Saastamoinenova i predloženog modela troposferskog kašnjenja za postaje u Čakovcu, Zadru i Dubrovniku u 2014. i 2015. godini. Sezonski i godišnji grafovi odijeljeno prikazuju rezultate za sve koordinatne osi; os x (gornji dio grafa), os y (srednji graf) te os z (donji dio grafa).



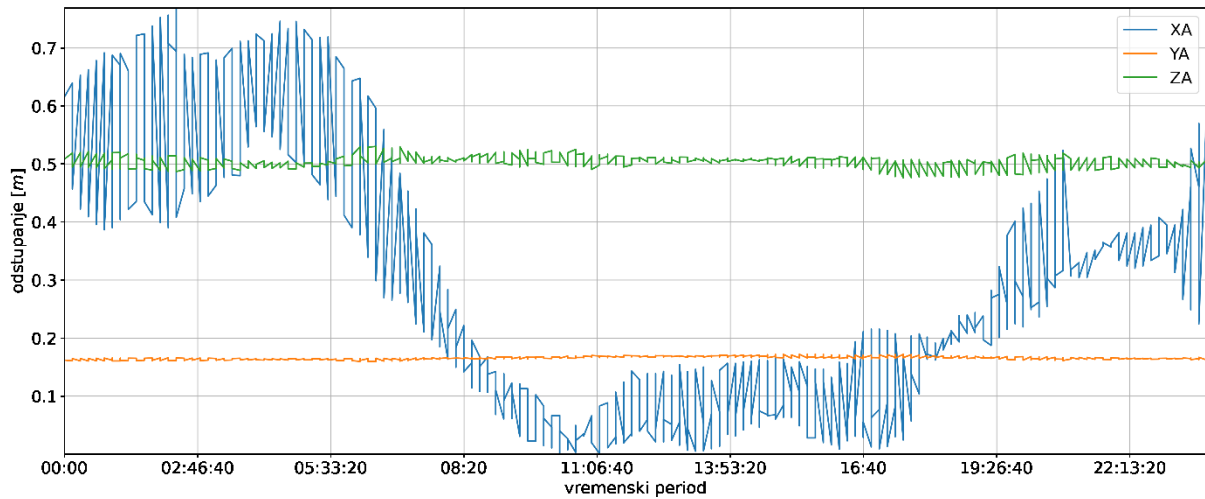
Kretanje razlike apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu 1. – 3. siječnja 2014. godine



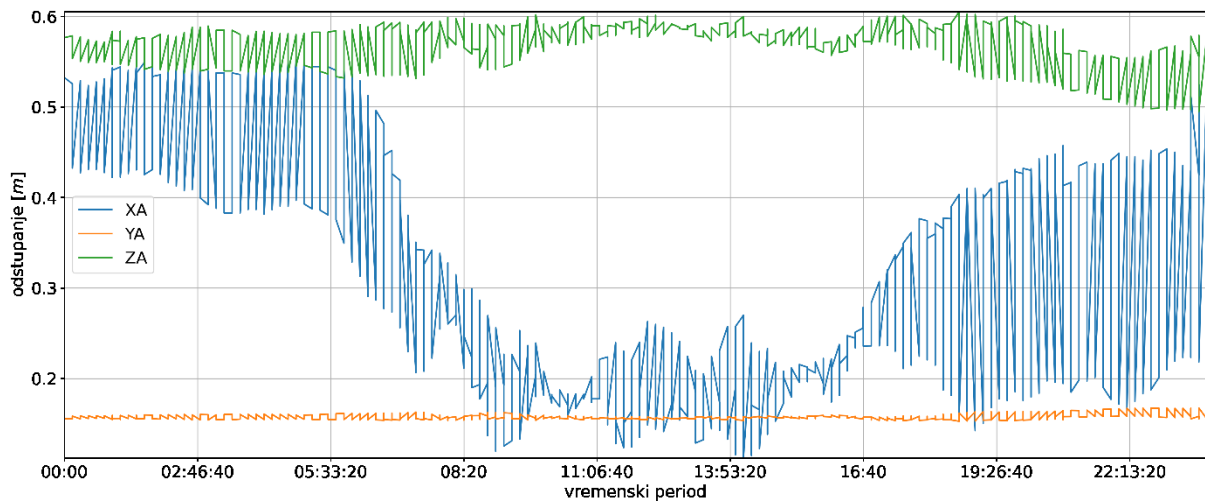
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru 1. – 3. veljače 2014. godine



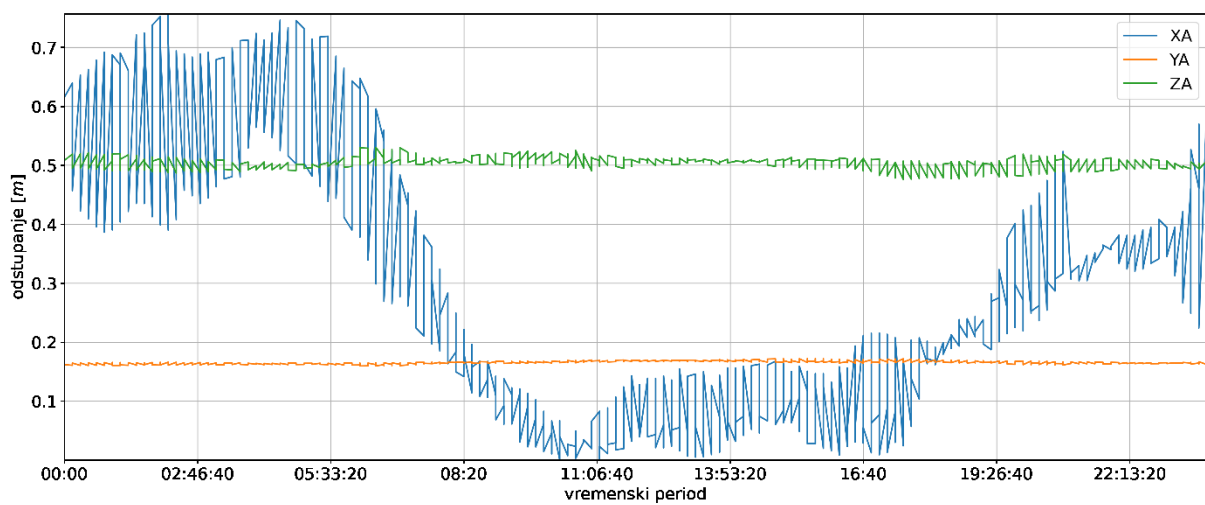
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku 2. – 4. siječnja 2014. godine



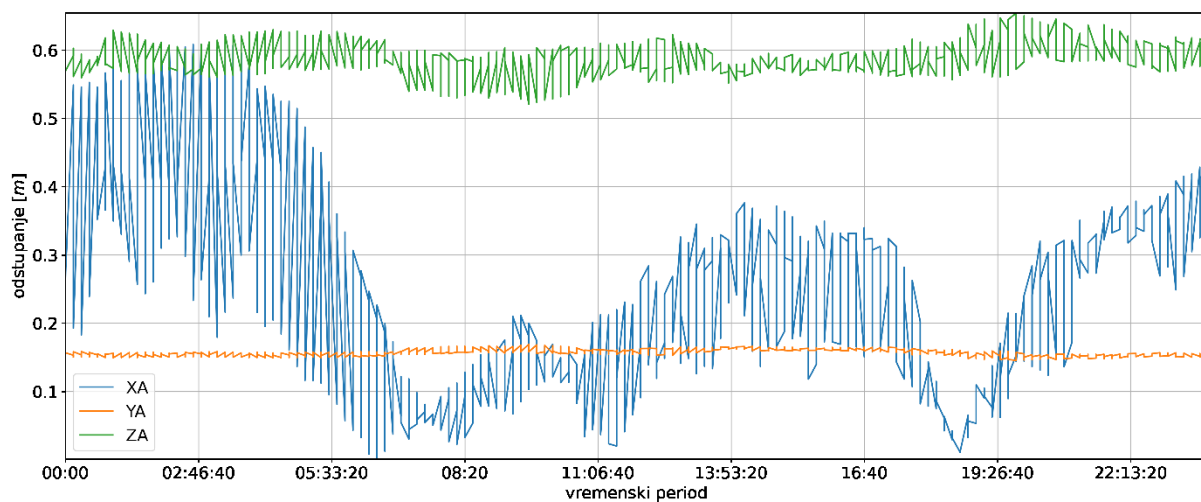
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu 1. – 3. travnja 2014. godine



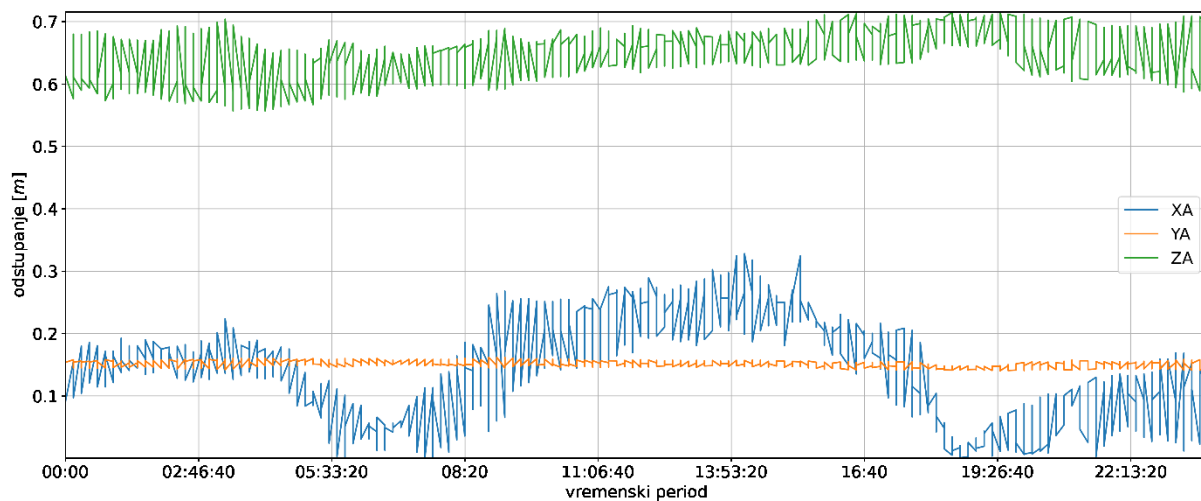
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru 1. – 3. travnja 2014. godine



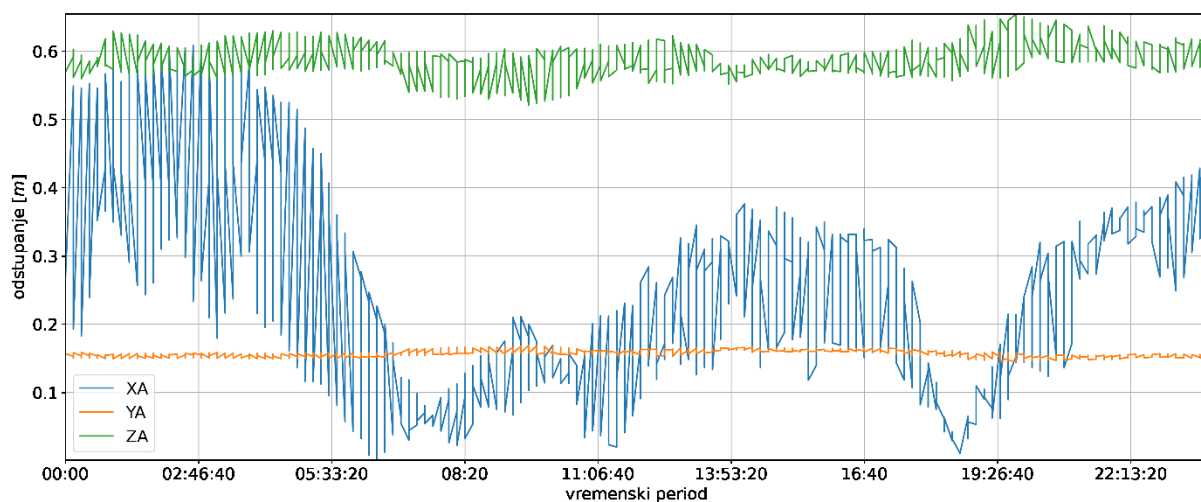
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku 1. – 3. travnja 2014. godine



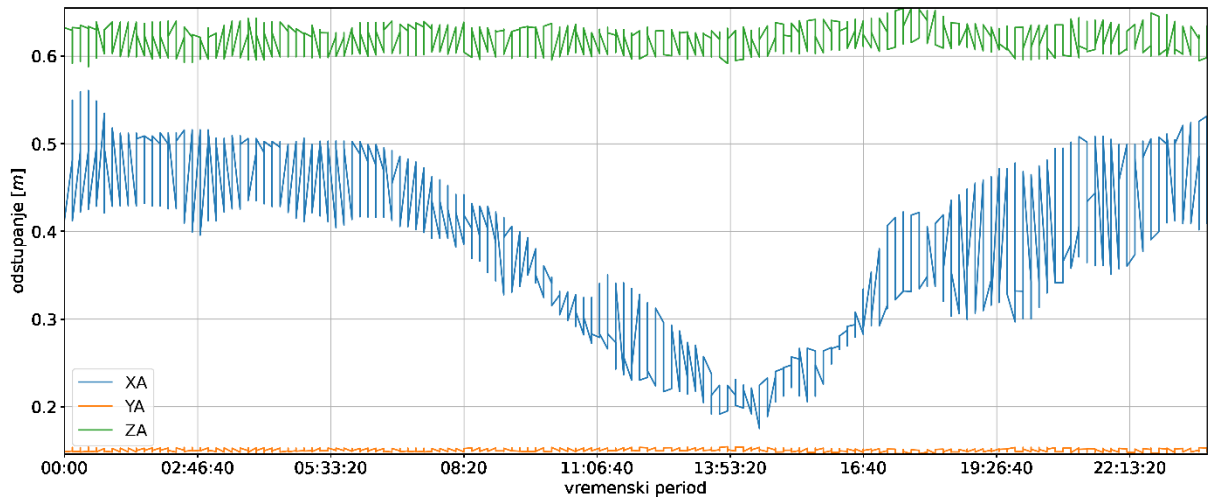
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu 1. – 3. srpnja 2014. godine



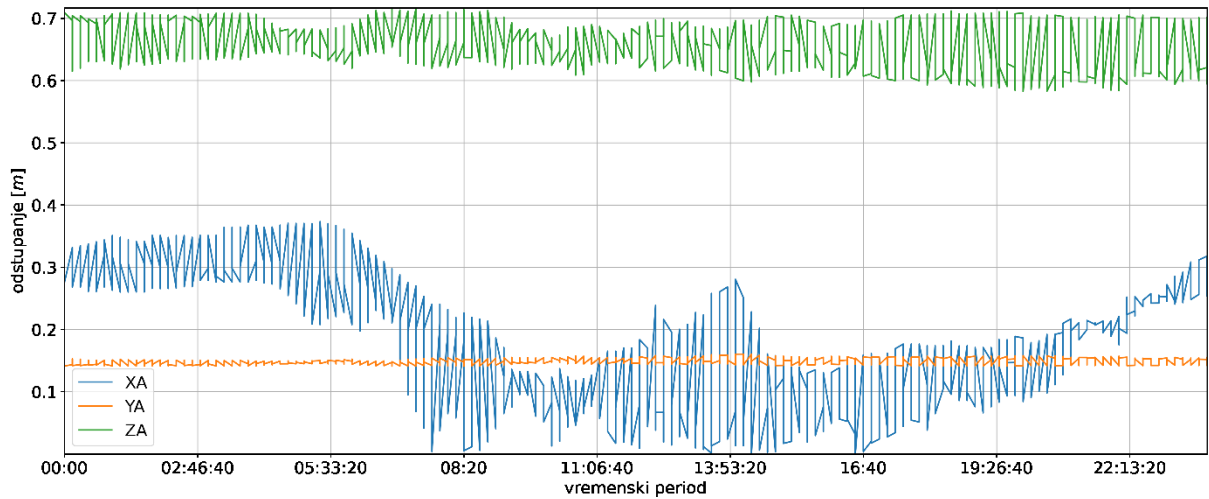
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru 1. – 3. srpnja 2014. godine



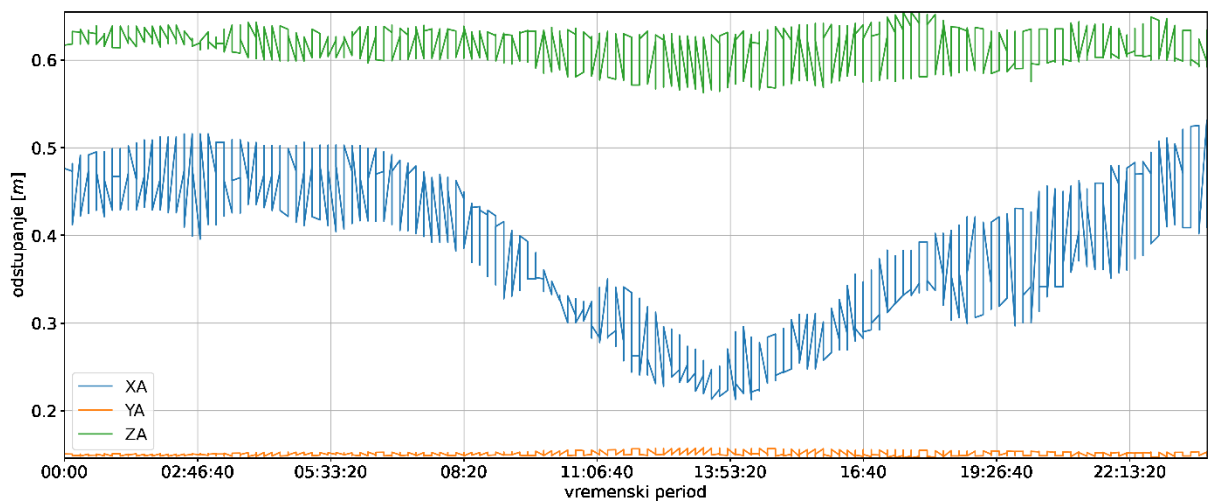
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku 1. – 3. srpnja 2014. godine



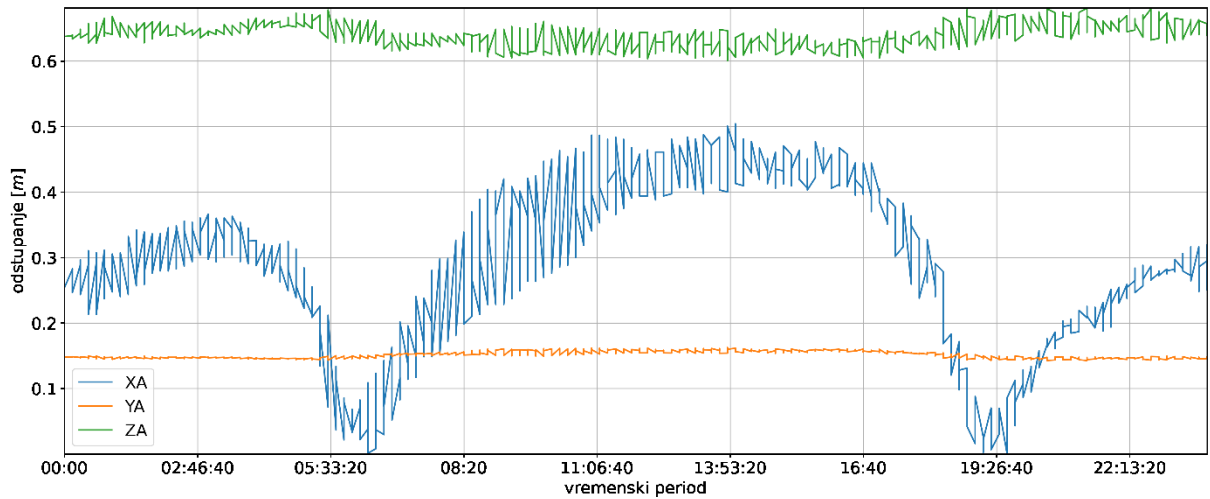
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu 1. – 3. listopada 2014. godine



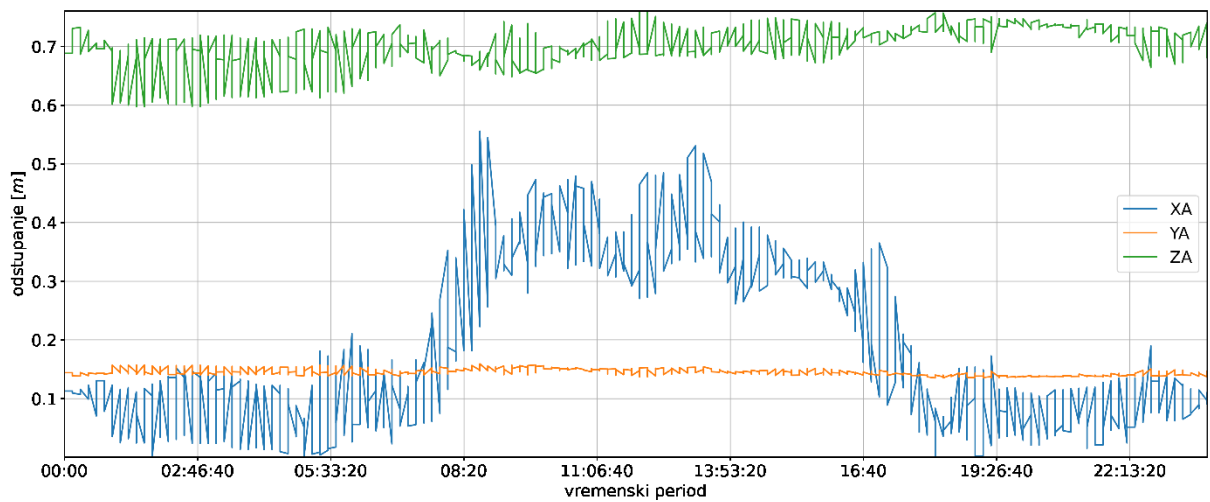
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru 1. – 3. listopada 2014. godine



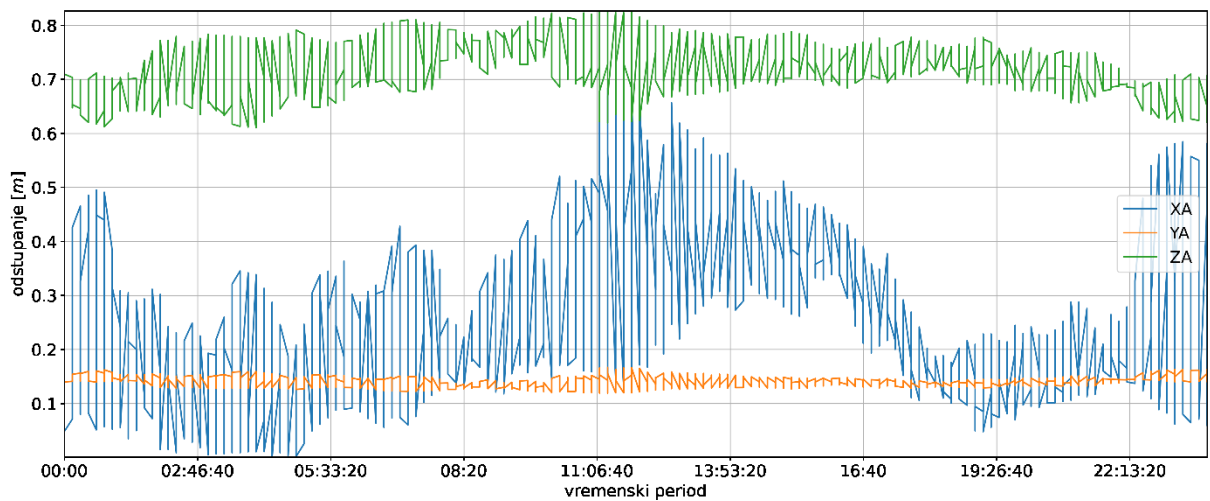
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku 1. – 3. listopada 2014. godine



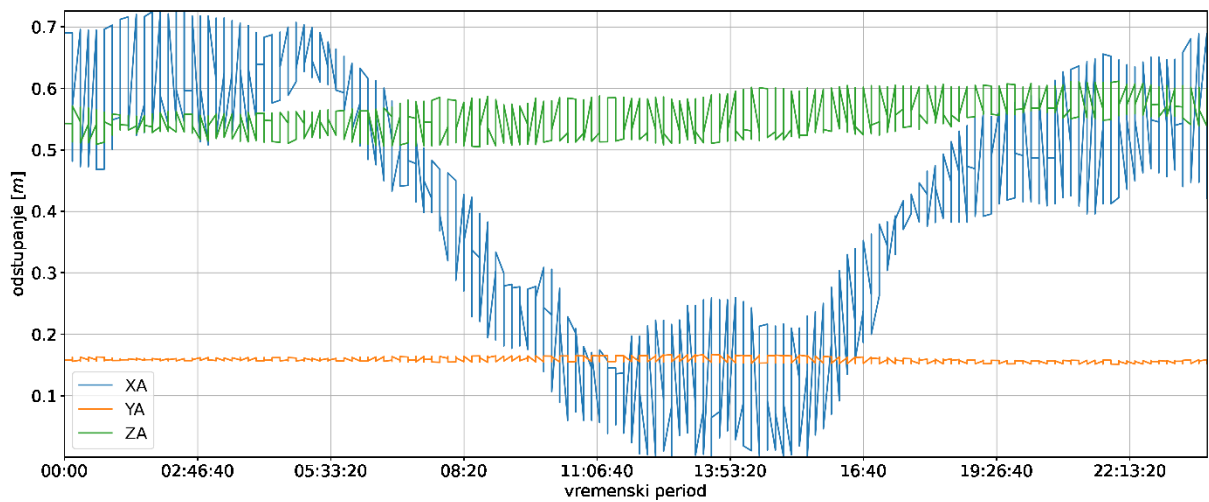
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu 1. – 3. srpnja 2015. godine



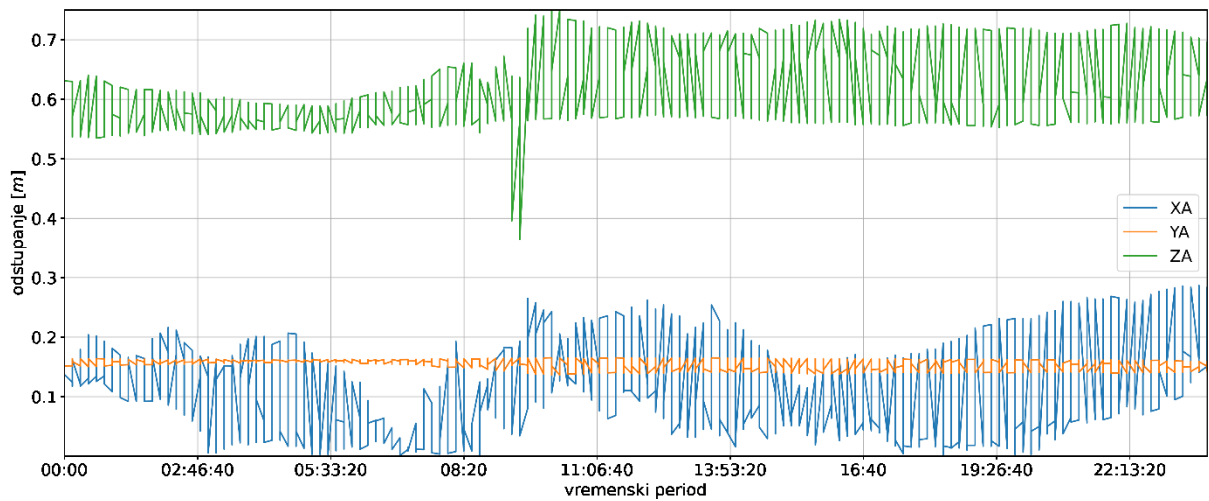
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru 1. – 3. srpnja 2015. godine



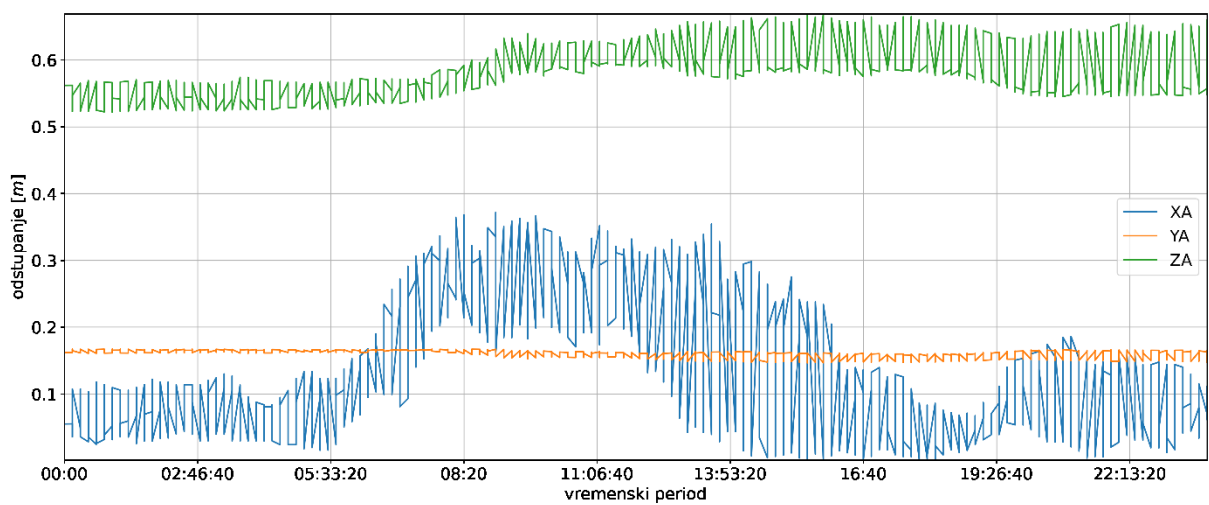
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku 15. – 18. srpnja 2015. godine



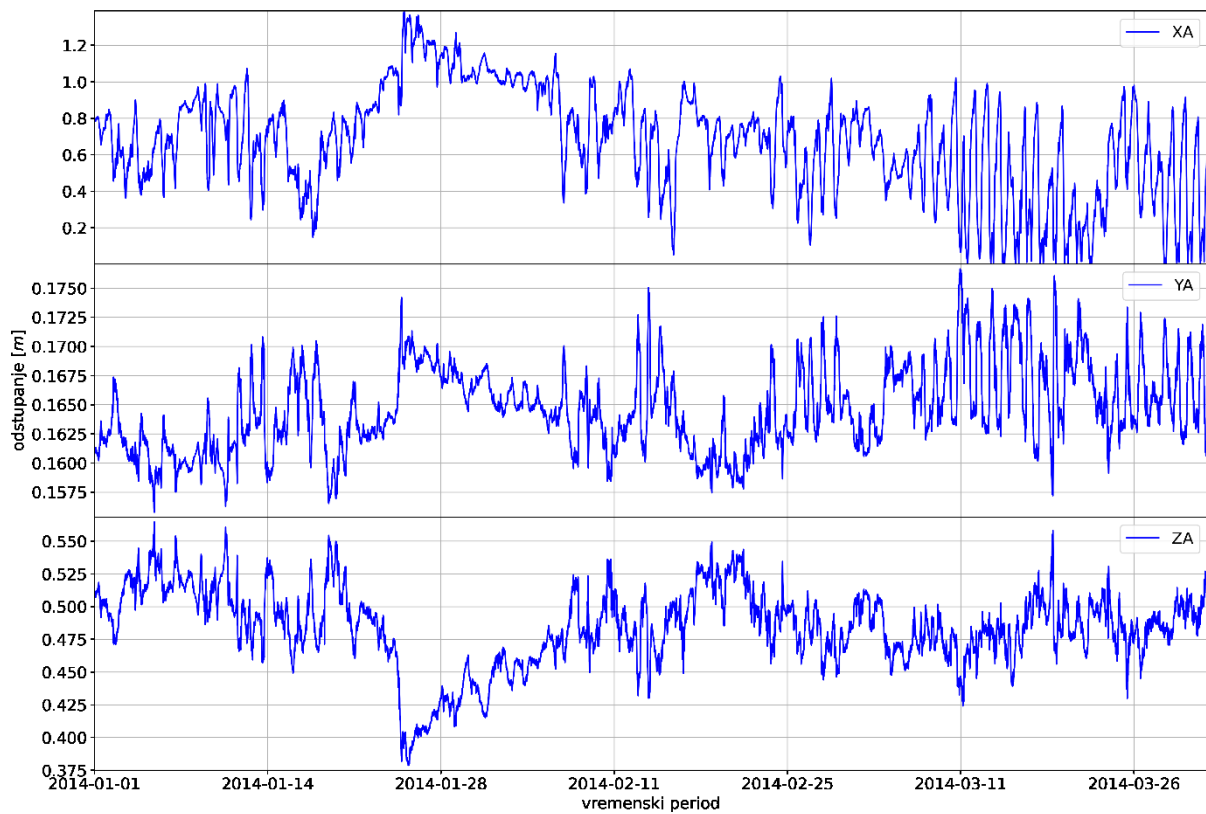
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu 1. – 3. listopada 2015. godine



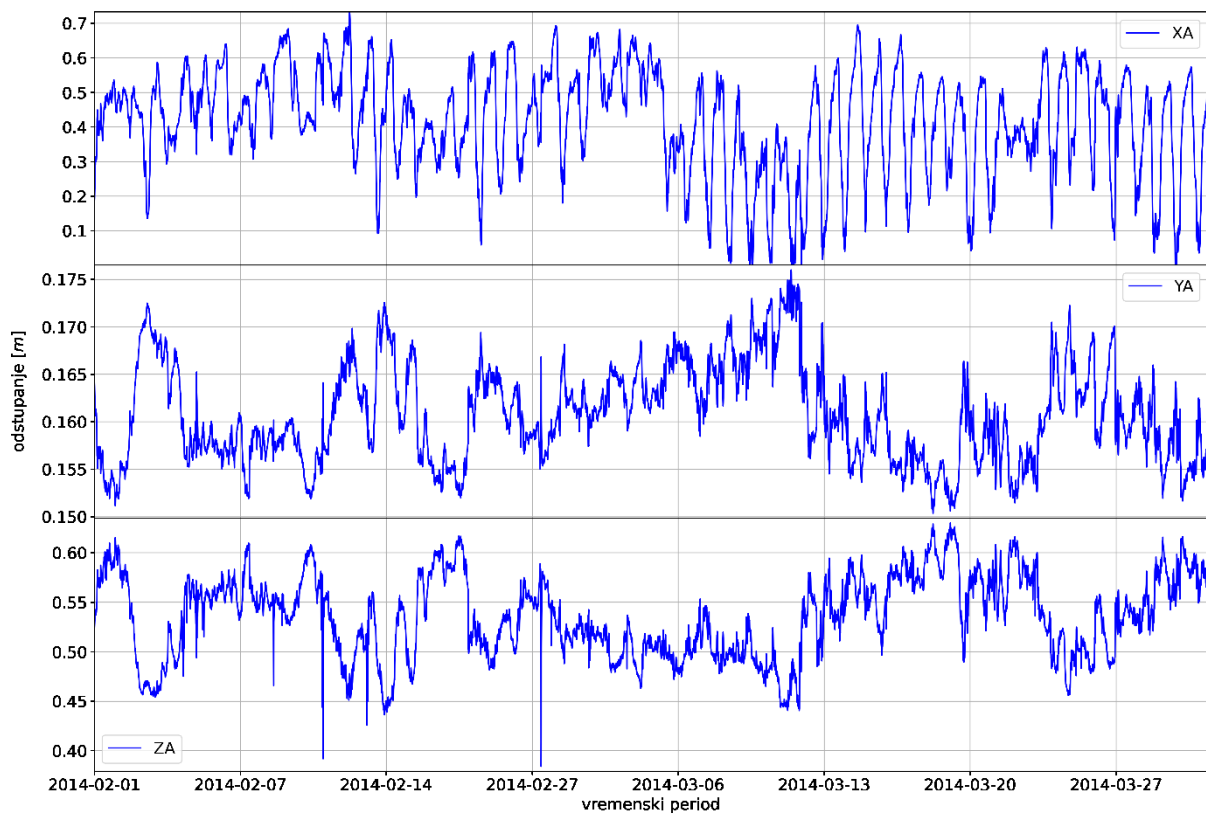
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru 1. – 3. listopada 2015. godine



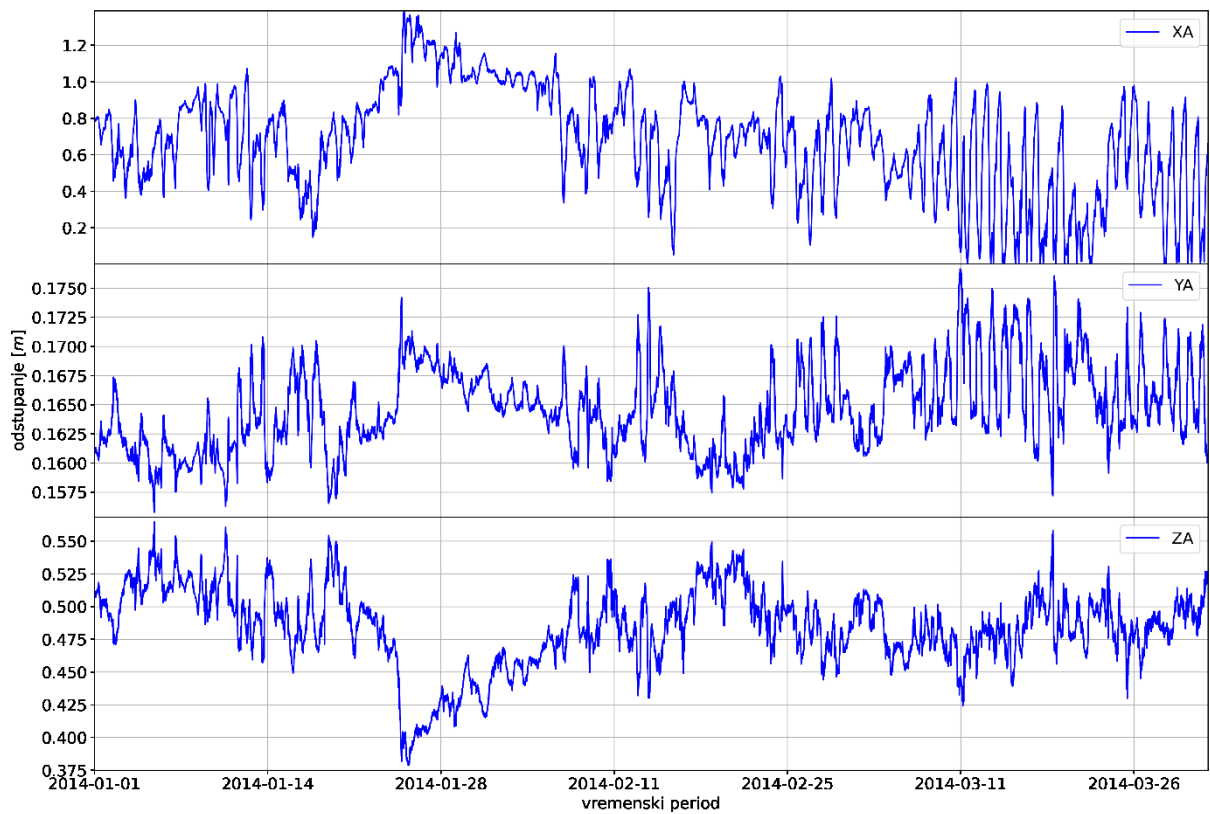
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku 1. – 3. listopada 2015. godine



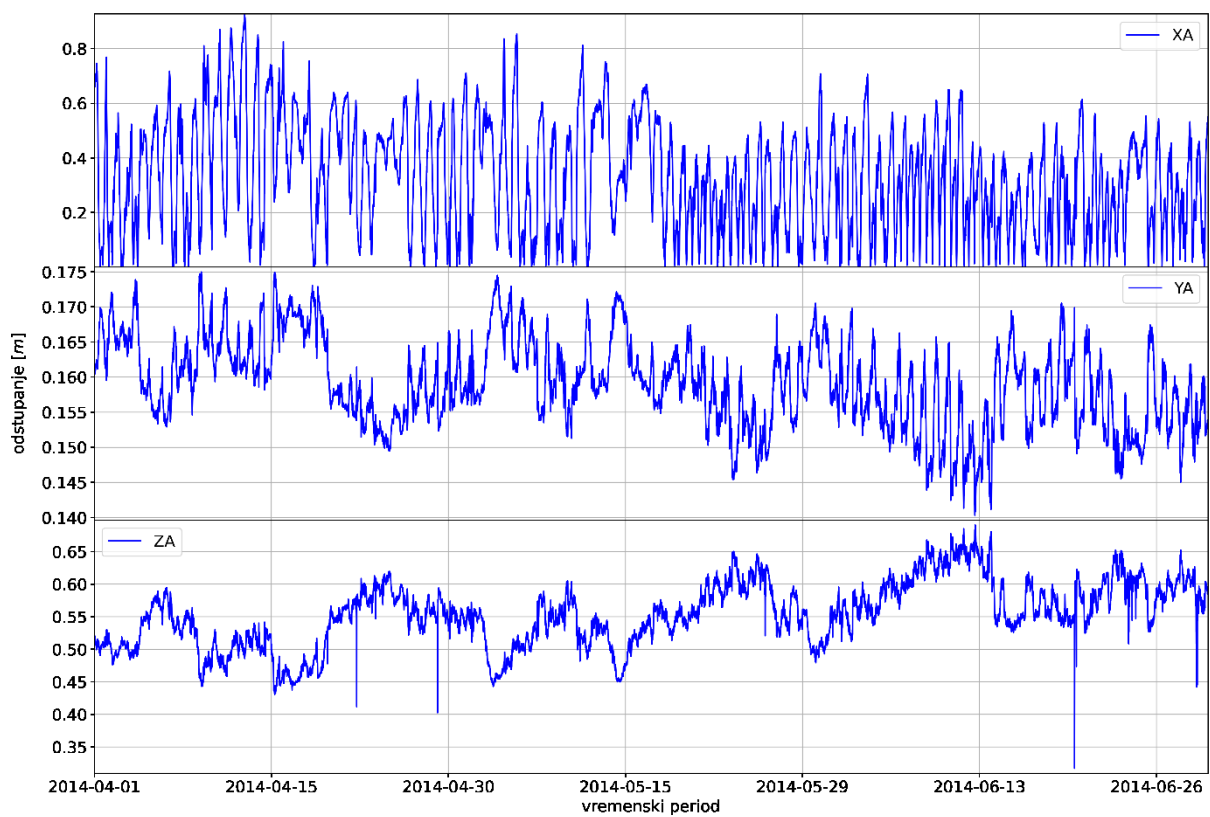
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu siječnja – ožujka 2014. godine



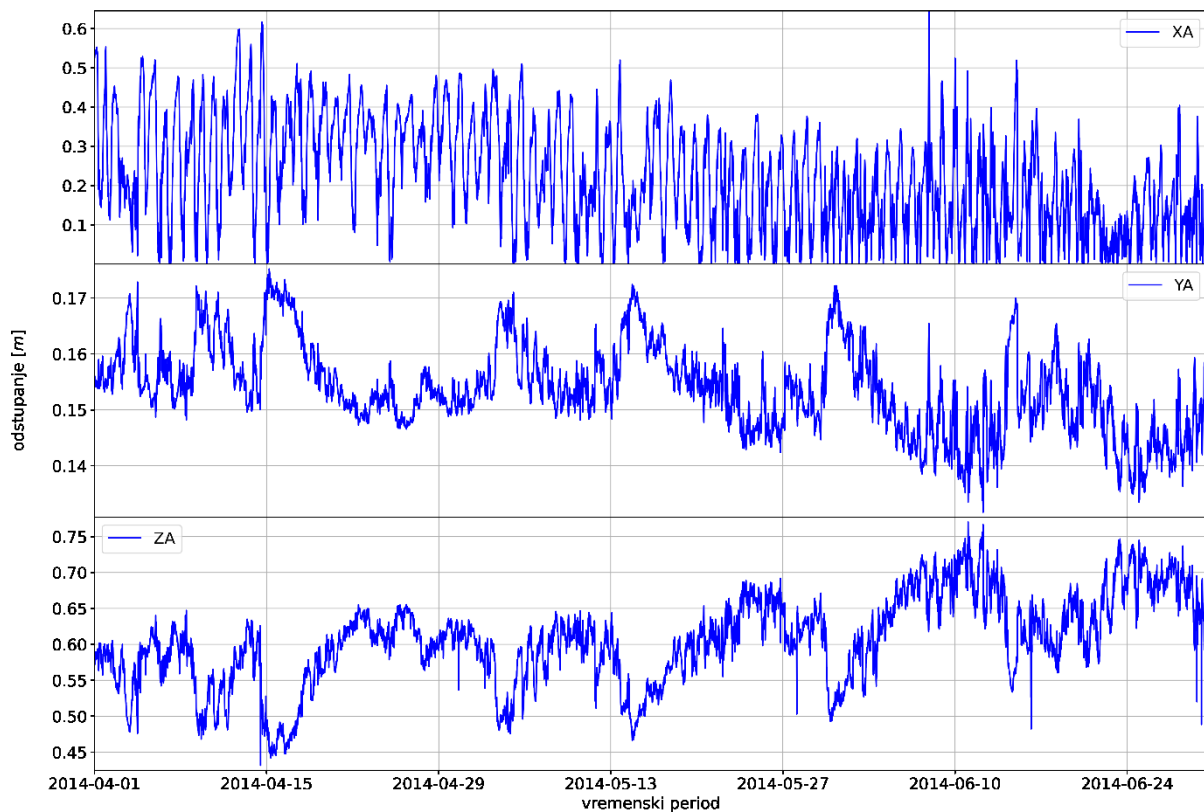
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru veljače – ožujka 2014. godine



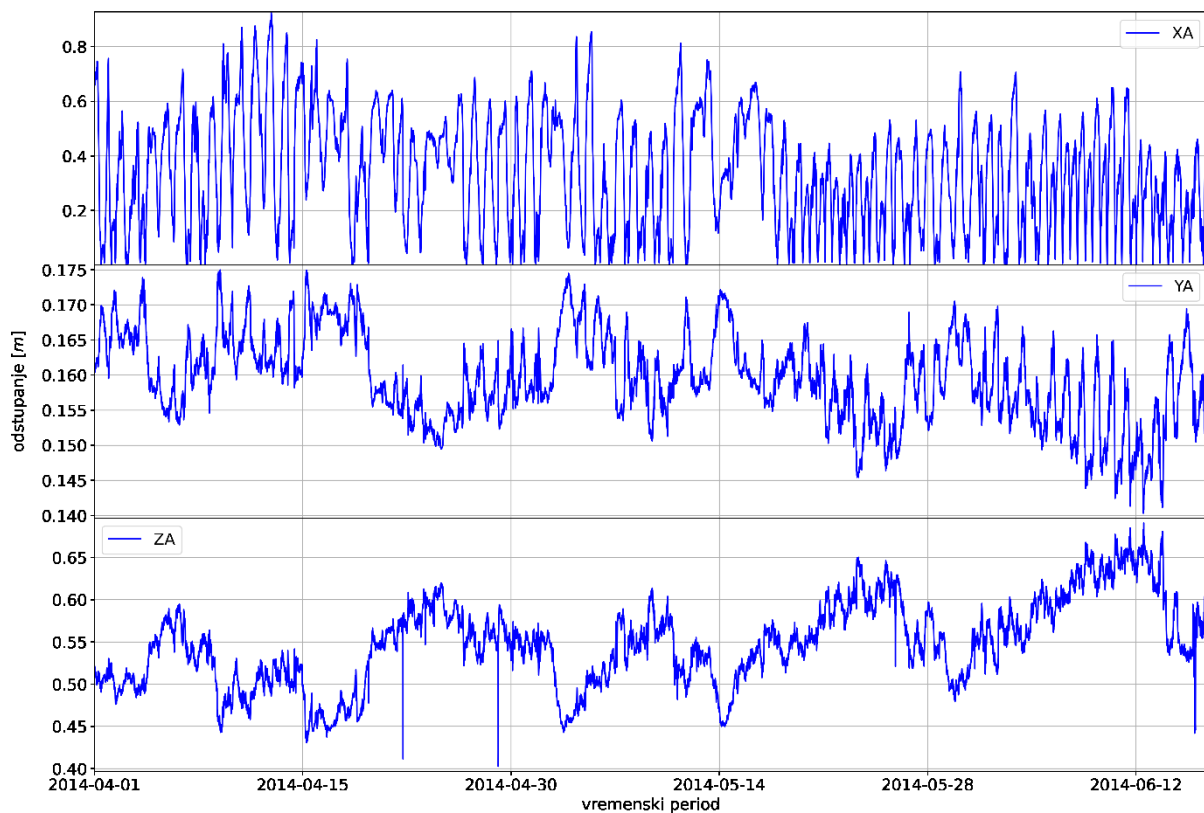
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku siječnja – ožujka 2014. godine



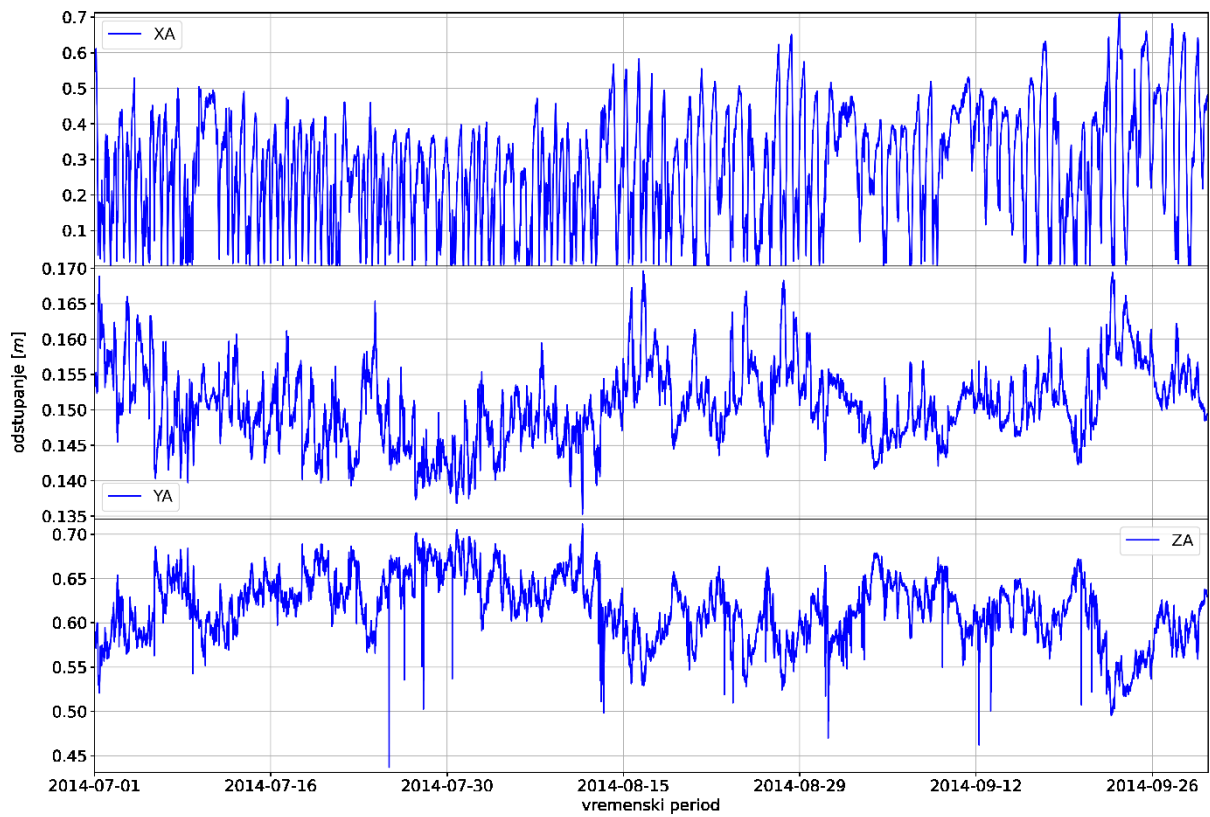
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu travnja – lipnja 2014. godine



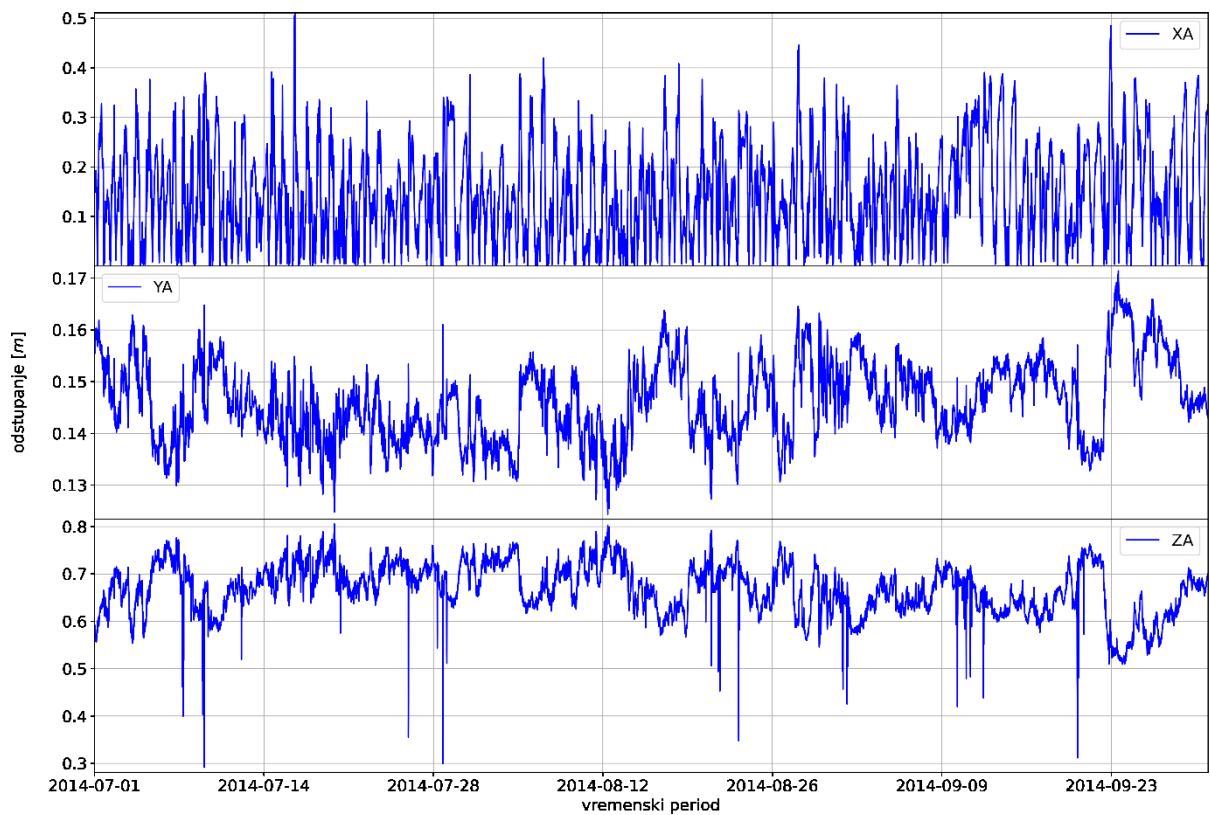
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru travnja – lipnja 2014. godine



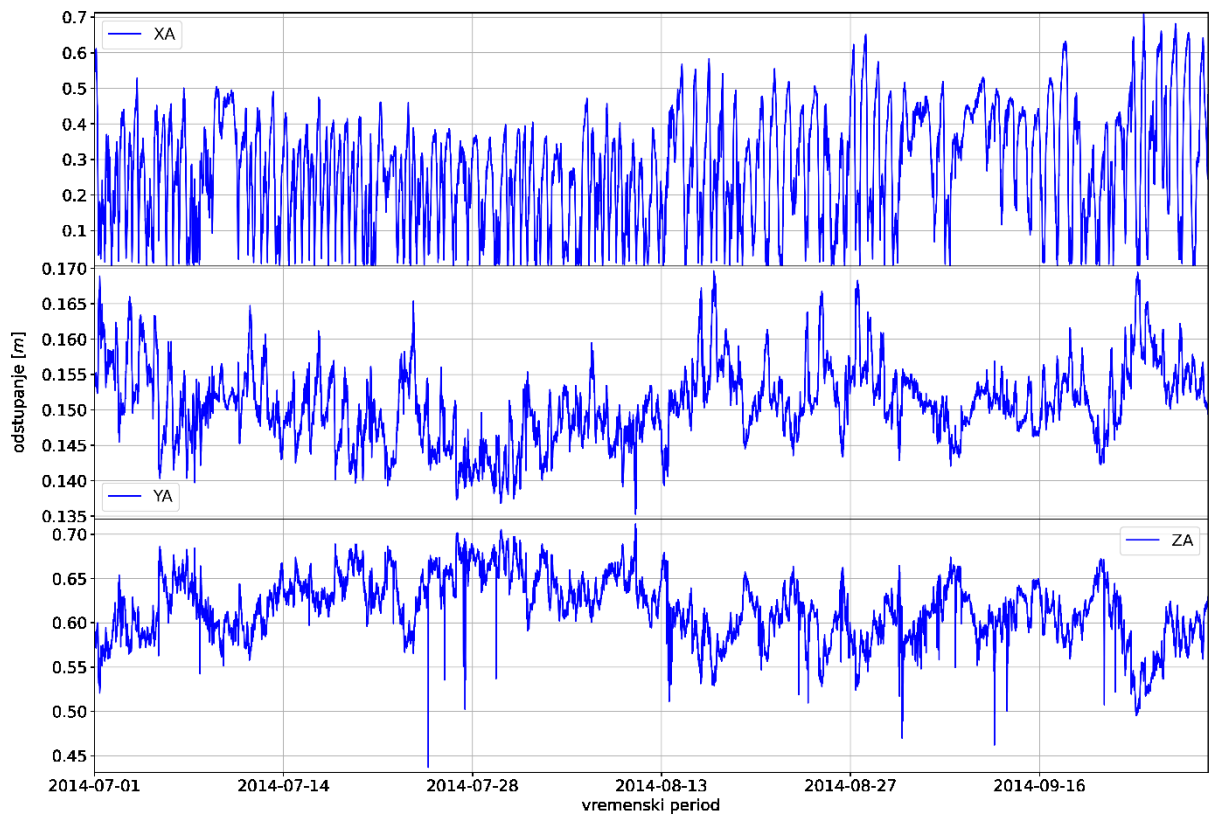
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku travnja – lipnja 2014. godine



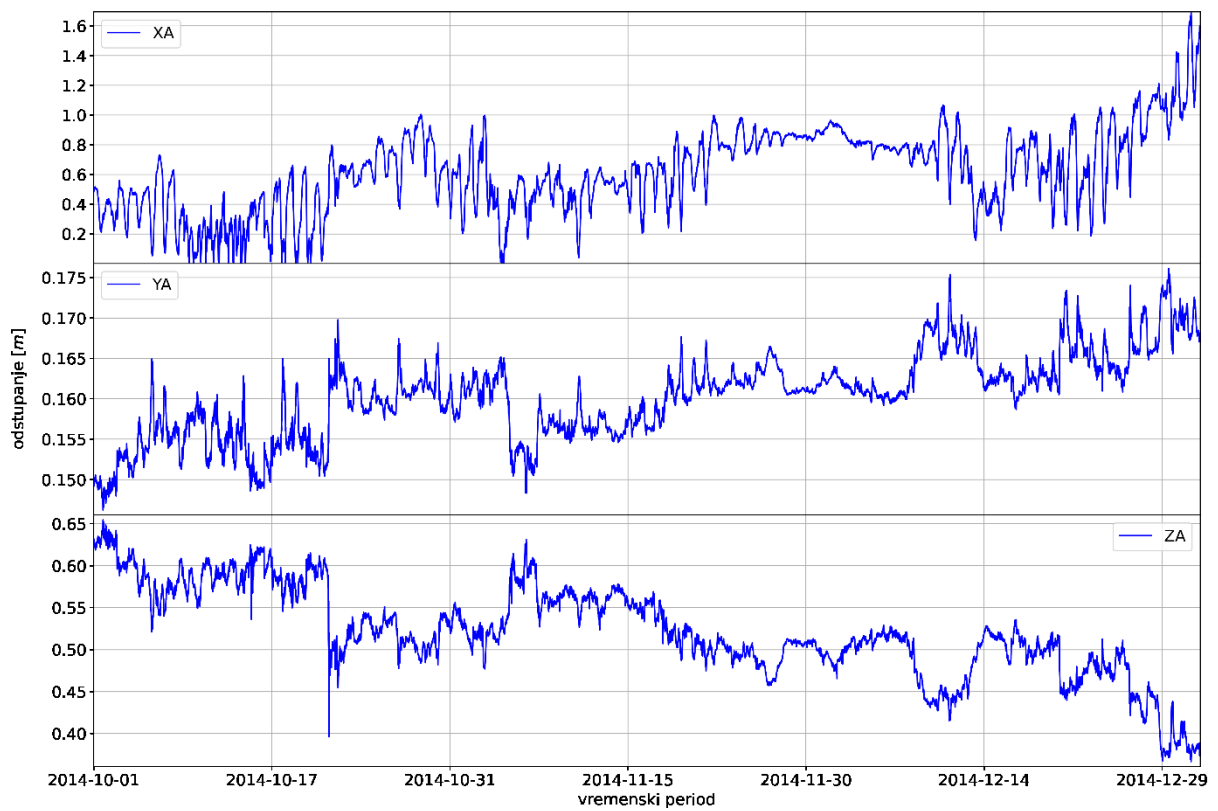
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu srpnja – rujna 2014. godine



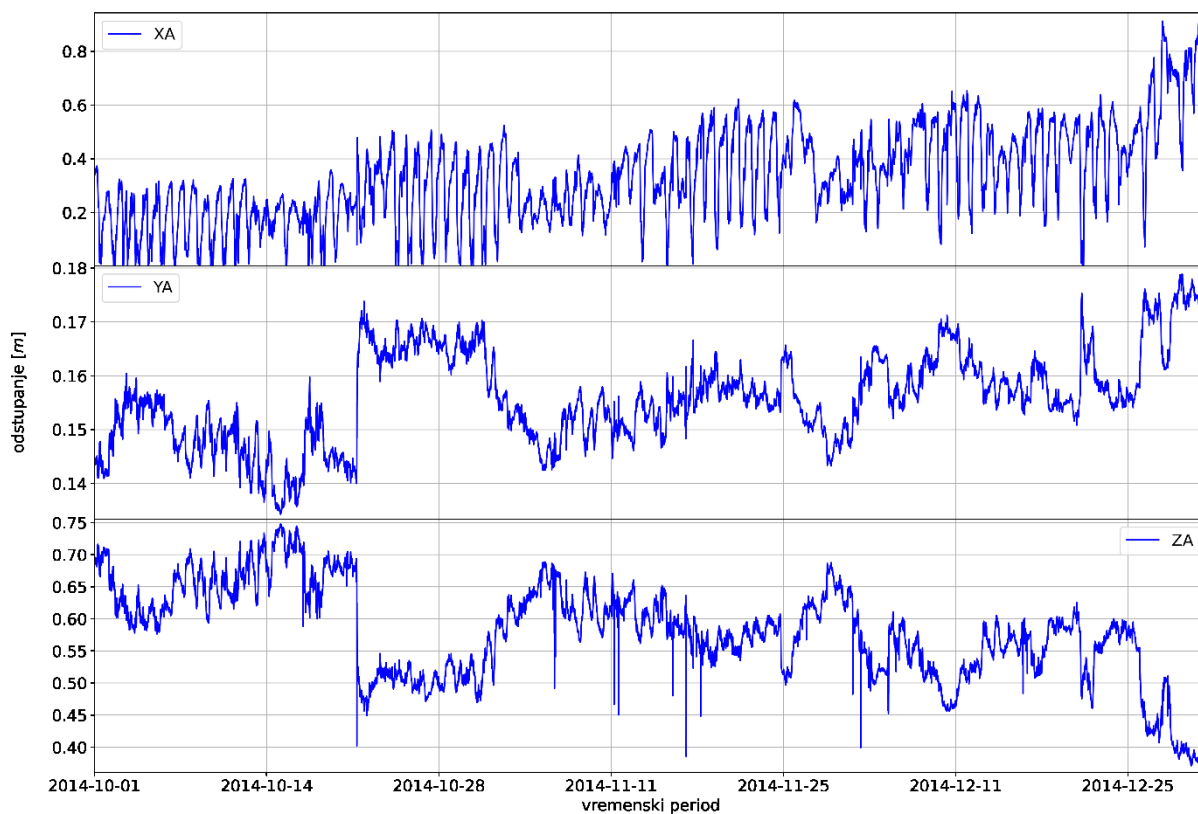
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru srpnja – rujna 2014. godine



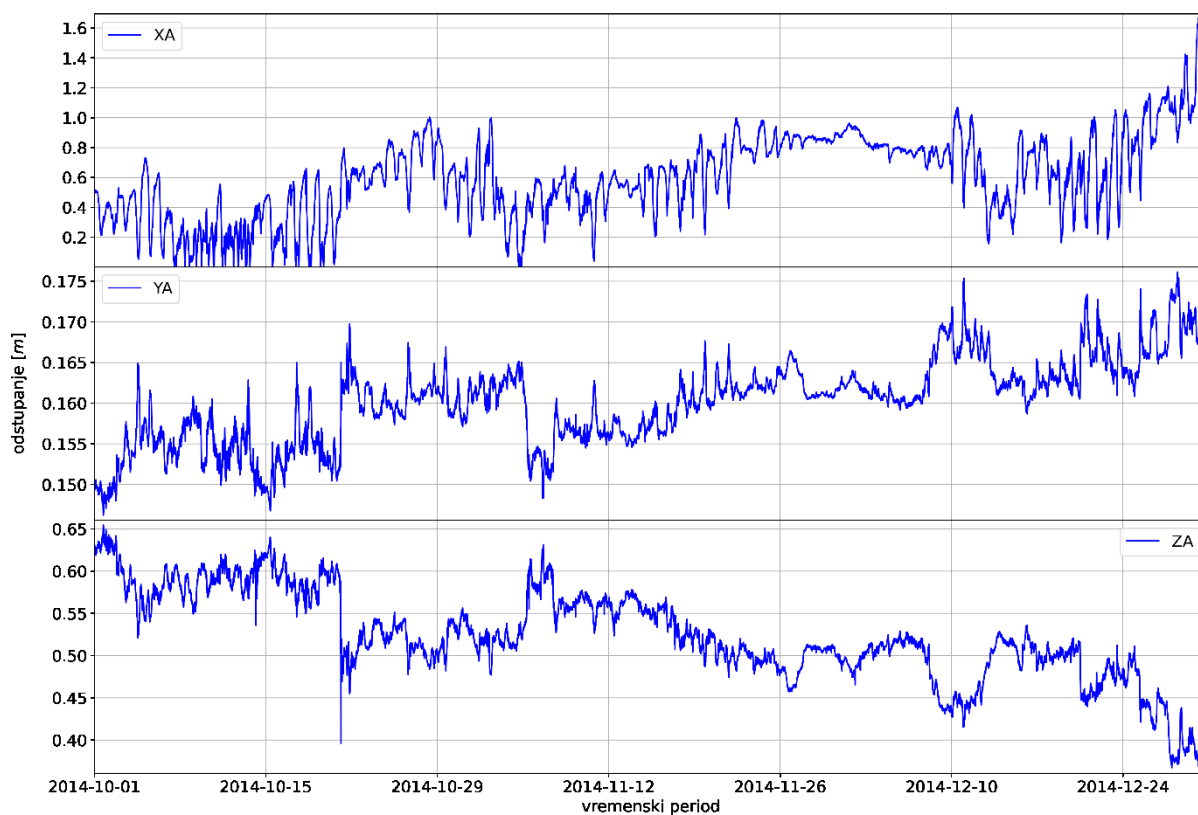
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku srpnja – rujna 2014. godine



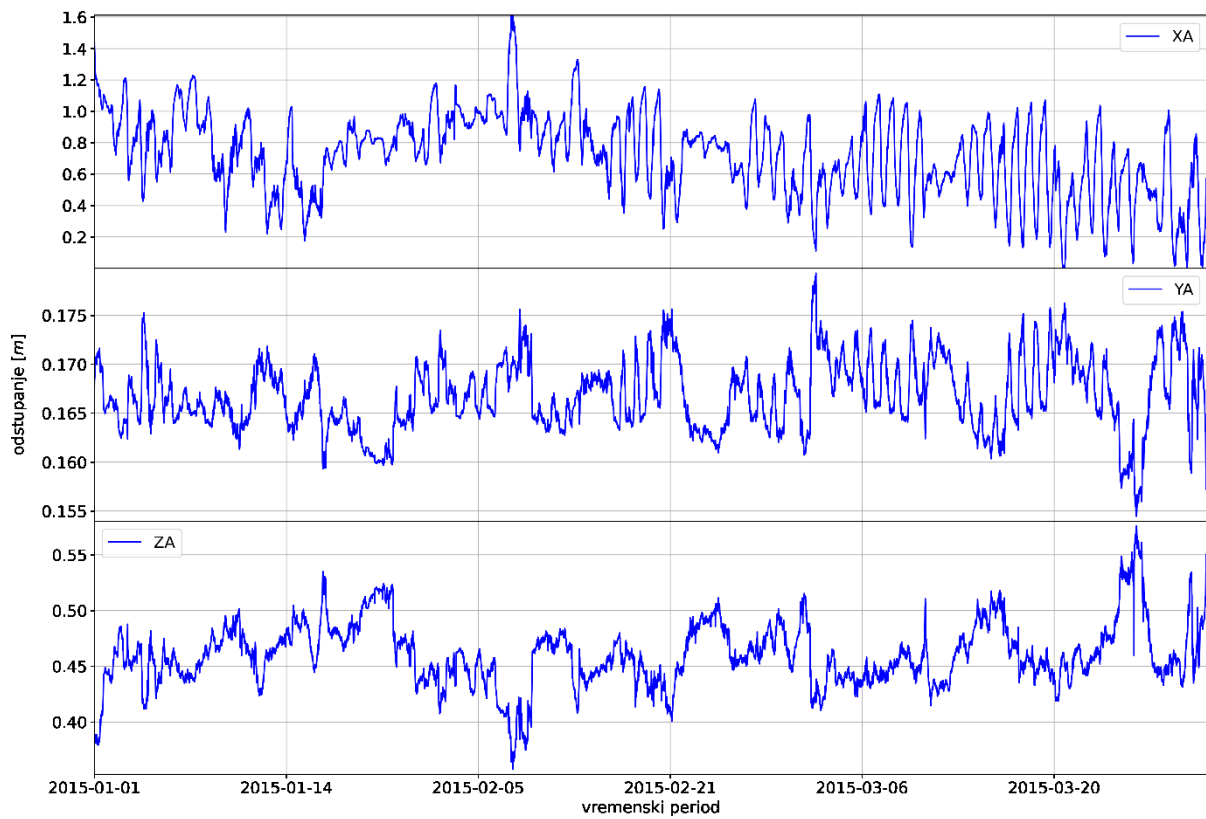
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu listopada – prosinca 2014. godine



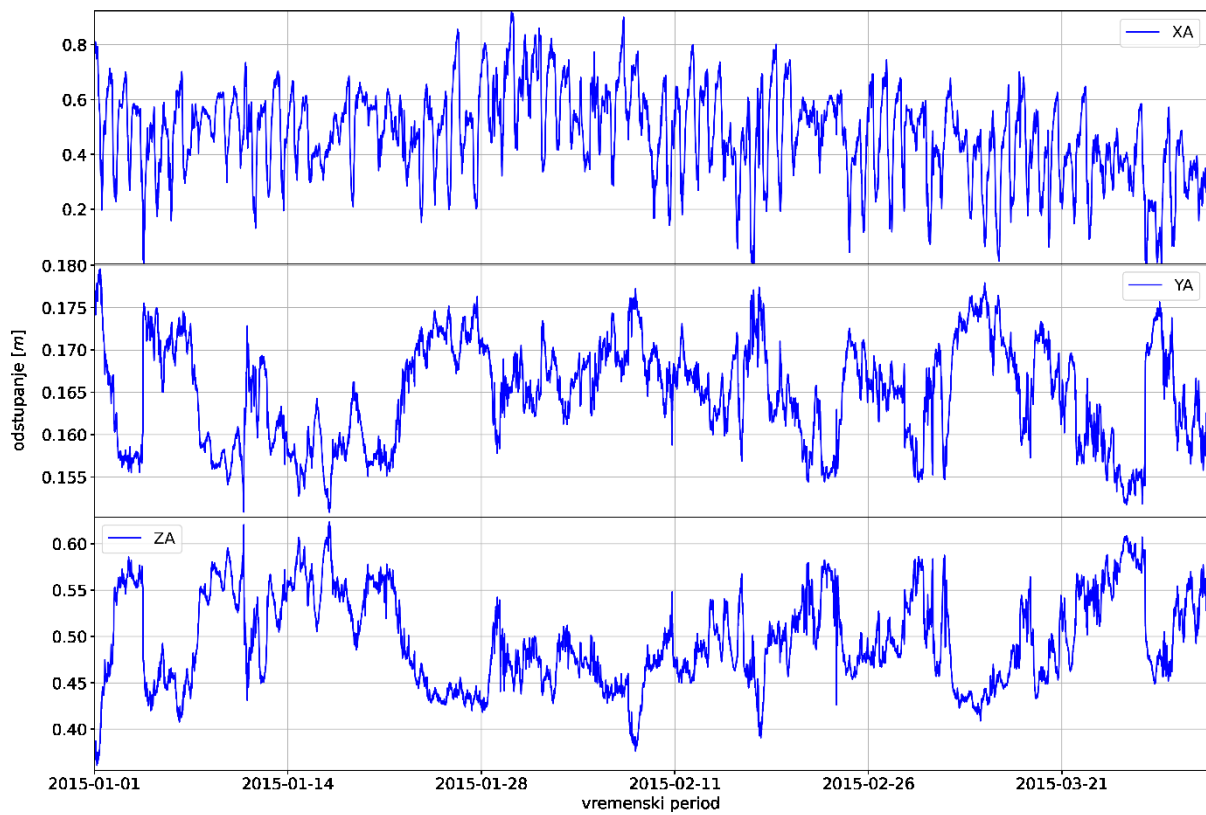
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru listopada – prosinca 2014. godine



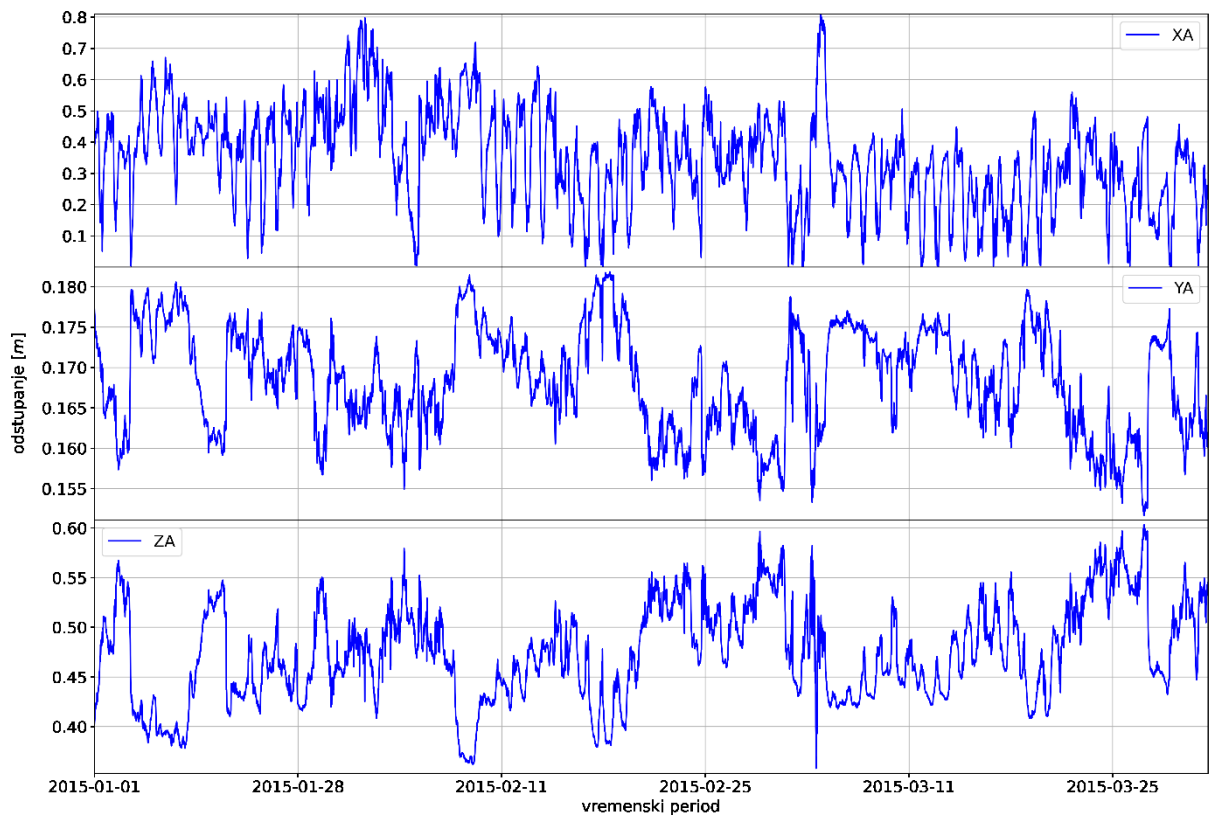
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku listopada – prosinca 2014. godine



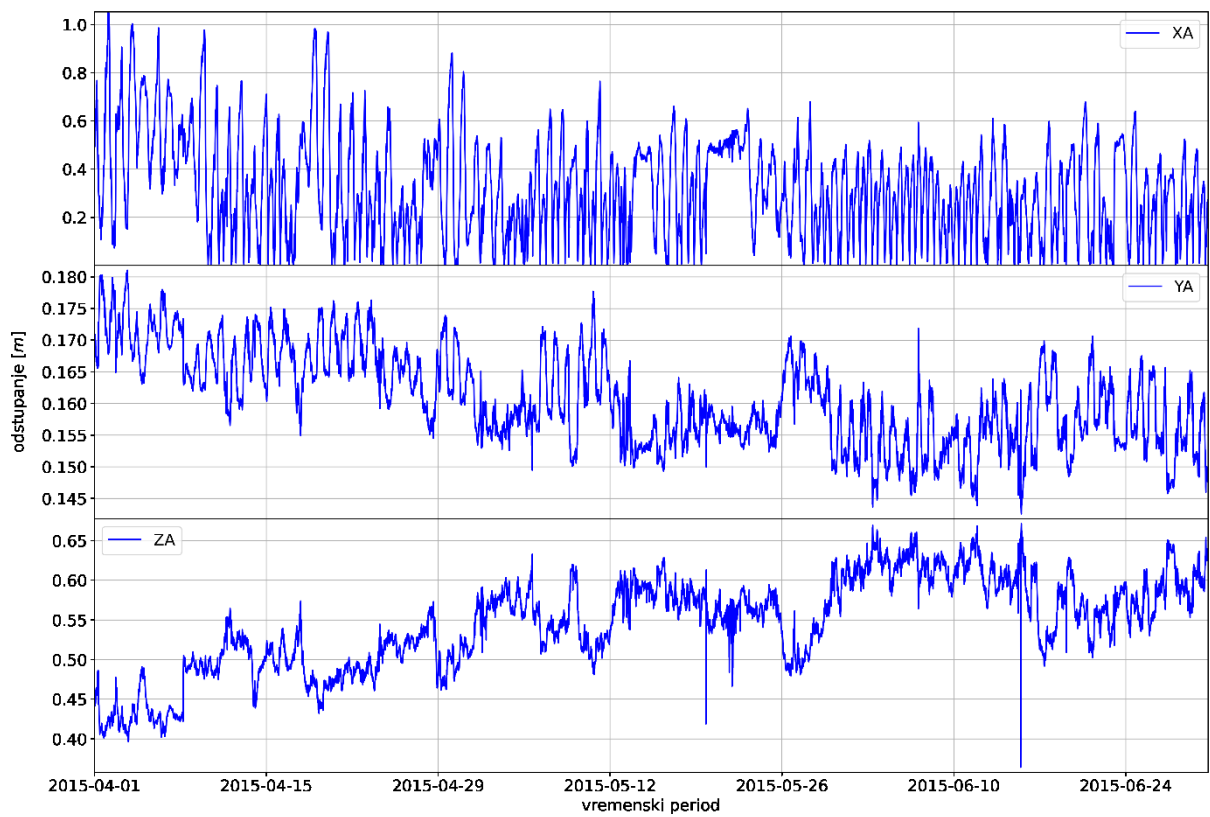
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu siječanja – ožujka 2015. godine



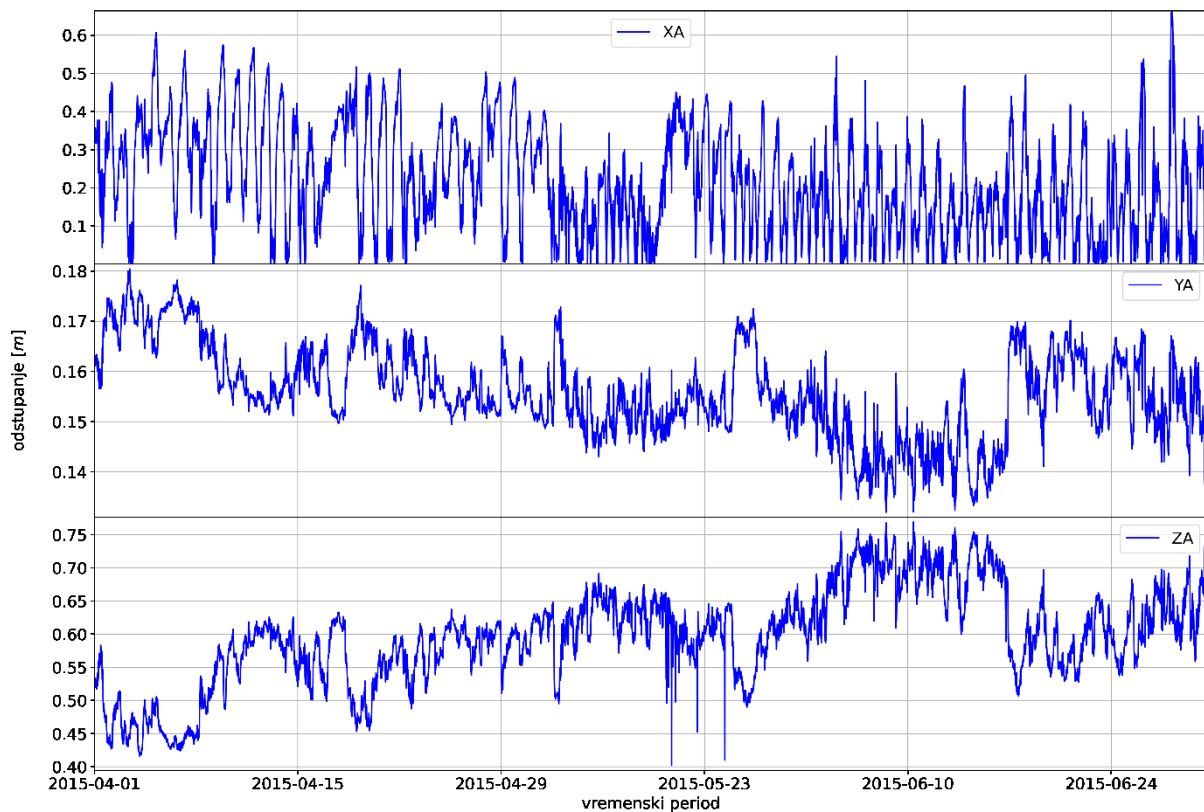
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru siječanja – ožujka 2015. godine



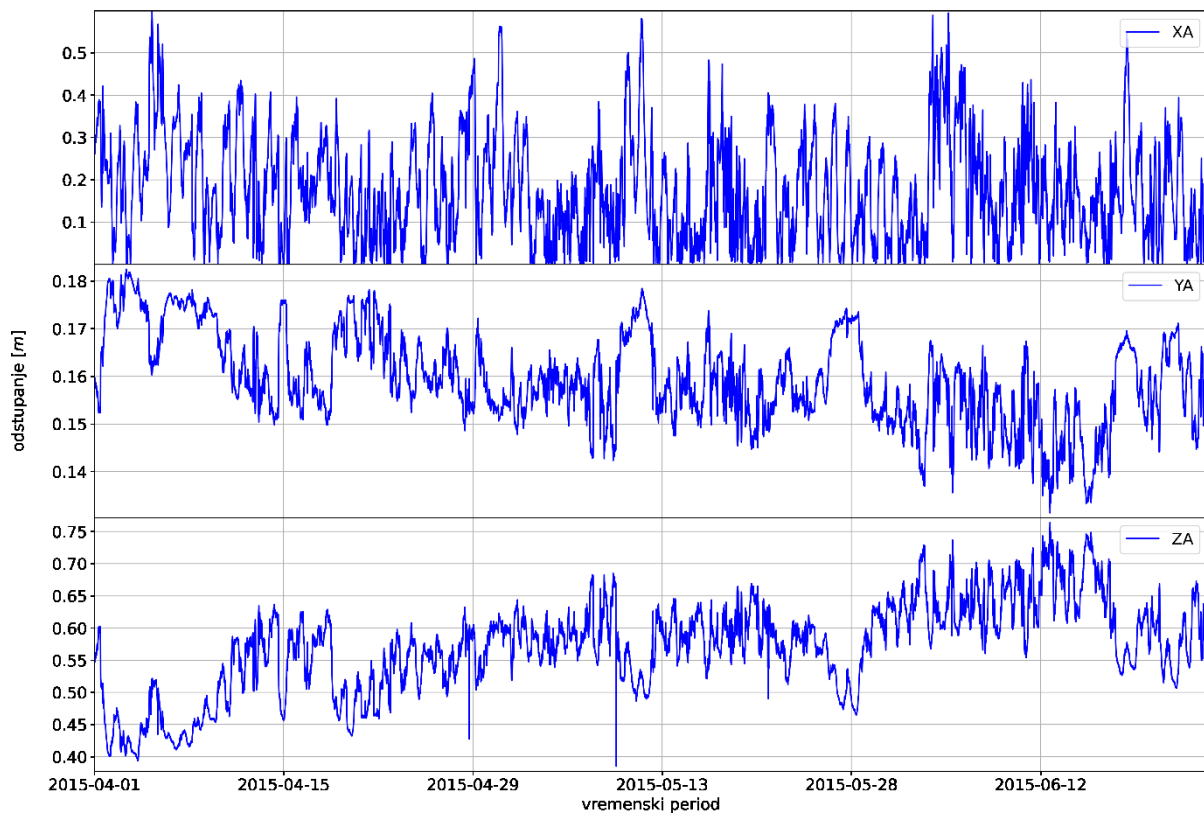
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku siječnja – ožujka 2015. godine



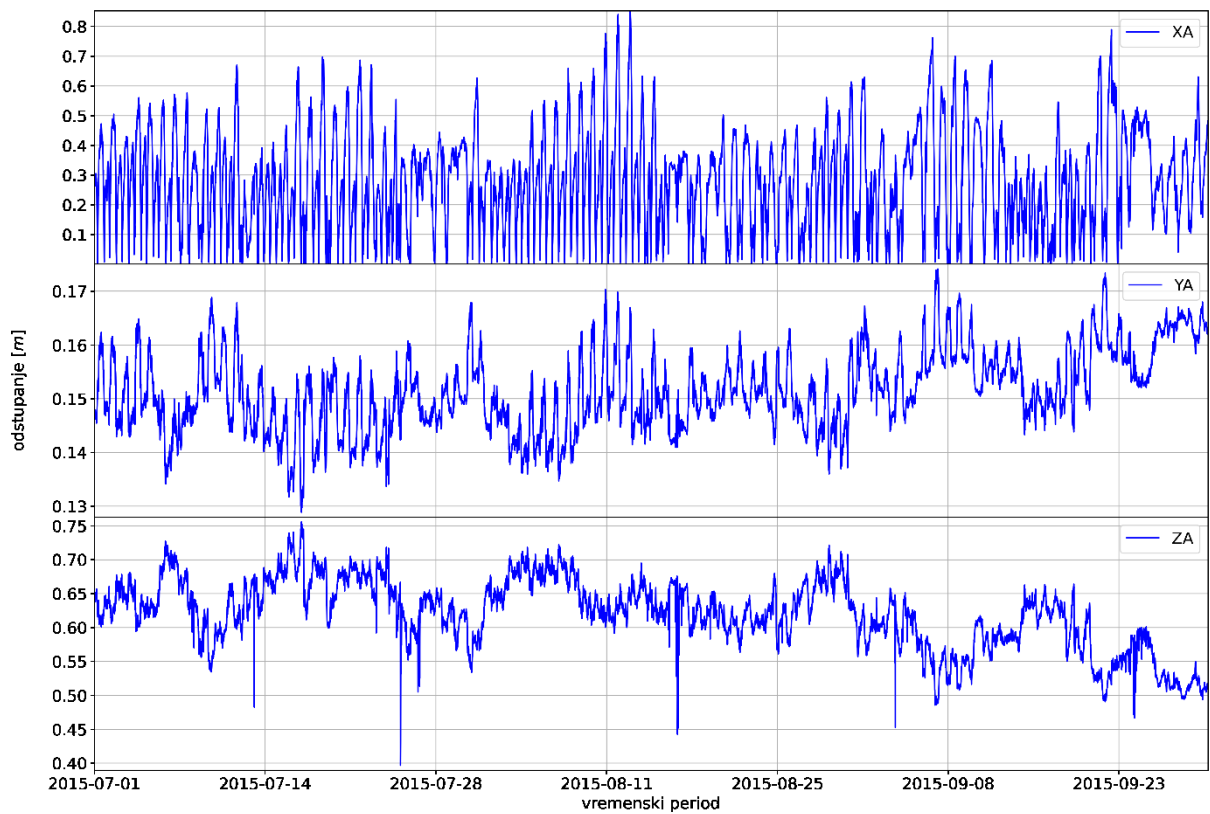
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu travnja – lipnja 2015. godine



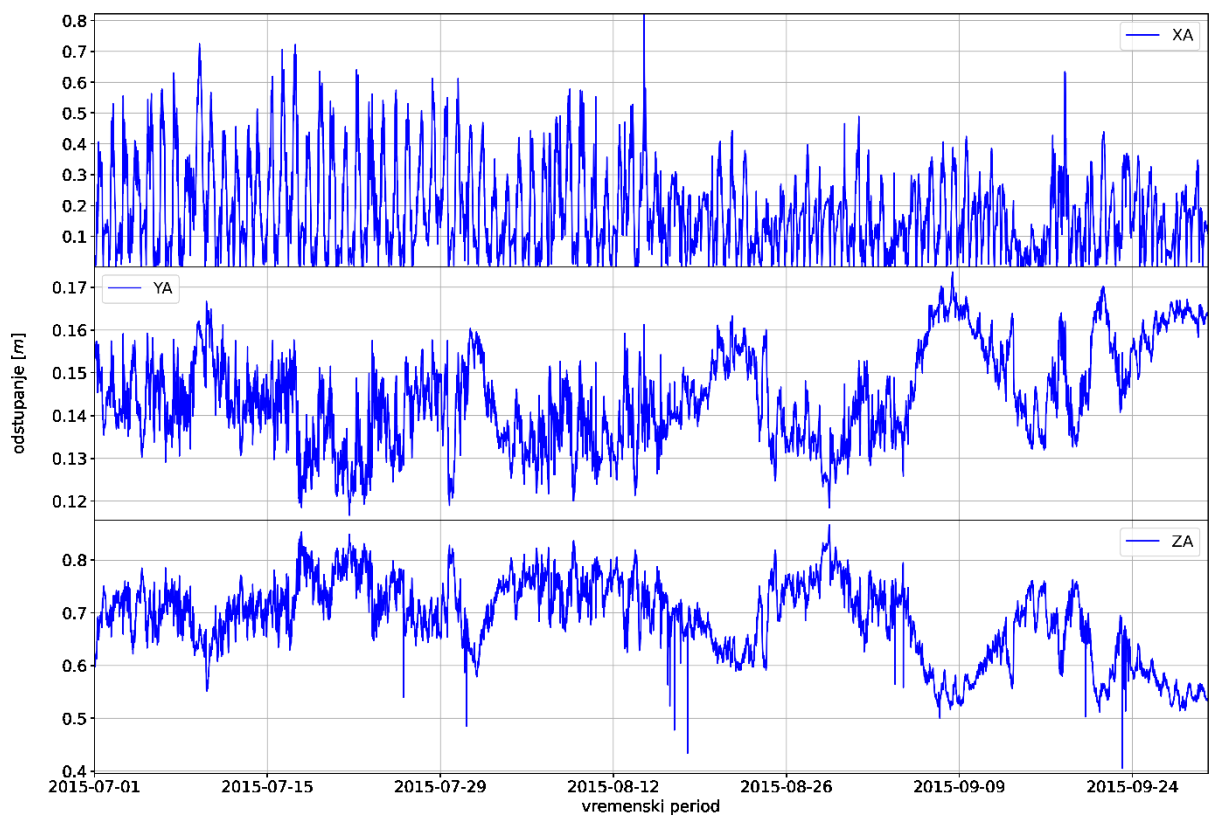
Kretanje apsolutne greške za postaju u Zadru travnja – lipnja 2015. godine



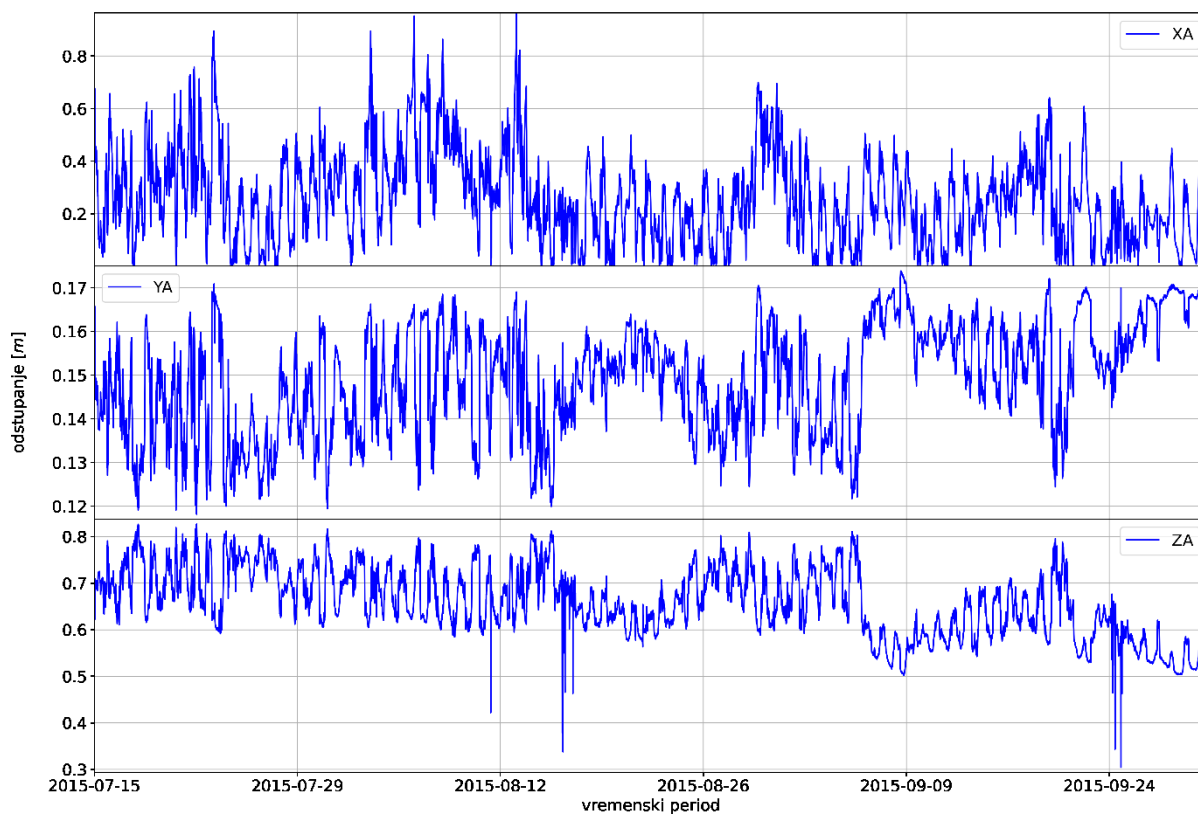
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku travnja – lipnja 2015. godine



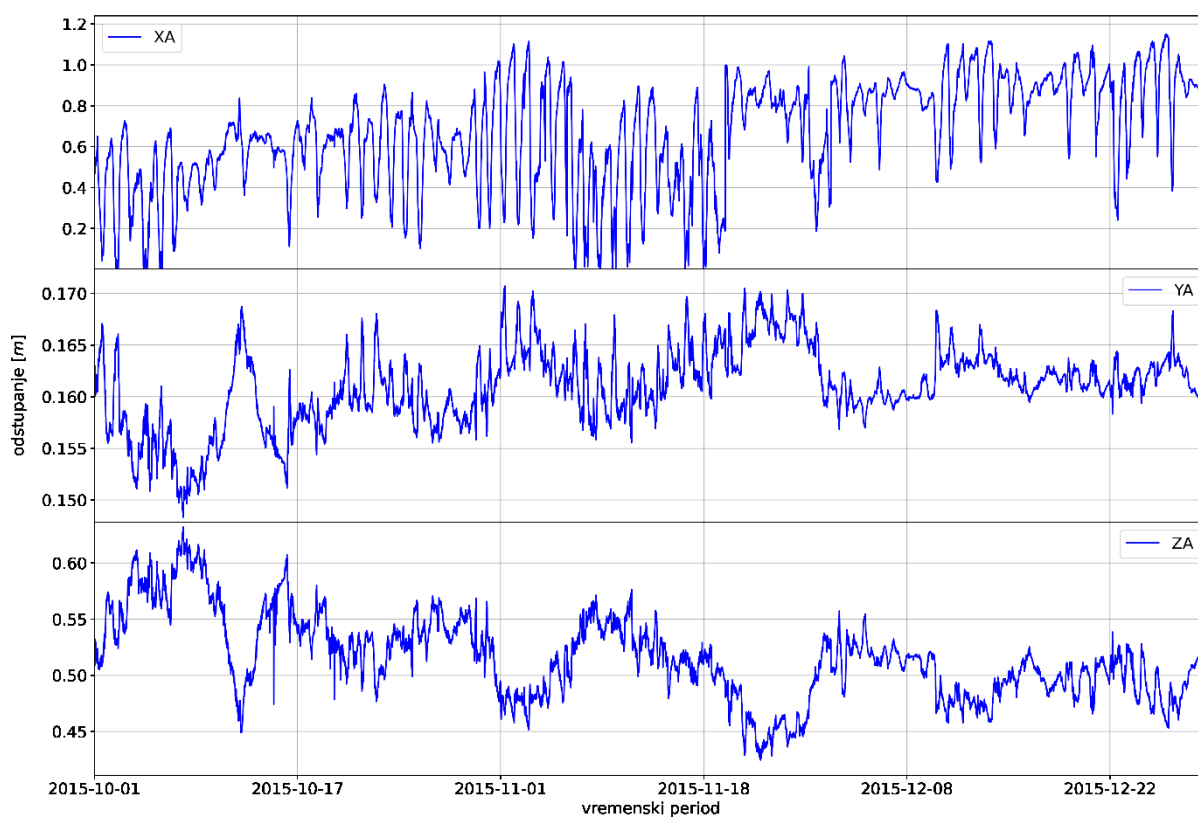
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu srpanja – rujna 2015. godine



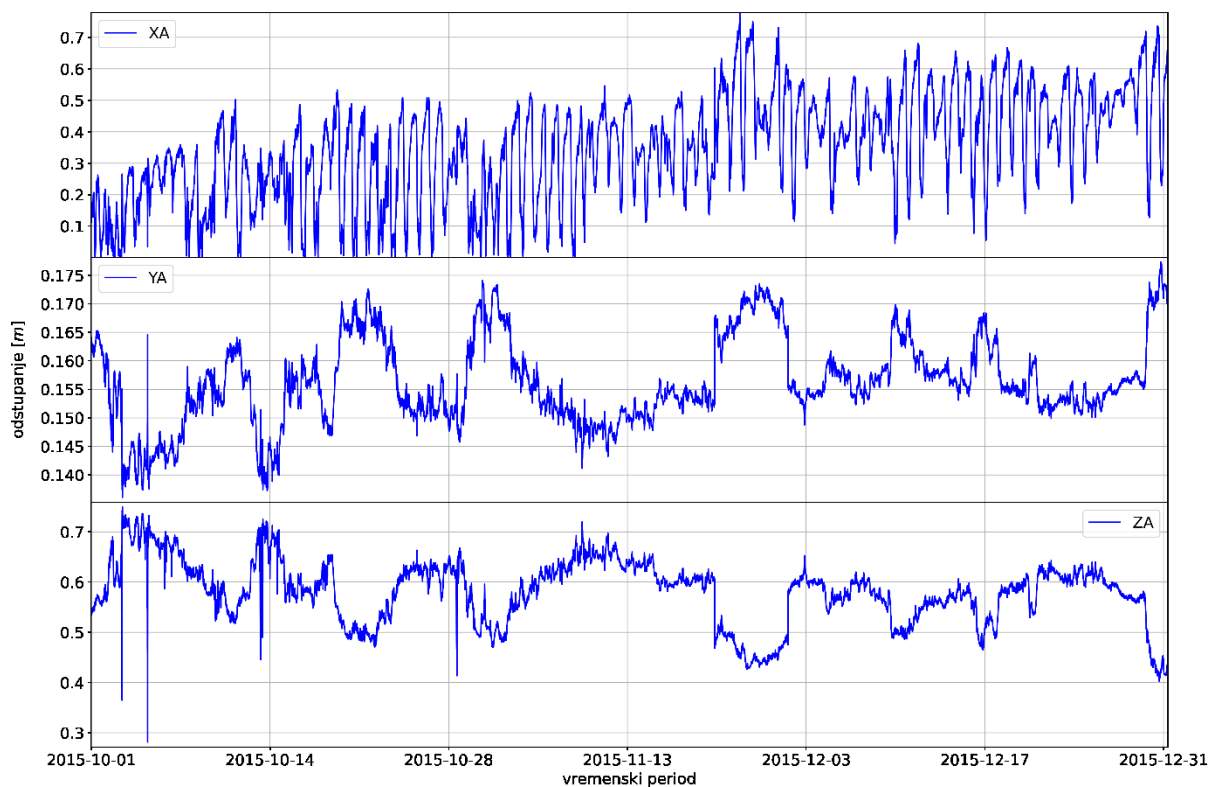
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru srpanja – rujna 2015. godine



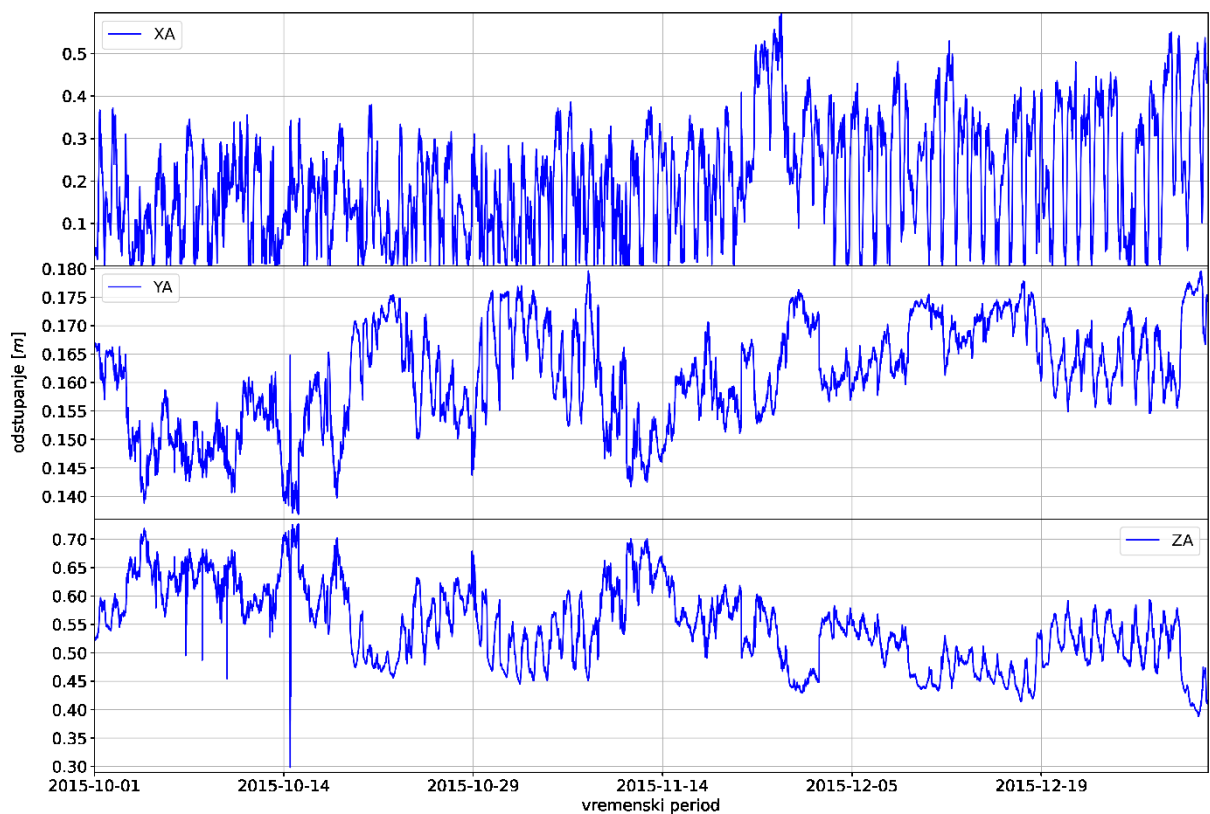
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku srpanja – rujna 2015. godine



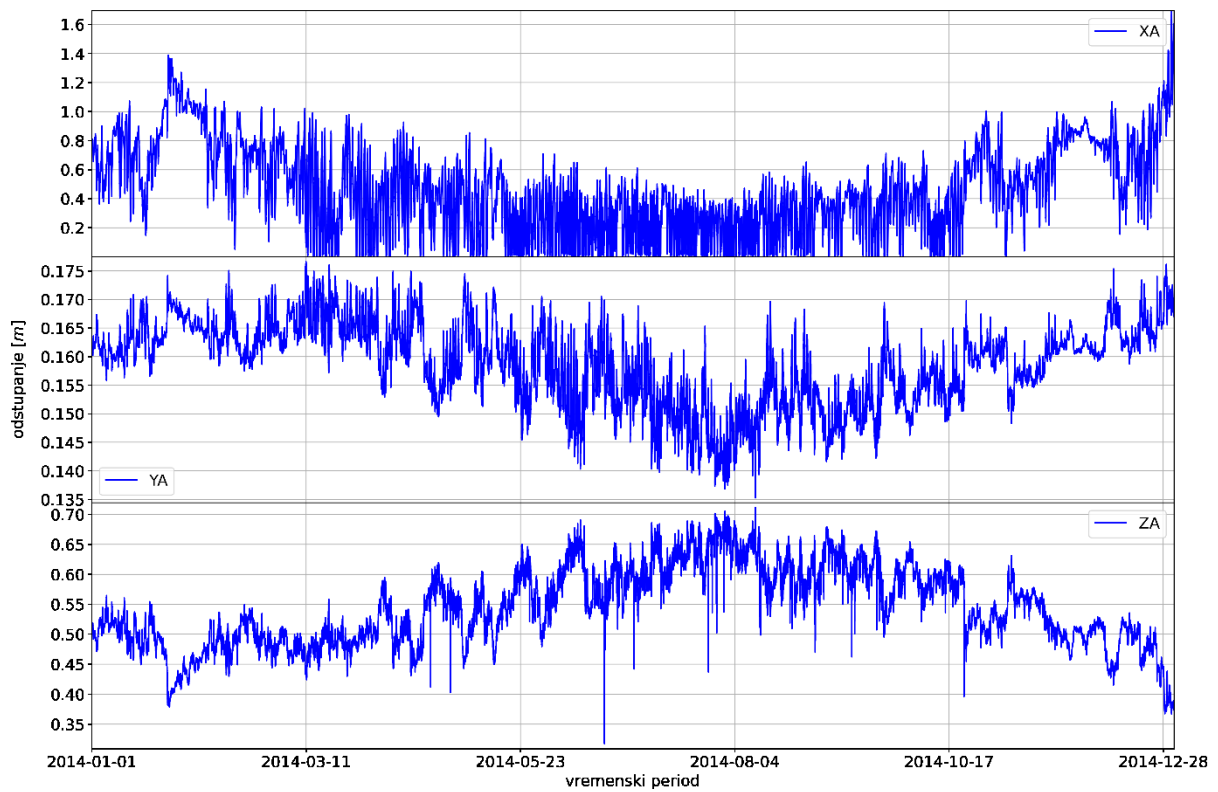
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Čakovcu listopada – prosinca 2015. godine



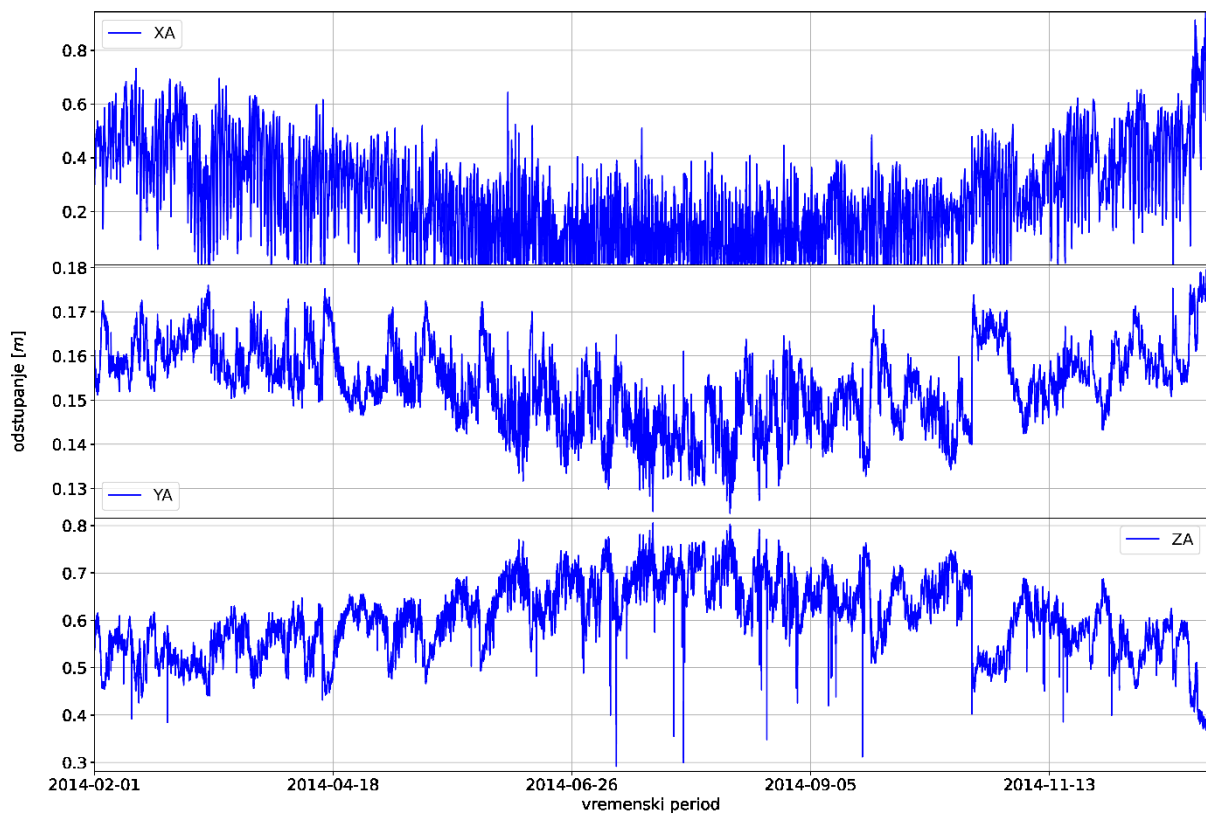
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Zadru listopada – prosinca 2015. godine



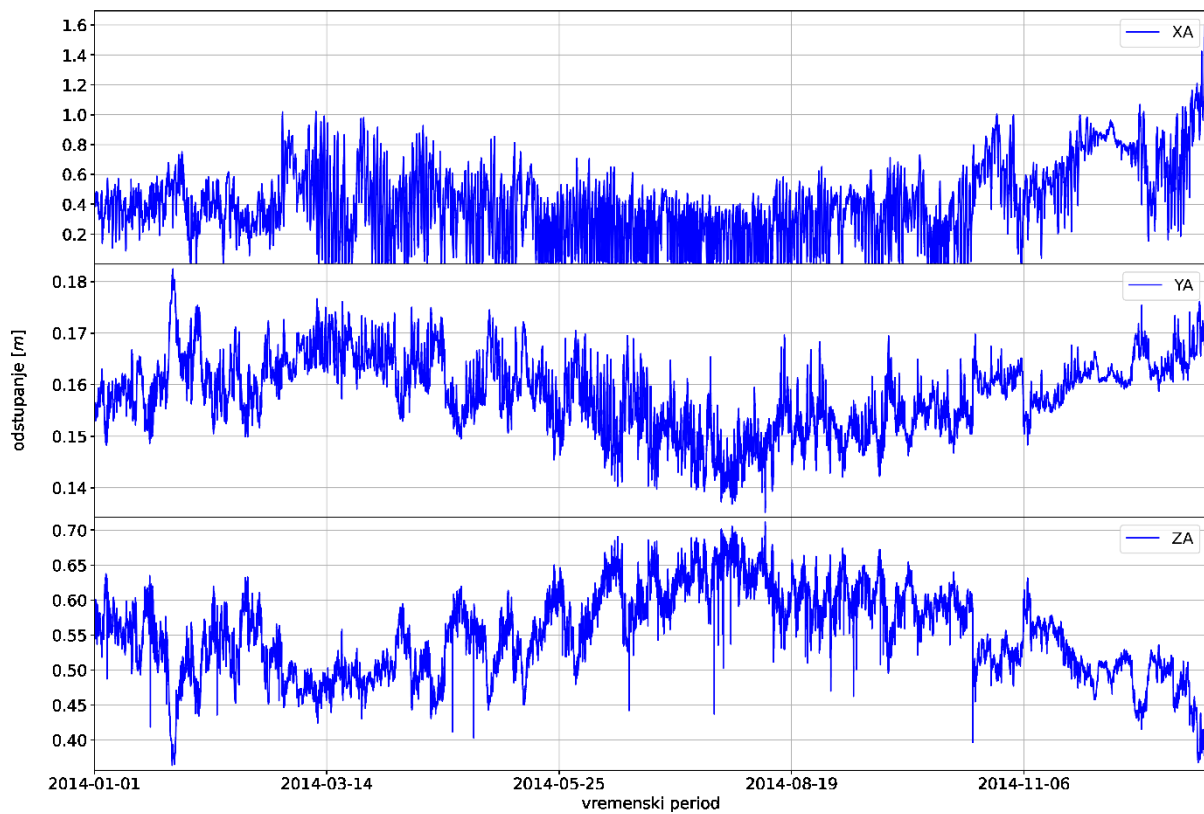
Kretanje razlika apsolutnih odstupanja za postaju u Dubrovniku listopada – prosinca 2015. godine



Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svom osima za postaju u Čakovcu u 2014. godini



Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svom osima za postaju u Zadru u 2014. godini



Kretanje razlika apsolutnih odstupanja po svom osima za postaju u Dubrovniku u 2014. godini

E) Python programski kôd upotrijebljen za obradu ulaznih podataka s ciljem stvaranja ulazne matrice nužne za razvoj predloženog modela

```
!pip install pandas
```

```
import pandas as pd
import glob
import os
```

```

Gradovi=['Dubrovnik','Zadar','Cakovec']
Xs=[4465932.814, 4425737.1640, 4227250.763]
Ys=[1460581.653, 1204734.505, 1247280.631]
Zs=[4299308.581, 4417173.487, 4595193.320]

extension='pos'
df=pd.DataFrame()
year='19'
os.chdir(r'G:\podaci\pozicije 2019. ĆK_ZD_DU')

for grad in Gradovi:
    svi_fileovi_grada=[i for i in glob.glob('CRD_{}*{}'.format(grad, year))]
    meteo=pd.concat([pd.read_excel(f, skiprows=2) for f in svi_fileovi_grada])

    meteo['Time'] = pd.to_datetime(meteo['UTC']).dt.time
    meteo['datum'] = pd.to_datetime(meteo['UTC']).dt.date
    meteo['Date'] = pd.to_datetime(meteo.Date.astype(str)+' '+meteo.Time.astype(str))
    meteo.drop('UTC', inplace=True, axis=1)
    meteo.drop('datum', inplace=True, axis=1)
    meteo=meteo.set_index('Date')
    parse_dates=['Date']
    meteo.sort_index(inplace=True)

    all_filenames=[i for i in glob.glob('{}*{}'.format(grad, extension))]
    pos=pd.concat([pd.read_csv(f,skiprows=13, delim_whitespace=True,
        parse_dates=[[ '%', 'UTC' ]]) for f in all_filenames])
    pos=pos.set_index('%_UTC')
    pos=pos[['x-ecef(m)', 'y-ecef(m)', 'z-ecef(m)', 'Q', 'ns']]
    pos=pos.resample('10min').mean()
    pos = pos.dropna()
    pos.reset_index(drop=True)

    merged=meteo.merge(pos, left_index=True, right_index=True)
    merged ['Grad'] = '{}'.format(grad)
    merged['X']= Xs[Gradovi.index(grad)]
    merged['Y']= Ys[Gradovi.index(grad)]
    merged['Z']= Zs[Gradovi.index(grad)]

    merged['deltaX'] = merged['X'] - merged['x-ecef(m)']
    merged['deltaY'] = merged['Y'] - merged['y-ecef(m)']
    merged['deltaZ'] = merged['Z'] - merged['z-ecef(m)']
    merged=merged[['Grad', 'Time', 'RH', 'P', 'Pr', 'T', 'PWV', 'ns', 'deltaX', 'deltaY', 'deltaZ']]

    df=df.append(merged)

df['zeroone'] = '1'
df.loc[:,2, 'zeroone'] = '0'
df.to_excel('konacna_matrica_za_{}.xlsx'.format(year))

```

F) Početni i završni dio matrice ulaznih podataka temeljem koje je razvijen predloženi model

	Grad	Time	RH	P	Pr	T	PWV	ns	deltaX	deltaY	deltaZ	zeroone
2019-01-01 00:00:00	Dubrovnik	00:00:00	38	1015.6	0.0	8.5	0.820160	9.6	4.19600	0.91957	3.36242	0
2019-01-01 00:10:00	Dubrovnik	00:10:00	39	1015.6	0.0	8.5	0.837669	9.4	2.64761	-0.38084	1.07040	1
2019-01-01 00:20:00	Dubrovnik	00:20:00	39	1015.6	0.0	8.5	0.837669	9.0	1.76079	-0.38738	0.29683	0
2019-01-01 00:30:00	Dubrovnik	00:30:00	39	1015.8	0.0	8.4	0.833064	9.0	0.77219	-0.64398	-0.67380	1
2019-01-01 00:40:00	Dubrovnik	00:40:00	39	1015.9	0.0	8.5	0.837669	9.0	1.68507	-0.54619	0.20946	0
...
2019-12-31 22:20:00	Cakovec	22:20:00	88	1012.6	0.0	-1.8	0.899250	6.6	6.08282	2.65644	7.09339	1
2019-12-31 22:30:00	Cakovec	22:30:00	86	1012.6	0.0	-1.2	0.914980	8.0	3.10903	1.18835	4.97508	0
2019-12-31 22:40:00	Cakovec	22:40:00	83	1012.5	0.0	-0.9	0.904817	8.0	3.58607	1.35232	3.91010	1
2019-12-31 22:50:00	Cakovec	22:50:00	86	1012.6	0.0	-1.3	0.909474	8.0	4.94279	2.51858	5.12925	0
2019-12-31 23:00:00	Cakovec	23:00:00	86	1012.8	0.0	-1.5	0.898559	7.0	8.97929	5.44472	8.99813	1

151284 rows × 12 columns

Prvih i posljednjih pet redaka matrice s položajnim i meteorološkim podacima iz 2019. godine temeljem koje je razvijen predloženi model