Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja

Brčić, David

Doctoral thesis / Disertacija

2015

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:517854

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Image not found or type unknown *Repository / Repozitorij:*

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository

Image not found or type unknown

UNIRI DIGITALNA KNJIŽNICA

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

David Brčić

MODEL NESPECIFIČNOGA DNEVNOG HODA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA SIGNALA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2015.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

David Brčić

MODEL NESPECIFIČNOGA DNEVNOG HODA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA SIGNALA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Serđo Kos

Komentor: Izv. prof. dr. sc. Renato Filjar

Rijeka, 2015.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MARITIME STUDIES IN RIJEKA

David Brčić

A MODEL OF NON-SPECIFIC DAILY PATTERN OF THE SATELLITE POSITIONING SIGNAL IONOSPHERIC DELAY

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2015

Mentor rada: Prof. dr. sc. Serđo Kos

Komentor rada: Izv. prof. dr. sc. Renato Filjar

Doktorski rad obranjen je dana 30. 4. 2015. godine na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred Povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Robert Mohović
2. Prof. dr. sc. Serđo Kos
3. Izv. prof. dr. sc. Renato Filjar
4. Doc. dr. sc. Zoran Mrak
5. Doc. dr. sc. Irena Jurdana

SAŽETAK

U ukupnom proračunu pogreške određivanja položaja jednofrekvencijskim GNSS prijamnicima, ionosfersko kašnjenje satelitskog signala predstavlja najznačajniju utjecajnu veličinu. GPS modelom ispravke ionosferskog kašnjenja (prema Klobucharu), dnevna dinamika ionosferskog kašnjenja opisuje se na globalnoj razini. U doktorskom radu predložen je regionalni model utemeljen na uočenim nespecifičnim pravilnostima u dnevnom hodu ionosferskog kašnjenja signala za određivanje položaja. Nespecifične pravilnosti pojavljuju se pod određenim uvjetima; tijekom mirnog svemirskog vremena, nepobuđene ionosfere, u razdobljima ljetnih mjeseci te na području srednjih geografskih širina. Identificirana lokalna dinamika ionosferskog kašnjenja razlog je i motivacija za provedeno istraživanje, s ciljem unaprjeđenja pružanih usluga i općenito rada GNSS sustava. Model je izrađen na temelju izmjerenih vrijednosti ionosferskog kašnjenja, koje su izvedene iz opažanja kodnih i faznih pseudoudaljenosti. Pri tome su korišteni podaci s referentnih IGS stanica unutar Jadranske regije. Model je verificiran u razdobljima unutar kojih prevladavaju definirani uvjeti okoliša širenja signala za satelitsko određivanje položaja. Dobivene vrijednosti uspoređene su sa stvarnim vrijednostima ionosferskog kašnjenja, te s vrijednostima ionosferskog kašnjenja modeliranim prema Klobucharovom modelu ispravke. Model je ispitan na trima različitim lokacijama u području Jadranske regije u 2006. i 2007. godini. Rezultati su pokazali kako, u odnosu na Klobucharov model, predloženi model u zadanim uvjetima pruža točnije ispravke ionosferskog kašnjenja. Time je potvrđena primijenjivost predloženog modela za područje Jadranske regije i okolice. Značajke modela razmotrene su sa stajališta uspješnosti, prednosti i ograničenja modela. Prikazane su znanstvena i praktična mogućnost primjene modela i ostalih rezultata istraživanja. Analiza pogrešaka modela i njihovih uzroka postavlja smjernice za daljnja istraživanja lokalnih i globalnih uvjeta ionosferske dinamike te Sunčeve i geomagnetske aktivnosti.

Ključne riječi:

Globalni sustav za satelitsko određivanje položaja, globalni navigacijski satelitski sustav, ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja, ukupni sadržaj elektrona, model ispravke ionosferskog kašnjenja, srednje geografske širine, Jadranska regija

SUMMARY

Satellite positioning signal ionospheric delay has been identified as a single major contributor in total satellite positioning error budget. Daily dynamics of ionospheric delay are described globally by utilising the GPS standard (Klobuchar) ionospheric model. In this doctoral thesis, a regional ionospheric delay correction model has been proposed. The model is based on observed daily pattern ionospheric delay non-specific regularities, which are occuring under specified conditions; during quiet space weather, undisturbed ionosphere, in summer months period and at middle geographic latitudes. The local ionospheric delay dynamics are the reason and a motivation for conducted research, which was carried out aiming at GNSS services improvement and system performance. The model is developed on the basis of measured values of ionospheric delay. These values were derived from code and phase pseudorange observables from Adriatic region reference IGS stations. The model has been verified in time periods where defined conditions of satellite positioning signal propagation environment were prevailing. Obtained values were compared with actual ionospheric delay values, as well as with ionospheric delay values obtained with the Klobuchar ionospheric correction model. The proposed model has been tested in three different locations in the Adriatic region, in years 2006 and 2007. The results showed that, under specified conditions and controlling parameters, proposed ionospheric model provides more accurate ionospheric delay corrections compared to the Klobuchar model. The proposed model's applicability in the Adriatic region and surrounding has been confirmed. Model properties have been discussed from the accomplishment, advantages and limitations aspect. The potential of the model's scientific and practical appliance is presented, along with thesis research results. A model error analysis and error causes will set guidelines for further research activities regarding local and global ionospheric dynamics conditions, as well as solar and geomagnetic activity exploration.

Key Words:

Global positioning system, global navigation satellite system, satellite positioning signal ionospheric delay, total electron content, ionospheric delay correction model, middle geographic latitudes, Adriatic region

PREDGOVOR

Tijekom vremena koje sam proveo u izradi ovog rada, postepeno sam shvatio da je doktorat puno više od studiranja, znanosti i razmišljanja. Radi se o disciplini, kontroli i nadasve, strpljenju. Također, radi se o kompromisima koje čovjek mora napraviti sam sa sobom, s okolinom i najbližima. Neki od njih zahtijevali su drastične promjene u mom moždanom sklopu. U jednom trenutku ovaj se pothvat razvio u izazov koji sam morao prihvatiti i ući u ring. S obzirom da je doktorat poprimio svoj konačni oblik, bitka je očito završila. Pobjednik se krije negdje u stranicama koje slijede.

Razdoblje pisanja, koliko je god bilo frustrirajuće, bilo je i uzbudljivo. Velike stvari uvijek dolaze s pomiješanim osjećajima.

Profesoru Serđu Kosu, svome mentoru, zahvaljujem na razumijevanju i na inspirirajućim razgovorima, na podršci i pruženoj slobodi. Hvala vam. Izvanrednom profesoru Renatu Filjaru, svom komentoru i prijatelju, dugujem puno. Za strpljenje, vođenje, nepopustljivost, a najviše za vrijeme koje mi je nesebično posvetio. Hvala ti.

Uz prof. Kosa i prof. Filjara, zahvaljujem članovima Povjerenstva za obranu doktorskog rada, na konstruktivnim primjedbama: profesoru Robertu Mohoviću, docentu Zoranu Mraku i docentici Ireni Jurdani. Hvala vam.

Jasminu, Marku Valčiću, Marku Guliću, Sanjinu, Jasminki... hvala vam. Znate zašto. Hvala i tebi, Nevene. A tebi Mate, skoro najveće hvala.

Zahvalu dugujem i članovima Zavoda za nautičke znanosti Pomorskog fakulteta u Rijeci – svoga Zavoda, svojim kolegama. Hvala vam.

Viktoru zahvaljujem na učenju osnovnih koraka, ili abecede – slova, riječi, jednostavnih rečenica i pokreta. Hvala ti.

Zahvaljujem doktoru Gopiju Seemali s Instituta za geomagnetizam iz Mumbaia (Indija), tvorcu programskog alata *GPS Gopi* te profesoru Jaumeu Sanzu Subirani s Tehničkog Sveučilišta Katalonije, članu *gAGE* grupe i tvorcu *gLAB* programskog paketa. Osim što su izradili izvanredne alate za analizu GNSS podataka, pokazali su iznimnu velikodušnost pri našoj komunikaciji. Zahvaljujem im na nesebičnoj pomoći i na vrijednim odgovorima na moja (svakakva) pitanja.

Svima koji su istinski iščekivali dan kada će doktorat ugledati svjetlo dana, posvećujem ovaj rad. Roditeljima Braci i Ileani, bratu Ivanu, nonićima živima i pokojnima, i cijeloj svojoj preostaloj obitelji. Ograničen sam brojem stranica, ali znate tko ste. Hvala vam od srca.

A najveće i najtoplije hvala, mojoj supruzi i životnoj suputnici, Živi. Na podršci, razumijevanju, i ljubavi. Osim što si trebala biti pored jednog od mnogih mene tijekom ovog razdoblja, ti si me bodrila i gurala kad sam to najviše trebao, a da nisam bio ni svjestan. Hvala ti.

''Victoria: What are all these knobs?

The Doctor: What, these?

Jamie: Instruments. These are for controlling our flight.

Victoria: Flight?

Jamie: Well, yes. You see, we travel around in here through time and space.

[Victoria laughs]

The Doctor: Oh, no, no, no, no. Don't laugh. It's true.''

- *Dr. Who*

''The mission of this Program is to:

1. Drop 5 bombs in the same hole, and
2. Build a cheap set that navigates (<$ 10,000), and don't you forget it!''

- *GPS Joint Program Office*

Svjetlost se savija. Ako je svjetlost iskrivljena, sve je iskrivljeno.

''Although it may be nice to think that modeling projects progress smoothly from building through to use, this is hardly ever the case.''

- *D. Lawson*

''A model is a good model if it:

1. Is elegant
2. Contains few arbitrary or adjustable elements
3. Agrees with and explains all existing observations
4. Makes detailed predictions about future observations that can disprove the model if they are not borne out.''

- *S. Hawking*

''Many scientists feel that a model should be elegant to be true. However, it is important to understand that the main criterion for any model is the ability to describe its subject with given accuracy and predict its behavior. The model cannot ever completely describe the subject, because when it does, it becomes the subject.''

- *I. G. Petrovski*

''You don't do things alone. Nobody does things alone. Everybody always need support. You should never be afraid to look for people who can encourage you or mentor you. There are a lot of people out there who want to provide advice and support to people who are trying to do the right thing. Just always remember to be open to help. Never think that you know everything. And always be ready to listen.''

- *B. Obama*

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. UČINCI IONOSFERSKIH POREMEĆAJA NA RAD I ZNAČAJKE SUSTAVA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA 6

2.1 Arhitektura GPS sustava 6

2.1.1. Prostorni segment 7

2.1.2. Kontrolni segment 8

2.1.3. Korisnički segment 8

2.2 Koncept satelitskog određivanja položaja 9

2.3 Opis satelitskih signala za određivanje položaja 12

2.3.1 Struktura GPS satelitskih signala 12

2.3.2 GPS satelitski signali nove generacije 14

2.4 Postupak procjene položaja na temelju prijama satelitskih signala 15

2.5 Proračun pogrešaka određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima 17

2.5.1 Korisnička razdioba pogrešaka 17

2.5.2 Geometrijska razdioba točnosti 19

2.5.3 Ukupni proračun pogreške određivanja položaja 19

2.6 Morfologija ionosfere i njena povezanost sa svemirskim vremenom 20

2.6.1 Geoprostor 21

2.6.2 Razumijevanje ionosferskih procesa 22

2.6.3 Morfologija ionosfere 23

2.6.3.1 Fizikalna aeronomija ionosferskog sustava 24

2.6.3.2 Kemijska aeronomija ionosferskog sustava 26

2.6.3.3 Atmosferski vjetrovi, gravitacijski valovi i putujući ionosferski poremećaji 27

2.7 Ukupni sadržaj elektrona 28

2.7.1 Ovisnost i promjenjivost ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u ionosferi 28

2.7.2 Ovisnost ukupnog sadržaja elektrona o položaju korisnika 30

2.7.3 Ovisnost ukupnog sadržaja elektrona o upadnom kutu signala za satelitsko određivanje položaja 31

2.7.4 Ionosferski učinci na satelitske navigacijske sustave 32
2.7.4.1 Pobude ionosfere na poremećaje svemirskog vremena 32
2.7.4.2 Učinci ukupnog sadržaja elektrona na širenje signala za satelitsko određivanje položaja 34
2.7.5 Uzroci pojave kašnjenja satelitskog signala pri prolasku kroz ionizirani medij 36
2.7.5.1 Širenje radiovalova kroz disperzivni medij 36
2.7.5.2 Ionosfersko kašnjenje satelitskih signala za određivanje položaja 38
3. DOSADAŠNJA POSTIGNUĆA U ISTRAŽIVANJU I MODELIRANJU DINAMIKE IONOSFERSKOG KAŠNJENJA 40
3.1 Pokazatelji ionosferske dinamike 41
3.1.1 Pokazatelji Sunčeve aktivnosti 41
3.1.2 Geomagnetski pokazatelji 42
3.1.2.1 Geomagnetsko polje 42
3.1.2.2 Pokazatelji jakosti geomagnetskog polja 42
3.1.2.3 Pokazatelji geomagnetske aktivnosti 43
3.1.3 Ionosferski pokazatelji 44
3.1.4 Definicija mirnih uvjeta svemirskog vremena 45
3.2 Pristupi uklanjanju učinaka ionosferskog kašnjenja 46
3.2.1 Izravna metoda 47
3.2.2 Neizravna metoda 47
3.2.3 Modeli ionosfere 49
3.2.4 Izvori ionosferskih podataka 50
3.2.5 Određivanje ukupnog sadržaja elektrona dvofrekvencijskim GPS opažanjima 51
3.2.6 Numeričke mape 57
3.3 Modeli ispravke ionosferskog kašnjenja za jednofrekvencijske GNSS prijamnike 58
3.3.1 NeQuick model 59
3.3.2 Klobucharov model 60
3.4 Pregled vlastitih istraživanja 62
4. METODOLOGIJA RADA 64
4.1 Geografsko područje istraživanja 64

4.2 Promatrano razdoblje 65
4.3 Izvori podataka i podaci 66
4.3.1 Ulazni podaci za razvoj modela 66
4.3.2 Proračun vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona 66
4.3.3 Pokazatelji Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti 69
4.4 Razvoj prognostičkog modela 72
4.5 Izrada matematičkog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja 74
4.6 Verifikacija predloženog modela 76
5. MODEL NESPECIFIČNOGA DNEVNOG HODA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA SIGNALA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA 77
5.1 Fizikalni opis lokalne ionosferske dinamike 77
5.2 Iskustveni prognostički model pogoršanja uvjeta za satelitsko određivanje položaja 80
5.2.1 Opći prognostički model 80
5.2.2 Sažetak rezultata dobivenih općim prognostičkim modelom 81
5.2.3 Primjena prognostičkog modela na razdoblje istraživanja 83
5.2.4 Sažetak rezultata dobivenih primijenjenim prognostičkim modelom 85
5.2.5 Završna razmatranja o rezultatima prognostičkog modela 86
5.3 Opis predloženog modela ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja 87
5.3.1 Značajke modela i uvjeti primjene 87
5.3.2 Definicija predloženog modela 88
6. VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG MODELA 91
6.1 Ispitivanje modela unutar definiranih uvjeta i kriteriji uspješnosti 91
6.2 Verifikacija modela i analiza pogrešaka 91
6.3 Verifikacija modela primjenom podataka s IGS GNSS stanice Medicina 92
6.4 Verifikacija modela primjenom podataka s IGS GNSS stanice Bolzano 96
6.5 Usporedba rezultata verifikacije s obje stanice 99
6.6 Verifikacija modela primjenom podataka s IGS GNSS stanice Matera 103
6.7 Usporedba modeliranih vrijednosti s vrijednostima ionosferskog kašnjenja GIM numeričkih mapa 108
6.7.1 Usporedba modela s GIM podacima za 2006. godinu 108

6.7.2 Usporedba modela s GIM podacima za 2007. godinu 110
6.7.3 Sažetak rezultata usporedbe 111
7. RAZMATRANJA O PREDLOŽENOME MODELU I REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA 112
7.1 Uspješnost modela 112
7.2 Analiza dnevnih pogrešaka 115
7.3 Opća razmatranja 118
7.4 Razmatranja o primjenjivosti modela 119
7.5 Primjenjivost u pomorskoj navigaciji 119
7.6 Primjena rezultata istraživanja 121
8. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA 123
POPIS LITERATURE 125
POPIS KRATICA 134
POPIS OZNAKA I SIMBOLA 136
POPIS SLIKA 143
POPIS TABLICA 147
PRILOG i

1. UVOD

Satelitska navigacija je skup postupaka za procjenu položaja i ostalih navigacijskih parametara (usklađivanje s vremenskim standardom, procjena brzine) pokretnog korisnika temeljena na analizi primljenih signala (vrijeme i značajke širenja signala od satelitske antene do antene korisničke opreme), odaslanih sa satelitskih predajnika. Poradi jedinstvenih značajki (točnost određivanja položaja, brzine i usklađenost sa standardom vremena, kontinuitet pružanja usluga, globalna dostupnost, praćenje integriteta), satelitski navigacijski sustavi predstavljaju okosnicu razvoja i djelovanja brojnih tehnoloških (navigacijskih i ne-navigacijskih) i društveno-ekonomskih sustava, postavši tako dijelom nacionalne infrastrukture [141, 124, 46, 16, 31].

Kvaliteta pružanja usluga globalnih navigacijskih satelitskih sustava (engl. *Global Navigation Satellite Systems* – GNSS) temelji se na učincima utjecajnih veličina koje definiraju točnost, pouzdanost, dostupnost, integritet i kontinuitet usluga GNSS sustava, čime se određuje proračun pogrešaka određivanja položaja, brzine i vremena. Američki sustav GPS (engl. *Global Positioning System* – GPS) trenutno je, uz ruski sustav GLONASS (rus. *GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* – GLONASS), jedini potpuno operativni globalni navigacijski satelitski sustav [53, 130]. GPS prijamnici zauzimaju veći dio ukupnog svjetskog tržišnog udjela korisničke opreme za satelitsku navigaciju, uz nedavno opaženi trend rasta udjela kombiniranih GPS/GLONASS prijamnika i njihove primjene [75, 122]. Činjenica kako jednofrekvencijski GPS prijamnici predstavljaju i predstavljat će i dalje u skoroj budućnosti najčešći slučaj komercijalnih GNSS prijamnika, određuje i smjer akademskih (znanstvenoistraživačkih) i industrijskih aktivnosti na području očuvanja održivosti kvalitete određivanja položaja i vremena GNSS sustavima.

U ukupnom proračunu pogrešaka određivanja položaja GNSS sustavima, učinci ionosferskih poremećaja na širenje satelitskih radijskih signala od satelitske do korisničke antene predstavljaju daleko najznačajniju pojedinačnu utjecajnu veličinu koja definira vrijednost korisničke razdiobe pogrešaka GNSS sustava. Pretežno izraženi u obliku ekvivalentnog ionosferskog kašnjenja satelitskog signala, ionosferski učinci definiraju pogrešku određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavom.

Ionosfersko kašnjenje GNSS/GPS signala rezultat je složenih fizikalnih i kemijskih pojava nastalih na Suncu, čiji se učinci manifestiraju u svemirskom okolišu Zemlje, odnosno u Zemljinim ionosferskim slojevima. Ionosfersko kašnjenje stoga je često teško predvidivo, stohastično i ovisno kako o globalnim, tako i o lokalnim značajkama ionosferske dinamike. Sve to, u smislu ispravke kašnjenja, procjenu ionosferskog kašnjenja s potencijalom korištenja čini vrlo zahtjevnim zadatkom. Ispravka ionosferskog kašnjenja GPS signala za jednofrekvencijske korisnike na globalnoj razini postiže tek djelomičan i vrlo ograničen uspjeh, primjenjiv tek u određenim kategorijama primjena sustava GPS. Model ispravljanja ionosferskog kašnjenja GPS signala po

Klobucharu [88], dio dostupne GPS usluge, predstavlja točku usporedbe za nove modele koji postupno poprimaju regionalni i lokalni karakter.

U ovome se radu predlaže regionalni model ispravke ionosferskog kašnjenja GPS signala za jednofrekvencijske korisnike. Model je razvijen ukorak s rastućim potrebama za održivom kvalitetom usluge točnog određivanja položaja sustavom GPS za navigacijske i ne-navigacijske svrhe na području Jadranskog mora, Republike Hrvatske i okolne regije. Predloženi model utemeljen je na uočenim nespecifičnim pravilnostima u dnevnom hodu ionosferskog kašnjenja GPS signala u promatranom području tijekom razdoblja mirnog svemirskog vremena u ljetnim mjesecima. Navedene nespecifične pravilnosti identificirane su iz eksperimentalnih opažanja dobivenih referentnim GNSS stanicama i razlikuju se od onih uočenih na globalnoj razini. Predloženi model predstavlja poboljšanje u odnosu na referentni model ispravke po Klobucharu. Uvođenje regionalnog modela za područje Jadranskog mora, Republike Hrvatske i okolne regije argumentirano je i opisom fizikalnih procesa koji u promatranom geografskom području definiraju lokalnu specifičnu dinamiku dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja GPS signala.

Postavljena **znanstvena hipoteza** doktorskog rada glasi:

Dnevna dinamika ionosferskog kašnjenja satelitskog signala za jednofrekvencijsko određivanje položaja u intervalu mirnog svemirskog vremena i nepobuđene ionosfere na području Jadranskog mora i okolne regije naznačena je linearnim porastom u noćnim satima i postojanjem više lokalnih maksimuma dnevnih vrijednosti, pa se opisuje kompozitnim matematičkim modelom:

- u noćnim satima:

$$d_{iono} = a_n \cdot t + b_n \tag{1.1}$$

- tijekom dana:

$$d_{iono} = a_d \cdot cos\left(2 \cdot \Pi \cdot \frac{t - t_{d0}}{P_d}\right) + \sum_{i=1}^{N} a_i \cdot cos\left(2 \cdot \Pi \cdot \frac{t - t_i}{P_i}\right), \tag{1.2}$$

pri čemu su:

d_{iono}... dnevni hod ionosferskog kašnjenja, t... trenutak za koji se proračunava vrijednost ionosferskog kašnjenja, a_n, b_n... koeficijenti linearnog porasta ionosferskog kašnjenja tijekom noćnih sati, a_d... vršna vrijednost središnjeg maksimuma ionosferskog kašnjenja, t_{d0}... trenutak (faza) nastupa vršne vrijednosti središnjeg maksimuma ionosferskog kašnjenja, P_d... period nastupa središnjeg maksimuma ionosferskog kašnjenja, $i = 1, \dots N$... broj lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja, a_i... vršne vrijednosti lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja, t_i... vremena (faze) nastupa vršnih vrijednosti lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja, P_i... periodi nastupa lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja.

Iz postavljene znanstvene hipoteze proizlaze sljedeće **pomoćne hipoteze**:

1. Dnevni hod ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja sastoji se od više lokalnih maksimuma;
2. Regionalni model ionosferskog kašnjenja za područje Jadranskog mora i okolne regije, u uvjetima mirnog svemirskog vremena sastoji se od linearnih komponenti tijekom noćnih sati, te glavne kosinusne komponente i pomoćnih kosinusnih komponenata tijekom dana;
3. Pokazatelji Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti definiraju iskustveni prognostički model pogoršanja uvjeta za satelitsko određivanje položaja uslijed učinaka svemirskog vremena;
4. Regionalni model primijenjen u zadanim uvjetima pruža bolje karakteristike ispravke ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja od postojećeg ionosferskog modela ispravke.

Znanstveni problem doktorskog rada je prognoza dinamike ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja, što ionosfersku dinamiku čini **predmetom istraživanja**.

Objekti istraživanja su dnevni uzorak hoda ionosferskog kašnjenja na promatranom području, značajke širenja satelitskih signala, pogreška položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima uslijed učinaka svemirskog vremena, slijed nastanka, širenja, interakcije i manifestacije pojava i poremećaja dinamike svemirskog vremena, vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona duž puta satelitskog signala, te pokazatelji Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti, kao utjecajni parametri svemirskog vremena na okoliš i uvjete satelitskog određivanja položaja.

Svrha provedenog istraživanja doprinos je unaprjeđenju rada GNSS sustava i poboljšanju točnosti mjerenja pseudoudaljenosti između prijamnika i satelita, temeljem koje su postignuti sljedeći **ciljevi** istraživanja:

1. Izrada i verifikacija modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja za promatrano područje u mirnim uvjetima svemirskog vremena i nepobuđene ionosfere;
2. Identifikacija stvarne dinamike ionosferskog kašnjenja na promatranom području;
3. Identifikacija poremećaja ionosferskog kašnjenja;
4. Razvoj modela prognoze stanja okoliša širenja satelitskih signala;
5. Izrada okvira djelovanja svemirskog vremena od nastanka odnosnih pojava do njihove manifestacije na usluge satelitskih navigacijskih sustava.

Na temelju izvršenog istraživanja i dobivenih rezultata, ostvareni su sljedeći **znanstveni doprinosi**:

1. Identifikacija karakteristične lokalne dinamike dnevnog hoda ukupnog ionosferskog sadržaja slobodnih elektrona i ionosferske pogreške jednofrekvencijskog satelitskog određivanja položaja na području Jadranskog mora i okolne regije tijekom nepobuđenih uvjeta svemirskog vremena (u ljetnim mjesecima);
2. Prijedlog novog regionalnog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja jednofrekvencijskog satelitskog određivanja položaja na području Jadranskog mora i okolne regije tijekom nepobuđenih uvjeta svemirskog vremena (u ljetnim mjesecima), temeljen na karakterističnoj lokalnoj dinamici ukupnog ionosferskog sadržaja slobodnih elektrona;
3. Prijedlog na strojnom učenju utemeljenog iskustvenog modela prognoze stanja i uvjeta okoliša satelitskog određivanja položaja uslijed učinaka svemirskog vremena;
4. Vrednovanje rezultata istraživanja i predloženih modela te utvrđivanje uvjeta njihove primjene ovisno o stanju i dinamici promjena svemirskog vremena u području regije Jadranskog mora.

Doktorski rad organiziran je kako slijedi.

U uvodnom poglavlju obrazloženi su elementi znanstvenoistraživačkog rada uz motivaciju za provedeno istraživanje te je opisana struktura doktorskog rada.

Drugo poglavlje, pod naslovom *Ionosferski učinci na satelitske navigacijske sustave*, predstavlja znanstveni problem u razmatranju.

U trećem poglavlju, pod naslovom *Dosadašnja postignuća u istraživanju i modeliranju dinamike ionosferskog kašnjenja*, navedeni su najznačajniji rezultati prethodnih istraživanja, na čijim se temeljima grade doprinosi znanstvenoistraživačke aktivnosti opisane u doktorskom radu. Ovdje su prikazana vlastita istraživanja lokalne dinamike ionosferskog kašnjenja i dobiveni rezultati koji su prethodili daljnjem istraživanju prikazanom u doktorskom radu.

Unutar četvrtog poglavlja, naslova *Metodologija rada*, opisani su postupci analize podataka te razvoj i verifikacija predloženog modela u postupku uobičajene prakse znanstvenoistraživačkog rada. Prikazani su izvori podataka uz analizu njihove kvalitete, postupka pohranjivanja podataka, postupka pristupa i pripreme za obradu.

Peto poglavlje, pod naslovom *Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja*, definira hipotezu znanstvenog istraživanja, predstavlja predloženi model, prikazuje njegov nastanak, izlaže teoretsku

podlogu modela te definira uvjete korištenja modela i algoritam procjene ionosferskog kašnjenja GPS signala u uvjetima primjene.

U šestom poglavlju, naslova *Verifikacija predloženog modela* predstavljeni su rezultati praktične verifikacije modela i razvijenog algoritma za procjenu ionosferskog kašnjenja GPS signala, za jednofrekvencijske korisnike u definiranim uvjetima primjene modela. Također, prikazani su rezultati usporedbe s referentnim modelom ispravke ionosferskog kašnjenja (prema Klobucharu) te s vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenog na temelju globalnih ionosferskih mapa promatranog područja.

Unutar sedmog poglavlja, pod naslovom *Razmatranja o predloženome modelu i rezultatima istraživanja* analizirane su prednosti i ograničenja predloženog modela, kao i poboljšanja postignuta u odnosu na referentni model ispravke ionosferskog kašnjenja. Također, navode se smjernice nastavka znanstvenoistraživačkog rada i praktične primjene modela.

Zaključno poglavlje predstavlja sažetak rezultata znanstvenog istraživanja. Ovdje su navedeni znanstveni doprinosi te su ukratko sažeti rezultati verifikacije hipoteze uz preporuke, prijedloge i planirane aktivnosti vezane za daljnja istraživanja.

Tijekom pripreme i pisanja rada korištena je terminologija koja nije potpuno usklađena s hrvatskim jezikom. Usprkos nastojanju da se pronađe odgovarajući prijevod za određeni izraz, pojavu, proces, postupak itd., to nije uvijek bilo moguće. U tim slučajevima, uz dotični je termin navedena njegova engleska (izvorna) inačica. Osim toga, bilo je potrebno definirati određene izraze koji su korišteni u doktorskom radu. Tako, pojam *atmosfera* označava slojeve i područja cjelokupne Zemljine ovojnice (uključujući ionosferu), *područje* ionosfere (engl. *region*) označava dio Zemljine atmosfere unutar kojeg postoje uvjeti za pojavu ioniziranih slojeva, dok je *ionosferski sloj* (engl. *layer*) područje na određenoj visini, u kojem postoji stanovita koncentracija iona s izraženom lokalnom vršnom vrijednošću.

2. UČINCI IONOSFERSKIH POREMEĆAJA NA RAD I ZNAČAJKE SUSTAVA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA

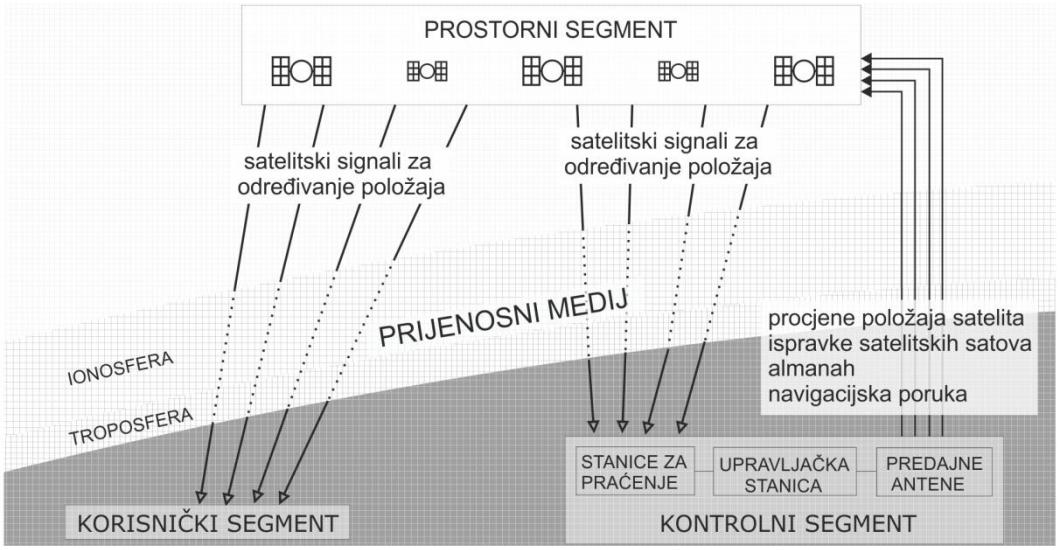
Ovo je poglavlje podijeljeno u dvije relevantne cjeline. U prvoj cjelini opisan je koncept određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima na primjeru sustava GPS. Prikazana je arhitektura sustava i struktura satelitskih signala za određivanje položaja. Opisan je postupak određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima, uz prikaz utjecajnih veličina koje čine ukupnu pogrešku određivanja položaja. Ionosfersko kašnjenje satelitskih signala izdvojeno je kao najznačajniji pojedinačni uzrok ukupne degradacije točnosti određivanja položaja, stoga predstavlja drugu cjelinu poglavlja. Ionosferska dinamika opisana je s fizikalnog stajališta učinaka pojava svemirskog vremena te su prikazani ionosferski učinci na rad i značajke satelitskih navigacijskih sustava.

2.1 Arhitektura GPS sustava

Globalni sustav za određivanje položaja (engl. *NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System* – NAVSTAR GPS, skraćeno GPS) američki je satelitski navigacijski sustav kojim se korisnicima pružaju sljedeće temeljne usluge (engl. *Positioning, Navigation and Timing* – PNT) [119, 84, 141, 53]:

- određivanje položaja
- određivanje smjera kretanja
- određivanje brzine kretanja
- usklađivanje s koordiniranim svjetskim vremenom (engl. *Universal Time Coordinated* – UTC).

Segmenti GPS sustava i njihov međusobni odnos prikazani su na slici 2.1 [119].



Slika 2.1: Segmenti GPS sustava

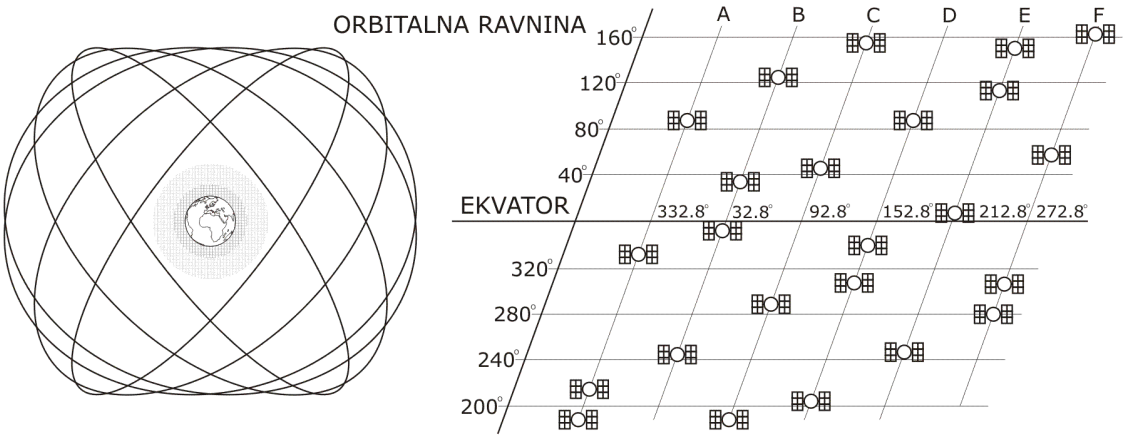
Segmenti GPS sustava su [119, 84]:

- prostorni segment (konstelacija satelita)
- kontrolni segment
- korisnički segment i
- okoliš širenja satelitskih signala (prijenosni medij kojeg čine zrakoprazni prostor i Zemljina atmosfera).

U nastavku poglavlja opisane su osnovne značajke segmenata GPS sustava.

2.1.1. Prostorni segment

Prostorni segment GPS sustava čine sateliti koji se kreću u srednjim Zemljinim orbitama (engl. *Medium Earth Orbit* – MEO, na visini od približno 20200 km [119, 139, 123]. Šest orbitalnih ravnina međusobno je razmaknuto za 60^0, nagiba od 55^0 u odnosu na ekvatorijalnu ravninu [84, 139]. Nazivna konstelacija sadrži 24 satelita, pri čemu se na svakoj orbitalnoj ravnini nalazi najmanje četiri satelita [119]. Po trenutnim podacima (2015) oko Zemlje kruži 31 operativan GPS satelit [139, 122]. Sateliti se gibaju brzinama od 3,9 km/s, što odgovara vremenu ophodnje od 11 sati, 56 minuta i 2 sekunde, odnosno polovini sideričkog dana [139, 136, 119, 123]. S obzirom na Zemljinu rotaciju (siderički dan), svaki satelit dva puta dnevno prijeđe iznad iste točke na Zemlji [123, 136]. Na slici 2.2 prikazana je nazivna satelitska konstelacija GPS sustava te raspodjela satelita unutar pojedine orbite [119, 84].



Slika 2.2: GPS satelitska konstelacija promatrana s ekvatorijalne ravnine (lijevo) i raspored nazivne GPS konstelacije u ravninskoj projekciji (desno)

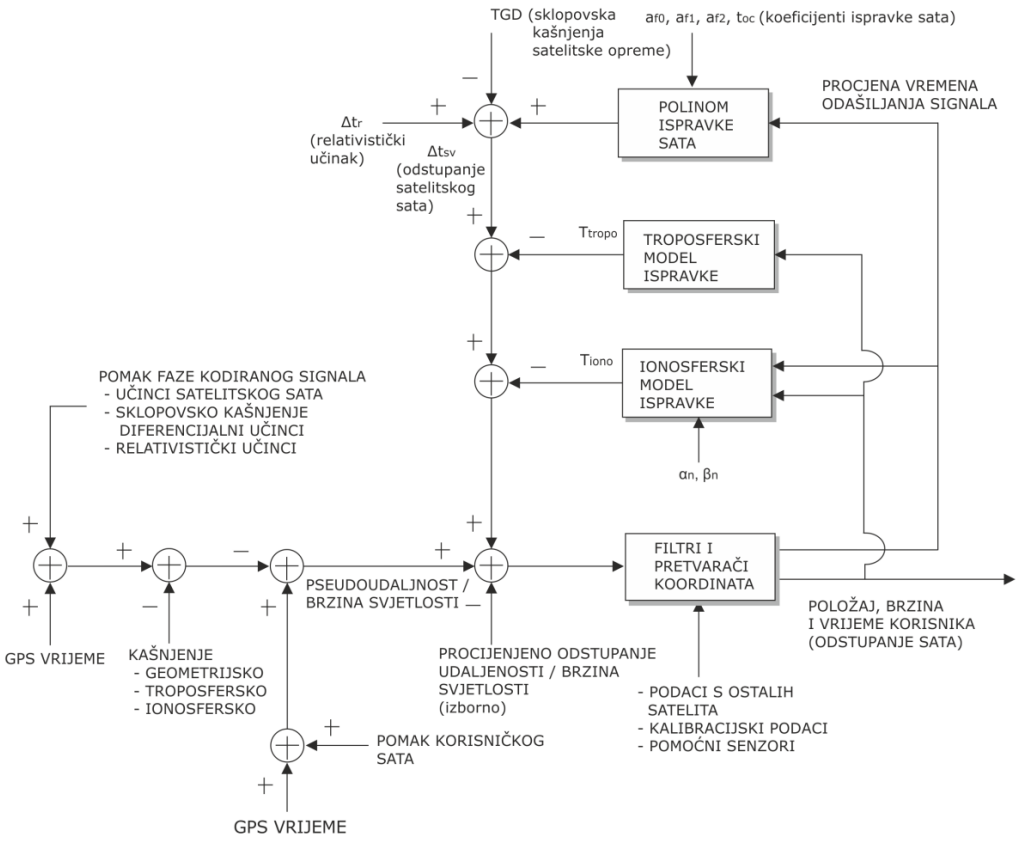
Sateliti neprekidno odašilju signale za određivanje udaljenosti između korisnika i satelita [139]. Nazivna vrijednost velike poluosi iznosi 26 559,7 km [143, 53]. Ova je visina izabrana zbog optimalne iskoristivosti signala za satelitsko određivanje položaja, dostupnosti dovoljnog broja satelita te mogućnosti njihovog povoljnog međusobnog položaja unutar orbitalnih ravnina u cilju smanjenja geometrijske razdiobe točnosti [119, 113]. Pokrivenost (engl. *footprint*) svakog satelita iznosi približno 38 % Zemljine površine. Ako se u obzir uzme kut maskiranja od 5^0, efektivna pokrivenost iznosi 33,9 % površine Zemlje [143].

2.1.2. Kontrolni segment

GPS kontrolni segment upravlja cjelokupnim sustavom i skrbi za kontrolu i održavanje satelitske konstelacije [139,119]. Sastoji se od glavne i zamjenske upravljačke stanice, 12 predajnih antena i 16 stanica za praćenje satelita [139, 53]. Potonje prikupljaju podatke o položajima i kretanju satelita, kodna i fazna mjerenja satelitskih signala i atmosferske podatke [119, 123]. Na temelju prikupljenih podataka, unutar kontrolne stanice generiraju se ispravke satelitskih orbita i satelitskih satova te procijenjena kretanja satelita. Između satelitskog i kontrolnog segmenta prisutna je dvosmjerna komunikacija [136, 84]. Unutar kontrolnog segmenta se pripremaju elementi navigacijske poruke koja se putem satelita odašilje korisnicima [119, 84, 123].

2.1.3. Korisnički segment

GPS korisnička oprema sastoji se od prijamne antene, prijamnika, izvora napajanja i dodatne opreme poput kabela i spojnih vodova [84, 41]. Usluga sustava GPS omogućava svim korisnicima s odgovarajućom opremom prijam satelitskih signala bez ograničenja [119, 41]. Korisnici se mogu podijeliti na civilne i autorizirane, što određuje razinu i značajke pružanja korisničkih usluga [119, 143, 142]: standardnih (engl. *Standard Positioning Service* – SPS) i preciznih usluga (engl. *Precise Positioning Service* – PPS) [53, 143, 142]. Na slici 2.3 prikazan je blok-dijagram ispravke vremena širenja signala unutar prijamnika na temelju podataka iz navigacijske poruke [53].



Slika 2.3: Mjerenje i ispravke vremena širenja satelitskog signala unutar prijamnika

Konvencionalni prijamnici sastoje se od triju podsustava [41]. U ulaznom sučelju (engl. *RF front-end*) vrše se temeljne operacije na primljenim signalima: pojačanje, filtriranje i pretvorba GPS signala, a kod novijih prijamnika i analogno-digitalna konverzija [123]. U sklopu procesora osnovnog pojasa (engl. *baseband processor*) na obrađenim signalima obavlja se korelacija sa stvorenim replikama satelitskih kodova [41, 119, 122] te se mjeri pomak faze između generiranog i primljenog kodiranog signala, odnosno mjeri se vrijeme širenja satelitskog signala između satelitske i prijamne antene. Paralelno, iz ulaznog (kompozitnog) satelitskog signala se izdvajaju elementi navigacijske poruke na temelju kojih se rekonstruiraju informacije sadržane unutar satelitskog signala. Ove su informacije potrebne za proračun položaja i brzine satelita, ispravke satelitskog vremena i status satelita [123, 122].

Na temelju dobivenih i proračunatih informacija, unutar navigacijskog sklopa (engl. *navigation portion*) procjenjuju se položaj, brzina i vrijeme korisnika [119, 8, 123, 122].

2.2 Koncept satelitskog određivanja položaja

Satelitsko određivanje položaja temelji se na mjerenju vremena širenja satelitskih signala od predajne (satelitske) do prijamne (korisničke) antene [119]. Sateliti odašilju signale u pravilnim vremenskim razmacima. Prijamom satelitskih signala prijamnik identificira pojedini satelit, njegov položaj, vrijeme (trenutak) odašiljanja i vrijeme (trenutak) prijama satelitskog signala [119, 123]. Na temelju izmjerenog vremena širenja signala, proračunava se udaljenost između satelita i korisničkog prijamnika [119, 123, 139]:

$$r = \Delta t \cdot c, \tag{2.1}$$

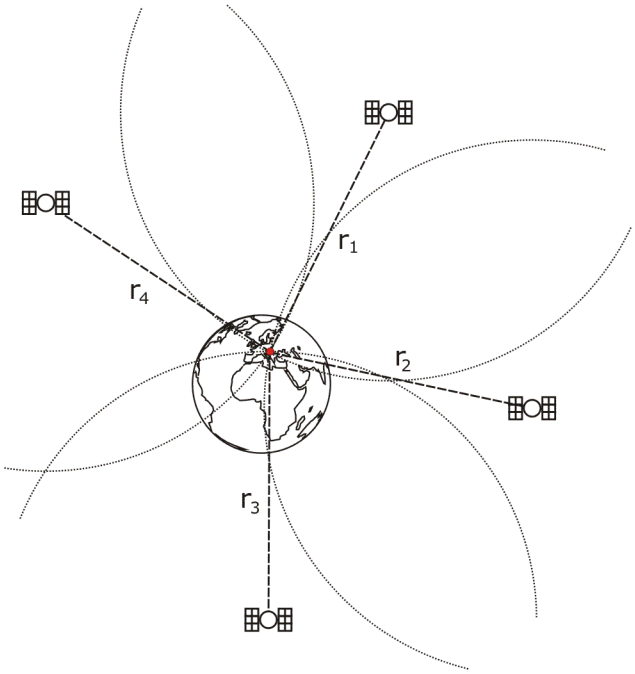
pri čemu su:

r...geometrijska (stvarna) udaljenost između prijamne i satelitske antene, Δt...vrijeme propagacije satelitskog signala između prijamne i satelitske antene, c...brzina širenja satelitskih signala.

Upotrebom izmjerenih udaljenosti između prijamne antene i najmanje četiriju satelita, određuje se položaj i vrijeme korisnika u referentnom koordinatnom sustavu, odnosno vremenskom okviru. Brzina korisnika određuje se Dopplerovim pomakom frekvencija satelitskih signala [119, 123, 113]. Koncept određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima prikazan je na slici 2.4.

Određivanje položaja satelitskim navigacijskim sustavima temelji se na trima preduvjetima:

- postojanju zajedničkog referentnog koordinatnog sustava
- zajedničkom vremenskom okviru i
- konstantnoj brzini prostiranja satelitskih signala.

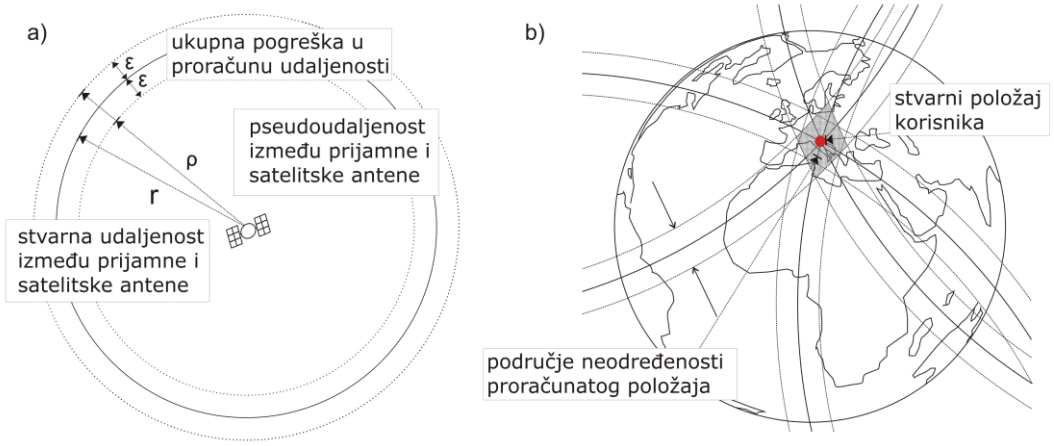


Slika 2.4: Osnovni koncept satelitskog određivanja položaja
Mjerenjem vremena prostiranja signala određuje se udaljenost između korisnika i satelita na temelju čega se procjenjuje položaj korisnika

Unutar zajedničkog referentnog koordinatnog sustava prikazuju se koordinate satelita i korisnika. Položaji i kretanja satelita odnose se na inercijski zemaljski koordinatni sustav (engl. *Earth Centered Inertial coordinate system* – ECI) [119]. Koordinatne osi ECI sustava nepomične su u odnosu na nebesku sferu [56, 122, 123]. Unutar prijamnika, satelitske koordinate se pretvaraju u rotacijski zemaljski referentni sustav (engl. *Earth Centered, Earth Fixed coordinate system* – ECEF). U ECEF sustavu, odnosno korištenom referentnom okviru opisuje se položaj korisnika [122, 123, 84, 139]. Unutar GPS satelitskog navigacijskog sustava koristi se WGS-84 referentni okvir [117, 119, 53], pomoću kojeg se pravokutne koordinate korisnika pretvaraju u sferne koordinate [84, 119].

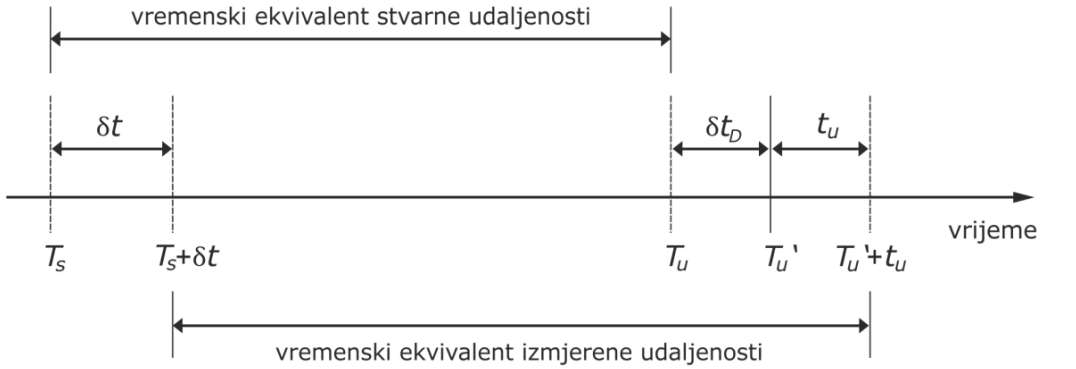
Sljedeći preduvjet jest zajednički vremenski okvir satelita i korisnika [122, 139]. U cilju preciznog mjerenja vremena širenja satelitskih signala, potrebna je međusobna usklađenost satova svih segmenata GPS sustava (vrijeme GPS sustava, satelitsko vrijeme i korisničko vrijeme). Vrijeme GPS sustava (engl. *System Time* – ST) održava se u odnosu na UTC vrijeme unutar graničnih vrijednosti. Vrijednosti odstupanja satelitskih satova u odnosu na vrijeme GPS sustava sadržane su unutar navigacijske poruke satelitskog signala, uz pomoć kojih se unutar korisničkog prijamnika određuje točno vrijeme odašiljanja signala [84, 119]. Odstupanje korisničkog sata od vremena GPS sustava ovisno je o korisniku, stoga se, kao četvrta nepoznanica, ispravlja dodatnim mjerenjem vremena širenja satelitskog signala. Uslijed pogrešaka u mjerenju vremena širenja satelitskog signala unutar prijamnika se, umjesto stvarne udaljenosti mjeri *pseudoudaljenost*, odnosno udaljenost između satelita i prijamnika uvećana za vrijednosti pogrešaka satelitskog i korisničkog sata, ionosferskog kašnjenja i ostalih

pogrešaka [84]. Izmjerene pseudoudaljenosti definiraju područje neodređenosti položaja, kako je prikazano (Slika 2.5).



Slika 2.5: Prikaz stvarne udaljenosti i izmjerene pseudoudaljenosti između prijamne i satelitske antene (a) te područja neodređenosti proračunatog položaja (b)

Odnos stvarne udaljenosti između satelita i prijamnika i izmjerene pseudoudaljenosti može se opisati na primjeru izmjerenog vremena propagacije satelitskog signala, kako je prikazano na slici 2.6 [84].



T_s trenutak odašiljanja satelitskog signala u vremenu sustava
T_u trenutak prijama satelitskog signala bez pogreške δt_D, izražen u vremenu sustava
T_u' trenutak prijama satelitskog signala uključujući pogrešku δt_D, izražen u vremenu sustava
δt odstupanje satelitskog sata od vremena sustava
t_u odstupanje korisničkog sata od vremena sustava
$T_s+\delta t$ trenutak odašiljanja satelitskog signala, očitan na satelitskom satu
$T_u'+t_u$ trenutak prijama satelitskog signala, očitan na korisničkom satu
δt_D ukupna pogreška mjerenja vremena uslijed utjecajnih veličina

Slika 2.6: Odnos stvarne udaljenosti i izmjerene pseudoudaljenosti između korisničke i satelitske antene na temelju izmjerenog vremena širenja satelitskog signala

Usklađivanjem satova na zajednički vremenski okvir (ST) i uklanjanjem ostalih pogrešaka u mjerenju vremena širenja, izmjereno vrijeme propagacije satelitskog signala odgovara udaljenosti između satelitske i korisničke antene [119, 84, 123]:

$$\Delta t_r = \Delta t_\rho + \delta t - t_u - \delta t_D, \qquad (2.2)$$

gdje su:

Δt_r...vremenski ekvivalent stvarnoj udaljenosti između prijamnika i satelita, Δt_ρ...izmjereno vrijeme širenja satelitskog signala, δt...odstupanje satelitskog sata, t_u...pogreška korisničkog sata, δt_D...ukupno vremensko odstupanje uslijed ostalih pogrešaka pri mjerenju vremena širenja satelitskog signala.

Posljednji preduvjet satelitskog određivanja položaja pretpostavka je o konstantnoj brzini prostiranja satelitskih signala. Unutar GPS sustava, vrijednost brzine iznosi $2{,}99792458 \cdot 10^8$ [m/s], što odgovara brzini prostiranja elektromagnetskih valova u zrakopraznom prostoru [53, 117, 123]. Prolaskom satelitskog signala kroz slojeve Zemljine atmosfere dolazi do promjena u brzini prostiranja signala [123, 119, 88], što utječe na mjerenje vremena, odnosno na izmjerenu udaljenost između prijamnika i korisnika [119, 139, 123]. Brzina prostiranja signala funkcija je medija kroz koji satelitski signal prolazi te se može izraziti indeksom loma. Indeks loma predstavlja odnos brzine širenja signala u zrakopraznom prostoru i brzine širenja unutar medija [28, 84, 123]:

$$n = \frac{c}{v}, \tag{2.3}$$

gdje su:

n...indeks loma, c...brzina širenja elektromagnetskih valova u zrakopraznom prostoru, v...brzina širenja elektromagnetskih valova unutar medija.

2.3 Opis satelitskih signala za određivanje položaja

Frekvencije GNSS satelitskih signala za određivanje položaja nalaze se u L pojasu frekvencijskog spektra, unutar kojeg su smješteni radijski valovi frekvencija između 1 i 2 GHz [70]. Za radijske signale u L pojasu karakteristično je da se kroz Zemljinu atmosferu šire pravocrtno [113]. Na nižim frekvencijama od L pojasa dolazi do izraženog ionosferskog kašnjenja, dok na višim frekvencijama signali postaju osjetljivi na utjecaj gradijenata neutralne atmosfere [88, 53, 113]. U ovome potpoglavlju opisani su GPS satelitski signali za određivanje položaja koji se odašilju sa svih operativnih GPS satelita. U satelitima novih generacija (tipovi *Blok IIR(M)*, *Blok IIF* te budući *Blok III*) implementirani su novi civilni i vojni signali. Novi signali bit će ukratko opisani na kraju poglavlja.

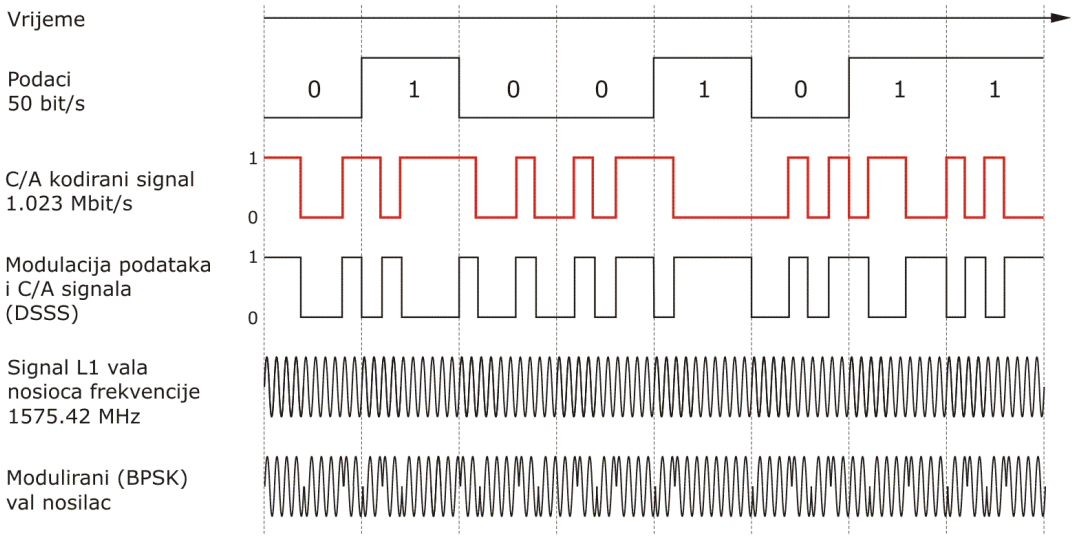
2.3.1 Struktura GPS satelitskih signala

Satelitski signal za određivanje položaja sastoji se od triju komponenata, od kojih svaka ima svoju vremensku razlučivost [119, 122]:

- val nosilac
- kodirani signal i
- navigacijska poruka.

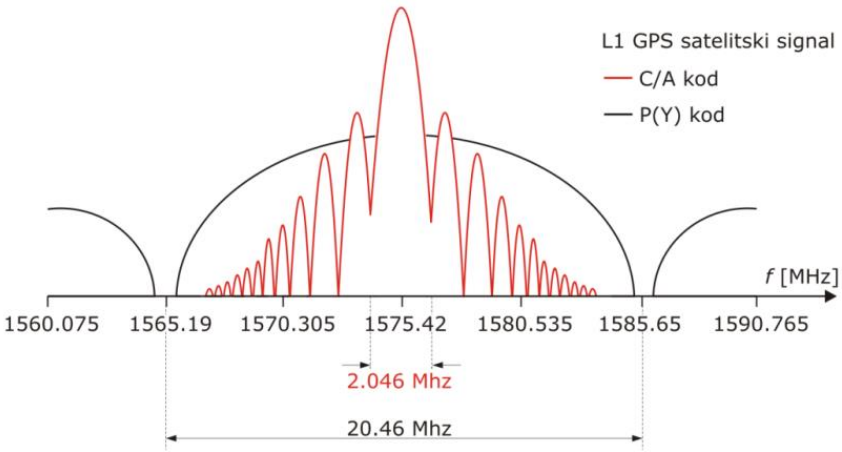
GPS sateliti odašilju signale na trima frekvencijama: 1575,42 MHz (val nosilac L1), 1227,60 MHz (val nosilac L2) i 1176,45 MHz (val nosilac L5) [119, 122, 123], pri čemu se L1 i L2 signali odašilju sa svih satelita. Svaka frekvencija višekratnik je osnovne frekvencije od 10,23 MHz [119, 123].

Valovi nosioci moduliraju se kodiranim signalima za određivanje položaja i navigacijskom porukom [119, 84, 123]. Korištenjem tehnike višestrukog pristupa s kodnom raspodjelom (engl. *Code Division Multiple Access* – CDMA), omogućeno je, na istim prijenosnim frekvencijama, istovremeno korištenje signala sa svih satelita [119]. Struktura L1 civilnog satelitskog signala prikazana je na slici 2.7 [84, 136].



Slika 2.7: Struktura i modulacija L1 C/A satelitskog signala za određivanje položaja

Kodiranim signalom mjeri se udaljenost između prijamnika i pojedinog satelita [84]. To je binarni niz jedinstven za svaki satelit, raspršen unutar frekvencijske domene vala nosioca primjenom tehnike raspršenog spektra s izravnim nizom (engl. *Direct Sequence Spread Spectrum* – DSSS), stoga zauzima frekvencijski pojas širi od središnje frekvencije. Raspršeni spektar GPS signala prikazan je na slici 2.8 [119, 123, 56, 136].



Slika 2.8: Raspršeni spektar GPS signala na L1 prijenosnoj frekvenciji

Na temelju prijama kodiranog signala unutar prijamnika se postupkom križne auto-korelacije identificira signal pojedinog satelita s replikom istog signala generiranog u prijamniku. Dovođenjem signala u fazu mjeri se vrijeme prostiranja signala, odnosno razlika vremena između trenutka predaje i prijama signala [119, 123].

Val nosilac GPS L1 signala moduliran je dvama CDMA kodiranim signalima, od kojih se za civilne potrebe koristi *C/A* (engl. *clear acquisition*) pseudoslučajni (engl. *pseudorandom noise* – PRN) kod. Signal je veličine 1023 bita i odašilje se svake milisekunde [119, 53]. P(Y) kodirani signal odašilje se na obje frekvencije, čime je omogućeno dvofrekvencijsko kodno mjerenje vremena širenja satelitskih signala [119, 139, 84]. U tablici 2.1 prikazana je struktura L1 i L2 GPS signala za određivanje položaja.

Tablica 2.1: Struktura GPS satelitskih signala

Osnovna frekvencija		f_0 = 10.23 Mhz
L1	Frekvencija Valna duljina	154 · f_0 = 1575,420 MHz 19,03 cm
L2	Frekvencija Valna duljina	120 · f_0 = 1227,600 MHz 24,42 cm
P kodirani signal	Frekvencija ponavljanja (eng. *chip rate*) Duljina Period (interval) ponavljanja	f_0 = 10,23 MHz (Mbit/s) 29,31 m 266 dana, 7 dana/satelit
C/A kodirani signal	Frekvencija ponavljanja (eng. *chip rate*) Duljina Period (interval) ponavljanja	f_0 /10 = 1,023 MHz (Mbit/s) 293,1 m 1 ms
Navigacijska poruka	Frekvencija Ukupna duljina trajanja	f_0 /204 600 = 50 Hz (bit/s) 12,5 min

Izvor: [139, 136]

Unutar navigacijske poruke, sa svakog se satelita odašilju sljedeći podaci [53, 119]:

- vrijeme GPS sustava i ispravke satelitskih satova (uključivo kašnjenja satelitske opreme i ispravke relativističkih učinaka)
- podaci o pretvorbi GPS vremena u koordinirano svjetsko vrijeme;
- podaci o stanju ispravnosti satelita
- procijenjeni položaj (efemeride) satelita koji odašilje poruku
- približni položaji (orbitalni parametri) ostalih satelita (almanah)
- koeficijenti modela ispravke ionosferskog kašnjenja.

Pomoću navedenih informacija određuju se elementi potrebni za određivanje pseudoudaljenosti: procijenjeni položaji satelita u trenutku odašiljanja signala, trenutak odašiljanja signala i trenutak prijama signala za satelitsko određivanje položaja [113, 139].

2.3.2 GPS satelitski signali nove generacije

Pojedini sateliti (tip *Blok IIF*) odašilju civilne signale na prijenosnoj frekvenciji od 1176.45 MHz (val nosilac L5), kojom se odašilju dva PRN kodirana signala [54, 139]. U tablici 2.2 prikazane su značajke GPS L5 civilnog signala.

Tablica 2.2: Značajke GPS L5 civilnog signala

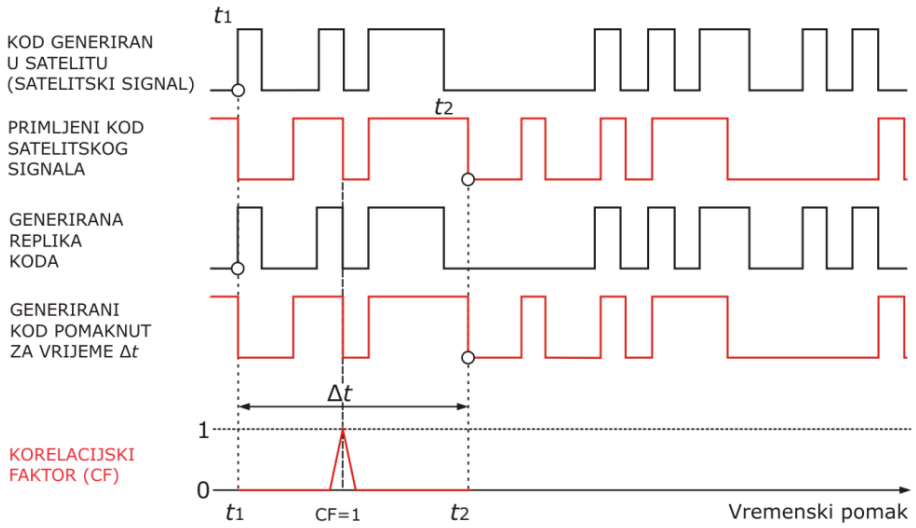
Osnovna frekvencija (MHz)	Frekvencija vala nosioca (MHz)	Valna duljina (cm)	Frekvencija ponavljanja (MHz/ Mbit/s)		Navigacijska poruka (Hz/ bit/s)	
			L5-I	L5-Q	L5-I	L5-Q
f_0 = 10,23		25,50	f_0 = 10,23		f_0 /204 600 = 50	-

Izvor: [139]

S *Blok IIR(M)* tipa satelita odašilje se novi civilni signal na GPS valu nosiocu L2 [84, 56, 33]. Do 2021. godine predviđa se odašiljanje L2C i L5 signala sa svih operativnih satelita [53, 54, 33, 56]. Osim navedenih signala, predviđa se ugradnja dodatnih civilnih i vojnih signala na svima trima prijenosnim frekvencijama [84, 56, 53, 54].

2.4 Postupak procjene položaja na temelju prijama satelitskih signala

Prijamom satelitskih signala unutar GPS prijamnika generiraju se replike kodiranih signala svih satelita. Korelacijskom funkcijom prijamnik identificira C/A PRN kodirane signale satelita čiji su signali primljeni, kako je prikazano (Slika 2.9).



Slika 2.9: Postupak korelacije primljenog (satelitskog) i generiranog (replike) kodiranog signala te mjerenje faze (pomaka) kodnog zapisa

Identifikacijom satelita na temelju PRN koda satelitskog signala stvara se veza (engl. *lock*) između satelita i prijamnika, nakon čega se iz signala rekonstruira navigacijska poruka [84, 119]. Na temelju podataka iz navigacijske poruke procjenjuje se položaj pojedinog satelita te se određuje trenutak odašiljanja satelitskog signala. Faza koreliranog signala u odnosu na generiranu repliku unutar prijamnika proporcionalna je vremenu širenja satelitskog signala od satelitske do korisničke antene [84, 123].

Prijamnik mjeri pseudoudaljenost između satelitske predajne i korisničke prijamne antene [119]:

$$\rho = r + c \cdot b_u + c \cdot \delta t_D, \quad (2.4)$$

pri čemu su:

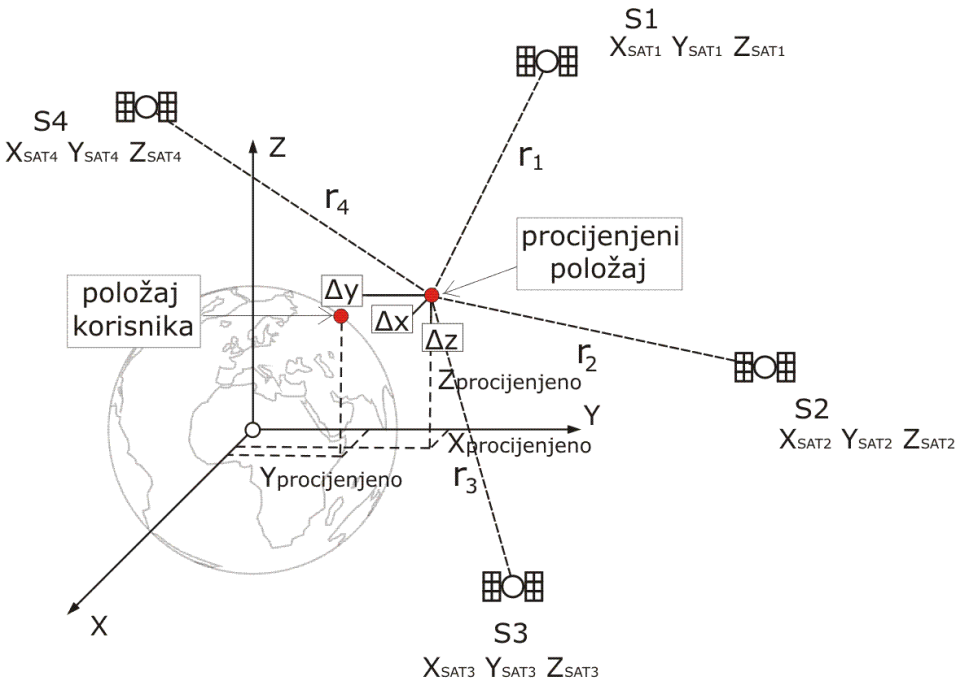
ρ... pseudoudaljenost između korisničke i satelitske antene, r... stvarna udaljenost između korisničke i satelitske antene, b_u... pogreška korisničkog sata (s), δt_D... ukupna pogreška mjerenja vremena širenja signala uslijed ostalih utjecajnih parametara (s).

Proširenjem izraza (2.4) u trodimenzionalni pravokutni sustav, dobiva se sljedeći skup jednadžbi [147, 123, 84]:

$$\rho_i = \sqrt{\left(x_u(t_u) - x_{s_i}(t_{s_i})\right)^2 + \left(y_u(t_u) - y_{s_i}(t_{s_i})\right)^2 + \left(z_u(t_u) - z_{s_i}(t_{s_i})\right)^2} + c \cdot b_u + \epsilon_{\rho_i}, \quad (2.5)$$

pri čemu su:

ρ_i... izmjerena pseudoudaljenost s i-tog satelita, x_u, y_u, z_u,... koordinate korisnika u trenutku prijama signala, t_r... trenutak prijama signala, $x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i}$ ... koordinate i-tog satelita u trenutku odašiljanja signala, t_{s_i}... trenutak odašiljanja signala, $c \cdot b_u$... pogreška korisničkog sata (m), $\epsilon_{\rho_i} = c \cdot \delta t_D$... ukupna pogreška u proračunu udaljenosti uslijed ostalih utjecajnih parametara (m).



Slika 2.10: Postupak procjene položaja satelitskim navigacijskim sustavima

Mjerenjima pseudoudaljenosti i jednom od metoda procjene položaja određuje se položaj korisnika u trima koordinatnim osima i ispravak korisničkog sata, kako je prikazano na slici 2.10 [8, 147, 84, 119].

Idealnim mjerenjem vremena širenja signala prijamnik bi izmjerio stvarne udaljenosti između prijamnika i satelita, čime bi se odredio točan položaj korisnika.

Međutim, zbog odstupanja korisničkog sata, odstupanja satelitskih satova, utjecaja prijenosnog medija na mjerenje vremena širenja signala i ostalih uzroka pogrešaka kod određenog položaja prisutna je stanovita vrijednost pogreške. Niz pojedinačnih uzroka pogreške mjerenja vremena širenja satelitskog signala definira utjecajne veličine pogreške, čineći ukupnu pogrešku određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima.

2.5 Proračun pogrešaka određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima

Ukupnu pogrešku točnosti položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima čini korisnička razdioba pogrešaka (engl. *User Equivalent Ranging Error* – UERE) i geometrijska razdioba točnosti (engl. *Geometric Dilution of Precision* – GDOP), odnosno pogreške u proračunu udaljenosti između satelita i prijamnika te pogreške uslijed prostorne raspodjele satelita čiji se signali koriste u postupku određivanja položaja. Točnost proračuna pseudoudaljenosti izravno je proporcionalna GDOP parametru, te se može izraziti kao [119, 84, 85, 139, 136]:

$$\sigma_T = \sigma_R \cdot GDOP, \tag{2.6}$$

gdje su:

σ_T... ukupna pogreška položaja, σ_R... korisnička razdioba pogrešaka, $GDOP$... geometrijska razdioba točnosti.

2.5.1 Korisnička razdioba pogrešaka

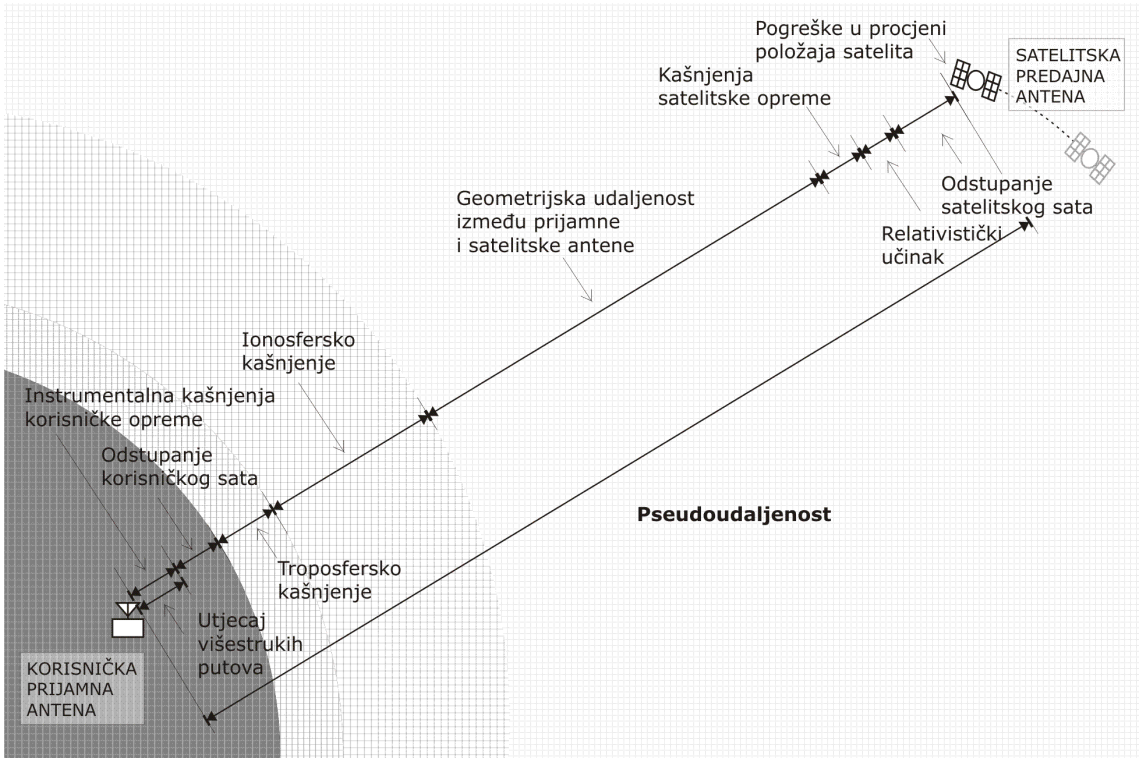
Ukupnu korisničku razdiobu pogrešaka predstavlja skup vrijednosti svih pojedinačnih uzroka koji utječu na mjerenje vremena širenja satelitskog signala između satelitske i korisničke antene [119, 84]. Pojedinačni uzroci UERE pogreške se mogu podijeliti na [136, 119, 123, 139, 84]:

- satelitsku komponentu pogreške
- korisničku komponentu i
- pogrešku uslijed širenja satelitskog signala kroz prijenosni medij.

Komponente korisničke razdiobe pogrešaka prikazane su na slici 2.11 [139, 122, 119].

Satelitsku komponentu pogreške čine pogreške u procijenjenim položajima (efemeridama) satelita, odstupanja satelitskih satova od GPS vremenskog sustava (uključujući relativistički učinak) te sklopovska kašnjenja satelitske opreme [123, 84, 67, 103]. Parametri procijenjenih ispravaka satelitskih satova odašilju se unutar navigacijske poruke satelitskog signala. U navigacijskoj poruci su također sadržani parametri procjene položaja satelita. Do pogreške dolazi uslijed razlike između predviđenih (odaslanih) satelitskih efemerida i stvarnih položaja satelita [136, 84].

Pogreška korisničke komponente sastoji se od pogreške uslijed termalnog šuma prijamnika, sklopovskih kašnjenja korisničke opreme i višestrukih putova satelitskog signala [123, 119]. Do pogreške višestrukih putova dolazi uslijed prijama signala odbijenih od okolnih objekata i prepreka [123], što utječe na korelacijsku funkciju PRN kodiranih signala [119].



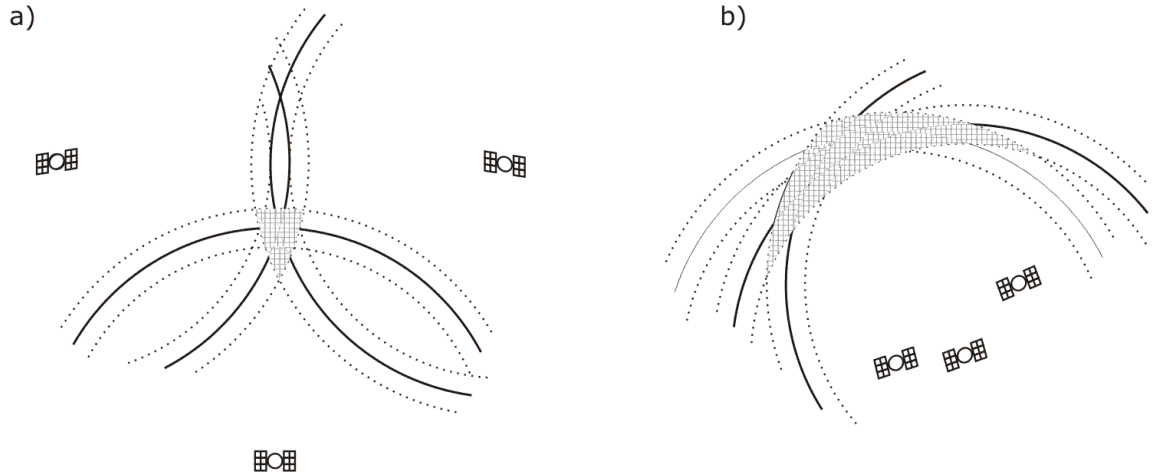
Slika 2.11: Kompozicija izmjerene pseudoudaljenosti između satelitske i korisničke antene Prikaz nije u mjerilu

Pogreška uslijed širenja satelitskog signala kroz prijenosni medij može se podijeliti na troposfersko i ionosfersko kašnjenje [89, 90, 119, 123, 84]. Do troposferskog kašnjenja dolazi zbog promjene brzine širenja signala uslijed promjena u temperaturi, tlaku i relativnoj vlažnosti neutralne atmosfere te međusobnog položaja korisničkog prijamnika i satelita [119, 139]. Meteorološki parametri definiraju troposferski indeks loma. Utjecaj troposferskog kašnjenja kod jednofrekvencijskih GPS prijamnika umanjuje se modeliranjem hidrostatske i vlažne komponente kašnjenja, pri čemu se kod hidrostatske komponente primjenjuju zakoni idealnih plinova [139]. Za vlažnu komponentu potreban je proračun meteoroloških parametara [122, 139].

Troposferski indeks loma neovisan je o frekvenciji odaslanih signala, stoga nije disperzivan [139]. Ionosfersko kašnjenje signala za određivanje položaja značajno više utječe na točnost mjerenja vremena širenja satelitskih signala. Detaljno razmatranje o ionosferskom kašnjenju prikazano je u drugoj cjelini poglavlja.

2.5.2 Geometrijska razdioba točnosti

Parametar geometrijske razdiobe točnosti (engl. *Dilution of Precision* – DOP) predstavlja omjer točnosti mjerenja pseudoudaljenosti i određivanja položaja [139, 119]. Uslijed nepovoljne prostorne raspodjele satelita koje prijamnik koristi u postupku određivanja položaja dolazi do povećanja geometrijske razdiobe točnosti [84, 119, 136], čime se povećava područje neodređenosti položaja (Slika 2.12).



Slika 2.12: Utjecaj povoljne (a) i nepovoljne (b) prostorne razdiobe satelita na područje neodređenosti položaja korisnika

Geometrijska razdioba točnosti može se rastaviti na vremensku (engl. *Time Dilution of Precision* – TDOP) i na prostorne komponente; komponentu horizontalne (engl. *Horizontal Dilution of Precision* – HDOP), sjeverne (engl. *Northing Dilution of Precision* – NDOP), istočnu (engl. *Easting Dilution of Precision* – EDOP), prostorne (engl. *Positioning Dilution of Precision* – PDOP), i vertikalne (visinske) razdiobe točnosti (engl. *Vertical Dilution of Precision* – VDOP) [119, 123]. Svaka komponenta definira odnosnu komponentu pogreške položaja i/ili mjerenja vremena satelitskim navigacijskim sustavima [119, 93].

2.5.3 Ukupni proračun pogreške određivanja položaja

Izmjerena pseudoudaljenost može se prikazati matematičkim modelom postupka određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavom [84]:

$$\rho = r + c \cdot (t_u - \delta t + \delta t_D), \tag{2.7}$$

gdje su:

ρ... pseudoudaljenost između korisničke i satelitske antene (m), r... geometrijska udaljenost između korisničke i satelitske antene (m), t_u... pogreška korisničkog sata (s), δt... odstupanje satelitskog sata (s), δt_D... ukupna pogreška mjerenja vremena uslijed ostalih utjecajnih parametara (s).

Ukupni učinak na mjerenje vremena širenja satelitskog signala sastoji se od niza pojedinačnih utjecaja [84]:

$$\delta t_D = \delta t_T + \delta t_I + \delta t_N + \delta t_M + \delta t_H, \quad (2.8)$$

pri čemu su:

δt_T... vremenski ekvivalent troposferskog kašnjenja, δt_I... vremenski ekvivalent ionosferskog kašnjenja, δt_N... kašnjenje uzrokovano šumom prijamnika, δt_M... kašnjenje uzrokovano višestrukim putovima signala, δt_H... kašnjenje nastalo unutar sklopovske opreme (instrumentalno kašnjenje).

Pogreške vremena, pomnožene s brzinom širenja poprimaju vrijednosti ekvivalentne pogreške izmjerene pseudoudaljenosti. Komponente pogreške proizašle iz učinaka djelovanja pojedinačnih utjecajnih veličina te ukupni proračun pogreške u određivanju položaja prikazani su u tablici 2.3. Svaka utjecajna veličina sastoji se od stalne i slučajne komponente.

Tablica 2.3: Ukupni proračun pogreške satelitskog određivanja položaja

Izvor pogreške	**Uzrok**	**Vrijednost pogreške, 1σ (m)**		
		Stalna	**Slučajna**	**Ukupna**
Satelitska komponenta	Satelitske efemeride	2,1	0,0	2,1
	Satelitski sat	2,0	0,7	2,1
Prijenosni medij (atmosfera)	Ionosfersko kašnjenje	4,0	0,5	4,0
	Troposfersko kašnjenje	0,5	0,5	0,7
Korisnička komponenta i mikrookoliš	Višestruki putovi	1,0	1,0	1,4
	Šum prijamnika	0,5	0,2	0,5
Korisnička razdioba pogrešaka (UERE), rms		5,1	1,4	5,3
Vertikalna pogreška 1σ uz parametar VDOP = 2,5				12,8
Horizontalna pogreška 1σ uz parametar HDOP = 2,0				10,2

Izvor: [119]

Pogreška uslijed ionosferskog kašnjenja satelitskog signala dominira nad ostalim utjecajnim veličinama, pri čemu su na ovu komponentu pogreške najosjetljiviji jednofrekvencijski GPS prijamnici, još uvijek najzastupljeniji među korisnicima.

U sljedećim potpoglavljima opisani su znanstveni problem i predmet istraživanja, odnosno značajke ionosferske dinamike i ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja.

2.6 Morfologija ionosfere i njena povezanost sa svemirskim vremenom

Atmosfere svih nebeskih tijela unutar Sunčevog sustava podložne su ionizaciji atmosferskih plinova uslijed solarnog zračenja. Na taj se način stvaraju ionosferska

područja [55]. Ionosferska ovojnica područje je Zemljine atmosfere koju čine električki pozitivno i negativno nabijene čestice – ioni plinova i slobodni elektroni [28, 119, 69]. Ove čestice nastaju uslijed procesa odvajanja (engl. *dissociation*) i ionizacije gornjih atmosferskih slojeva, uzrokovane fotonima kratkih valnih duljina [135]. Proces fotoionizacije može se prikazati sljedećim izrazom [148]:

$$a + \frac{hc}{\lambda} \rightarrow a^{+} + e^{-}, \tag{2.9}$$

gdje su:

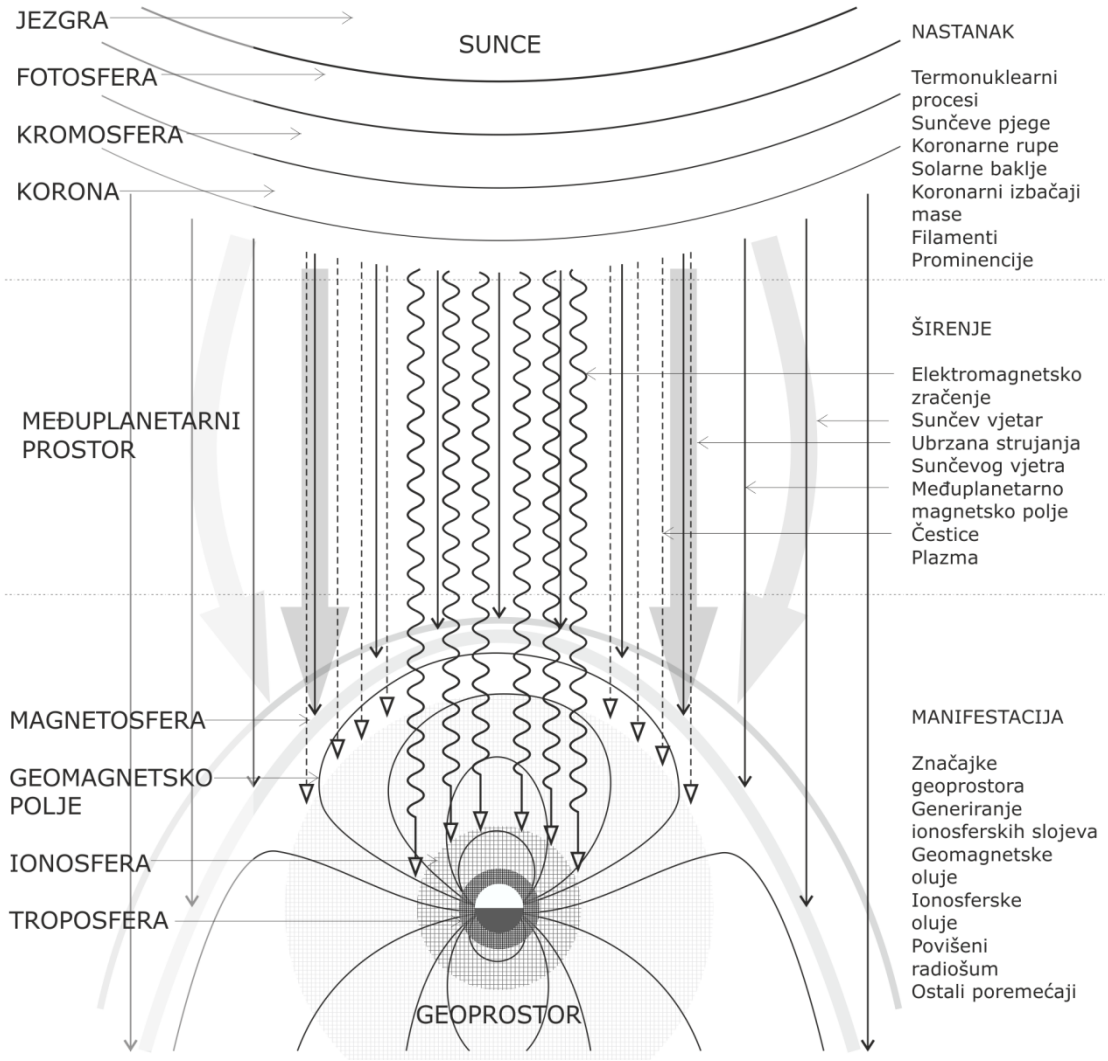
a... neutralni atom, h... Plankova konstanta, $6{,}62 \times 10^{-34}$ (Js), c... brzina svjetlosti, λ... duljina upadnog elektromagnetskog vala, a^{+}... pozitivni ion, e^{-}... slobodni elektron.

Ionosfera je tranzicijsko područje između potpuno ionizirane magnetosferske plazme (gornja granica) i Zemljine neutralne atmosfere (donja granica), što ionosferu čini nepotpuno ioniziranim medijem – manje od 1 % zraka ionizirano je čak u glavnim ionosferskim slojevima [83, 129]. Područje između magnetosfere i ionosfere naziva se plazmasfera, ili unutarnja magnetosfera. Plazmasfera je podložna Zemljinoj gravitaciji i rotira sa Zemljom [135].

2.6.1 Geoprostor

Zemljin okoliš, kojeg čine gornji slojevi Zemljine atmosfere, ionosfera i magnetosfera, naziva se *geoprostor*, sustav unutar kojeg se razvijaju pojave nastale uslijed solarne aktivnosti [99, 58]. Magnetosfera je područje u kojem se mogu opaziti dijelovi magnetskog polja Zemlje, a oblikovano je interakcijom Sunčevog vjetra, međuplanetarnog magnetskog polja i geomagnetskog polja. Magnetosfera predstavlja vanjsku granicu geoprostora [55, 83, 99, 30].

Promjene u ionosferskoj strukturi i ionosferskoj dinamici posljedica su atmosferskih i ionosferskih pojava [99], koje su rezultat dinamike svemirskog vremena [55, 99, 52]. Svemirsko vrijeme može se definirati kao skup fizikalnih i kemijskih pojava vezanih za transfer energije i materije u okolišu Sunce-Zemlja, s mogućim utjecajima na zemaljske i satelitske tehnološke i ostale sustave [52, 119, 49]. Pojave svemirskog vremena manifestiraju se kao solarno zračenje različitih valnih duljina, *uobičajeno* i *brzo* strujanje solarnog vjetra, solarne baklje (engl. *solar flares*) i koronarno izbacivanje mase (engl. *Coronal Mass Ejections* – CME), odnosno vruće plazme, međuplanetarnog magnetskog polja i energetskih čestica [52, 83, 99, 134]. Navedene pojave, uz pripadajuće pokazatelje Sunčeve aktivnosti određuju *uvjete svemirskog vremena*. Na slici 2.13 prikazan je pojednostavljeni tijek nastanka pojava i učinaka svemirskog vremena [69, 134, 99, 28].



Slika 2.13: Pojednostavljeni prikaz pojava svemirskog vremena

Slika prikazuje pojave nastale na Suncu, koje se u različitim oblicima šire kroz međuplanetarni prostor (okoliš Sunce-Zemlja) te dolaskom u blizinu Zemlje stupaju u interakciju s geoprostorom i Zemljinom ionosferom.

2.6.2 Razumijevanje ionosferskih procesa

S fizikalnog stajališta, ionosfera i gornja atmosfera (termosfera) čine jedan integrirani sustav [83, 55]: procesi koji se odvijaju unutar atmosfere uzrokuju stvaranje ionosferskih područja, ili slojeva. Izvori ionizacije su solarno zračenje, ionizirane čestice solarnog vjetra, energetski nabijene čestice nastale utjecajem sunčevog vjetra i/ili magnetosferski induciranim električnim poljima [55]. Ionosferski profil ovisi o dobu dana, godišnjem dobu, području (geomagnetskoj širini), Sunčevom ciklusu i Sunčevoj aktivnosti [52, 44, 85, 99]. Najznačajniji proces ionizacije i dovođenja energije u ionosferu je fotoionizacija [129, 55].

Osim solarnog ultraljubičastog i ekstremnog ultraljubičastog (engl. *Ultraviolet/Extreme Ultraviolet* – UV/EUV) zračenja, na ionosfersku dinamiku, raspodjelu slobodnih elektrona i njihovu gustoću utječu promjene u stanjima okoliša

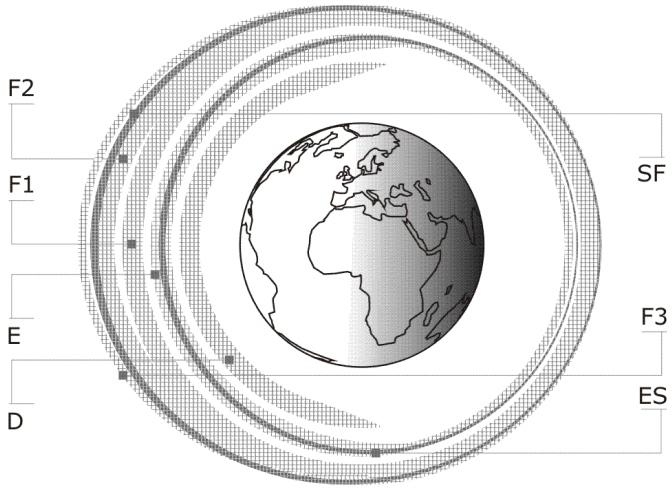
Sunce-Zemlja [99, 15, 123], što se odražava u lokalnim ionosferskim poremećajima i nakupinama ionosferske plazme.

2.6.3 Morfologija ionosfere

Područje ionosfere proteže se na visinama 50 – 2000 km iznad Zemljine površine [28, 69, 119]. Ionosferska područja nastaju uslijed solarnog zračenja različitih valnih duljina, različite raspodjele atmosferskih čestica te različitih ionizacijskih i fotokemijskih procesa koji prevladavaju na određenim visinama iznad Zemljine površine [20, 28, 58, 12]. *Energetsko* solarno (X) zračenje prodire do nižih visina, dok UV zračenje ionizira više slojeve [119, 55]. UV i EUV zračenje glavni su uzrok formiranja ionosfere [119, 55, 69]. Tijekom dnevnih sati ionosferu čine sljedeći slojevi [119, 69, 28]:

- D sloj, na visini 50 – 90 km
- E sloj, na visini 90 – 140 km
- F1 sloj, na visini 140 – 210 km i
- F2 sloj, na visini 210 – 1000 km.

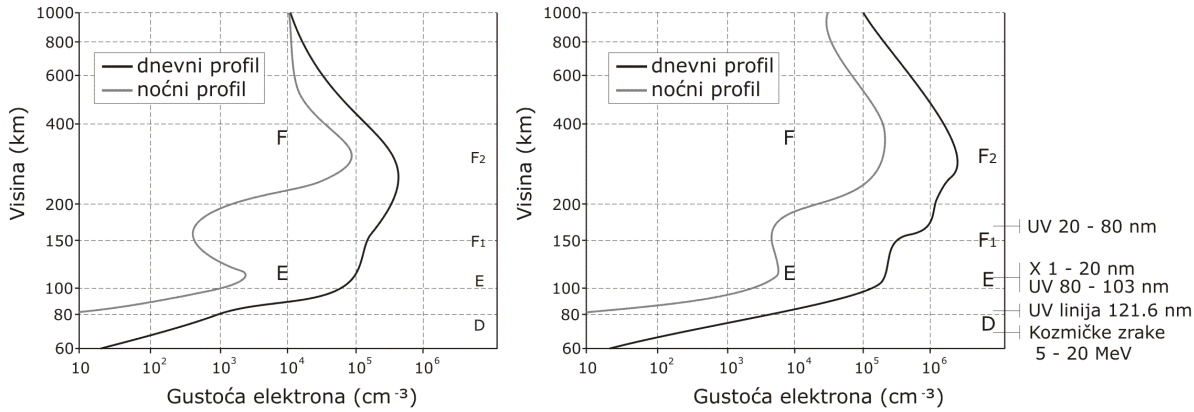
Na noćnoj strani Zemlje ionosferu čine E i F2 slojevi [119, 55, 69], *prorijeđeni* uslijed nepostojanja izravnog solarnog zračenja [58, 135].



Slika 2.14: Prikaz ionosferskih slojeva u odnosu na međusobni položaj Sunca i Zemlje

Osim nazivnih slojeva, unutar ionosfere pojavljuju se *sporadični* i *posredni E slojevi* (E_S) na visinama E sloja koje uglavnom čine metalni ioni nastali uslijed raspada meteora [55, 135]. F3 sloj formira se na visinama iznad 500 km, dok se ekvatorijalni prošireni SF sloj (engl. *Spread F* – SF) formira unutar F2 sloja kao posljedica difuzije F područja [148, 135, 69]. Na slici 2.14 prikazani su ionosferski slojevi tijekom noćnih i dnevnih sati prema [123, 69, 135, 58]. F2 sloj karakterizira najveća koncentracija i promjenjivost raspodjele slobodnih elektrona [119] te najznačajnije utječe na širenje satelitskih signala za određivanje položaja (uz F1 sloj u znatno manjoj mjeri) [119]. Iznad 1000 km započinje područje protonosfere koju uglavnom sačinjava ionizirani vodik, i u manjoj mjeri plinoviti helij. Protonosfera se proteže približno do visina na kojima se nalaze GPS sateliti [119].

Na slici 2.15 prikazan je vertikalni profil ionosfere srednjih geografskih širina u vremenima niske i visoke Sunčeve aktivnosti. Prikazani su osnovni ionosferski slojevi i uzroci njihovog nastanka [69, 58, 129].



Slika 2.15: Tipični vertikalni profil gustoće elektrona u ionosferi srednjih širina za vrijeme niske (lijevo) i visoke (desno) Sunčeve aktivnosti

Vertikalni ionosferski profil pokazuje slojevitu strukturu ionosfere, s jasno izraženim D, E, F1 i F2 slojevima [135]. Na nižim visinama, do ionizacije dolazi uslijed solarnog zračenja visokih energija, s vršnim vrijednostima ionizacije prisutnima na visinama najveće atmosferske apsorpcije valova kraćih valnih duljina [55, 83]. Na ovaj način nastaju D i E ionosferski sloj koje karakterizira fotokemijska ravnoteža iona i atmosfere. To je slučaj i kod F1 sloja, gdje se atomski ioni pojavljuju kao neutralne molekularne vrste [55].

2.6.3.1 Fizikalna aeronomija ionosferskog sustava

Ioni i elektroni teže k rekombinaciji i reakciji s plinovima čime se stvaraju novi ioni, što utječe na raspodjelu gustoće slobodnih elektrona [58]. Stopa promjene gustoće elektrona ovisi o brzini procesa stvaranja i gubitka elektrona te se može izraziti jednadžbom kontinuiteta [58, 28, 129]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q - L - \nabla(Nv), \tag{2.10}$$

gdje su:

q... stopa stvaranja elektrona, L... stopa gubitka elektrona uslijed procesa rekombinacije, $\nabla(Nv)$... gubitak elektrona uslijed prijenosa.

U D, E i F1 sloju, proces prijenosa elektrona $\nabla(Nv)$ uglavnom je zanemariv, pri čemu vrijedi $q \sim L$ [58]. Izraz L može se pojednostavljeno zapisati [129]:

za E sloj: $L(N) = \alpha_L N^2$

za F1 sloj: $L(N) = \beta_L N$,

pri čemu su α_L i β_L kvadratni, odnosno linearni koeficijent gubitka.

Stvaranje E i F sloja može se aproksimirati Chapmanovom funkcijom ionizacije [24, 58, 28, 129]. Stopa stvaranja ionskih-elektronskih parova u nekom atmosferskom području umnožak je četiriju elemenata [69]:

$$q = \eta\sigma nI, \tag{2.11}$$

gdje je I... intenzitet ionizirajućeg zračenja, n... koncentracija atoma ili molekula podložnih I zračenju.

Kako bi moglo doći do ionizacije, čestica prvo mora apsorbirati zračenje, količina čega se izražava apsorpcijskim presjekom σ. Prilikom zračenja u ionizacijskom procesu ne sudjeluje cjelokupna energija. To se izražava ionizacijskom učinkovitošću η, koja predstavlja dio apsorbiranog zračenja koje stvara ionizaciju [69]. Chapmanovom funkcijom [24, 28, 69, 148]:

$$q = q_{m0}\exp(1 - z - \sec\chi e^{-z}) \tag{2.12}$$

opisano je stvaranje ioniziranog sloja, pri čemu su:

z... reducirana visina neutralnog plina, χ... zenitni kut Sunca, q_{m0}... stopa stvaranja pri $\chi = 0^0$.

Područja iznad F1 sloja nisu u stanju fotokemijske ravnoteže [55]. Atmosfera F područja nije dovoljno gusta da bi spriječila vertikalno širenje ionizacije koja utječe na strukturu sloja [55], te gravitacijski utjecaj zaslužan za razlaganje (disociranje) čestica [129, 58]. Za razliku od (2.10), unutar F2 sloja dominira proces prijenosa [58, 148]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -(N\boldsymbol{v}), \tag{2.13}$$

gdje je $\boldsymbol{v}$... brzina pomaka plazme.

Kako je proces gubitka zanemariv, F2 sloj područje je najveće gustoće ionosferskih slobodnih elektrona [129]. Prijenos iona i elektrona razlog je postojanja F2 sloja tijekom noćnih sati, pri čemu glavnu ulogu ima vertikalni pomak ionosferske plazme [58, 135, 129]. Stoga se izraz (2.13) može zapisati kao [58, 69, 20]:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\partial(Nw)}{\partial h}, \tag{2.14}$$

odnosno

$$w = -\frac{D}{N}\cdot\frac{\partial N}{\partial h} \tag{2.15}$$

s pretpostavkom da vertikalni pomak nastaje uslijed difuzije (širenja), gdje je

$$D = \frac{kT}{m\boldsymbol{\nu_c}}, \tag{2.16}$$

pri čemu su:

w... brzina vertikalnog pomaka/gibanja, h... visina, D... koeficijent difuzije, k... Boltzmannova konstanta, T... temperatura, m... masa čestice, $\boldsymbol{\nu_c}$... sudarna frekvencija.

U tablici 2.4 prikazane su dnevne značajke ionosferskih slojeva.

Tablica 2.4: Procijenjena gustoća slobodnih elektrona unutar ionosferskih slojeva

Ionosferski sloj	**Gustoća elektrona**
D sloj	$10^8 - 10^{10}$ m^{-3}
E sloj	nekoliko 10^{11} m^{-3}
F1 sloj	nekoliko 10^{11} m^{-3} do 10^{12} m^{-3}
F2 sloj	nekoliko 10^{12} m^{-3}

Izvor: [69]

Poradi svojih značajki, F2 nastupa kao glavni utjecajni sloj pri širenju signala za satelitsko određivanje položaja [119, 148, 13]. Kompleksnost sloja može se promatrati u kontekstu kemijskih promjena, dnevnog zagrijavanja i hlađenja, neutralnih vjetrova i induciranih električnih polja [148, 90, 15, 104]. Kod potonjih, struktura i dinamika gornje atmosfere stvara elektrodinamičke pomake u F sloju, što može značajno utjecati na vertikalnu raspodjelu ionizacije [148, 135].

2.6.3.2 Kemijska aeronomija ionosferskog sustava

Ionosfera nastaje ionizacijom atmosferskih plinova, pretežno *N_2, O_2 i O* [58, 129]. Svaki se ionosferski sloj može promatrati ovisno o prevladavajućem kemijskom procesu [129]:

I. *Stvaranje,* odnosno ionizacija dominantnih plinova:

$$O + h\nu \rightarrow O^+ + e^- \tag{2.17}$$

$$N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e^-, \tag{2.18}$$

II. *Prijenos naboja* prilikom sudara iona s neutralnim molekulama:

$$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O \tag{2.19}$$

$$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N \tag{2.20}$$

$$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N, \tag{2.21}$$

III. *Rekombinacija* s elektronima i razlaganje:

$$NO^+ + e^- \rightarrow N + O \tag{2.22}$$

$$O_2^+ + e^- \rightarrow O + O \quad (2.23)$$

$$N_2^+ + e^- \rightarrow N + N. \quad (2.24)$$

U D području, negativni ioni brojniji su od elektrona. Većina pozitivnih i negativnih iona veže se za molekule vode i formira se u složene nakupine [129]. E sloj karakteriziraju pretežito molekularni ioni NO^+ i O_2^+, uz postojanje metalnih iona Fe^+, Mg^+ i Ca^+, koji su glavna sastavnica sporadičnog E sloja srednjih širina [129, 135, 55]. Unutar F1 sloja prevladavaju NO^+ i O_2^+, dok u F2 sloju prevladava O^+ [129, 29]. Kisik se na visinama F2 sloja uslijed UV zračenja razlaže u atome. Uslijed gravitacije, na ovim visinama dolazi do difuznog razdvajanja plinova. Atomski kisik progresivno postaje obilniji od molekularnog kisika i dušika [129]. Iznad sloja F1 povećava se gustoća elektrona, što se objašnjava bržom stopom smanjenja koeficijenta gubitka β_L (ovisnog o koncentraciji N_2 i O_2) s visinom, nego što je stopa stvaranja q (proporcionalna koncentraciji O).

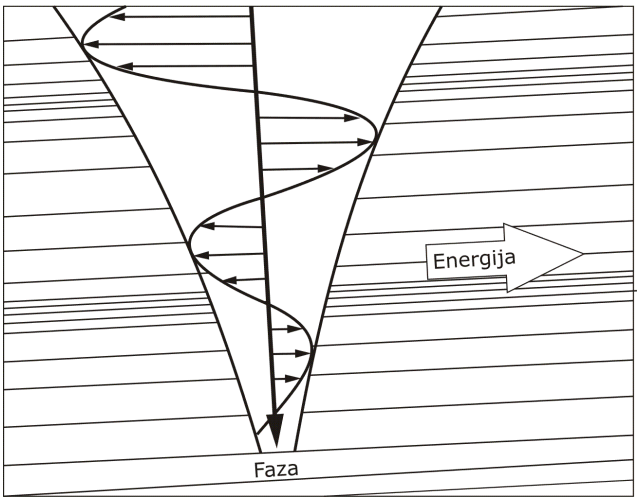
2.6.3.3 Atmosferski vjetrovi, gravitacijski valovi i putujući ionosferski poremećaji

Sunčevo zračenje zagrijava neutralni zrak, uzrokujući vodoravna kretanja masa zraka (vjetrove) koji, u kombinaciji s gravitacijskim silama Sunca i Mjeseca pokreću dinamiku ionosferskih slojeva [69, 129]. Atmosferski vjetrovi nastaju uslijed razlika u temperaturi dnevne i noćne ionosfere, te kao rezultat (solarnih, auroralnih i međuplanetarnih) energijskih unosa [148]. Uslijed temperaturnih promjena dolazi do vodoravnih tlačnih gradijenata [135, 129]. Zajedno s vertikalnim gibanjima, vjetrovi pokreću globalno kruženje energije i ionosfersku plazmu od izvora prema drugim širinama oko Zemlje, duž silnica geomagnetskog polja [129].

Putujući ionosferski poremećaji (engl. *Travelling Ionospheric Distu*rbances – TID) valovite su oscilacije ionosferske plazme i gustoće elektrona u F području [148, 140] s dnevnim, sezonskim i cikličkim (solarnim) varijacijama [148, 129, 110]. Dijele se na [148, 135]:

- Poremećaje velikih razmjera, s periodama 1 – 3 sata, vodoravne valne duljine 1 000 – 4000 kilometara te brzine veće od 300 m/s i
- Poremećaje umjerenih razmjera, s periodama manjim od 10 minuta, valnim duljinama do 300 kilometara te brzinama od 50 – 300 m/s.

Putujući ionosferski poremećaji manifestacija su atmosferskih gravitacijskih valova (engl. *Atmospheric Gravity Waves* – AGW) [129, 148]. Gravitacijski valovi posljedica su sila uzgona u atmosferi [129, 135], pri čemu umjereni putujući ionosferski poremećaji, u kombinaciji s atmosferskim vjetrovima i Sunčevim *terminatorom* (granična crta koja dijeli osvijetljenu od tamne strane – u ovom slučaju – Zemlje) nastupaju kao posljedica vodoravnih gibanja gravitacijskih valova na ionosferskim visinama [148, 66]. Atmosferski gravitacijski valovi i putujući ionosferski poremećaji promatraju se kao dvije manifestacije istog procesa [135]. Uz glavnu vodoravnu komponentu širenja, brzina faze gravitacijskih valova sadrži vertikalnu komponentu (prema dolje), dok komponenta valne grupe i širenje energije pokazuju vertikalnu komponentu prema gore [129, 135, 66, 67] (Slika 2.16).



Slika 2.16: Shematski dijagram značajki širenja gravitacijskih valova
Strelicama je prikazana promjena brzine širenja s visinom, dok blago nakošene linije prikazuju promjene u gustoći. Prikazan je smjer kretanja valne grupe (energija) te fazne brzine gravitacijskih valova

Za putujuće ionosferske poremećaje velikih razmjera vjeruje se kako nastaju u auroralnim područjima [135, 148]. Šireći se prema ekvatoru u obliku nizova (engl. *trains*), tijekom prolaska utječu na promjene visine ionosferskih slojeva [148], odnosno gustoće ionosferskih elektrona [98, 109, 12].

2.7 Ukupni sadržaj elektrona

Ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja posljedica je ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u ionosferi (engl. *Total Electron Content* – TEC) [119, 88, 90]. Ukupni sadržaj elektrona definira se kao integrirani broj slobodnih elektrona unutar vertikalnog stupca presjeka 1 m^2 na putu satelitskog signala između satelitske i korisničke antene [119, 89, 87, 88]:

$$TEC = \int N(h)dh, \tag{2.25}$$

gdje su:

N... gustoća ionosferskih elektrona u vertikalnom ionosferskom profilu, h... visina iznad Zemljine površine.

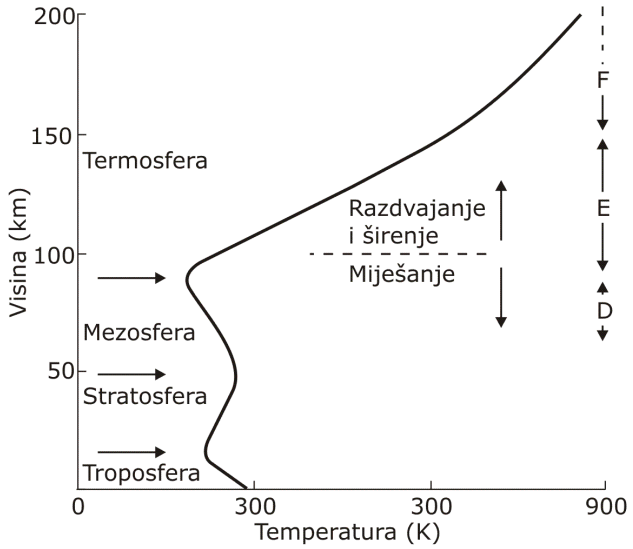
Ukupni sadržaj slobodnih elektrona izražava se u TEC jedinicama (engl. *Total Electron Content Unit* – TECU), pri čemu 1 TECU = 10^{16} elektrona/ m^2 [123, 119, 89].

2.7.1 Ovisnost i promjenjivost ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u ionosferi

Procesi stvaranja, gubitka i prijenosa slobodnih elektrona unutar ionosfere mijenjaju se tijekom višestrukih vremenskih raspona (engl. *timescales*), od minuta (npr. uslijed solarnih erupcija) do više godina (u ovisnosti o Sunčevoj aktivnosti tijekom

solarnog ciklusa) [109]. Utjecaj ukupnog sadržaja elektrona na ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja očituje se ne samo količinom ukupnog sadržaja elektrona, već i njihovom prostornom i vremenskom raspodjelom i dinamikom [90, 88]. Smatra se da se, u mirnim uvjetima, najveća koncentracija slobodnih elektrona nalazi na visinama između 250 i 400 km iznad Zemljine površine, od čega 2/3 ukupnog sadržaja elektrona dolazi iz područja iznad visine vršne vrijednosti gustoće F2 sloja [109, 119]. To se objašnjava kao posljedica manje koncentracije stabilnih čestica na F2 visinama i nepostojanja dinamičke ravnoteže između pozitivnih i negativnih čestica [69, 55]. Dugoročno, Sunčevo UV zračenje nastupa kao glavni pokretač dinamike ukupnog sadržaja elektrona, pri čemu se pod pojmom *dinamika ukupnog sadržaja slobodnih elektrona* podrazumijeva raspodjela, kretanje, stvaranje, gubitak i općenito *ponašanje* ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi [90].

Dnevni hod ukupnog sadržaja elektrona ovisan je o Sunčevom zračenju i solarnom zenitnom kutu [119, 88], zbog čega je vrijednost ukupnog sadržaja elektrona povećana tijekom dnevnih sati. Najveće godišnje vrijednosti pojavljuju se tijekom ravnodnevnica, kada Sunčeve zrake obasjavaju Zemlju pod pravim kutom, što uzrokuje dodatno zagrijavanje Zemljine neutralne atmosfere i povećanu stopu gubitka molekularnih vrsta (Slika 2.17) [90, 129].



Slika 2.17: Vertikalni temperaturni profil Zemljinih slojeva neutralne atmosfere, uz prikaz donjih ionosferskih slojeva

Dinamika ukupnog sadržaja elektrona ovisna je o tijeku Sunčevog ciklusa, čije je trajanje definirano razdobljem od približno 11 godina, karakterizirano najmanjom (Sunčevim minimumom) i najvećom (maksimumom) razinom Sunčeve aktivnosti [135, 52]. Dinamika ukupnog sadržaja slobodnih elektrona izravno je podložna poremećajima uslijed ekstremnih dovođenja energije u ionosferu, kao što su geoefektivna sprega Sunčevog vjetra i magnetosfere, odnosno ionosferskih i geomagnetskih oluja [55, 99]. Geofizički učinci uključuju različite utjecajne pojave na raspodjelu ukupnog sadržaja slobodnih elektrona na globalnoj razini i pobude Zemljine ionosfere [109, 90, 88, 129]:

- promjene kemijskog sastava na ionosferskim visinama
- promjenjivost neutralnih vjetrova
- dnevne promjene električnih polja koje pokreću ionizirajuće procese duž silnica geomagnetskog polja i
- toplinske unose u područjima visokih širina uzrokovane magnetskim olujama.

2.7.2 Ovisnost ukupnog sadržaja elektrona o položaju korisnika

Ionosfera se, ovisno o položaju korisnika može podijeliti na:

- ionosferu niskih geografskih širina
- ionosferu srednjih geografskih širina i
- ionosferu visokih geografskih širina.

U ionosferi *srednjih geografskih širina* (područje 20^0 - 60^0 sjeverne i južne geomagnetske širine) ionosferu tvore energetska solarna (UV i X) zračenja (nastanak ionizacije) te pojave kemijske rekombinacije (nestanak ionizacije) neutralne atmosfere i ioniziranih područja [148, 135]. Ravnoteža između stvaranja i gubitka čestica podložna je utjecaju neutralnih vjetrova, koji ionizaciju prenose duž silnica geomagnetskog polja prema nižim i višim geografskim širinama [69]. Ionosfera srednjih širina povezana je s plazmasferom i manje je osjetljiva na vanjske utjecaje [135, 69].

U područjima niskih i visokih geografskih širina dolazi do dodatnih pojava osim prethodno opisanih [135, 83]. U ionosferi *niskih geografskih širina* (područje od 0^0 do 20^0 sjeverne i južne geomagnetske širine) Sunce je blisko zenitnom kutu te je kod geomagnetskog polja najizraženija vodoravna komponenta [135, 148, 129]. Zbog toga dolazi do vertikalnih pomaka ionizacije u ionosferskom F području (engl. *drifts*) te, u E području, ekvatorijalnog mlaza inducirane električne struje (engl. *equatorial electrojet*) [148, 135]. Ovaj pomak uzrokuje nepravilnosti u gustoći elektrona, koja je najmanja blizu geomagnetskog ekvatora (Ekvatorijalna anomalija ionizacije (engl. *Equatorial Ionization Anomaly* – EIA)), s vršnim vrijednostima na približno $\pm$15-20^0 geomagnetskih širina [6, 129, 148, 135]. Kako je kretanje ionosferske plazme ograničeno magnetskim silnicama, anomalija se, pogonjena atmosferskim neutralnim vjetrovima kreće prema polovima te u kružnom procesu, od polova nazad prema ekvatoru [109, 148, 129]. Pri tome se gustoća elektrona protokom prema polovima povećava, dok se pomakom prema ekvatoru smanjuje [29, 7].

Ionosfera *visokih geografskih širina* (područja od 60^0 do 90^0 sjeverne i južne geomagnetske širine) silnicama geomagnetskog polja povezana je s vanjskim dijelom magnetosfere [83], što ju čini izravno podložnom utjecaju Sunčevog vjetra i međuplanetarnog magnetskog polja (engl. *Inperplanetary Magnetic Field* – IMF) [135, 69, 99]. Jačina unosa P_m (engl. *power input*) energije u magnetosferu može se opisati prema [138]:

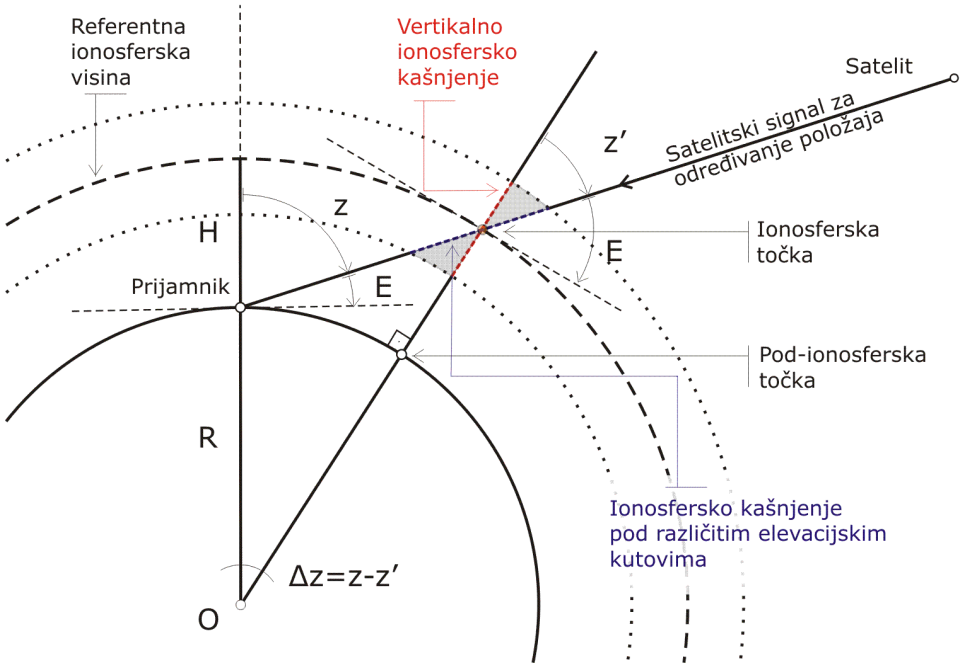
$$P_m = (1.8572 \times 10^{-17})\langle M_E\rangle^{0.67}\langle N_{SW}\rangle^{0.32}\langle v_{SW}\rangle^{1.63}\langle B_{SW}\rangle^{0.70}\,\langle \sin^4\left(\frac{\theta_{SW}}{2}\right)\rangle, \qquad (2.26)$$

gdje su:

M_E... magnetski moment Zemlje (Tm^3), N_{SW}... koncentracija Sunčevog vjetra (m^{-3}), v_{SW}... brzina Sunčevog vjetra (kms^{-1}), B_{SW}... jakost međuplanetarnog magnetskog polja (nT), θ_{SW}... kut između međuplanetarnog magnetskog polja i sjevernog smjera geomagnetskog polja unutar GSM (engl. *Geocentric-Solar-Magnetospheric* – GSM) referentnog okvira.

2.7.3 Ovisnost ukupnog sadržaja elektrona o upadnom kutu signala za satelitsko određivanje položaja

Najmanje vrijednosti ionosferskog kašnjenja satelitskog signala prisutne su kada se satelit nalazi u zenitu korisnika ($\chi = 0^0$, odnosno $\chi = \pi/2$ rad), zbog najkraćeg puta širenja signala kroz ionizirani medij [139, 123, 132, 89]. Porastom zenitnog kuta dolazi do povećane vrijednosti ionosferskog kašnjenja duljinom puta signala između korisničke i prijamne antene u odnosu na vertikalni ionosferski profil korisnika, kako je prikazano na slici 2.18.



Slika 2.18: Ovisnost ukupnog sadržaja elektrona o međusobnom položaju satelitske i korisničke antene – putu signala za satelitsko određivanje položaja

Na ovaj su način definirane dvije važne veličine [89, 102, 103, 139, 123, 148]:

i) Ukupni sadržaj elektrona pri različitim elevacijskim kutovima prijama signala ($\chi \neq 0^0$) (engl. *Slant Total Electron Content* – STEC):

$$STEC = \int N(s)ds, \tag{2.27}$$

pri čemu je N... gustoća ionosferskih elektrona duljinom puta signala s;

ii) vertikalna vrijednost ukupnog sadržaja elektrona ($\chi = 0^0$) (engl. *Vertical Total Electron Content* – VTEC), pri čemu vrijedi odnos [148]:

$$N(s)ds = N(h)\sec\chi_s dh\,, \tag{2.28}$$

gdje je χ_s... zenitni kut smjera signala na referentnoj ionosferskoj visini (u ionosferskoj točki).

Kako bi se omogućila usporedba različitih mjernih rezultata pri proračunu ukupnog sadržaja elektrona, opažene vrijednosti svode se na referentne vertikalne vrijednosti upotrebom funkcije preslikavanja $M_{TEC(z)}$ (engl. *mapping function*) [96, 123, 121]:

$$M_{TEC(z)} = \frac{STEC}{VTEC}, \tag{2.29}$$

pri čemu su:

$STEC$... vrijednost ukupnog sadržaja elektrona pri ($\chi \neq 0^0$), $VTEC$... vertikalna vrijednost ukupnog sadržaja elektrona.

Pri proračunu ukupnog vertikalnog sadržaja elektrona pretpostavlja se da je vrijednost ukupnog sadržaja elektrona sadržana u infinitezimalno tankom sloju iznad Zemljine površine na odabranoj referentnoj ionosferskoj visini.

2.7.4 Ionosferski učinci na satelitske navigacijske sustave

Učinci ionosfere i svemirskog vremena odražavaju se na niz navigacijskih i ne-navigacijskih sustava. U nastavku su opisani poznati utjecaji ionosferske dinamike na rad i usluge koje pružaju satelitski navigacijski sustavi.

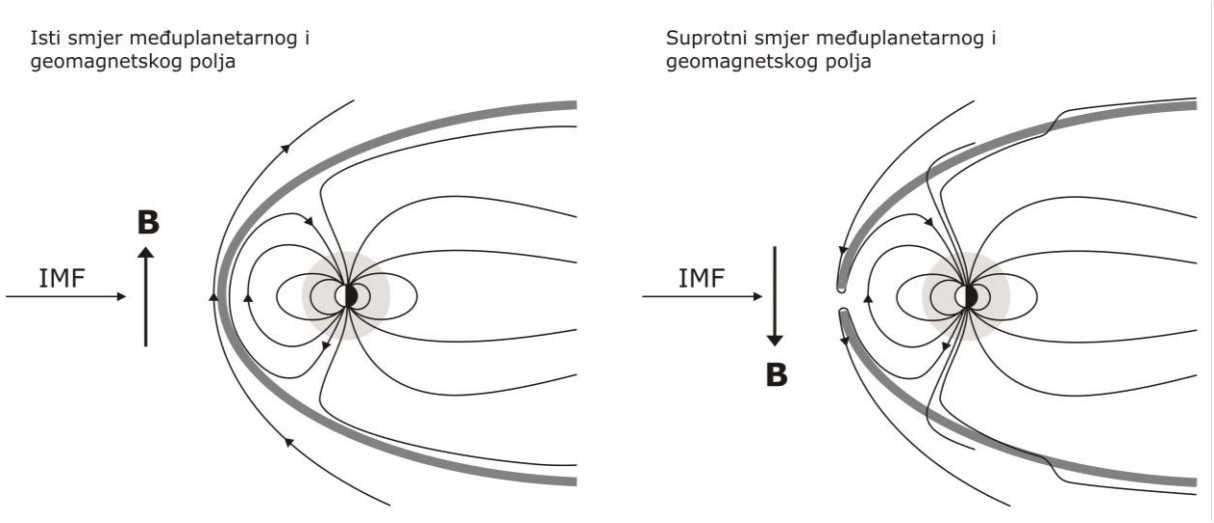
2.7.4.1 Pobude ionosfere na poremećaje svemirskog vremena

Prema [34], u područjima srednjih širina, u mirnim uvjetima promjenjivost ionosferskog kašnjenja dostiže 8 cm/min, dok su u drugim područjima zabilježene promjene i do 65 cm/min. Tijekom ionosferskih poremećaja, promjena ionosferskog kašnjenja može doseći vrijednosti do 3m/min [34, 84]. Ukupni sadržaj slobodnih ionosferskih elektrona može prouzročiti pogrešku mjerenja vremena širenja signala za određivanje položaja za više od 100 ns (>30 m) [92, 86, 90]. Promjene u strukturi ionosferskih slojeva mogu se prikazati kao promjene u raspodjeli ionosferske koncentracije, ukupnog sadržaja elektrona, najvećoj gustoći elektrona, visini i obliku sloja, te stupnju turbulentnosti [7, 12, 15, 99, 98]. Pojedinačni nastup ovih pojava nije isključen. Ekstremni solarni poremećaji uzrokuju visoku i naglu promjenjivost kretanja slobodnih elektrona unutar ionosferskih slojeva [99, 15, 44], pri čemu dolazi do izrazitih promjena vršnih vrijednosti visine F2 sloja [12].

Magnetosferskim unosima zagrijavaju se gornji slojevi neutralne atmosfere (termosfere), čime dolazi do ionizacije i *slabljenja* (engl. *depletion*) neutralnih slojeva. To uzrokuje uzlazna strujanja molekularnih plinova i pojačane vjetrove u smjeru *od*

auroralnih područja [7, 12, 15, 99]. Vjetrovi pomiču ionosfersku plazmu duž silnica magnetskog polja gdje su stope gubitka niže [12, 109]. Oba procesa utječu na ionosferu svih geografskih širina, što uzrokuje geomagnetske i ionosferske oluje [99]. Ionosferske oluje su reakcije ionosfere na geomagnetsku aktivnost, međutim, mogu nastupiti neovisno o magnetskim poremećajima, npr. uslijed praskova Sunčevog zračenja (engl. *Solar Radio Bursts* – SRB) [109, 99, 157].

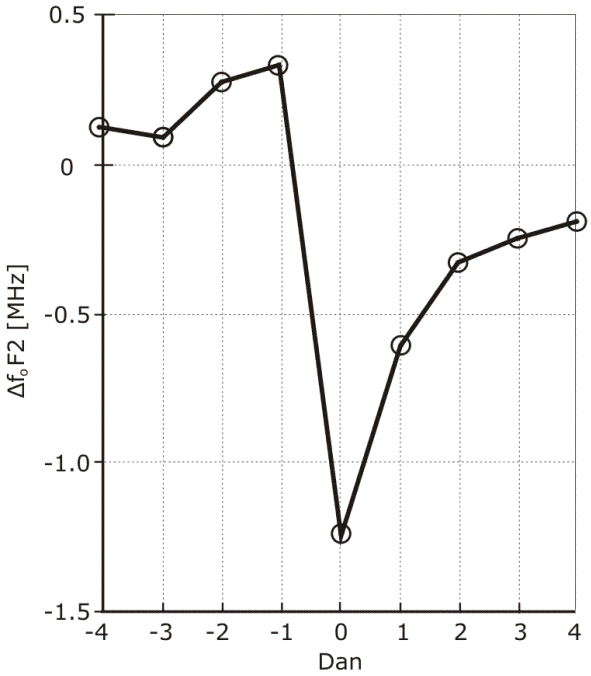
Ionosferske oluje obično se sastoje od triju faza [Liu i dr. 2010, 109]. Posljedica pomicanja ionosferske plazme je povećanje visine F2 sloja (vertikalni *drift*), ionosferske koncentracije i ukupnog sadržaja elektrona, što je znak početka nastupa *pozitivne faze oluje* [99, 98, 7, 12, 15, 67]. Geomagnetsko polje odbija većinu Sunčevog vjetra [83]. Međutim, uslijed interakcije geomagnetskog i međuplanetarnog magnetskog polja, u procesu magnetskog ponovnog spajanja (engl. *magnetic reconnection*) dio ulazne energije se oslobađa [99]. S obzirom da geomagnetsko polje pokazuje smjer sjevera u odnosu na međuplanetarno magnetsko polje, do najvećeg oslobađanja energije dolazi kod južnog smjera IMF polja, kako je prikazano na slici 2.19 [106]. Energija se pohranjuje u gornjim atmosferskim slojevima, strujama koje teku u auroralnim područjima visokih širina i unutarnjoj magnetosferi [99].



Slika 2.19: Interakcija međuplanetarnog i geomagnetskog polja kada ona pokazuju isti (lijevo) i suprotni (desno) smjer

Pojačani atmosferski vjetrovi dovode molekularne plinove iz auroralnih područja do nižih širina, što smanjuje koncentraciju i ukupni sadržaj ionosferskih elektrona. Tada nastupa glavna, *negativna faza* (Slika 2.20) [7, 12, 30, 99].

Pod određenim (ekstremnim) uvjetima može doći do potpunog nestanka F2 sloja [12], nakon čega se stvara novi sloj uz postojanu gustoću elektrona iz gornjih slojeva neutralne atmosfere, jer su gornji slojevi izloženi izravnom Sunčevom zračenju [12]. Nakon prestanka poremećaja, ukupni ionosferski sadržaj elektrona vraća se na svoje početne vrijednosti, u tzv. *fazi oporavka* [15, 98].



Slika 2.20: Superponirani dijagram opaženih promjena u kritičnoj frekvenciji sloja F2 u razdobljima ionosferskih oluja
Nulti dan je dan najvećeg pada kritične frekvencije, zabilježen u 12:00 sati po lokalnom vremenu

Poremećaji svemirskog vremena mogu se klasificirati kao geomagnetske oluje, ionosferske oluje i povišeni radiošum [157]. Ovisno o prirodi i intenzitetu događaja, ovi se učinci mogu manifestirati individualno, međutim nije rijedak slučaj da su sadržani u cjelokupnoj pojavi pojedinog događaja. Posljedice poremećaja mogu nastupiti kao povećana degradacija točnosti položaja (pogreška može poprimiti vrijednosti do više desetaka metara u vodoravnoj, odnosno preko stotinu metara u vertikalnoj ravnini), smanjenje integriteta sustava, ali i potpuni gubitak signala satelitskog određivanja položaja [99, 44, 141, 22, 3, 23]. Osim na točnost pružanih usluga, poremećaji se mogu odraziti na funkcionalnost satelitskog segmenta i korisničke opreme (elektronička i mehanička oštećenja) [99, 44, 141, 3].

2.7.4.2 Učinci ukupnog sadržaja elektrona na širenje signala za satelitsko određivanje položaja

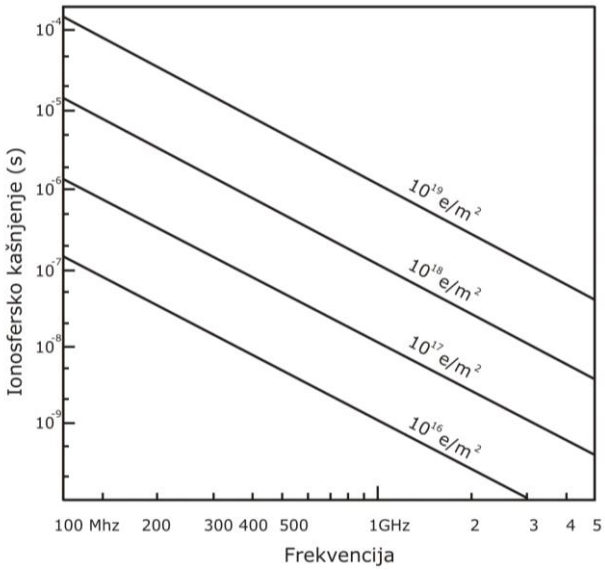
Utjecaj ukupnog sadržaja slobodnih elektrona na značajke širenja GPS L1 satelitskog signala prikazan je u tablici 2.5.

Tablica 2.5: Utjecaj ukupnog sadržaja elektrona na značajke širenja GPS L1 signala za satelitsko određivanje položaja

Parametar	**1 TECU**
Vremensko kašnjenje	0,542 ns
Ekvivalentna pogreška u proračunu udaljenosti	0,1624 m
Diferencijalna pogreška udaljenosti (L2 – L1)	0,104 m
Napredovanje vala nosioca	0,853 perioda

Izvor: [119, 139, 65]

Vremensko kašnjenje signala od 1 ns odgovara 2,85 TECU jedinica te je ekvivalentno vrijednosti 0,299792458 m pogreške u proračunu pseudoudaljnosti [119, 147, 102]. Na slici 2.21 prikazana je vrijednost ionosferskog kašnjenja u ovisnosti o radnim frekvencijama radijskih sustava, u rasponu dosad opaženih ekstrema vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona 10^{16} – 10^{19} e/m^2 [87, 88].



Slika 2.21: Prikaz ionosferskog kašnjenja naspram operativnih frekvencija tehnoloških sustava za vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona 1016 – 1019 e/m²

Glavni ionosferski učinak se manifestira kao kašnjenje valne grupe signala Δt_P za satelitsko određivanje položaja (kodiranog signala) uz ekvivalentno napredovanje faze vala nosioca (frekvencije) Δt_Φ. Ova se pojava naziva *ionosferska divergencija* (engl. *ionospheric divergence*) [119, 88, 38]:

$$\Delta t_P = \frac{40.3}{c \cdot f^2} TEC, \tag{2.30}$$

$$\Delta t_\Phi = -\frac{40.3}{c \cdot f^2} TEC, \tag{2.31}$$

pri čemu vrijedi odnos [119, 88]:

$$\Delta t_\Phi = -f \Delta t, \tag{2.32}$$

gdje su:

Δt_P... kašnjenje valne grupe (kodiranog) signala, Δt_Φ... napredovanje vala nosioca satelitskog signala, c... brzina širenja elektromagnetskih valova u zrakopraznom prostoru, f... frekvencija, TEC... ukupni sadržaj slobodnih ionosferskih elektrona.

Kako je frekvencija satelitskog signala derivacija faze po vremenu [88], uslijed promjena vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona na putu satelitskog signala kroz ionosferu dolazi

do dodatnih promjena u Dopplerovom pomaku vala nosioca, što se može prikazati kao [88, 119, 122]:

$$\Delta f = \frac{1.34 \times 10^{-7}}{f} \frac{d}{dt} TEC, \tag{2.33}$$

gdje je Δf... dodatna vrijednost u Dopplerovom pomaku (Hz).

Ova je pojava izražena uslijed ekstremnih ionosferskih poremećaja, pri čemu dolazi do naglih fluktuacija amplitude i faze radiovala (scintilacija) [88, 82, 85]. Uslijed prolaska satelitskog signala kroz ionosferu dolazi do učinka Faradayeve rotacije u polarizaciji radijskog signala [88, 119]:

$$\Omega = \frac{k}{f^2} \int B_L N dl, \tag{2.34}$$

$$TEC = \frac{\Omega f^2}{k B_L}, \tag{2.35}$$

gdje su Ω... Faradayeva rotacija (rad), B_L... jakost uzdužne komponente magnetskog polja, $k = 2.36 \times 10^{-5}$.

Osim navedenih učinaka, prilikom širenja satelitskih signala za određivanje položaja prisutno je savijanje puta radio vala i iskrivljenje valnog oblika odaslanih signala [119, 88, 82, 38]. No, temeljni učinak na širenje satelitskih signala L pojasa kojima se procjenjuje položaj korisnika, te uslijed kojeg dolazi do ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja predstavlja ionosferski indeks loma i njegove varijacije [82, 88, 119, 28]. U nastavku je opisana pojava ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja i odnos indeksa loma i ukupnog sadržaja elektrona.

2.7.5 Uzroci pojave kašnjenja satelitskog signala pri prolasku kroz ionizirani medij

U ovome je potpoglavlju opisan pojam ionosferskog indeksa loma i njegov utjecaj na širenje elektromagnetskih valova. Nadalje, opisane su značajke širenja radiovalova kroz slojeve Zemljine ionosfere te rezultirajuće ionosfersko kašnjenje kao prolaska signala kroz ionizirane slojeve.

2.7.5.1 Širenje radiovalova kroz disperzivni medij

Prelaskom između zrakopraznog prostora u atmosferski medij, signal se ne širi pravocrtno već u skladu sa Snellovim zakonom [42, 10, 5]:

$$sin\,\theta_i = n\,sin\,\theta_r, \tag{2.36}$$

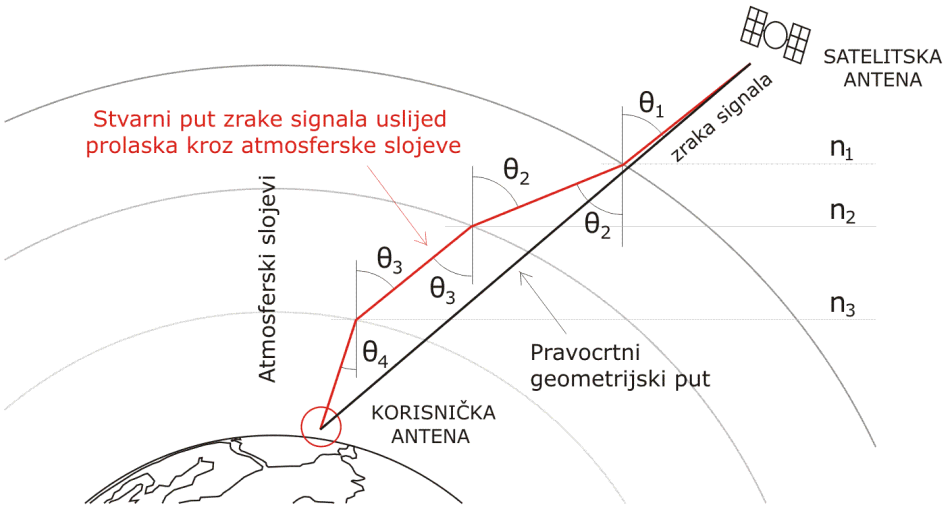
gdje su:

θ_i... kut zrake signala u zrakopraznom prostoru, θ_r... kut zrake u mediju, n... indeks loma.

Rezultirajuće kutove povezuje konstanta indeks loma n. Ako se u obzir uzme nehomogeni medij, može se zapisati [42, 139]:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 . \tag{2.37}$$

Širenje signala kroz slojeve različitih indeksa loma rezultirat će lomom zrake signala prema strani medija s višim indeksom loma, čime se povećava geometrijski put signala [42, 139, 123]. Kod širenja signala za satelitsko određivanje položaja, zraka signala se u neutralnoj atmosferi lomi prema Zemlji kao i, u manjoj mjeri, u donjim ionosferskim slojevima, dok se u gornjoj ionosferi lomi od Zemlje (Slika 2.22) [139, 123].



Slika 2.22: Prostiranje zrake signala kroz atmosferske medije različitih indeksa loma

Prema Fermatovom načelu [42], radijski signal se između dviju točaka u mediju prostire duž puta za koji je potrebno najkraće vrijeme širenja, odnosno najkraćim putem [42, 139, 123]:

$$l = \int_r^s n dl, \tag{2.38}$$

gdje su:

l... najkraća geometrijska udaljenost, n... indeks loma.

Kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja može se zapisati kao [139]:

$$\Delta = \int_r^s n dl - \int_r^s dl, \tag{2.39}$$

gdje drugi integral predstavlja rezultirajuću udaljenost između korisnika i satelita.

U ionosferi, za razliku od neutralnih slojeva Zemljine atmosfere, kutna frekvencija ω i valni broj k nisu proporcionalni [123, 69, 119, 28, 20]. Valni broj predstavlja broj valnih

ciklusa po udaljenosti, odnosno promjenu faze proporcionalnu udaljenosti [148]. Kutna frekvencija i valni broj povezani su na sljedeći način [139, 28]:

$$\omega^2 = c^2k^2 + \omega_p^2, \tag{2.40}$$

gdje su:

c... brzina širenja signala u zrakopraznom prostoru, ω_p... kritična frekvencija ionosferske plazme koja se može izraziti kao $\omega_p = 2\pi f_p$, $f_p = 8{,}98\sqrt{N}$ (MHz), N... gustoća ionosferskih elektrona.

Kako gustoća ionosferske plazme nije homogena, dolazi do prostornih i vremenskih varijacija indeksa loma, odnosno povećanja geometrijske udaljenosti zrake signala [139]. Ionosferski indeks loma može se opisati magnetoionskom teorijom širenja radijskih valova.

2.7.5.2 Ionosfersko kašnjenje satelitskih signala za određivanje položaja

Prolaskom kroz ionizirane slojeve, satelitski signali nailaze na nepravilnosti zbog kojih dolazi do promjene brzine njihovog prostiranja, kao i naglih fluktuacija amplitude i faze valova [85, 119, 131]. Prelaskom radiovalova između dvaju medija, mijenja se njihova valna duljina i brzina širenja, dok frekvencija ostaje ista [95, 28]. Valovi različitih frekvencija prostiru se različitim brzinama [48, 69, 131, 119], pri čemu širenje kodiranog signala (valne grupe) pokazuje različite značajke širenja od vala nosioca.

Indeks loma ioniziranog medija izražava se formulom prema Appleton-Hartreeu [28, 58, 69, 119]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm \left[\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2\right]^{\frac{1}{2}}}, \tag{2.41}$$

gdje su parametri X, Y_L, Y_T, i Z određeni odnosom valne frekvencije i frekvencijskim značajkama medija [69]:

$$X = \frac{Ne^2}{\epsilon_o m_e \omega^2} = \frac{f_N^2}{f^2}, \quad Y_L = \frac{eB_L}{m_e\omega} = \frac{f_H \cos\theta_m}{f}, \quad Y_T = \frac{eB_T}{m_e\omega} = \frac{f_H \sin\theta_m}{f}, \quad Z = \frac{v}{\omega}, \tag{2.42}$$

pri čemu su:

f... radna frekvencija (Hz), e... naboj elektrona, $-1{,}602\times10^{-19}$ (C), ϵ... dielektrična konstanta zrakopraznog prostora, $8{,}854\times10^{-12}$ (F/m), m_e... masa elektrona, $9{,}107\times10^{-31}$ (kg), θ_m... kut upada zrake radiovala u odnosu na zemaljsko magnetsko polje, v...sudarna učestalost elektrona i neutralnih čestica (Hz), f_H... žirofrekvencija elektrona (Hz), f_N... frekvencija plazme ili kritična frekvencija (Hz), ω... kutna valna frekvencija, $\omega = 2\pi f$.

S obzirom da žirofrekvencija elektrona (okretanje elektrona u polju magnetske indukcije) iznosi 1,5 MHz, frekvencija plazme rijetko prelazi 20 MHz, a sudarna učestalost iznosi približno 10^4 Hz [119, 29], ionosferski se indeks loma može, s točnošću unutar < 1 % izraziti kao [29, 119, 69, 20]:

$$n = 1 - \frac{X}{2}, \tag{2.43}$$

parametar X može se zapisati kao [119, 20]:

$$X = \frac{40{,}3}{f^2} \int N dh, \tag{2.44}$$

Ionosfersko kašnjenje Δt_i opisano je [119, 28, 69, 58]:

$$\Delta t_i = \frac{1}{c} \int (1 - n) dh, \tag{2.45}$$

stoga se Δt_i (s) može zapisati kao:

$$\Delta t_i = \frac{40{,}3}{c \cdot f^2} \int N dh, \tag{2.46}$$

odnosno

$$\Delta t_i = \frac{40{,}3}{c \cdot f^2} TEC. \tag{2.47}$$

Nadalje, izraz ekvivalentnog ionosferskog kašnjenja izmjerene pseudoudaljenosti može se zapisati kao:

$$\Delta \rho = \frac{40{,}3}{f^2} TEC. \tag{2.48}$$

Na temelju opisanih pojava, slijedi zaključak kako je ionosfersko kašnjenje proporcionalno količini elektrona sadržanoj na ukupnoj udaljenosti puta satelitskog signala, te obrnuto proporcionalno kvadratu prijenosne frekvencije satelitskih signala [89, 90, 28, 99, 119, 122].

3. DOSADAŠNJA POSTIGNUĆA U ISTRAŽIVANJU I MODELIRANJU DINAMIKE IONOSFERSKOG KAŠNJENJA

Proučavanje ionosfere započinje odašiljanjem prvog prekooceanskog bežičnog radiosignala 1901. godine [5], iako je postojanje E sloja službeno potvrđeno 1926. godine od strane Brenta i Tuvea, odnosno Appletona i Barnetta [5, 68, 51]. Lodge [1902] nastanak Zemljine ionosfere opisuje fotokemijskom teorijom [109]. Chapman opisuje teoriju ionizacije atmosferskih slojeva [24]. Chapman i Bartels [1940] otkrivaju geomagnetizam. Također, otkrivaju vezu polarne svjetlosti i ionosferskih poremećaja sa strujanjima Sunčevog vjetra [109, 51]. U kontekstu pojava i posljedica svemirskog vremena, dolazi se do otkrića *solarno-terestričkog lanca* [109, 51].

Razvojem i primjenom bežičnih tehnologija se otkrivaju različite pojave pri širenju valova različitih frekvencija [130, 5]. Ustanovljeno je kako ionosfera nastupa kao važan utjecajni čimbenik pri širenju radijskih signala [52, 5, 51, 13]. Ionosferske sonde pojavljuju se 30-ih godina prošlog stoljeća, dok se 60-ih godina pojavljuju ne-koherentni radari s raspršenim nizom [13, 97, 69, 109, 129]. Primjenom navedenih tehnika omogućen je iskustveni pristup proučavanju ionosfere s mogućnošću predviđanja i modeliranja dinamike ukupnog sadržaja elektrona i koncentracije (gustoće) slobodnih elektrona u ionosferi [109].

Za potrebe procjene ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja, ključna fizikalna veličina nije cjelokupni ionosferski profil, već procjena ukupnog sadržaja slobodnih elektrona na putu signala. GNSS tehnika određivanja ukupnog sadržaja slobodnih elektrona na temelju izmjerenih pseudoudaljenosti između korisnika i satelita ističe se kao metoda koja je unaprijedila ionosfersku fiziku, naročito zbog činjenice kako ukupni sadržaj elektrona nastupa kao presudan čimbenik degradacije položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima [109, 119, 88]. Zbog globalne pokrivenosti, neprekinutog rada i obrade opažanja približno u stvarnom vremenu, GNSS opažanja nastupaju kao jedinstven izvor podataka o ukupnom sadržaju slobodnih ionosferskih elektrona [103, 64]. Međunarodna GNSS služba (engl. *International GNSS Service* – GNSS) je organizacija unutar koje se prikupljaju opažanja s više od (2015. godine) 400 različitih referentnih lokacija, prvenstveno GPS satelitskim navigacijskim sustavom [35, 63]. Poradi dostupnosti opažanja i mogućnosti obrade podataka u željenim razdobljima, u doktorskom radu korištena su opažanja dobivena GPS sustavom.

GPS opažanja zapisuju se u službenim standardiziranim formatima, čime je omogućena njihova naknadna obrada [57]. Obradom kodnih i faznih opažanja na dvije ili više frekvencija, što podrazumijeva razlike kašnjenja satelitskih signala i uklanjanje geometrijskog rješenja (udaljenosti između prijamnika i satelita), proračunavaju se vrijednosti ukupnog sadržaja slobodnih elektrona između satelitske i prijamne antene. GPS dvofrekvencijski prijamnici se koriste kao senzori za opažanje ionosferske dinamike

(metoda obrnutog inženjeringa) [96, 102, 103, 91, 63]. Ova je metoda opisana kasnije, te je korištena u prikazanom istraživanju.

U nastavku poglavlja opisani su pokazatelji Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti kojima su definirani uvjeti i stanje svemirskog vremena. Na temelju obrade podataka o vrijednostima navedenih pokazatelja, definirane su granične vrijednosti mirnih uvjeta svemirskog vremena. Ukratko su opisani načini modeliranja ionosfere s naglaskom na algoritme ispravaka ionosferskog kašnjenja u GNSS sustavima. Prikazani su rezultati vlastitih istraživanja i objavljenih rezultata koja su prethodila izradi doktorskog rada.

3.1 Pokazatelji ionosferske dinamike

Ionosferskom dinamikom označava se količina, kretanje te prostorna i vremenska raspodjela ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u ionosferi. Pri određivanju i modeliranju pokazatelja ukupnog sadržaja slobodnih elektrona u obzir se uzimaju ostali pokazatelji kojima se opisuje ionosferska dinamika i stanje svemirskog vremena, a u cilju praćenja razvoja uvjeta svemirskog vremena, te mogućih utjecaja na dinamiku ionosferskog kašnjenja. Pri tome se promatraju pojave na Suncu (u jezgri, fotosferi, kromosferi i koroni), pojave u međuplanetarnom prostoru (elektromagnetsko zračenje, međuplanetarno magnetsko polje, čestice i plazma), te pojave u geoprostoru (magnetosfera, ionosfera i neutralna atmosfera). Drugim riječima, promatra se cjelokupni prirodni proces nastanka – širenja – interakcije – manifestacije pojava i poremećaja uzrokovanih Sunčevom aktivnošću.

Kod promatranja pokazatelja ionosferske dinamike potrebno je obratiti pozornost ne samo na povećane vrijednosti u odnosu na mirne uvjete, već i na brzinu njihove promjene i dinamiku. Najvažniji pokazatelji opisani su u nastavku poglavlja, od kojih je većina korištena u prikazanom istraživanju.

3.1.1 Pokazatelji Sunčeve aktivnosti

Sunčeve pjege područja su smanjene temperature (približno do 1700^0 C u odnosu na okolna područja) u Sunčevoj fotosferi [111]. Uzrokuju ih termonuklearni procesi u Sunčevoj jezgri i neujednačena rotacija ekvatorijalnog i polarnog dijela Sunčevog diska, uslijed koje se stvaraju lokalne petlje magnetskog polja Sunca povećane jakosti [111, 52, 148]. Broj Sunčevih pjega (engl. *Sunspot Number* – SSN) nastupa kao mjerodavan pokazatelj Sunčeve aktivnosti. Erupcije sa Sunca (solarne baklje) i koronarni izbačaji mase (engl. *Coronal Mass Ejections* – CME) često se dešavaju u područjima Sunčevih pjega [52]. Pokazatelj broja Sunčevih pjega iskustveno se može prikazati kao [52, 148]:

$$R = k(10g + s), \tag{3.1}$$

gdje su:

R... broj Sunčevih pjega (engl. *International Sunspot Number*), *g*... broj skupina Sunčevih pjega, *s*... broj pojedinačnih pjega, *k*... koeficijent ispravke (ovisan o opservatoriju).

Broj Sunčevih pjega varira sa Sunčevim ciklusom [52]. Tijekom solarnih maksimuma zabilježena vrijednost *SSN* pokazatelja iznosi preko 200 [52]. *SSN* pokazatelj pokazuje dobru korelaciju sa solarnim radiozračenjem (engl. *solar flux* – SF), koje se mjeri na valnoj duljini od 10.7 cm, odnosno na frekvenciji od 2800 MHz [148, 139, 52]. *SF* pokazatelj izražava se kao dnevna vrijednost izražena u *sfu* (eng. *Solar Flux Unit* – sfu) jedinicama [10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}]. Najmanja zabilježena vrijednost *SFD* pokazatelja iznosi 63 [sfu] [139, 52].

3.1.2 Geomagnetski pokazatelji

Geomagnetskim pokazateljima opisuju se dugotrajne i prijelazne (kratkoročne), međusobno povezane promjene u jakosti zemaljskog magnetskog polja [105, 21]. U nastavku poglavlja opisani su pokazatelji geomagnetskog polja i geomagnetske aktivnosti s naglaskom na prijelazne pokazatelje korištene u istraživanju.

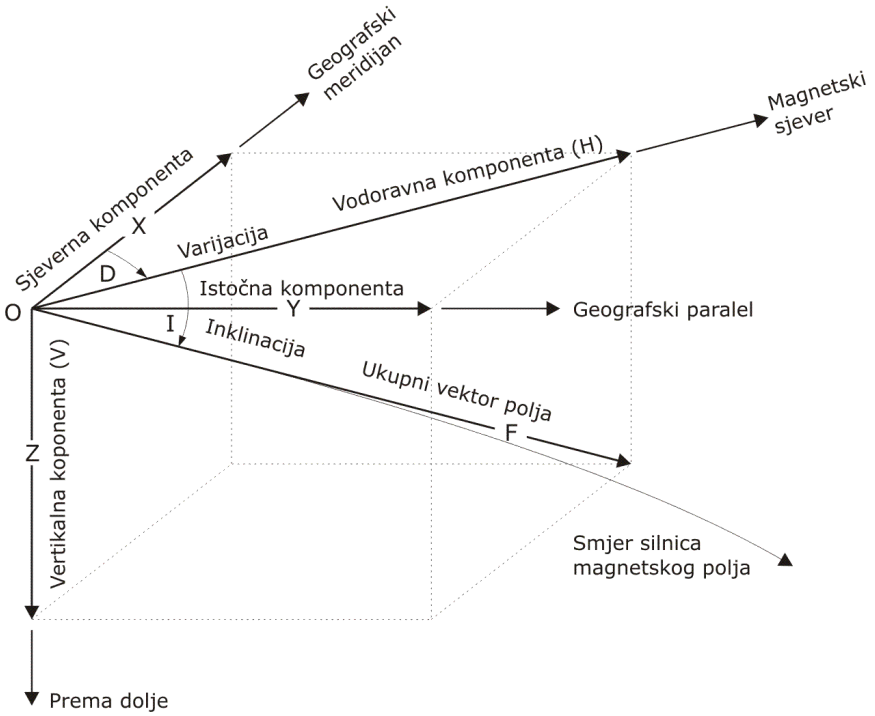
3.1.2.1 Geomagnetsko polje

Zemljino magnetsko polje može se prikazati dipolom nagnutim za približno 12° (inklinacija – *I*) u odnosu na Zemljinu os, zbog čega se geomagnetski ekvator i geomagnetske širine razlikuju od geografskih [21]. Dipolni ekvator (*I = 0°*) nalazi se približno 12° N od geografskog ekvatora u Indiji, odnosno 12° S od geografskog ekvatora u Peruu. Polovi (*I = 90°*) se nalaze na Arktiku (Kanada), odnosno na Istočnoj Antarktici [129, 21].

Kretanje ionosferske plazme ograničeno je silnicama geomagnetskog polja [21, 135]. Na niskim i srednjim geomagnetskim širinama silnice geomagnetskog polja su zatvorene, dok su na višim širinama povezane s magnetosferom [135]. Ionosfera visokih geomagnetskih širina podložna je utjecaju nabijenih čestica i električnih struja nastalih u magnetosferi, koje u atmosferu ulaze kroz auroralne ovale (prsteni promjera 2000 – 3000 km), područja koja okružuju Zemljine magnetske polove. Tijekom ionosferskih oluja, električne struje u ionosferi visokih širina mogu pobuditi geomagnetsko polje do 5 % u odnosu na 0,1 % varijacije u mirnim uvjetima [109, 129].

3.1.2.2 Pokazatelji jakosti geomagnetskog polja

Geomagnetsko polje opisuje se vodoravnom komponentom *H*, deklinacijskim kutom – varijacijom *D* (između geografskog i geomagnetskog sjevera) i inklinacijom *I*, kako je prikazano na slici 3.1 [21, 116].



Slika 3.1: Komponente geomagnetskog polja

Zbog standardiziranja opaženih podataka i mogućnosti prikaza vrijednosti na visokim širinama koristi se pretvorba u XYZ pravocrtni koordinatni sustav, čije komponente čine ukupni vektor polja *F*, odnosno jakost polja **B** [T] [21]. Ovdje vrijedi:

$$B_x = -X, \qquad B_y = -Y, \qquad B_z = -Z, \tag{3.2}$$

gdje su B_x, B_y, B_z komponente jakosti geomagnetskog polja u sjevernom, istočnom i vertikalnom (prema dolje) smjeru. Ove su komponente korištene u istraživanju pri analizi i procjeni stanja svemirskog vremena tijekom promatranih razdoblja. Za izvor dnevnih podataka o vrijednostima jakosti geomagnetskog polja izabran je magnetski opservatorij s lokacijom najbližom promatranom području istraživanja.

3.1.2.3 Pokazatelji geomagnetske aktivnosti

Osim navedenih pokazatelja jakosti geomagnetskog polja, kod procjene stanja i uvjeta geomagnetske komponente svemirskog vremena, promatraju se pokazatelji geomagnetske aktivnosti i stabilnosti geomagnetskog polja. U tablici 3.1 prikazani su standardni pokazatelji geomagnetske aktivnosti prema preporukama Međunarodne udruge za geomagnetizam i aeronomiju (engl. *International Association of Geomagnetism and Aeronomy* – IAGA).

Tablica 3.1: Osnovni pokazatelji geomagnetske aktivnosti

Pokazatelj	Opis
K/Kp	Trosatni logaritamski pokazatelj – predstavlja razinu nepravilnih varijacija vodoravne komponente magnetskog polja na određenoj stanici (K), pri čemu planetarni pokazatelj (Kp) predstavlja srednju vrijednost sa 12 stanica između 48^0 i 63^0 geomagnetske širine. Vrijednosti K/Kp pokazatelja kreću se od 0 do 9, pri čemu se povećanom geomagnetskom aktivnošću smatra vrijednost Kp od 5 pa na više.
Dst	Satni pokazatelj – opisuje stanje uzbude magnetosfere na području geomagnetskog ekvatora. Mirne uvjete označavaju Dst vrijednosti bliske nuli, dok tijekom poremećaja mogu doseći negativne vrijednosti od par stotina [nT].
AE	Satni pokazatelj aktivnosti auroralnog mlaza – konstruira se na temelju opažanja sa stanica u polarnim područjima.
Q	15-minutni pokazatelj geomagnetske aktivnosti visokih širina.
A/Ap	Linearni ekvivalent K pokazatelja.
aa	Pokazatelj globalne geomagnetske aktivnosti proračunat pomoću K pokazatelja s dva međusobno antipodalna magnetska opservatorija.

Izvor: [52, 105, 120]

Od pokazatelja geomagnetske aktivnosti tijekom istraživanja korišteni su pokazatelji *Kp*, *Ap* i *Dst* te pokazatelji jakosti magnetskog polja B_x, B_y i B_z.

3.1.3 Ionosferski pokazatelji

Ionosferska aktivnost u stvarnom se vremenu opisuje pokazateljima koji se mogu odnositi na karakteristične točke u ionosferi, područja najveće gustoće elektrona, ukupni profil gustoće elektrona, cjelokupni trodimenzionalni prikaz propagacijskog medija, ili ukupnu integralnu količinu elektrona duž puta signala – ukupni sadržaj elektrona [13]. Osim potonjeg, pri prognoziranju stanja svemirskog vremena, promatranju trenutnih uvjeta ionosferske aktivnosti i modeliranju ionosferskog profila koriste se pokazatelji ionosferskih slojeva.

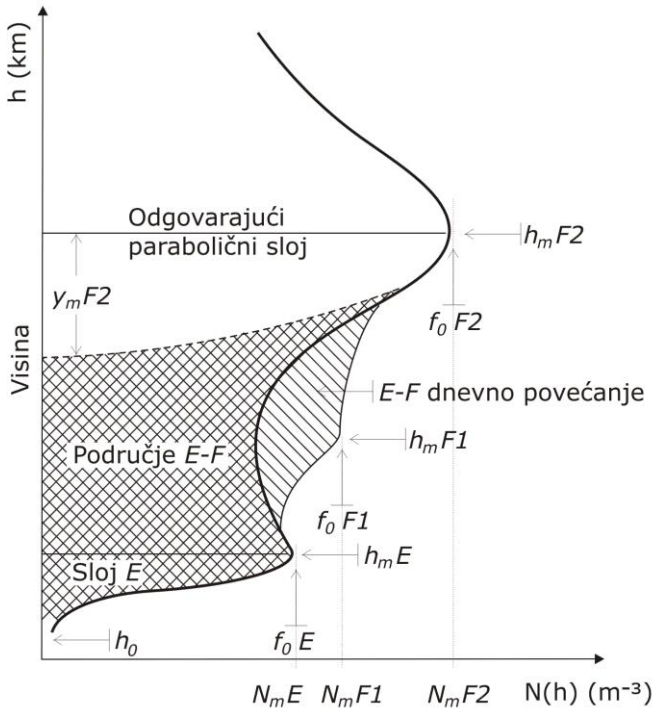
Najviša frekvencija pri kojoj dolazi do odbijanja odaslanih signala od određenog ionosferskog sloja mjera je vršne vrijednosti gustoće ionosferskih elektrona promatranog sloja, kako je prikazano na slici 3.2 [15, 69, 13]:

$$N_e = 1{,}24 \times 10^{10} {f_N}^2, \tag{3.3}$$

gdje su:

N_e... gustoća elektrona ionosferskog sloja (m^{-3}), f_N... kritična frekvencija ionosferskog sloja (MHz).

Vertikalni ionosferski profil s karakterističnim ionosferskim pokazateljima prikazan je na slici 3.2 [36, 37]: kritičnim frekvencijama ionosferskih slojeva f_0X, visinama vršnih vrijednosti gustoće slobodnih elektrona ionosferskih slojeva, h_mX, vršnim vrijednostima gustoće slobodnih elektrona ionosferskih slojeva N_mX, te vrijednošću polovice ukupne širine sloja F2, y_mF2.



Slika 3.2: Dijagram ionosferskog profila gustoće elektrona s prikazom karakterističnih ionosferskih pokazatelja

U tablici 3.2. prikazan je raspon zabilježenih kritičnih frekvencija promatranih ionosferskih slojeva na stanicama San Vito dei Normani (Italija) i Rim (Italija) tijekom razdoblja 16. 6. – 4. 7. 2006. godine, odnosno 16. 6. – 4. 7. 2007. godine. Dobivene vrijednosti proračunate su na temelju podataka iz [155].

Tablica 3.2: Raspon opaženih vrijednosti [MHz] kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva tijekom promatranih razdoblja

Pokazatelj	**16. 6. – 4. 7. 2006.**			**16. 6. – 4. 7. 2007.**		
	Najmanja vrijednost	**Najveća vrijednost**	**Raspon**	**Najmanja vrijednost**	**Najveća vrijednost**	**Raspon**
f0E	1,72	3,72	2	1,61	3,96	2,35
f0Es	1,7	11,6	9,9	1,7	10,25	8,55
f0F1	2,61	5,55	2,94	2,81	5	2,19
f0F2	2,8	9,7	6,9	2,1	10,4	8,3

Često korišteni ionosferski pokazatelj, naročito kod modeliranja ionosferskih mapa je propagacijski pokazatelj *M(3000)F2*, koji predstavlja omjer najviše iskoristive frekvencije (engl. *Maximum Usable Frequency* – MUF) signala koji može biti primljen na udaljenosti od 3000 km i kritične frekvencije f_0F2 [13].

3.1.4 Definicija mirnih uvjeta svemirskog vremena

U cilju definiranja graničnih vrijednosti pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti kojima se uvjeti svemirskog vremena mogu karakterizirati kao

mirni, pristupilo se istraživanju višegodišnjih skupova podataka o zabilježenim vrijednostima pokazatelja [154, 155, 164]. Vrijednosti su promatrane u uvjetima:

- niske i povećane Sunčeve aktivnosti
- Sunčevog minimuma, Sunčevog maksimuma i prijelaznih razdoblja
- mirnih uvjeta svemirskog vremena
- promjenjivih, narušenih i ekstremnih uvjeta svemirskog vremena i
- različitih godišnjih doba.

Uz proučavanje vrijednosti opisanih pokazatelja te konzultirajući odgovarajuće izvore o značajkama pokazatelja tijekom različitih uvjeta svemirskog vremena [157, 52, 83, 100, 148, 111], odabrane su vrijednosti pokazatelja svemirskog vremena za koje se može smatrati da definiraju uvjete mirnog svemirskog vremena i nepobuđene ionosfere. Definirani kriteriji prikazani su u tablici 3.3.

Tablica 3.3: Vrijednosti pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti kojima su definirani mirni uvjeti svemirskog vremena

Pokazatelji Sunčeve aktivnosti			**Geomagnetski pokazatelji**			**Ionosferski pokazatelji**		
Pokazatelj	**MAX**	**SD**	**Pokazatelj**	**MAX**	**SD**	**Pokazatelj**	**R**	**M**
SFD (sfu)	100	10	**Bx** (nT)	21100	20	**f0E** (MHz)	1,5 – 4	3
SSN	30	10	**By** (nT)	-450	50	**f0Es** (MHz)	1 – 11	4
			Bz (nT)	42800	20	**f0F1** (MHz)	2,5 – 5	4
			Kp	5	1	**f0F2** (MHz)	2 – 11	5
			Ap	48	6			
			Dst (nT)	-40	10			

***Legenda**: MAX – najveća vrijednost; SD – standardno odstupanje srednje vrijednosti; R – raspon; M – srednja vrijednost*

Mirno svemirsko vrijeme definirano je kao stanje svemirskog vremena unutar kojeg su se vrijednosti promatranih pokazatelja zadržale unutar graničnih vrijednosti, dok se nepobuđena ionosfera definira zadržavanjem vrijednosti kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva unutar definiranog raspona.

3.2 Pristupi uklanjanju učinaka ionosferskog kašnjenja

Ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja uklanja se [89, 119, 85, 90, 102, 126, 32, 84]:

- izravnim mjerenjem ukupnog sadržaja elektrona (korištenjem višefrekvencijskih GNSS/GPS prijamnika)
- neizravnim mjerenjem ukupnog sadržaja elektrona (korištenjem diferencijskih GNSS/GPS prijamnika) i
- modeliranjem (procjenom) ukupnog sadržaja slobodnih elektrona.

3.2.1 Izravna metoda

Frekvencije L1 i L2 GPS signala za određivanje položaja međusobno su dovoljno razmaknute (347,82 MHz, odnosno 28,3 %) za učinkovito uklanjanje ionosferskog kašnjenja [119, 139, 90, 88, 148].

Kako je ionosfersko kašnjenje obrnuto proporcionalno kvadratu prijenosne frekvencije satelitskih signala, mjerenjem pseudoudaljenosti istodobno na dvije (L1 i L2) ili više frekvencija ono se može proračunati i značajno ukloniti, od 95 % do 99 %, ovisno o izvoru [139, 90, 148]. Učinak ionosferskog kašnjenja u stvarnom vremenu uklanja se pomoću linearne kombinacije kodnih i/ili faznih pseudoudaljenosti [139, 90]:

$$\Phi_c = \frac{f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2}, \tag{3.4}$$

odnosno

$$P_c = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2}, \tag{3.5}$$

gdje su:

Φ_c... linearna kombinacija faznih pseudoudaljenosti, P_c... linearna kombinacija kodnih pseudoudaljenosti, $f_{1,2}$... L1 i L2 GPS frekvencije, $\Phi_{1,2}$... proračunate fazne pseudoudaljenosti na L1 i L2 GPS frekvencijama, $P_{1,2}$... proračunate kodne pseudoudaljenosti na L1 i L2 GPS frekvencijama.

3.2.2 Neizravna metoda

Usluga ispravke položaja diferencijskim GPS prijamnicima (engl. *Differential GPS* – DGPS) temelji se na činjenici kako je za dva prijamnika na međusobno bliskoj udaljenosti većina komponenata pogreške (osim utjecaja višestrukih putova i šuma prijamnika) položaja zajednička, uključujući pogrešku ionosferskog kašnjenja [85, 84]. Uz navedeni uvjet, obje stanice koriste iste satelite pri mjerenju pseudoudaljenosti, odnosno pri određivanju položaja. Unutar područja pokrivenosti, referentna stanica može korisničkoj stanici odašiljati ispravke položaja ili ispravke pseudoudaljenosti [84, 122], pri čemu se smatra da su koordinate referentne stanice poznate.

Uz pretpostavku poznatog položaja referentne stanice i procijenjenog položaja satelita, smatra se da je geometrijska udaljenost između referentnog prijamnika i pojedinog satelita poznata za svaki trenutak opažanja. Referentna stanica mjeri pseudoudaljenost do pojedinog satelita, nakon čega se proračunava razlika između geometrijske udaljenosti i izmjerene pseudoudaljenosti:

$$\Delta\rho_R^i = r_R^i - \rho_R^i, \tag{3.6}$$

pri čemu su:

$\Delta\rho_R^i$... razlika između stvarne udaljenosti i izmjerene pseudoudaljenosti između referentnog prijamnika i *i*-tog satelita, r_R^i... stvarna (geometrijska) udaljenost između referentnog prijamnika i *i*-tog satelita, ρ_R^i... izmjerena pseudoudaljenost između referentnog prijamnika i *i*-tog satelita.

Ispravka pseudoudaljenosti se odašilje korisničkom prijamniku unutar kojeg se pridružuje izmjerenoj pseudoudaljenosti do istog satelita. Unutar korisničkog prijamnika, ispravka pseudoudaljenosti podešava se za trenutak t opažanja vlastitog (korisničkog) mjerenja pseudoudaljenosti [84]:

$$\Delta\rho_R^i(t) = \Delta\rho_R^i(t_R) + \Delta\dot{\rho}_R^i(t_R)(t - t_R), \tag{3.7}$$

pri čemu su:

$\Delta\rho_R^i(t)$... ispravak pseudoudaljenosti, $\Delta\dot{\rho}_R^i(t_R)$... stopa ispravke pseudoudaljenosti.

Nakon toga, izmjerena se korisnička pseudoudaljenost između prijamnika i *i*-tog satelita ispravlja za trenutak opažanja t [84, 123]:

$$\rho_{UC}^i(t) = \rho_U^i(t) + \Delta\rho_R^i(t), \tag{3.8}$$

gdje je:

$\rho_{UC}^i(t)$... izmjerena pseudoudaljenost korisničkog prijamnika ispravljena diferencijskim prijamnikom.

Razlike u vertikalnom ionosferskom kašnjenju referentne i korisničke stanice unutar radijusa od 100 km kreću se u rasponu 0,2 – 0,5 m pri nepobuđenoj ionosferi, odnosno preko 4 m uslijed narušenih uvjeta svemirskog vremena i pobuđene ionosfere [92, 144]. Prema [86], očekivana vrijednost razlike ionosferskog kašnjenja unutar radijusa od 400 km iznosi približno 2 m. Putujući ionosferski poremećaji malih razmjera (Poglavlje 2) mogu prouzrokovati prostorne razlike ukupnog sadržaja elektrona (gradijente) već na udaljenostima od 10 km [84].

Razlika između ionosferskog kašnjenja referentne stanice $\Delta\rho_R^I$ i ionosferskog kašnjenja korisničke stanice $\Delta\rho_U^I$ ovisna je o zenitnom kutu satelita i ukupnom sadržaju slobodnih elektrona [84, 122]:

$$|\Delta\rho_U^I - \Delta\rho_R^I| = \left|\frac{p}{d_R}\left(\frac{p}{d_R} - \cos\chi_R'\right)\frac{40.3}{f^2}TEC\right|, \tag{3.9}$$

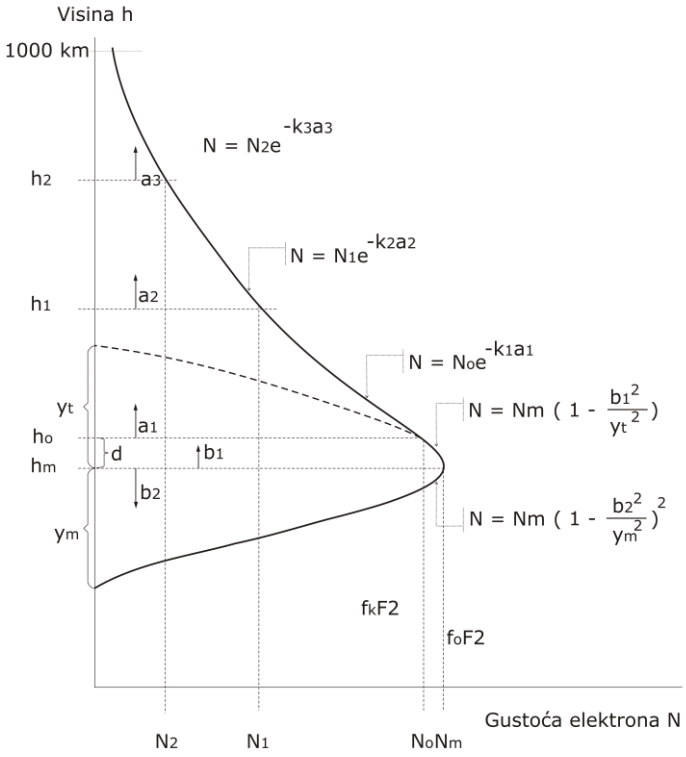
pri čemu su:

p... udaljenost između referentne i korisničke stanice (m), d_R... udaljenost između referentnog prijamnika i satelita, χ_R'... zenitni kut satelita u ionosferskoj točki referentne stanice.

3.2.3 Modeli ionosfere

Modeli ionosfere kao utjecajnog medija na širenje radiovalova dijele se ovisno o promatranom pokazatelju [28, 13, 4]. Uobičajeni izvori ukupnog sadržaja ionosferskih elektrona su globalne numeričke mape, regionalni modeli ukupnog sadržaja elektrona, prognostički modeli (algoritmi ispravke ionosferskog kašnjenja) korišteni u GNSS sustavima, te iskustveni modeli ionosfere temeljeni na različitim izvorima podataka [121, 13, 4]. U IRI iskustvenom ionosferskom modelu (engl. *International Reference Ionosphere* – IRI) korišteni su svi raspoloživi izvori podataka [14, 13, 62].

Ovisno o području, ionosferski modeli dijele se na globalne, regionalne i lokalne modele, a ovisno o pristupu na teoretske (fizikalne), iskustvene (empirijske) i parametrizirane [28, 29, 13, 4, 148, 45]. Iskustveni modeli temeljeni su na dugoročno prikupljanim podacima; korištenjem matematičkih funkcija i statističkom analizom podataka opažanja, opisuju se karakteristične varijacije u uzorcima kretanja dinamike ionosfere i opaženoj raspodjeli elektrona [13, 89, 129, 29]. Pritom se koriste globalne karte gustoće elektrona karakterističnih točaka i referentnih visina (numeričke karte u globalnim i regionalnim mjerilima), na temelju kojih se opisuju vertikalni profili između točaka [13, 28, 71, 2]. Prema izradi, modeli se mogu podijeliti u jednostavne i kompozitne [13, 29]. Na slici 3.3 prikazan je Bentov iskustveni kompozitni model gustoće elektrona [11, 13].



Slika 3.3: Konstrukcija Bentovog modela gustoće elektrona

Kod Bentovog modela, vertikalni profil gustoće elektrona kompozitno je opisan poluparabolom (donji dio profila), parabolom (u blizini vršne vrijednosti F2 sloja) te s

tri eksponencijalna segmenta koji opisuju dio profila iznad F2 područja do granične visine od 1000 km [11, 13].

Fizikalni modeli konstruiraju se na temelju teorijskih jednadžbi kontinuiteta, očuvanja energije (temperature) i očuvanja sile (brzine kretanja) elektrona i iona, uz dodatne jednadžbe gibanja i dinamike neutralnih čestica [129]. Pri tome se gustoća elektrona predviđa u funkciji visine ili duž silnica geomagnetskog polja [108].

Fizikalne veličine kojima je određena prostorna i vremenska dinamika ionosferskog kašnjenja su ukupni sadržaj slobodnih elektrona (*TEC*) i gustoća slobodnih elektrona (*N*) [90, 13], pri čemu vrijedi odnos:

$$TEC = \int N(h)dh, \tag{3.10}$$

gdje je *h*... visina iznad Zemljine površine.

3.2.4 Izvori ionosferskih podataka

Pri istraživanju i modeliranju ionosferskog profila, ionosferskih slojeva i ukupnog sadržaja elektrona se koriste:

- zemaljske i satelitske ionosonde
- koherentni i ne-koherentni radari s raspršenim nizom
- mjerenja sa satelita niskih orbita (engl. *Low Earth Orbit* – LEO)
- LEO satelitska altimetrija
- raketna i *in-situ* mjerenja nižih ionosferskih slojeva i
- GPS višefrekvencijska opažanja.

Načelo ionosondne tehnike temelji se na mjerenju kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva (izraz *3.3*). Radijski signali promjenjivih frekvencija u rasponu 0,5 – 25 MHz [69, 50, 15] odašilju se pri kutu ($\chi = 0^0$). Svaki ionosferski sloj ima svoju kritičnu frekvenciju, nakon koje se signal više ne odbija, već kroz njega prolazi [135, 69]. Drugim riječima, do kritične frekvencije dolazi kod približavanja frekvencije odaslanog signala najvišoj frekvenciji plazme u ionosferskom sloju, gdje izmjerena virtualna visina sloja zbog sve sporijeg širenja odaslanih signala teži k beskonačnosti [69]. Temeljne informacije koje sadrži povratni signal su vrijeme širenja (visina ionosferskog sloja), frekvencija, amplituda, faza, polarizacija, Dopplerov pomak i oblik frekvencijskog valnog spektra [69]. Ionosondna mjerenja ograničena su visinom vršne vrijednosti gustoće elektrona [13, 69], stoga se za proučavanje cjelokupnog ionosferskog profila dodatno koriste ionosonde na satelitima u LEO orbitama [50, 13].

Za razliku od ionosondi, nekoherentnim radarima s raspršenim snopom (engl. *Incoherent Scatter Radars* – ICS) istražuje se cjelokupni profil ionosfere [97, 13, 129, 29]. Radijski signali odašilju se na znatno višim frekvencijama od kritične frekvencije F2 sloja. Mjerenjem spektralne gustoće povratnog raspršenog signala dobivaju se podaci o gustoći i temperaturi ionosferske plazme [13].

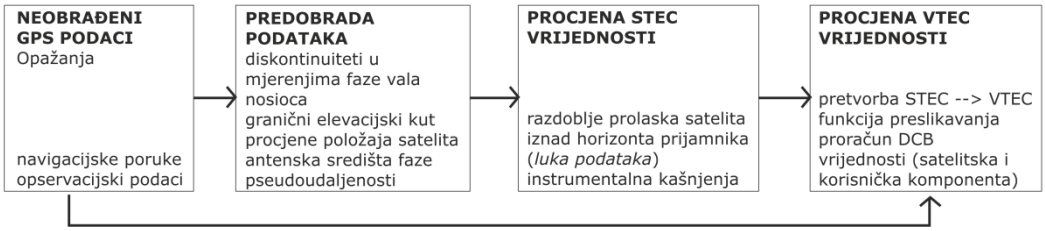
Ukupni sadržaj elektrona duž puta signala mjeri se satelitima na niskim Zemljinim orbitama koristeći tehniku Faradayeve rotacije ili diferencijalnu Dopplerovu tehniku [13]. Jedna od novijih metoda primjena je GPS radiookultacije [107, 81]: GPS prijamnicima na LEO satelitima primaju se satelitski signali za određivanje položaja koji prolaze kroz ionosferu, različitim putovima i pod različitim kutovima [107, 122]. Najkorisniji podaci se dobivaju kada se GPS satelit, ionosfera i satelitski prijamnik nalaze u istoj ravnini [107, 81]. Pojam *okultacija* ukazuje na činjenicu da se geometrija predajnika, ionosfere i prijamnika mijenja u vremenu [107]. Zbog nemogućnosti primjene satelitskih tehnologija, niži ionosferski slojevi proučavaju se raketnim mjerenjima koristeći Faradayevu tehniku rotacije [13].

Ukupni sadržaj elektrona moguće je odrediti LEO altimetrijskim satelitima, čija je osnovna namjena mjerenje razine mora i oceana te praćenje klimatskih promjena. Satelitski altimetri mjere razinu površine mora radarskom tehnikom, signalima unutar SHF dijela frekvencijskog pojasa (engl. *Super High Frequency* – SHF, raspon 3 – 30 GHZ) [13]. Kako se signali odašilju na dvjema frekvencijama, mjerenjem razlike u kašnjenju vremena prijama signala moguće je odrediti i ukloniti ukupni sadržaj elektrona, koji u ovom kontekstu nastupa kao smetnja [13].

S obzirom na visine GPS satelita iznad Zemljine površine, odaslani satelitski signali na svom se putu do korisničkih prijamnika šire kroz cjelokupni ionosferski profil pod različitim kutovima, što je prepoznato kao učinkovit način proučavanja ukupnog sadržaja elektrona [13, 102, 63, 91].

3.2.5 Određivanje ukupnog sadržaja elektrona dvofrekvencijskim GPS opažanjima

Postupak određivanja ukupnog sadržaja slobodnih elektrona sastoji se od niza koraka, kako je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4: Postupak procjene ukupnog sadržaja elektrona dvofrekvencijskim GPS prijamnicima

Temeljna korištena opažanja su kodne i fazne pseudoudaljenosti na L1 i L2 frekvencijama. Pseudoudaljenosti se opažaju tijekom prolaska svakog satelita u vidokrugu korisničkog prijamnika – *luka podataka* (engl. *phase-connected arc of data*) (Slika 3.5), uz prepoznatu pojavu ionosferske divergencije [103, 102, 96, 38]:

$$P_1 = \rho_N + \frac{I}{f_1^2} + \tau_1^r + \tau_1^s \tag{3.11}$$

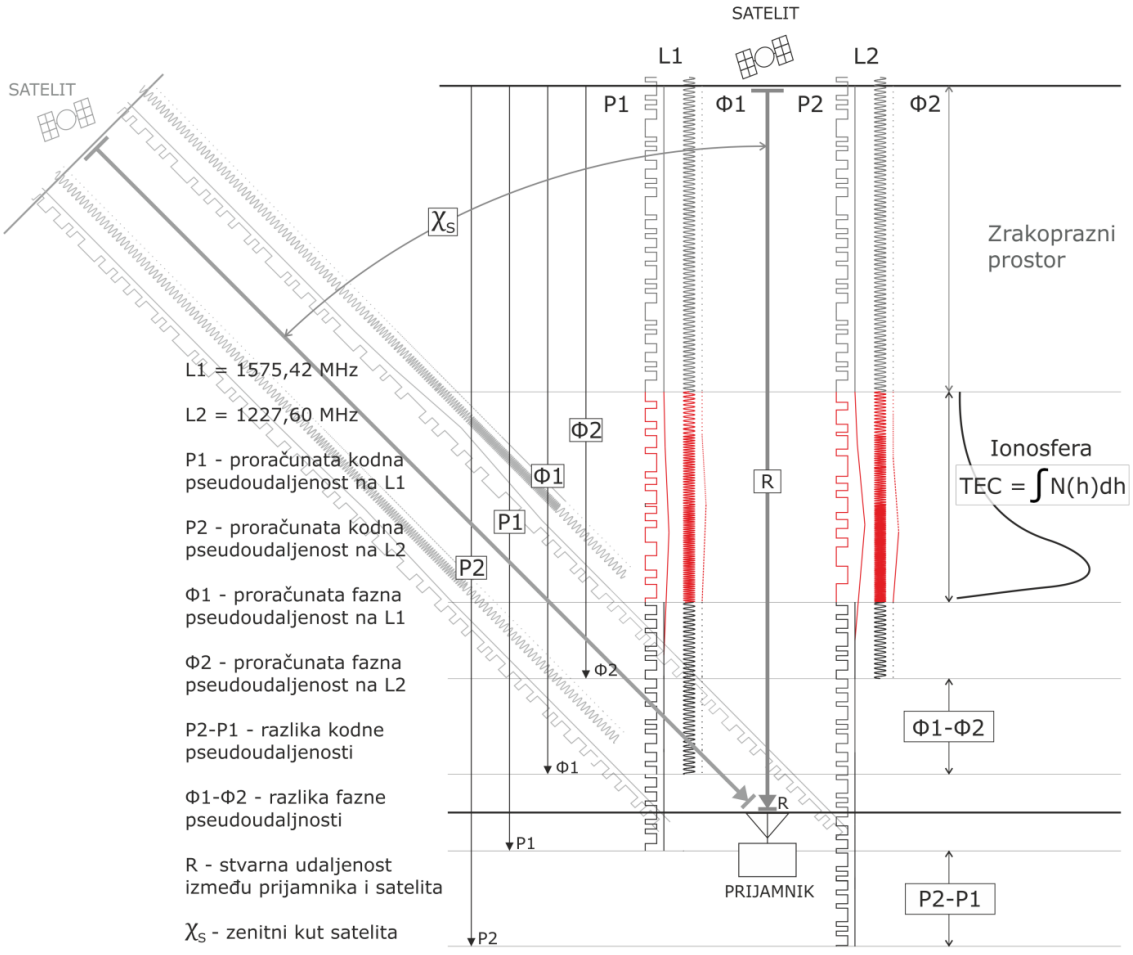
$$P_2 = \rho_N + \frac{I}{f_2^2} + \tau_2^r + \tau_2^s \tag{3.12}$$

$$\Phi_1 = \rho_N - \frac{I}{f_1^2} + \lambda_1 n_1 + \varepsilon_1^r + \varepsilon_1^s \tag{3.13}$$

$$\Phi_2 = \rho_N - \frac{I}{f_2^2} + \lambda_2 n_2 + \varepsilon_2^r + \varepsilon_2^s, \tag{3.14}$$

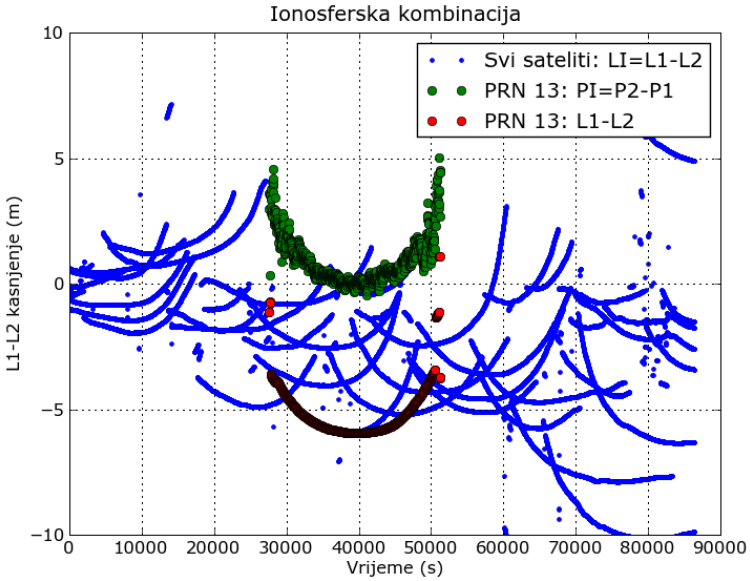
gdje su:

Φ_1, Φ_2... pseudoudaljenosti dobivene opažanjem faza vala nosioca, P_1, P_2... pseudoudaljenosti dobivene pomoću kodiranih signala, ρ_N... ne-disperzivna veličina (geometrijska udaljenost, troposfersko kašnjenje, pogreške satova, te ne-disperzivna kašnjenja uzrokovana sklopovskom opremom), λ_1, λ_2... valne duljine vala nosioca, n_1, n_2... broj diskontinuiteta (engl. *cycle-slips*) vala nosioca, što pomnoženo s valnom duljinom ($\lambda_1 n_1, \lambda_2 n_2$) čini ukupnu neodređenost u mjerenjima faze, τ, ε... disperzivne komponente kašnjenja uzrokovane satelitskom i korisničkom sklopovskom opremom, I... vrijednost ionosferskog kašnjenja u kodnim i faznim mjerenjima pseudoudaljenosti na frekvencijama f_1 i f_2, odnosno L1 i L2.



Slika 3.5: Pojednostavljeni prikaz metode određivanja ukupnog sadržaja elektrona na temelju GPS dvofrekvencijskih mjerenja i pripadajuće korištene veličine

Fazna kašnjenja (fazne razlike L1 i L2 GPS signala pretvorene u ekvivalentne udaljenosti) pružaju vrlo precizna opažanja vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona, međutim sadrže opću pogrešku uzrokovanu neodređenostima u diskontinuitetu vala nosioca [102, 123]. Val nosilac ne sadrži vremenske oznake kao PRN kodirani signali [122]. S druge strane, kodne razlike pružaju apsolutne vrijednosti ukupnog ionosferskog kašnjenja signala, ali sadrže pogreške višestrukih putova, termalnog šuma, te kašnjenja sklopovske opreme satelita i prijamnika [102, 103, 38, 63, 146]. Stoga, fazna mjerenja su točnija, ali neodređenija (engl. *ambiguous),* dok su kodna mjerenja apsolutna, ali sadrže značajnu količinu šuma (engl. *noisier*) (Slika 3.6) [102, 38, 139, 140].



Slika 3.6: Značajke GPS kodnih i faznih dvofrekvencijskih mjerenja
Kombinacije izmjerenih razlika kodnih (PI) i faznih (LI) pseudoudaljenosti iscrtane su za jedan satelit u razdoblju od 24 sata, uz prikaz razlika faznih pseudoudaljenosti svih satelita

Fazna mjerenja podešavaju se pomoću kodnih pseudoudaljenosti [102], pri čemu se koristi *bezgeometrijska* (engl. *geometry-free*) ili *ionosferska* kombinacija [103, 139], svođenjem izraza (*3.11 – 3.14*) na (*3.15 – 3.16*) [103, 139]:

$$P_I = P_2 - P_1 \tag{3.15}$$

$$\Phi_I = \Phi_1 - \Phi_2, \tag{3.16}$$

gdje su:

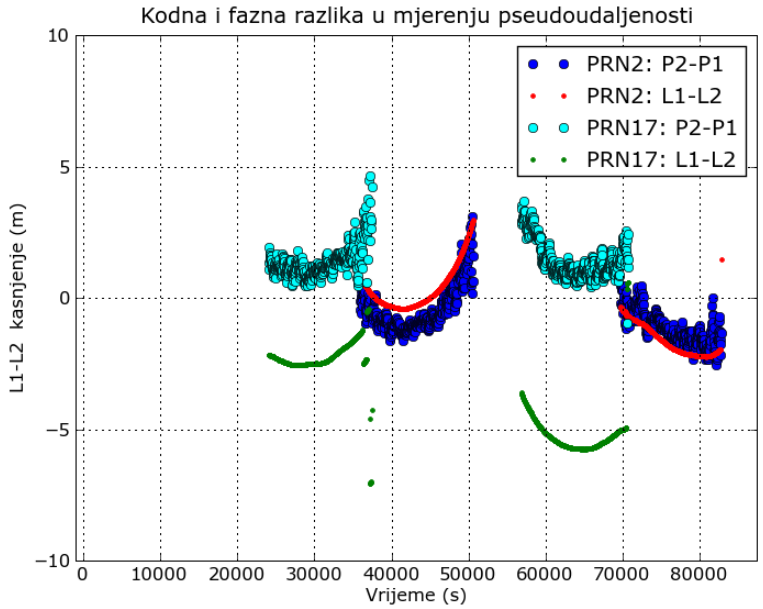
P_I, Φ_I... ionosferske kombinacije razlika kodnih i faznih mjerenja na L1 i L2 frekvenciji.

Ionosferskom kombinacijom uklanja se geometrijski dio izmjerenih vrijednosti (udaljenosti između prijamnika i satelita te pogreške uslijed višestrukih putova) te ostale nedisperzivne komponente pogreške [139, 103]. Razlika u kašnjenju L1 i L2 signala može se modelirati kao zbroj kašnjenja uzrokovanog sklopovljem prijamnika, zbroj kašnjenja uzrokovanog sklopovljem satelitskih predajnika, te ionosferskog

ukupnog sadržaja elektrona. Pri tome, potonja veličina može se promatrati kao konstanta za određeni luk podataka, što nije slučaj kod ostalih dvaju kašnjenja [103, 146]. S obzirom na svoju disperzivnu prirodu, ova se kašnjenja mogu pogrešno protumačiti kao komponente ionosferskog kašnjenja [103, 146].

Promjenjiva u vremenu, sklopovska kašnjenja potrebno je kalibrirati na dnevnoj razini. Instrumentalno kašnjenje korisničke opreme (engl. *Differential Code Bias* – DCB) ovisno je o individualnom prijamniku. U skladu s IGS smjernicama za uspostavu referentnih GNSS stanica [73], DCB kašnjenja identificiraju se i kalibriraju izravno, unosom dodatno generiranog signala u ulazno sučelje prijamnika [103, 38]. Dvofrekvencijski signal s poznatom vrijednošću konstantno se unosi u ulazno sučelje prijamnika, te se u pomoćnom prijamnom kanalu obrađuje i uspoređuje s primljenim signalom [103, 146]. Procijenjena kašnjenja satelitskih predajnika jednofrekvencijskim se korisnicima odašilju unutar GPS navigacijske poruke (engl. *Total Group Delay* – TGD) u sklopu ispravke satelitskog sata [139, 103, 96, 102]. Podaci o DCB vrijednostima GPS satelita i IGS prijamnika dostupni su u obliku *IONEX DCB* datoteka (engl. *IONosphere map Exchange Format* – IONEX) [133, 149, 150].

Nakon uklanjanja sklopovskih kašnjenja pristupa se procjeni ukupnog sadržaja elektrona.



Slika 3.7: Prikaz razlika kodne (PI) i fazne (LI) pseudoudaljenosti tijekom dnevnog prolaska GPS satelita PRN 2 i PRN 17 iznad IGS stanice Medicina

S obzirom da je 1 TECU = 0.163 m (L1), odnosno 1 TECU = 0,267 m (L2), svako kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja na L2 – L1 = 0,104 m, nakon što se uklone ostale komponente pogreške, odgovara jednoj TECU jedinici [38, 139]:

$$TEC_P = \frac{P_2 - P_1}{0{,}104 m TECU^{-1}} \tag{3.17}$$

za kodna mjerenja pseudoudaljenosti P na frekvencijama L1 i L2, te:

$$TEC_{\phi} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{0{,}104m\ TECU^{-1}} \tag{3.18}$$

za fazna mjerenja pseudoudaljenosti ϕ na frekvencijama L1 i L2.

Ukupni sadržaj elektrona određuje se na temelju opažanja razlike frekvencijskog kašnjenja (fazne pseudoudaljenosti), podešavanjem (engl. *leveling*) na temelju diferencijalnog kašnjenja (kodne) pseudoudaljenosti, čime se između ostalih utjecajnih veličina uklanja učinak termalnog šuma prijamnika [139]. Diskontinuiteti u mjerenjima vala nosioca detektiraju se ionosferskom kombinacijom $(\phi_1 - \phi_2)$ za svaku epohu k, odnosno za svaki satelit s pri N_i uzoraka [139]:

$$\phi_I(s;k) = \phi_1(s;k) - \phi_2(s;k), \tag{3.19}$$

pri čemu se diskontinuitet deklarira pri prekidu podataka većem od $T_{0_{\Delta t}}$ (60 s). Tada se za prethodna mjerenja primjenjuje polinom drugog reda $P_{II}(s;k)$:

$$\phi_I(s;k-N_I), \dots, \phi_1(s;k-1), \tag{3.20}$$

U slučaju da je

$$\phi_I(s;k) - P_{II}(s;k) > granična\ vrijednost\ , \tag{3.21}$$

pri čemu je

$$granična\ vrijednost = a_0 - a_1 \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_0}\right), \tag{3.22}$$

smatra se da je došlo do stvarnog diskontinuiteta, što vrijedi uz pretpostavku da Δt odgovara učestalosti uzorkovanja [139]. Tada se postupak ponavlja.

Točnom ali neodređenom ionosferskom kombinacijom ϕ_I podešava se (engl. *smoothing*) ionosferska kombinacija P_I koja je za razliku od ϕ_I jednoznačna (engl. *unambiguous*) ali šumna [123, 139]. Jedna od korištenih metoda podešavanja je Hatchov algoritam izglađivanja kodnog mjerenja [61, 139, 123] za satelit s, za svaku epohu k:

$$\hat{P}(s;k) = \frac{1}{n}P(s;k) + \frac{n-1}{n}\left[\hat{P}(s;k-1) + (\Phi(s;k) - \Phi(s;k-1))\right], \tag{3.23}$$

Algoritam se pokreće kada je $\hat{P}(s;1) = P(s;1)$, odnosno nakon svake pojave diskontinuiteta vala nosioca. U stvarnom vremenu, Hatch-ov algoritam može se tumačiti kao [139]:

$$\hat{P}(k) = \Phi(k) + \langle P - \Phi \rangle_k, \tag{3.24}$$

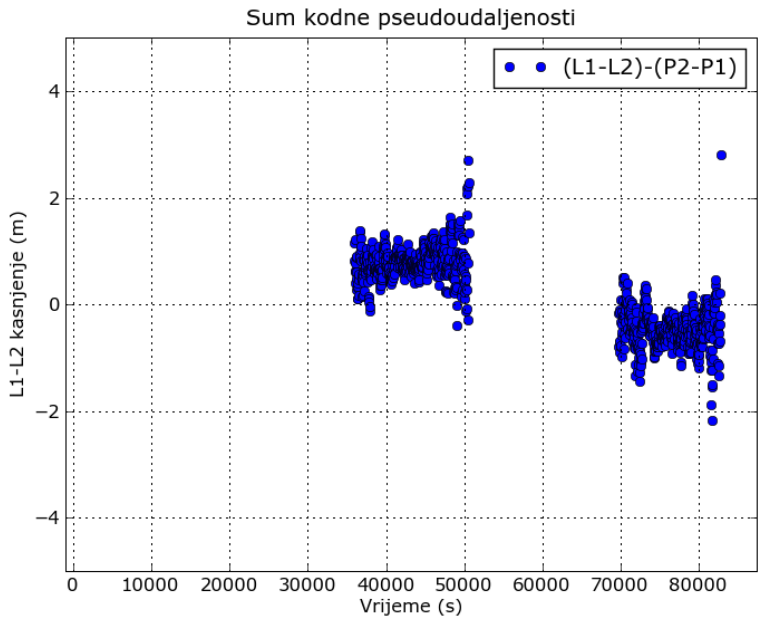
pri čemu se odstupanje između kodnog i faznog mjerenja $\langle P - \Phi \rangle$ procjenjuje u stvarnom vremenu te se koristi kako bi se val nosilac podesio kodnim mjerenjem.

Konstanta podešavanja određuje se za svaki skup u vremenskom nizu podataka između satelita i prijamnika, koji dijele zajedničko fazno odstupanje u luku podataka. Prema [102], *niveliranje* odstupanja (*the leveling bias*) B_{rs} računa se kao srednja razlika između ionosferskog kašnjenja proračunatog pseudoudaljenošću i fazom, zbrojena preko cijelog luka podataka (približno 4 – 6 sati) te ponderirano procijenjenim šumom pseudoudaljenosti (kodiranog signala) [102]:

$$B_{rs} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{\sigma_i^2} \{(P_2 - P_1) - (\phi_1 - \phi_2)\}}{\sum_{i=1}^{N_i} \left(\frac{1}{\sigma_i^2}\right)}, \tag{3.25}$$

gdje su:

i... trenuci (trenutak) opažanja, N_i... broj mjerenja (opažanja), σ_i ... procijenjena standardna pogreška šuma pseudoudaljenosti razlike u frekvenciji.



Slika 3.8: Šum kodne pseudoudaljenosti prikazan na primjeru dnevnog prolaska (lukova podataka) satelita iznad korisnika

Procijenjena pogreška σ_i ovisi o elevacijskom kutu satelita, vrsti i kvaliteti prijamnika, okolišu prijamnika (višestruki putovi), te načinu rada prijamnika (kodno ili beskodno mjerenje) [102].

Opažanje ukupnog sadržaja elektrona za svako mjerenje i čine ionosfersko kašnjenje $\phi_1 - \phi_2$ pridruženo vrijednosti B_{rs} [102, 38]:

$$TEC = TEC_{\Phi} - B_{rs}, \tag{3.26}$$

Dobivene vrijednosti odnose se na ukupni sadržaj elektrona pri $\chi \neq 0^0$, stoga ih je potrebno pretvoriti u odgovarajuće vertikalne ekvivalente. To se, za svaki luk podataka određuje konstrukcijom funkcije preslikavanja [96, 123, 121]:

$$M_{TEC(z)} = \frac{STEC}{VTEC}. \tag{3.27}$$

Funkcija preslikavanja odnosi se na točku u kojoj zraka signala prolazi kroz SLM sloj (jednoslojni model, prema engl. *Single Layer Model* – SLM) – ionosfersku točku (engl. *Ionospheric Pierce Point* – IPP). Odnos između zenitne udaljenosti između satelita i ionosferske točke z' i zenitne udaljenosti korisnika (prijamne antene) z može se izraziti kao [123]:

$$\sin z' = \frac{R}{R+H} \sin z, \tag{3.28}$$

pri čemu su:

R... radijus Zemlje, H... visina ionosferskog SLM sloja.

$M_{TEC(z)}$ funkcija može se izraziti kao [123]:

$$M_{TEC(z)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R^2 \cos^2 E}{(R+H)^2}}}, \tag{3.29}$$

odnosno

$$M_{TEC(z)} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 z'}}, \tag{3.30}$$

pri čemu je E... kut elevacije satelita.

3.2.6 Numeričke mape

Preslikavanje ionosfere iskustveni je pristup interpolaciji TEC vrijednosti. Na temelju opažanja i utvrđenih pravilnosti u ponašanju ionosferske dinamike definiraju se unaprijed određeni funkcionalni obrasci ukupnog broja elektrona na područjima koja nisu pokrivena IGS GNSS referentnim stanicama [63, 71, 160]. Završni formati numeričkih mapa kombinacija su pojedinačnih GIM (engl. *Global Ionospheric Maps* – GIM) mapa IGS udruženih središta za analizu ionosfere (engl. *IGS Ionosphere Associate Analysis Centers* – IAAC) koja čine zajedničku IGS ionosfersku radnu grupu (engl. *IGS Ionosphere Working Group* – IWG) [63, 71, 102, 160]:

- Centar za utvrđivanje orbita CODE (engl. *Center for Orbit Determination in Europe* – CODE), Bern (Švicarska);
- Europski centar za svemirske operacije ESOC pri ESA agenciji (engl. *European Space Operations Center of ESA* – ESOC), Darmstadt (Njemačka);

- Laboratorij mlaznog pogona JPL pri NASA agenciji (engl. *Jet Propulsion Laboratory* – JPL), Pasadena (Kalifornija);
- NrCAN/EMR centar (engl. *National Resources Canada Energy, Mines & Resources* – NrCAN/EMR), Ottawa (Kanada) i
- Centar pri Politehničkom Sveučilištu Katalonije UPC (šp. *Universitat Politècnica de Catalunya* – UPC), Barcelona (Španjolska).

Ionosfersko kašnjenje modelira se sfernom harmoničnom analizom, pri čemu su varijable φ, λ, t geografska širina, geografska dužina i lokalno vrijeme [29]. Funkcija $\Omega(\varphi, \lambda, t)$, izražava se kao [29, 28, 132]:

$$\Omega(\varphi, \lambda, t) = a_0(\varphi, \lambda) + \sum_{j=1}^{H} \left[a_j(\varphi, \lambda) \cos jT + b_j(\varphi, \lambda) \sin jT \right], \tag{3.31}$$

gdje su:

$$a_j(\varphi, \lambda) = \sum_{k=0}^{K} U_{2j,k} G_k(\varphi, \lambda) \tag{3.32}$$

$$b_j(\varphi, \lambda) = \sum_{k=0}^{K} U_{2j-1,k} G_k(\varphi, \lambda), \tag{3.33}$$

pri čemu su:

H... broj harmonika korištenih za prikaz dnevnih varijacija, T... satni kut u rasponu od -180^0 do 180^0 (0^0 u podne, 180^0 u ponoć), $G_k(\varphi, \lambda)$... funkcija geografskih koordinata oblika $\sin^q(x) \cos^m(\varphi) \cos(m\lambda)$, u kojoj je q ovisan o harmoničnom redu dužine m, a x parametar ovisan o magnetskoj inklinaciji (dipolu); stoga je numerička karta definirana skupom koeficijenata $U_{2j,k}$.

Na temelju obrađenih opažanja dobivenim GPS referentnim stanicama, izrađuju se dnevne globalne ionosferske mape, odnosno prostorne i vremenske raspodjele vertikalnog ukupnog sadržaja elektrona približno u stvarnom vremenu. Za podatkovni prikaz numeričkih vrijednosti koristi se standardizirani *IONEX* format podataka *(.igsg* za kompozitni format) [132, 160, 71, 102].

3.3 Modeli ispravke ionosferskog kašnjenja za jednofrekvencijske GNSS prijamnike

Ovisno o pojedinom GNSS sustavu, ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja uklanja se na različite načine. Kod GLONASS satelitskog navigacijskog sustava, tehnikom višestrukog pristupa frekvencijskom podjelom satelitskog signala (engl. *Frequency Division Multiple Access* – FDMA) ionosferski učinak uklanja se bez potrebe za ispravkama [123, 122, 127]. Unutar GPS, BeiDou i Galileo

satelitskih navigacijskih sustava koriste se modeli ispravke i procjene ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja [119, 139, 123, 122].

3.3.1 NeQuick model

NeQuick model ispravke ionosferskog kašnjenja koristi se za potrebe Galileo satelitskog navigacijskog sustava. Model je inačica analitičkog DGR ionosferskog modela (engl. *Di Giovanni – Radicella* – DGR, inicijali tvoraca modela) razvijenog 1990. godine. NeQuick modelom procjenjuje se gustoća elektrona u cjelokupnom vertikalnom profilu ionosfere [32, 126, 39]. Ovaj kompozitni trodimenzionalni model (engl. *profiler*) predviđa gustoću ionosferskih elektrona u funkciji položaja i vremena, omogućujući na taj način proračun ukupnog sadržaja elektrona pod različitim kutovima [32, 126, 139]:

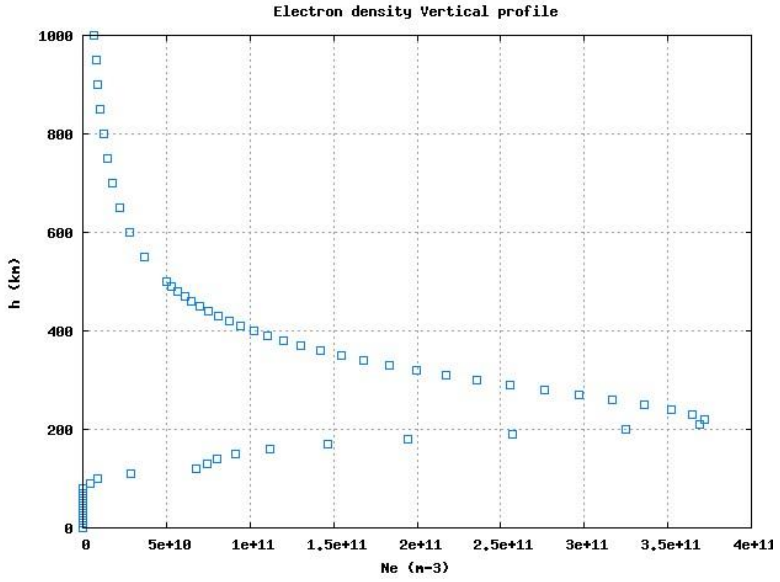
$$I_f = \frac{40{,}3 \cdot 10^{16}}{f^2} TEC, \tag{3.34}$$

Ulazni parametri NeQuick modela su procijenjeni položaj korisnika, UTC vrijeme, te solarna aktivnost izražena *SFD* ili *SSN* pokazateljem, temeljem čega se definira pokazatelj razine ionizacije [40, 126, 139]:

$$Az = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2, \tag{3.35}$$

gdje su:

Az… pokazatelj efektivne razine ionizacije u funkciji položaja korisnika, μ… modificirana dipolna širina temeljena na geomagnetskom polju, a_0, a_1, a_2… proračunati koeficijenti koji se odašilju unutar navigacijske poruke sustava.



Slika 3.9 Snimka zaslona tijekom postupka proračuna vertikalnog ionosferskog profila NeQuick modelom ispravke ionosferskog kašnjenja

Na slici 3.9. prikazan je proračun gustoće elektrona dobiven NeQuick modelom ispravke ionosferskog kašnjenja, na visini između 0 i 1000 km [152]. Proračun se odnosi za dan 15. 1. 2015. godine u 14:00 sati po lokalnom vremenu korisnika na položaju ($\varphi = 43^0$ N $\lambda = 013^0$ E). Kao ulazni pokazatelj korišten je pokazatelj solarnog zračenja *SF 10.7* = 63 [10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}] (vrijednost koja predstavlja minimalno solarno 10.7 zračenje).

Modificirana dipolna širina korisnika proračunava se na temelju magnetske inklinacije i procijenjene geografske širine korisnika [139, 25]:

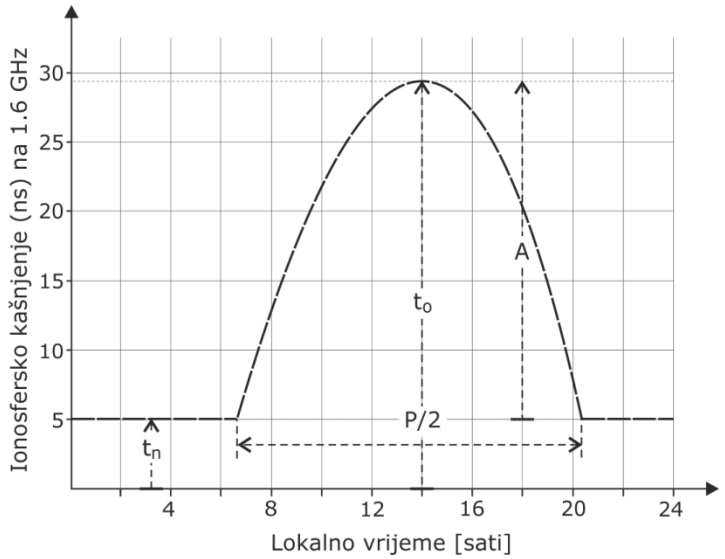
$$\tan \mu = \frac{I}{\sqrt{\cos \varphi}}, \tag{3.36}$$

gdje su:

I …magnetska inklikacija, φ … geografska širina korisnika.

3.3.2 Klobucharov model

Unutar GPS i BeiDou satelitskih navigacijskih sustava koristi se Klobucharov model ispravke ionosferskog kašnjenja satelitskog signala [87, 89, 119, 53, 26]. Klobucharov model izveden je iz Bentovog modela vertikalnog profila ionosfere [11, 45], te je razvijen u skladu s tehnološkim mogućnostima vremena i mogućnošću implementacije unutar GPS sustava. Model se temelji na dnevnoj dinamici ukupnog sadržaja elektrona iznad korisnika te se opisuje konstantnom vrijednošću ionosferskog kašnjenja tijekom noćnih sati i kosinusnom krivuljom tijekom dana [89, 119]. Četiri su pokazatelja koji definiraju Klobucharov model: konstantna vrijednost tijekom noćnih sati, amplituda kosinusne komponente, faza kosinusne komponente i period kosinusne komponente (Slika 3.10) [89].



Slika 3.10: GPS (Klobucharov) model ispravke ionosferskog kašnjenja

Određeni pokazatelji mogu se promatrati kao konstante [89, 87, 11]. Noćna komponenta je definirana kao 5 ns vrijednosti ionosferskog kašnjenja, dok je vrijeme vršne vrijednosti (faza) ionosferskog kašnjenja definirana kao 14:00 sati po lokalnom vremenu korisnika [89]. Preostala dva pokazatelja – amplituda i period kosinusne komponente kojima se opisuje dnevni hod ukupnog sadržaja elektrona, ovisni su o stanju svemirskog vremena [87, 89]. Koeficijenti amplitude i perioda korisnicima se odašilju unutar navigacijske poruke satelitskog signala. Algoritam Klobucharovog modela definiran je na sljedeći način [89, 119, 53, 139]:

$$t_{iV}\begin{cases} t_n + A \cdot \cos\left[\dfrac{2\pi - (t - t_0)}{P}\right] & \text{(dan)} \\ t_n\,, \quad ako \quad \left[\dfrac{2\pi - (t - t_0)}{P}\right] \geq \dfrac{\pi}{2} & \text{(noć)} \end{cases}, \tag{3.37}$$

gdje su:

t_{iV}... vertikalno ionosfersko kašnjenje, t_n... noćna vrijednost ionosferskog kašnjenja, A... vršna vrijednost ionosferskog kašnjenja (amplituda), P... period kosinusne komponente, t... lokalno vrijeme za koje se računa ionosfersko kašnjenje, t_0...konstantni fazni pomak (trenutak pojave vršne vrijednosti ionosferskog kašnjenja).

Pri tome su A i P pokazatelji definirani Klobucharovim α_n i β_n koeficijentima:

$$A = \sum_{n=0}^{3} \alpha_n \varphi^n \quad ; \quad P = \sum_{n=0}^{3} \beta_n \varphi^n, \tag{3.38}$$

gdje je φ^n... geomagnetska širina.

Pri proračunu ionosferskog kašnjenja za ($\chi \neq 0^0$) koristi se funkcija preslikavanja $M_{TEC(z)}$.

Klobucharov se model temelji na pretpostavci da je ukupni sadržaj slobodnih elektrona sadržana u infinitezimalno tankom sloju iznad Zemljine površine (engl. *Single Layer Model* – SLM, jednoslojni model) [89, 96, 102, 45]. Unutar GPS sustava, za visinu referentnog sloja uzeta je vrijednost od 350 km, dok je unutar Beidou sustava postavljena na 375 km [53, 26]. Referentna korištena visina odgovara procijenjenoj najgušćoj koncentraciji unutar ionosfere, odnosno području unutar kojeg su prisutne najveće varijacije ukupnog sadržaja elektrona [55].

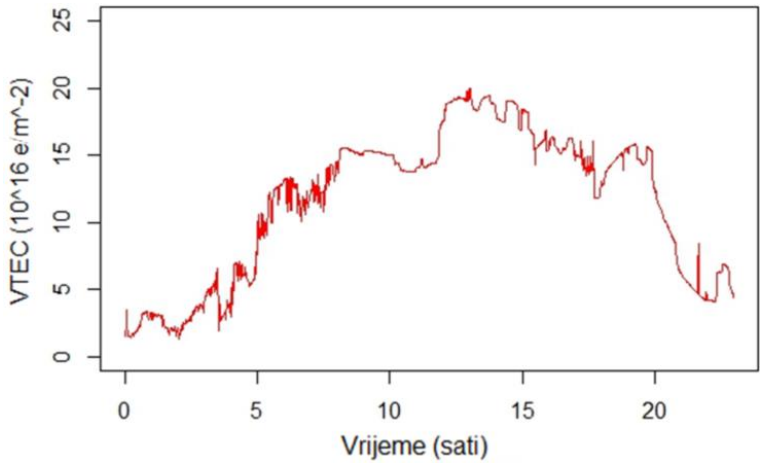
Primjenom Klobucharovog modela dolazi do određenih nedostataka u opisu ionosferskog kašnjenja [44, 43, 47]:

- Tijekom nastupa poremećaja svemirskog vremena, odziv modela pokazuje značajnu vremensku odgodu – i do nekoliko dana;

- Vrijednosti ionosferskog kašnjenja definirane kontrolnim parametrima (koeficijentima) modela znatno su veće od stvarnih vrijednosti, čime se pojavljuje mogućnost stvaranja neželjenog doprinosa pogrešci položaja;
- Odziv modela na kratkoročne poremećaje ima izraženo dugotrajno djelovanje nakon što poremećaji nestanu – prognozirane ispravke nemaju značajke ispravljanja ionosferskog kašnjenja u stvarnom ili približno stvarnom vremenu;
- Primjenom Klobucharovog modela ne može se opisati nespecifična, lokalna ionosferska dinamika.

3.4 Pregled vlastitih istraživanja

Tijekom istraživanja dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja satelitskih signala za određivanje položaja, identificirana je lokalna ionosferska dinamika koja se razlikuje od dnevnog uzorka ionosferskog kašnjenja definiranog unutar Klobucharovog modela [18, 47]. Ovaj lokalni dnevni uzorak karakterističan je po istosmjernoj linearnoj komponenti vrijednosti ionosferskog kašnjenja u noćnim satima, te postojanjem više lokalnih maksimuma tijekom dnevnih sati. Lokalne maksimume karakteriziraju različite širine (periode) i različiti trenuci nastupa vršnih vrijednosti (faze), kako je prikazano u tablici 3.4 [18].



Slika 3.11: Nespecifični dnevni hod ionosferskog kašnjenja GPS signala za satelitsko određivanje položaja

Na slici 3.11 prikazan je nespecifični dnevni hod ionosferskog kašnjenja GPS signala za satelitsko određivanje položaja, opažen na području Jadranske regije tijekom ljetnih mjeseci 2006. godine [18]. Daljnjim eksperimentalnim istraživanjem ionosferskog kašnjenja utvrđeno je kako se ovaj karakteristični uzorak pojavljuje u određenim uvjetima: u ljetnim mjesecima, nepobuđenoj ionosferi i mirnim uvjetima svemirskog vremena.

Tablica 3.4: Parametri nespecifičnih maksimuma u dnevnoj dinamici ionosferskog kašnjenja GPS signala za satelitsko određivanje položaja

Parametar	Vrijednost (sati)
Srednje vrijeme prve lokalne vršne vrijednosti	8,5
Srednje vrijeme druge lokalne vršne vrijednosti	16,0
Srednje trajanje prve lokalne vršne vrijednosti	3,5
Srednje trajanje druge lokalne vršne vrijednosti	3,5
Standardna devijacija vremena prve lokalne vršne vrijednosti	1,5
Standardna devijacija vremena druge lokalne vršne vrijednosti	2,0
Standardna devijacija trajanja prve lokalne vršne vrijednosti	1,0
Standardna devijacija trajanja druge lokalne vršne vrijednosti	2,0

Izvor: [18]

Primjenom Klobucharovog modela ispravke utvrđeno je kako dolazi do neželjenog doprinosa pogrešci položaja s obzirom na ionosfersku komponentu ukupnog proračuna GPS pogreške [18]. U cilju učinkovitije ispravke ionosferskog kašnjenja, pristupilo se identifikaciji lokalne ionosferske dinamike koja prevladava na području Jadranske regije pod definiranim uvjetima. Na temelju dobivenih rezultata, pristupilo se izradi regionalnog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja.

4. METODOLOGIJA RADA

U ovome je poglavlju opisan tijek istraživanja od pripreme podataka do konačne izrade i verifikacije predloženog modela. Prikazano je geografsko područje istraživanja i izvori podataka. Navedeno je razdoblje tijekom kojeg je proučavana lokalna ionosferska dinamika u cilju identifikacije dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja, uz razdoblje u kojem je izvršena verifikacija dobivenih rezultata. Stanje i uvjeti svemirskog vremena prikazani su na temelju vrijednosti korištenih pokazatelja, uzimajući u obzir kriterije kojima su definirani mirni uvjeti svemirskog vremena.

Nadalje, opisani su ulazni podaci za razvoj predloženog modela te način njihove obrade u cilju identifikacije lokalne ionosferske dinamike. Ukratko je opisan razvoj iskustvenog prognostičkog modela pogoršanja uvjeta okoliša širenja signala. Prikazan je način izrade predloženog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja.

Metodologija verifikacije modela prikazana je u posljednjem potpoglavlju.

4.1 Geografsko područje istraživanja

Istraživanje prikazano u doktorskom radu provedeno je na području Jadranskog mora i okolne regije. Za potrebe istraživanja odabrani su podaci sa svih IGS stanica koje se nalaze na ovom području. U cilju identifikacije lokalne ionosferske dinamike, obrađivani su GPS podaci [153, 162] sa sljedećih IGS referentnih stanica : *bzrg* – Bolzano (Italija); *graz* – Graz (Austrija); *pado* – Padova (Italija); *medi* – Medicina (Italija); *mate* – Matera (Italija) i *orid* – Ohrid (Makedonija). U tablici 4.1 prikazane su osnovne značajke korištenih IGS stanica.

Tablica 4.1: Opći podaci o korištenim IGS mjernim stanicama

Oznaka stanice	**Ime stanice (država)**	**Geografska širina φ (N)**	**Geografska dužina λ (E)**	**Nadmorska visina h (m)**
graz	Graz (Austrija)	47,0671	15,4935	538,3
bzrg	Bolzano (Italija)	46,4990	11,3368	328,8
pado	Padova (Italija)	45,4111	11,8961	64,7
medi	Medicina (Italija)	44,5199	11,6468	50,0
orid	Ohrid (Makedonija)	41,1273	20,7941	773,0
mate	Matera (Italija)	40,6491	16,7045	535,6

Podaci s IGS referentnih stanica obrađivani su u skladu s dostupnošću podataka i na temelju promatranog razdoblja istraživanja, kako je prikazano u daljnjem tekstu. Geografsko područje istraživanja prikazano je na slici 4.1.

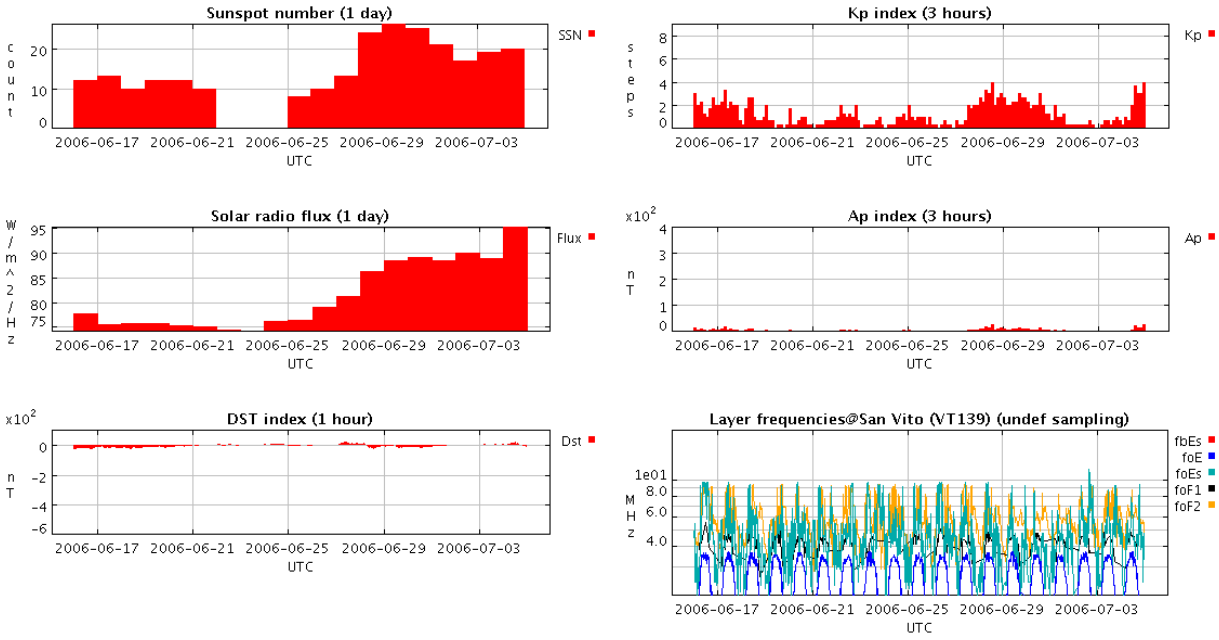


Slika 4.1: Geografski prikaz područja istraživanja

Obradom dostupnih podataka, na temelju čega je identificirana ionosferska dinamika na promatranom području, utvrđeno je kako je na svim lokacijama opažen nespecifični dnevni hod ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja.

4.2 Promatrano razdoblje

Promatrano razdoblje definirano je i odabrano u skladu s kriterijima mirnih uvjeta svemirskog vremena prikazanim u 3. poglavlju. Vremensko razdoblje korišteno za istraživanje predstavlja konstantni period od 19 dana. Vremenski nizovi vrijednosti pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti tijekom promatranog razdoblja 16. 6. – 4. 7. 2006. godine (dani 167 – 185) prikazani su slikom 4.2 [155].



Slika 4.2: Vremenski nizovi pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti u razdoblju 16. 6. – 4. 7. 2006. godine

Promatrani pokazatelji su pokazatelj broja Sunčevih pjega *SSN*, solarno zračenje *SFD*, pokazatelj stanja uzbude magnetosfere *Dst*, pokazatelji stabilnosti geomagnetskog polja *Kp* i *Ap*, te kritične frekvencije ionosferskih slojeva *f0E*, *f0Es*, *f0F1* i *f0F2*. 2006. godina označava približni početak 23. Sunčevog ciklusa (razdoblje Sunčevog minimuma) [52, 83].

4.3 Izvori podataka i podaci

U nastavku su prikazani izvori podataka i podaci na temelju kojih je izvršen proračun ukupnog vertikalnog sadržaja elektrona, te izvori i podaci o pokazateljima svemirskog vremena na temelju kojih su definirani mirni uvjeti svemirskog vremena.

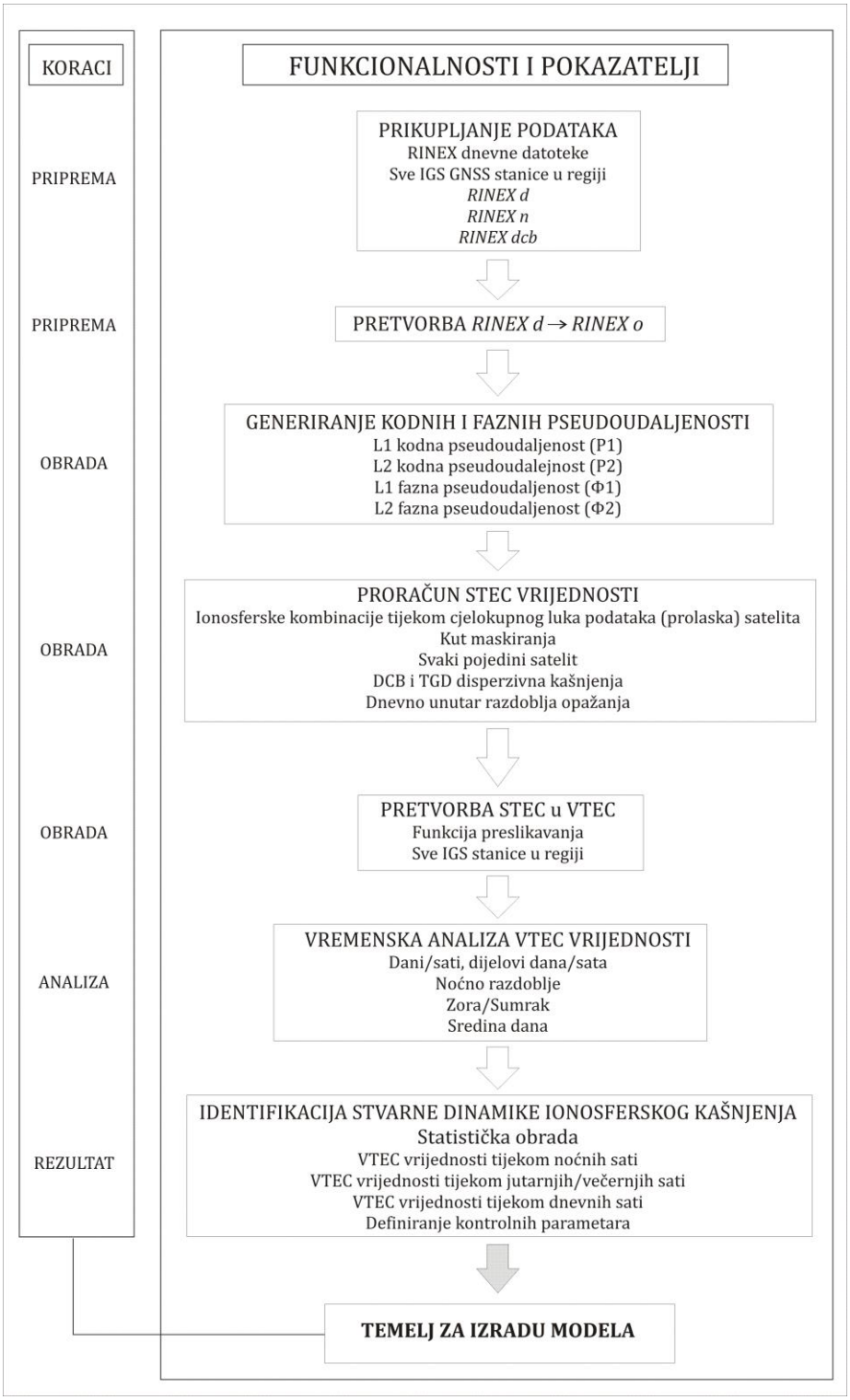
4.3.1 Ulazni podaci za razvoj modela

Izvori podataka o zapisima kodnih i faznih pseudoudaljenosti su IGS stanice Jadranske regije: Bolzano (Italija), Graz (Austrija), Padova (Italija), Medicina (Italija), Matera (Italija) i Ohrid (Makedonija). Zapisi su prije objavljivanja predobrađeni od strane IGS službe te su pohranjeni u propisanom standardiziranom formatu (engl. *Reader INdependent EXchange format* – RINEX) [57]. Temeljem smjernica za uspostavu referentnih IGS stanica [72, 73, 94, 35], osigurana je dosljednost i kvaliteta podataka, uz uklanjanja komponenata pogrešaka izmjerenih pseudoudaljenosti, kao što su smanjenja utjecaja višestrukih putova (< 0,3 m), minimalni broj diskontinuiteta vala nosioca (< 1 za 1000 opažanja) [94, 72], te ostali zahtjevi kojima se omogućuje točnost i integritet usluge unutar predviđenih standarda.

4.3.2 Proračun vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona

Prilikom obrade podataka korištene su *RINEX* opservacijske komprimirane datoteke (*RINEX.d*) [57, 72, 17], *RINEX* datoteke navigacijskih poruka (engl. *RINEX.n*) [CORS 2014] i *RINEX* datoteke DCB vrijednosti (*RINEX.dcb, IONEX.igsg)* [149] za svaku promatranu stanicu (*d*), odnosno globalno (*n, dcb*). Izvršena je konverzija komprimiranih datoteka u odgovarajuće opservacijske datoteke [151] (*RINEX.o*) kako bi se iste mogle dalje obrađivati. *DCB* i *IONEX.igsg* datoteke korištene su pri identifikaciji i uklanjanju vrijednosti sklopovskih kašnjenja. *RINEX.n* datoteke, osim što u kombinaciji s *RINEX.o* datotekama pružaju temelj za proračun pseudoudaljenosti (uz mogućnost generiranja *RINEX.pos* datoteka o položajnim zapisima), sadrže ispravke vrijednosti sklopovskih kašnjenja (TGD) satelita te koeficijente Klobucharovog modela ispravke ionosferskog kašnjenja.

Na temelju *RINEX.o* i *RINEX.d* datoteka GPS opažanja proračunate su vrijednosti dnevnih hodova ukupnog sadržaja slobodnih elektrona. Zapisi kodnih i faznih pseudoudaljenosti predstavljaju ulazne podatke za razvoj modela. Metodološki tijek obrade RINEX podataka prikazan je na slici 4.3.

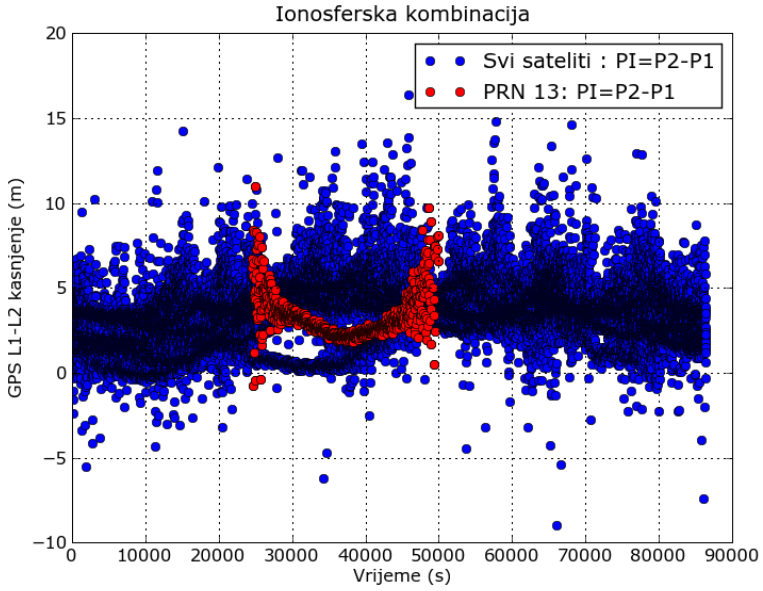


Slika 4.3: Dijagram obrade RINEX podataka u cilju pripreme temelja za izradu regionalnog modela

ΦI ionosferskom kombinacijom se proračunavaju fazne razlike pseudoudaljenosti tijekom lukova podataka svih satelita:

$$\Phi I = \Phi_1 - \Phi_2 = I\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) + (\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2) + b_r' + b_s'. \tag{4.1}$$

Nakon uklanjanja diskontinuiteta u mjerenjima faze vala nosioca izglađuje se ionosferska kombinacija PI, te se na taj način umanjuje utjecaj višestrukih putova i termalnog šuma prijamnika.



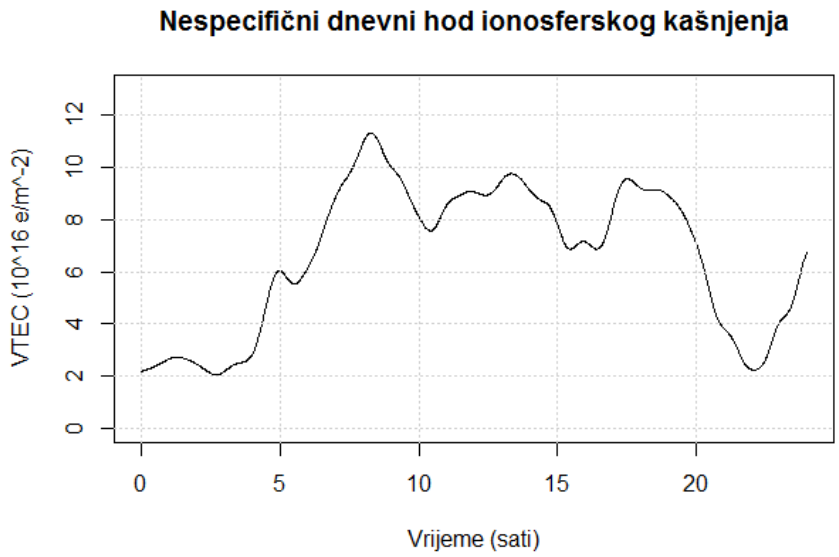
Slika 4.4: PI ionosferska kombinacija tijekom jednog dana kod prolazaka svih satelita, odnosno kod prolaska satelita PRN 13

Na slici 4.4 prikazan je tijek obrade GPS opažanja u trenutku dobivenih kodnih razlika pseudoudaljenosti (PI ionosferska kombinacija) proračunatih za prolaske svih satelita tijekom jednog dana:

$$PI = P_2 - P_1 = I\left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2}\right) + b_r + b_s. \tag{4.2}$$

Nakon što se u obzir uzmu kašnjenja satelitske i prijamne opreme, dobiva se apsolutna vrijednost ionosferskog kašnjenja, kojom se podešavaju fazna mjerenja. S obzirom da se proračunata ionosferska kašnjenja odnose na položaje satelita pri ($\chi \neq 0^0$), funkcijom preslikavanja proračunavaju se vertikalne vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Na slici 4.5 prikazan je primjer proračunatog dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja, pri čemu jedna TECU jedinica (10^{16} e/m^2) odgovara 0,1624 m ionosferskog kašnjenja.

Na opisani način proračunati su dnevni hodovi ionosferskog kašnjenja za sve stanice u regiji tijekom razdoblja dana 167 – 185 u 2006. godini, od kojih su, ovisno o dostupnosti podataka, odabrani skupovi podataka korišteni pri identifikaciji i analizi lokalne ionosferske dinamike.



Slika 4.5: Dnevni hod ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja

Postupak proračuna kodnih i faznih pseudoudaljenosti implementiran je u *gLAB* programskom paketu za obradu i analizu GNSS podataka standardiziranih formata [161]. Postupak uklanjanja disperzivnih sklopovskih kašnjenja implementiran je u *GPS Gopi* programu [159]. Ostali postupci u proračunu i analizi ukupnog sadržaja elektrona razvijeni su u *R* programskom okruženju [158].

4.3.3 Pokazatelji Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti

Prilikom definiranja uvjeta svemirskog vremena tijekom promatranog razdoblja, proučavani su sljedeći pokazatelji:

i) *Pokazatelji Sunčeve aktivnosti:* broj Sunčevih pjega *SSN* i solarno 10.7 radio zračenje *SFD* [155];

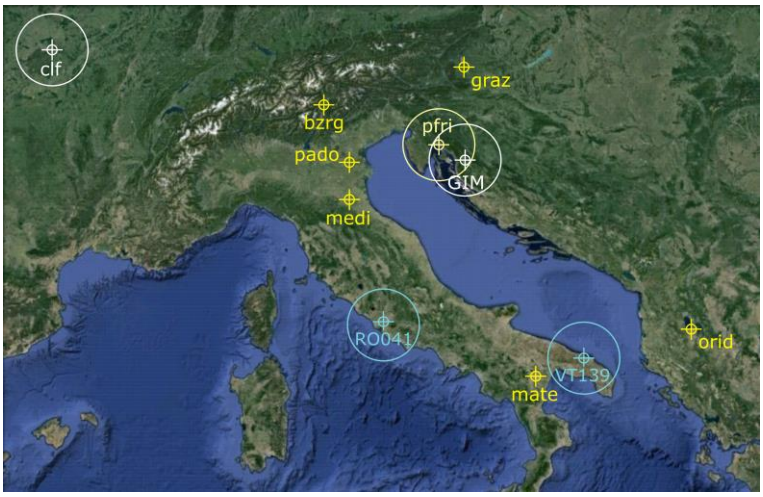
ii) *Pokazatelji geomagnetske aktivnosti:* sjeverna, istočna i vertikalna komponenta jakosti geomagnetskog polja *Bx*, *By* i *Bz* [154]; promjenjivost vodoravne komponente geomagnetskog polja *Kp*; apsolutni pokazatelj geomagnetske stabilnosti *Ap* [155]; stanje uzbude magnetosfere *Dst* [164];

iii) *Pokazatelji ionosferske aktivnosti:* kritične frekvencije ionosferskih slojeva E, Es, F1 i F2 *f0E*, *f0Es*, *f0F1* i *f0F2* [155].

U tablici 4.2 prikazani su opći podaci o izvorima podataka (opservatorijima) uz vremensku učestalost uzorkovanja pojedinog pokazatelja.

Tablica 4.2: Opći podaci o izvorima podataka pokazatelja svemirskog vremena uz učestalost opažanja

Pokazatelj (mjerna jedinica)	**Učestalost uzorkovanja**	**Opći podaci o mjernim stanicama**				
		Oznaka	**Ime (država)**	**Geografska širina φ (N)**	**Geografska dužina λ (E)**	**Nadmorska visina h (m)**
Bx, By, Bz *(nT)*	1 minuta	clf	Chambon la Foret (Francuska)	48,0239	2,2594	145
f0E, f0Es, f0F1, f0F2 *(MHz)*	15 minuta	VT139	San Vito dei Normanni (Italija)	40,7	17,9	N/A
f0E, f0Es, f0F1, f0F2 *(MHz)*	15 minuta	RO041	Rim (Italija)	41,9	12,5	N/A
VTEC *(TECU)*	2 sata	N/A	Sjeverni Jadran (Hrvatska)	45,0	15,0	N/A
Kp	3 sata	Globalno				
Ap	3 sata	Globalno				
Dst *(nT)*	1 sat	Globalno				
SSN	1 dan	Globalno				
F10.7 *(sfu)*	1 dan	Globalno				



Slika 4.6: Geografski prikaz mjernih stanica pomoću kojih su dobivene vrijednosti lokalnih pokazatelja stanja svemirskog vremena

Položaji opservatorija prikazani su na slici 4.6: *clf* – Chambon la Foret (Francuska); *RO041* – Rim , Italija i *VT139* – San Vito Dei Normanni, Italija. Podaci o GPS vremenskim nizovima točnosti položaja sa stanice *pfri* (Rijeka, Hrvatska) [156], te GIM ionosferske numeričke mape ukupnog sadržaja elektrona za položaj (φ = 45°N, λ = 015°E) [150] korišteni su pri definiranju uvjeta okoliša širenja signala za satelitsko određivanje položaja. U tablici 4.3. prikazani su ranije definirani kriteriji mirnog svemirskog vremena.

Tablica 4.3: Kriteriji mirnog svemirskog vremena i nepobuđene ionosfere

Pokazatelji Sunčeve aktivnosti			Geomagnetski pokazatelji			Ionosferski pokazatelji		
Pokazatelj	**MAX**	**SD**	**Pokazatelj**	**MAX**	**SD**	**Pokazatelj**	**R**	**M**
SFD (sfu)	100	10	**Bx** (nT)	21100	20	**f0E** (MHz)	1,5 – 4	3
SSN	30	10	**By** (nT)	-450	50	**f0Es** (MHz)	1 – 11	4
			Bz (nT)	42800	20	**f0F1** (MHz)	2,5 – 5	4
			Kp	5	1	**f0F2** (MHz)	2 – 11	5
			Ap	48	6			
			Dst (nT)	-40	10			

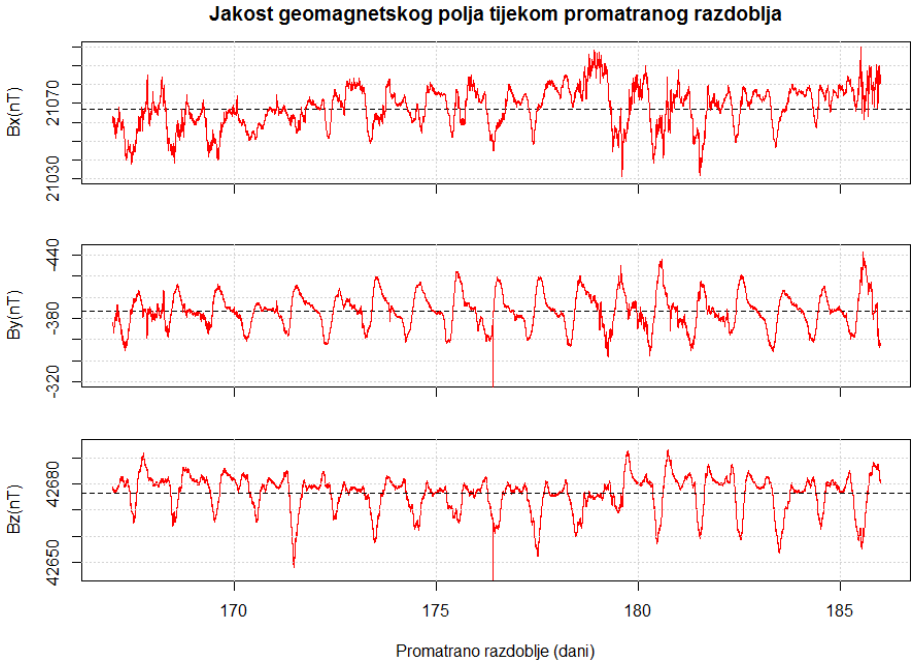
***Legenda**: MAX – najveća vrijednost; SD – standardno odstupanje srednje vrijednosti; R – raspon; M – srednja vrijednost*

U tablici 4.4 prikazan je statistički opis opaženih vrijednosti pokazatelja svemirskog vremena tijekom promatranih razdoblja 2006. i 2007. godine. Unutar obaju razdoblja vrijednosti i rasponi vrijednosti svih pokazatelja zadržale su se unutar definiranih granica. Vrijednosti su izračunate na temelju podataka prema [155, 154, 164].

Tablica 4.4: Statistički opis promatranih pokazatelja

Pokazatelj	16. 6. – 4. 7. 2006. (dani 167 – 185)						
	Najmanja vrijednost	**Srednja vrijednost**	**Standardno odstupanje**	**Median**	**Mod**	**Najveća vrijednost**	**Raspon**
SFD (sfu)	74,1	81,1789	6,6676	77,7	75,7	95,1	21
SSN	0	13,2	7,8	12	12	26	26
Bx (nT)	21031,1	21067,66	10,83621	21069,1	21075,6	21100,3	69,2
By (nT)	-443,6	-387,261	16,42597	-387,5	-389,4	-343,4	100,2
Bz (nT)	42648,2	42676,4	7,010712	42678,2	42678,5	42692,9	44,7
Kp	0	1,215789474	0,978678709	1	0,3	4	4
Ap	0	5,375	4,836643955	4	2	27	27
Dst (nT)	-32	-3,46272	9,882977	-2	1	23	55
f0E (MHz)	1,72	2,987423532	2,987423532	3,2	3,42	3,72	2
f0Es (MHz)	1,7	4,761761	1,766149	4,5	4,8	11,6	9,9
f0F1 (MHz)	2,61	4,274647	0,402766	4,35	4,55	5,55	2,94
f0F2 (MHz)	2,8	5,833098	1,546539	5,55	5,5	9,7	6,9
Pokazatelj	**16. 6. – 4. 7. 2007. (dani 167 – 185)**						
	Najmanja vrijednost	**Srednja vrijednost**	**Standardno odstupanje**	**Median**	**Mod**	**Najveća vrijednost**	**Raspon**
SFD [sfu]	67,5	71,9684	3,7235	70,2	70,2	77,8	10,3
SSN	0	6,1	6,7	7	0	19	19
Bx (nT)	21033	21085,41	10,52841	21087,7	21088,8	21124,6	91,6
By (nT)	-395,8	-342,628	17,31754	-342,1	-342,3	-301,7	94,1
Bz (nT)	42668,4	42697,78	7,397074	42700	42700,8	42717,1	48,7
Kp	0	1,445395	0,922388	1,3	0,7	4,3	4,3
Ap	0	6,375	5,323596	5	3	32	32
Dst (nT)	-28	-4,01974	7,546605	-5	-5	37	65
f0E (MHz)	1,61	2,826578	0,512068	2,86	3,56	3,96	2,35
f0Es (MHz)	1,7	4,280764	1,50643	4,05	3,1	10,25	8,55
f0F1 (MHz)	2,81	4,130121	0,380358	4,25	4,31	5	2,19
f0F2 (MHz)	2,1	5,240474	1,647902	5	5	10,4	8,3

Gdje je postojala mogućnost dobivanja podataka o lokalnim pokazateljima svemirskog vremena, to je učinjeno. Ostali pokazatelji dani su na globalnoj razini. Na slici 4.7 prikazani su vremenski nizovi vrijednosti komponenata jakosti geomagnetskog polja tijekom promatranog razdoblja 2006. godine.



Slika 4.7: Vremenski nizovi sjeverne (Bx), istočne (By) i vertikalne (Bz) komponente jakosti geomagnetskog polja u danima 167 – 185 2006. godine

Podatkovne vrijednosti svih promatranih pokazatelja priložene su, u sklopu popratne dokumentacije doktorskog rada na digitalnom prijenosnom mediju.

4.4 Razvoj prognostičkog modela

U cilju identifikacije poremećaja i procjene rizika učinaka ionosferskih i geomagnetskih poremećaja na značajke pružanih usluga satelitske navigacije, pristupilo se izradi iskustvenog prognostičkog modela pogoršanja uvjeta okoliša širenja signala za satelitsko određivanje položaja. Kao ulazni podaci korišteni su pokazatelji kojima je definirano stanje svemirskog vremena, dok je kao izlazna varijabla definiran vertikalni ukupni sadržaj slobodnih elektrona. Pri razvoju i vrednovanju modela korištene su metode strojnog učenja (engl. *machine learning*), odnosno prepoznavanja uzoraka (engl. *pattern recognition*) [115, 59]. Na temelju opaženih vrijednosti istraživan je međuodnos pokazatelja, pri čemu je korištena Pearsonova metoda korelacije među varijablama [115, 101, 145]. Pearsonov korelacijski koeficijent definiran je kao:

$$corr[X,Y] \triangleq \frac{cov[X,Y]}{\sqrt{var[X]var[Y]}}, \tag{4.3}$$

pri čemu se dobiva korelacijska matrica oblika:

$$R = \begin{pmatrix} corr[X_1, X_1] & corr[X_1, X_2] & \dots & corr[X_1, X_d] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ corr[X_d, X_1] & corr[X_d, X_2] & \dots & corr[X_d, X_d] \end{pmatrix}. \quad (4.4)$$

Navedenim postupcima definira se korelacija među pokazateljima temeljem koje se daljnjim razvojem modela prognoziraju poremećaji svemirskog vremena i njihovi učinci na ionosfersko kašnjenje signala, uz točnost određivanja položaja.

Uz navedene pokazatelje svemirskog vremena, korišteni su vlastiti podaci GPS položajnih zapisa prikupljeni na mjernoj stanici *pfri* – Rijeka (Hrvatska) [156], pohranjeni višenamjenskim programskim alatom *VisualGPS llc.*, u *NMEA* formatu [163]. Osim toga, korištene su numeričke GIM mape ukupnog sadržaja elektrona dostupne u *IONEX.g* standardiziranom formatu [150, 160, 94]. Zbog prostorne razlučivosti *IONEX* formata ($\Delta\varphi = 2{,}5^0, \Delta\lambda = 5^0$), skupovi numeričkih mapa odabrani su za geografsku lokaciju (45^0 N, 015^0 E), odnosno područje Sjevernog Jadrana.

Pri izradi općeg prognostičkog modela korišteni su prikupljeni i obrađeni podaci koji pokrivaju vremensko razdoblje od približno 300 dana tijekom 2011. i 2012. godine, unutar kojeg su bila prisutna različita stanja i uvjeti svemirskog vremena. S obzirom na različitu učestalost uzorkovanja, vrijednosti ulaznih podataka svođene su na 6-satna opažanja, pri čemu je za svako opažanje, osim trenutne vrijednosti uzimana razlika u odnosu na prošlo mjerenje (Δ_M).

U cilju pronalaska sličnosti među promatranim pokazateljima, modeliranju je prethodilo grupiranje pokazatelja u podskupove (engl. *clusters*). Pritom se pristupilo hijerarhijskom grupiranju podskupova, gdje $d_{i,i} = 0$ i $d_{i,j} \geq 0$ predstavljaju mjere udaljenosti (različitosti) među varijablama [115, 60]. Različitosti među parovima varijabli:

$$\Delta(x_i, x_i') = \sum_{j=1}^{D} \Delta_j\left(x_{ij}, x_{i'j}\right), \quad (4.5)$$

definiraju *matricu različitosti D*, pri čemu se kao mjera različitosti koristi kvadratna (Euklidska) udaljenost [115]:

$$\Delta_j\left(x_{ij}, x_{i'j}\right) = \left(x_{ij} - x_{i'j}\right)^2. \quad (4.6)$$

Na ovaj su način potvrđene sličnosti među kategorijama pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti.

Model je izrađen u obliku regresijskog stabla odlučivanja (engl. *decision tree*) [145, 115, 59], izražen funkcijom:

$$f(\mathrm{x}) = \mathbb{E}[y|\mathrm{x}] = \sum_{m=1}^{M} w_m \mathbb{I}(\mathrm{x} \in R_m) = \sum_{m=1}^{M} w_m \mathbb{I}\phi(\mathrm{x}; \mathrm{v}_m). \quad (4.7)$$

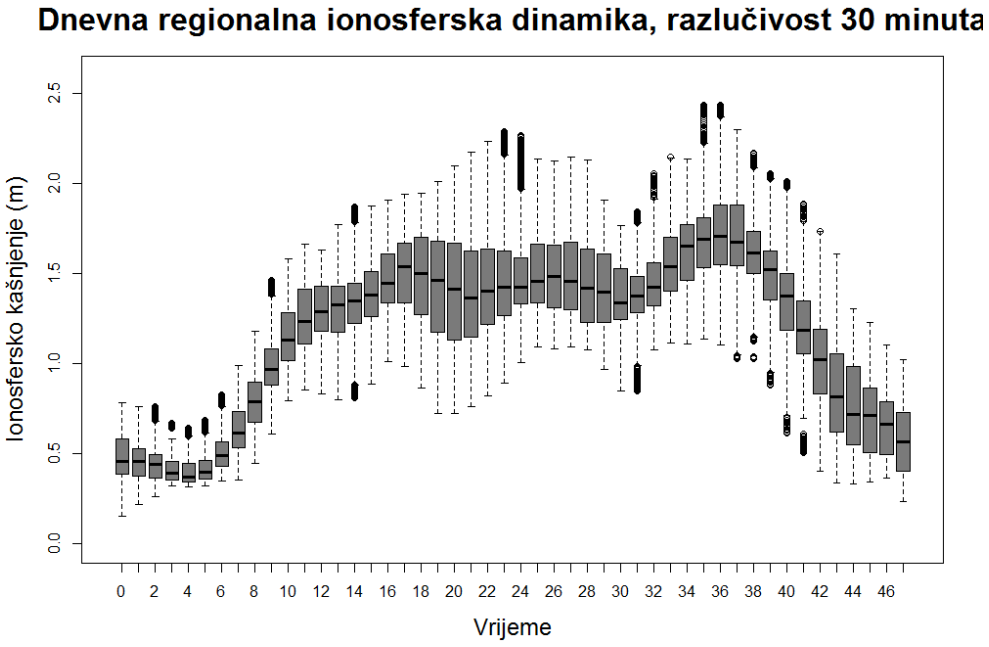
Kao izlazna varijabla modela definiran je vertikalni ukupni sadržaj elektrona.

U sklopu provedenog istraživanja, pristupilo se razvoju prognostičkog modela primijenjenog unutar promatranog razdoblja dana 167 – 185 u 2006. godini, s ciljem dodatne provjere prevladavajućih uvjeta.

Iskustveni prognostički model pogoršanja kvalitete satelitskog određivanja položaja razvijen je i vrednovan u *R* razvojnom okruženju [158], pri čemu je korišten *Rattle* analitički alat [145, 101]. Prikupljeni podaci korišteni za razvoj i izradu prognostičkog modela priloženi su, u sklopu popratne dokumentacije doktorskog rada na digitalnom prijenosnom mediju.

4.5 Izrada matematičkog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja

Motivacija za izradu predloženog modela su uočene nespecifične pravilnosti u dnevnom hodu ionosferskog kašnjenja na području Jadranske regije. Dnevna dinamika ionosferskog kašnjenja izvedena je iz kodnih i faznih mjerenja pseudoudaljenosti, metodom opisanom u 3. poglavlju. Pri tome su korišteni podaci s regionalnih IGS stanica prikazanih na slici 4.1 tijekom razdoblja 16. 6. – 4. 7. 2006. godine. Na slici 4.8 prikazane su dobivene srednje vrijednosti dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja. Zbog jasnoće prikaza, kutijasti dijagrami (engl. *box and whiskers plot*) prikazani su s razlučivošću od 30 minuta. Podatkovne vrijednosti dnevnih hodova ionosferskog kašnjenja opaženi na IGS stanicama nalaze se na digitalnom prijenosnom mediju priloženom u sklopu popratne dokumentacije doktorskog rada.



Slika 4.8: Prikaz srednjih vrijednosti lokalne dnevne ionosferske dinamike izražen u vremenskim koracima od 30 minuta

U tablici 4.5 prikazane su karakteristične vrijednosti dnevne dinamike ionosferskog kašnjenja.

Tablica 4.5: Statistički pokazatelji srednjih vrijednosti ionosferskog kašnjenja (m)

Najmanja vrijednost	Prvi kvartil	Median	Srednja vrijednost	Standardno odstupanje	Treći kvartil	Najveća vrijednost
0,1137	0,8451	1,3169	1,1953	0,4532	1,5407	2,5722

Dnevni hod ionosferskog kašnjenja prvotno je modeliran Klobucharovim modelom ispravke, čiji je programski kod izrađen u *R* razvojnom okruženju [158] prema [139]. Na temelju dobivenih rezultata utvrđeno je kako nije moguće opisati dnevnu lokalnu ionosfersku dinamiku sa zadovoljavajućom točnošću.

Modeliranju ionosferske dinamike pristupilo se izradom geometrijskog modela sličnosti valnih oblika. Predloženi model temeljen je na opaženim vremenskim nizovima lokalnog ionosferskog kašnjenja, odnosno vertikalnog ukupnog sadržaja elektrona. Uočene nespecifične pravilnosti definiraju karakteristična razdoblja tijekom 24 sata. Ove pravilnosti karakteriziraju:

i) Linearna povećanja, odnosno smanjenja vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom noćnih i večernjih sati, koja se mogu opisati linearnim funkcijama:

$$y = a \cdot x + b, \tag{4.8}$$

definiranim koeficijentom smjera a i koeficijentom sjecišta y-osi b.

ii) Više povećanja vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom dnevnih sati, koja se mogu opisati kosinusnim funkcijama:

$$y = A_i \cdot \cos\left[2\pi\left(\frac{x - x_i}{P_i}\right)\right], \tag{4.9}$$

definiranim koeficijentom vršne vrijednosti A_i, koeficijentom trenutka nastupa vršne vrijednosti x_i te koeficijentom vremena trajanja lokalnog maksimuma P_i.

Analizom dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja utvrđeno je kako tijekom dnevnih sati prevladavaju tri lokalna maksimuma s izraženim vršnim vrijednostima, uz noćnu (povećanje vrijednosti) i večernju (smanjenje vrijednosti) linearnu komponentu.

Srednje vrijednosti koeficijenata odnosa (4.8) proračunate su primjenom linearnih funkcija metodom najmanjih kvadrata.

Pri obradi dnevnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja proračunate su razlike (reziduali) između stvarnog ionosferskog kašnjenja i modeliranog ionosferskog kašnjenja po Klobucharovom modelu ispravke. Dnevne vrijednosti Klobucharovog modela dobivene su na temelju α_n i β_n koeficijenata odašiljanih u sklopu GPS navigacijske poruke. Srednje vrijednosti koeficijenata lokalnih maksimuma dobivene su numeričkim postupkom optimizacije metodom najmanjih kvadrata koristeći izraz (4.9) za karakteristična razdoblja tijekom dnevnih sati.

Cjelokupni postupak izrade predloženog modela i optimizacije kontrolnih parametara izrađen je u *R* razvojnom okruženju [158].

4.6 Verifikacija predloženog modela

U cilju potvrde uspješnosti predloženog modela pristupilo se postupku ispitivanja i provjere modela. Kriteriji uspješnosti predloženog modela definirani su u 6. poglavlju.

Model je verificiran stvarnim ionosferskim kašnjenjem izračunatim na temelju podataka s IGS stanica Medicina (Italija), Bolzano (Italija) i Matera (Italija). Također, vrijednosti dobivene predloženim modelom uspoređene su s modeliranim vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenim referentnim modelom ispravke (prema Klobucharu), pri čemu je korišten odgovarajući programski kod izrađen u razvojnom okruženju *R* [158].

U cilju dodatne provjere modela pri opisu lokalne ionosferske dinamike, pristupilo se identifikaciji dinamike ukupnog sadržaja elektrona na području Jadranskog mora na kojima ne postoje podaci s IGS referentnih stanica. Vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivene predloženim modelom uspoređene su s vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenim na temelju podataka GIM numeričkih ionosferskih mapa za područje Sjevernog Jadrana.

Predloženi model dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja, osim što je verificiran na navedenim trima lokacijama, također je verificiran u dvama različitim razdobljima: 16. 6. – 4. 7. 2006. godine te u istom razdoblju 2007. godine. Za proračun stvarnih VTEC vrijednosti, te za definiranje uvjeta svemirskog vremena prema kontrolnim parametrima korištena je metodologija i izvori podataka opisani i korišteni u 4. poglavlju.

5. MODEL NESPECIFIČNOGA DNEVNOG HODA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA SIGNALA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA

U ovome je poglavlju predložen model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja. Opisan je nastanak i postupak izrade modela na temelju uočenih nepravilnosti u dnevnom hodu ionosferskog kašnjenja satelitskog signala. Izložena je teoretska podloga modela, odnosno opis fizikalnih pojava kojima je objašnjena lokalna dinamika ionosferskog kašnjenja. Prikazane su značajke modela s obzirom na uvjete očekivane primjene, u sklopu čega je definiran algoritam procjene ionosferskog kašnjenja GPS signala kao praktična izvedba predloženog modela. Nadalje, prikazani su rezultati dobiveni iskustvenim prognostičkim modelom pogoršanja uvjeta širenja signala za satelitsko određivanje položaja.

5.1 Fizikalni opis lokalne ionosferske dinamike

U uvjetima mirnog svemirskog vremena i nepobuđene ionosfere, dnevna dinamika ionosferskog kašnjenja u Jadranskoj regiji je naznačena linearnim porastom ionosferskog kašnjenja tijekom noćnih prema jutarnjim satima, postojanjem više lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja tijekom dnevnih sati, te linearnim padom vrijednosti ionosferskog kašnjenja u satima nakon zalaska Sunca prema kraju dana.

Poziva se prethodno definiran izraz:

$$\Delta t_i = \frac{40{,}3}{c \cdot f^2} \int N(h)dh = \frac{40{,}3}{c \cdot f^2} TEC, \tag{5.1}$$

pri čemu su:

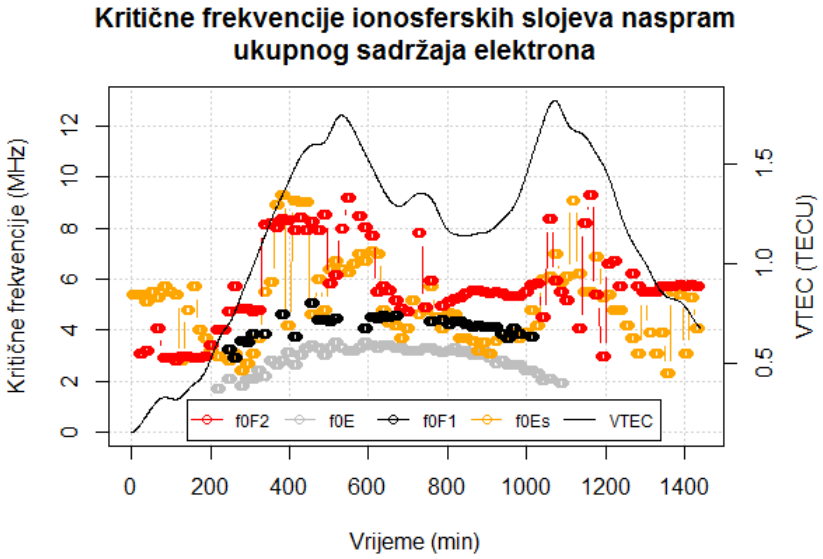
Δt_i... ionosfersko kašnjenje, c... brzina širenja satelitskih signala, f... frekvencija, N... gustoća ionosferskih elektrona, h... visina iznad Zemlje, TEC... ukupni sadržaj elektrona.

Linearni porast gustoće elektrona tijekom noćnih sati posljedica je prijenosa ionizacije, iste pojave uslijed koje se F2 sloj zadržava na noćnoj strani Zemlje. Prema [109], prihvaćeni uzrok noćnog povećanja ukupnog sadržaja elektrona su posljedice magnetosferske konvekcije – širenja ionosferske plazme uslijed interakcije Sunčevog vjetra i magnetosfere duž silnica magnetskog polja. Magnetosferska konvekcija je, kao i ostale pojave unutar geoprostora, prisutna u svim uvjetima svemirskog vremena. U kombinaciji s fotoionizacijskim procesom koji nastupa prije Sunčevog izlaska [135], dolazi do blagih noćnih porasta ukupnog sadržaja elektrona koji se protežu kroz nekoliko sati [109], za razliku od dnevne dinamike, gdje se pojavljuju lokalni maksimumi s vršnim vrijednostima.

Kako se Zemlja (lokalno područje) okreće prema sumraku, vrijednost ukupnog sadržaja elektrona opada. Ova je pojava definirana graničnom crtom koja dijeli osvijetljenu od tamne strane Zemlje, te slabljenjem fotoionizacijskog efekta uslijed povećanja zenitnog kuta Sunca. Poradi navedenih pojava dolazi do ravnomjernog pada vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Kao u noćnim satima, uslijed prijenosa ionizacije ukupni sadržaj elektrona opada ravnomjerno i nakon zalaska Sunca.

Poslije linearnog porasta (dnevni sati) gustoća elektrona ispod visine vršne vrijednosti F2 sloja raste do približno 12:00 sati po lokalnom vremenu, nakon čega opada (snažna ovisnost ionizacije o Sunčevom zenitnom kutu) [135]. Iznad F2 sloja prevladavaju dodatni procesi (difuzija plazme, atmosferski vjetrovi itd.), zbog čega do najveće ionizacije dolazi u popodnevnim satima (u približno 14:00 sati po lokalnom vremenu – manji utjecaj Sunčevog zenitnog kuta, utjecaj vršne vrijednosti temperature neutralnih područja) [135, 129]. U razdobljima niske geomagnetske aktivnosti, ionosfera je i dalje promjenjiva zbog sprege s gornjim slojevima Zemljine neutralne atmosfere [109]. Interakcija termosfere s ionosferom prepoznata je kao temeljni utjecajni proces F područja [112, 128, 9]. Što je sprezanje ioniziranih i neutralnih područja intenzivnije, jači su procesi rekombinacije i veće su stope gubitka iona i elektrona [69, 58]. To je jedan od razloga lokalnih dnevnih promjena ukupnog sadržaja elektrona, odnosno nastupa lokalnih maksimuma. Zbog termosferskih promjena koje potiču kemijske procese gubitka, dolazi do smanjenih vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Atmosferski vjetrovi pomiču ionosfersku plazmu duž silnica magnetskog polja gdje su stope gubitka niže [12, 109]. Osim toga, ionosfera srednjih geografskih širina mjesto je gdje se susreću posljedice pojava nastalih u ekvatorijalnoj ionosferi (ekvatorijalna ionizacijska anomalija i ekvatorijalni mlaz) te u ionosferi visokih geografskih širina (magnetosferski unosi i dinamika auroralnih područja).

Uz navedene pojave, na lokalnu dinamiku ionosferskog kašnjenja utječu povećanja visine vršne vrijednosti gustoće F2 sloja.

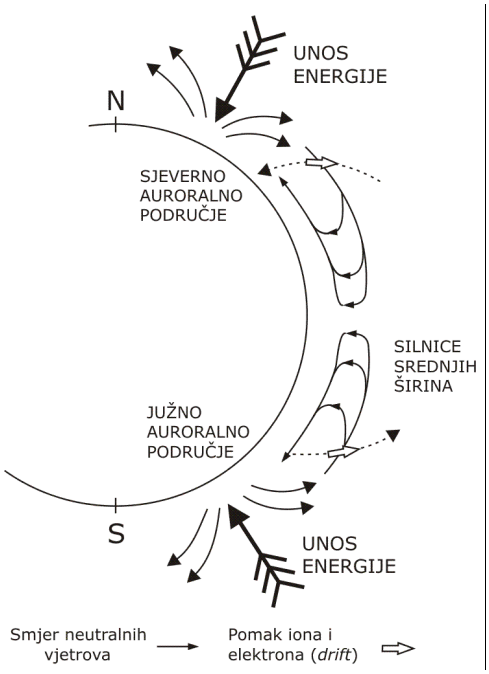


Slika 5.1: Primjer dnevnog hoda kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva i ukupnog sadržaja elektrona

Na slici 5.1, na temelju obrađenih podataka prikazana je proporcionalnost kritične frekvencije *f0F2* i dnevnog hoda ukupnog sadržaja slobodnih elektrona [28, 87, 99, 148].

Putujući ionosferski poremećaji atmosferskim se vjetrovima šire prema ekvatoru te podižu ionosfersku plazmu F sloja (uz visinu vršne vrijednosti gustoće elektrona *N*) (Slika 5.2) [148, 67, 12], što se odražava na promjene u ukupnom sadržaju slobodnih elektrona. Nakon prolaska poremećaja, visina F sloja vraća se na prvotne vrijednosti [110]. Ova je pojava prvi puta opažena proučavanjem odziva F2 sloja na geomagnetske poremećaje [12].

Tijekom ionosferskih i geomagnetskih oluja, unutar ionosfere (geoprostora) ne dolazi do novih procesa, već do intenziviranja postojećih, do još uvijek nepoznate mjere [137, 109, 110, 27, 67, 104, 125]. Od navedenih procesa, za ionosfersku dinamiku tijekom mirnih uvjeta svemirskog vremena svakako su najznačajnije promjene u neutralnom sastavu atmosfere koje utječu na proces rekombinacije, odnosno stopu gubitka ionosferskih elektrona [67, 128].



Slika 5.2: Kruženje poremećaja u ionosferskom F području

Po svojoj složenosti, geoprostor je jedinstveni sustav. Procesi koji se događaju unutar geoprostora još uvijek nisu potpuno objašnjeni i predmet su intenzivnih istraživanja [114, 112, 109, 67, 110, 99, 30, 18, 48]. Promjene u ionosferskoj dinamici rezultat su niza elektrodinamičkih, kemijskih i fizikalnih pojava koje se odvijaju u magnetosferi, plazmasferi, ionosferi, termosferi i troposferi [109, 104, 67], kao posljedica interakcije geoprostora s međuplanetarnim magnetskim poljem i Sunčevim vjetrom, koje pak nastaju na Sunčevoj površini. Stoga je, u cilju promatranja i identifikacije manifestacija učinaka svemirskog vremena, pojave svemirskog vremena potrebno promatrati od trenutka njihovog nastajanja.

5.2 Iskustveni prognostički model pogoršanja uvjeta za satelitsko određivanje položaja

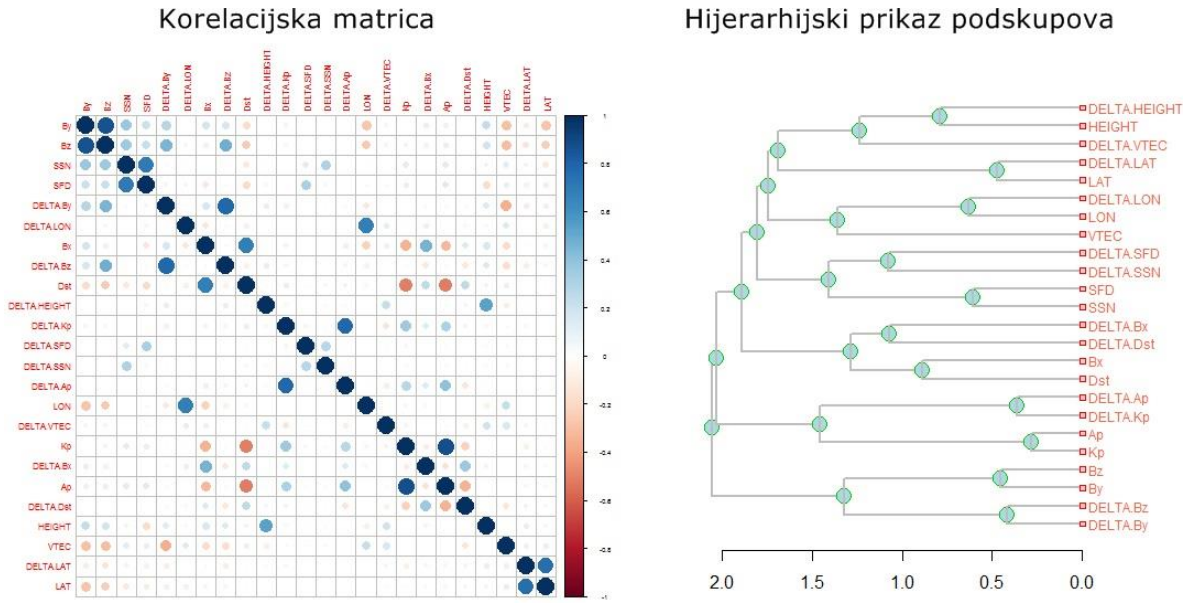
U cilju prognoze učinaka svemirskog vremena i manifestacije pojava izrađen je iskustveni prognostički model pogoršanja uvjeta okoliša širenja signala za satelitsko određivanje položaja.

5.2.1 Opći prognostički model

Ulazni parametri prognostičkog modela su pokazatelji Sunčeve [155], geomagnetske [154, 155, 164] i ionosferske [155, 150] aktivnosti definirani u 3. poglavlju, te vremenski nizovi položajnih odstupanja u sjevernom, istočnom i vertikalnom smjeru (φ, λ i h) opaženi na mjernoj stanici *pfri* – Rijeka (Hrvatska) [156], korišteni u cilju identifikacije i procjene učinaka svemirskog vremena na usluge satelitskih navigacijskih sustava. Uz apsolutne vrijednosti pokazatelja, korištene su razlike u vrijednosti u odnosu na prošlo mjerenje pojedinog pokazatelja Δ_M:

- φ, $\Delta\varphi$, λ, $\Delta\lambda$, h, Δh, *SSN*, *ΔSSN*, *SFD*, *ΔSFD*, *Kp*, *ΔKp*, *Ap*, *ΔAp*, *Dst*, *ΔDst*, *Bx*, *ΔBx*, *By*, *ΔBy*, *Bz*, *ΔBz*, *VTEC* i *ΔVTEC.*

Na slici 5.3 prikazana je korelacijska matrica pokazatelja svemirskog vremena tijekom razdoblja promatranja. Tablica 5.1 prikazuje koeficijente korelacije ukupnog sadržaja elektrona s ostalim pokazateljima.

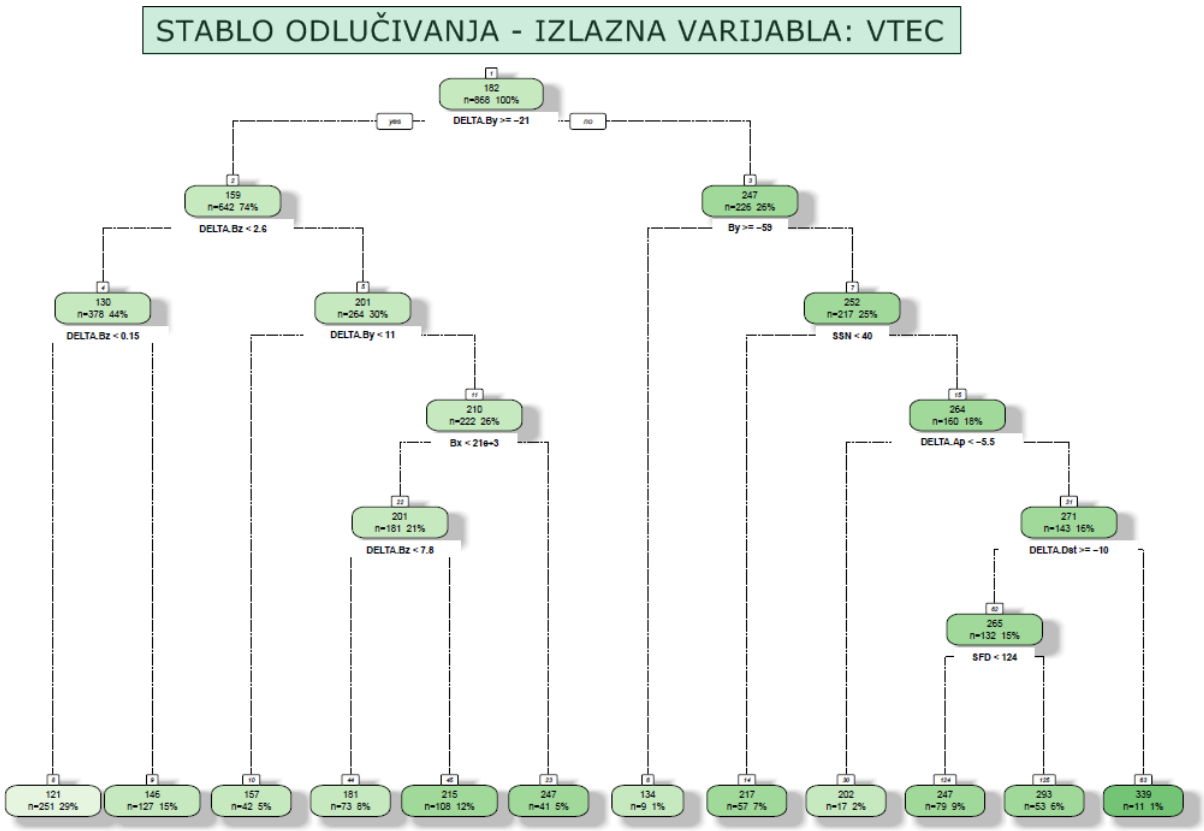


Slika 5.3: Korelacijska matrica pokazatelja svemirskog vremena (lijevo) i hijerarhijski prikaz (dendrogram) podskupova (desno)

Tablica 5.1: Prepoznate (mjerljive) korelacije ukupnog sadržaja elektrona s ostalim pokazateljima svemirskog vremena

PARAMETAR	KOEFICIJENT KORELACIJE	PARAMETAR	KOEFICIJENT KORELACIJE	PARAMETAR	KOEFICIJENT KORELACIJE
Ap	-0,008	SSN	0,121	ΔSFD	-0,043
Bx	-0,186	ΔAp	0,012	ΔSSN	-0,045
By	-0,297	ΔBx	-0,017	ΔVTEC	0,164
Bz	-0,306	ΔBy	-0,355	Δλ	0,148
Dst	0,094	ΔBz	-0,171	Δφ	0,085
h	-0,003	ΔDst	-0,133	λ	0,236
Kp	-0,004	Δh	-0,095	φ	0,113
SFD	0,104	ΔKp	0,043		

Model procjene ukupnog sadržaja elektrona temeljen na ulaznim podacima pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti prikazan je na slici 5.4 u obliku regresijskog stabla odlučivanja.



Slika 5.4: Opći model stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom

5.2.2 Sažetak rezultata dobivenih općim prognostičkim modelom

Ulazni parametri korišteni pri izradi stabla odlučivanja su pokazatelji *Bx*, *By*, *ΔAp*, *ΔBy*, *ΔBz, ΔDst*, *SFD*. Broj uzoraka *n* je 868. U tablici 5.2 prikazane su značajke izrađenog modela.

Tablica 5.2: Značajke modela stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom

	Parametar složenosti [*cp*]	**Broj terminalnih čvorova [*nsplit*]**	**Relativna pogreška [*rel error*]**	**Pogreška križne validacije [*xerror*]**	**Standardno odstupanje [*xstd*]**
1	0,300740	0	1,00000	1,00275	0,045466
2	0,185961	1	0,69926	0,71642	0,034260
3	0,028092	2	0,51330	0,54363	0,032965
4	0,022747	3	0,48521	0,55081	0,033959
5	0,021165	4	0,46246	0,55928	0,035520
6	0,017030	5	0,44130	0,55126	0,036072
7	0,016409	6	0,42427	0,53213	0,035273
8	0,014087	7	0,40786	0,53830	0,036627
9	0,012416	9	0,37968	0,52555	0,035598
10	0,011502	10	0,36727	0,52807	0,036709
11	0,010000	11	0,35577	0,50621	0,034669

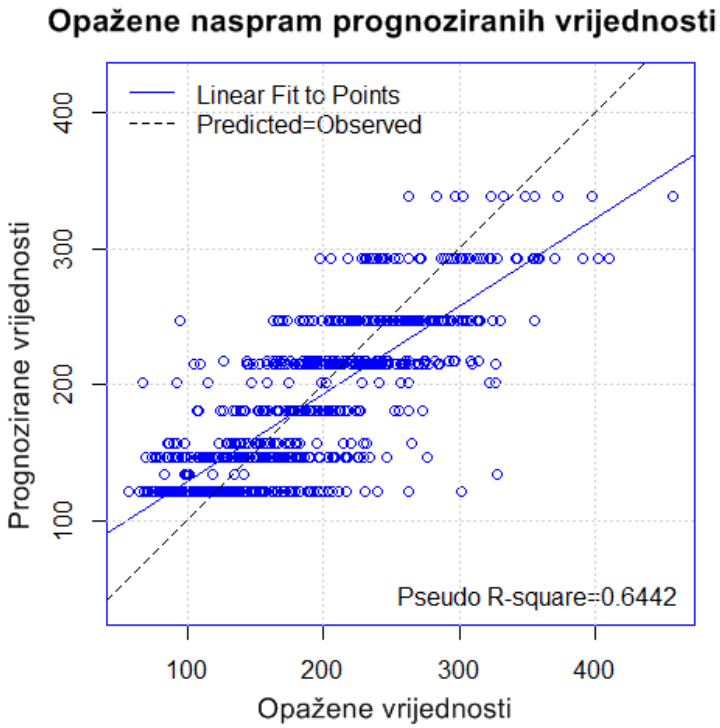
U Tablici 5.3 prikazana su pravila kojima je definiran opći model prognoze.

Tablica 5.3: Stablo odlučivanja prema pravilima – opći model

P	**Vrijednosti**						**VTEC**	**C**
8	ΔBy≥-21,35	ΔBz<2,65	ΔBz<0,15				121,3	251(29%)
9	ΔBy≥-21,35	ΔBz<2,65	ΔBz<0,15				146,4	127(15%)
45	ΔBy≥-21,35	ΔBz<2,65	ΔBy≥11,1	Bx<21160	ΔBz≥2,65		214,7	108(12%)
124	ΔBy≥-21,35	By<-59,4	SSN≥40,5	ΔAp≥-5,5	ΔDst≥-10	SFD<123,5	247,2	79(9%)
44	ΔBy≥-21,35	ΔBz<2,65	ΔBy≥11,1	Bx<21160	Bz<7,85		181,1	73(8%)
14	ΔBy≥-21,35	By<-59,4	SSN<40,5				217,4	57(7%)
125	ΔBy≥-21,35	By<-59,4	SSN<40,5	ΔAp≥-5,5	ΔDst≥-10	SFD≥123,5	292,6	53(6%)
10	ΔBy≥-21,35	ΔBz≥2,65	ΔBy<11,1				157,1	42(5%)
23	ΔBy≥-21,35	ΔBz≥2,65	ΔBy≥11,1	Bx≥21160			247	41(5%)
30	ΔBy<-21,35	By<-59,4	SSN≥40,5	ΔAp<-5,5			201,9	17(2%)
63	ΔBy<-21,35	By<-59,4	SSN≥40,5	ΔAp≥-5,5	ΔDst<-10		339,1	11(1%)
6	ΔBy<-21,35	By≥59,4					133,7	9(1%)

P – pravilo, C – pokrivenost

Na slici 5.5 prikazan je postupak vrednovanja općeg prognostičkog modela primijenjenog za razdoblje 2011./2012. godine na temelju prognoziranih i opaženih vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Pseudo R-kvadratna vrijednost predstavlja mjeru korelacije između opaženih i prognoziranih vrijednosti, te u ovome slučaju iznosi 0,6442.



Slika 5.5 Opažene naspram prognoziranih vrijednosti slobodnog sadržaja elektrona izražene u (TECU/10) – opći prognostički model

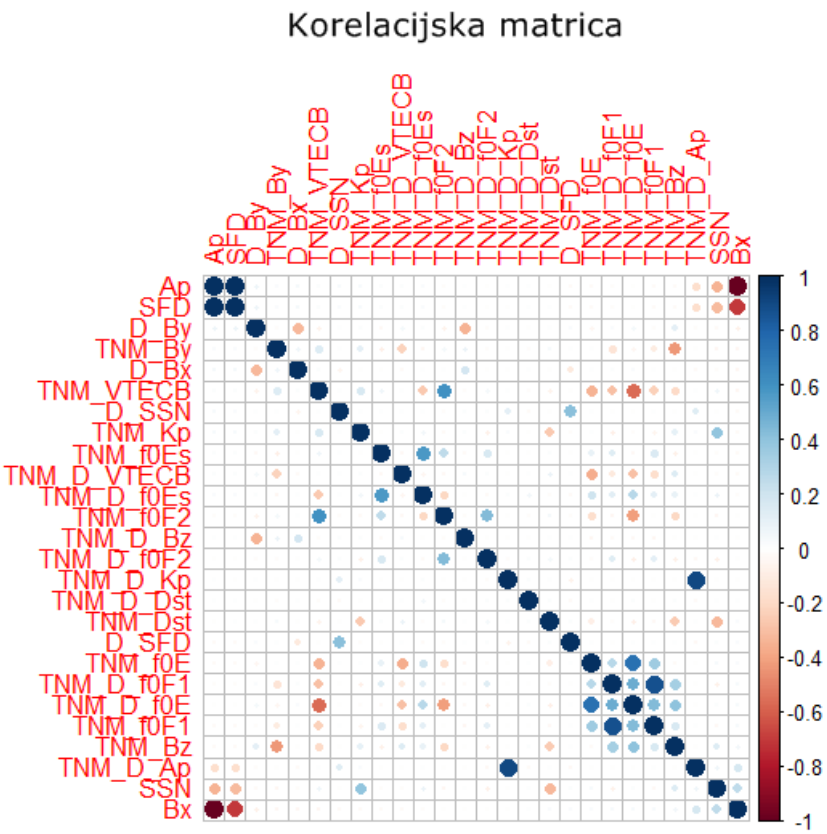
U nastavku je prikazan opisani prognostički model primijenjen za razdoblje 16. 6. – 4. 7. 2006. godine.

5.2.3 Primjena prognostičkog modela na razdoblje istraživanja

Ulazni parametri prognostičkog modela su pokazatelji Sunčeve [155], geomagnetske [154, 155, 164] i ionosferske [155] aktivnosti definirani u 3. poglavlju te proračunate vertikalne vrijednosti ukupnog sadržaja slobodnih elektrona opažene na stanici Bolzano (Italija). Uz apsolutne vrijednosti, korištene su razlike u vrijednosti u odnosu na prošlo mjerenje pojedinog pokazatelja Δ_M*:*

- *Bx, By, Bz, SFD, SSN, Ap, Kp, Dst, f0E, f0F1, f0F2, f0Es, VTEC, ΔBx, ΔBy, ΔBz, ΔSFD, ΔSSN, ΔAp, ΔKp, ΔDst, Δf0E, Δf0F1, Δf0F2, Δf0Es, ΔVTEC.*

Broj uzoraka *n* je 27360. Na slici 5.6 prikazana je korelacijska matrica pokazatelja svemirskog vremena. Tablica 5.4 prikazuje koeficijente korelacije ukupnog sadržaja elektrona s ostalim pokazateljima.

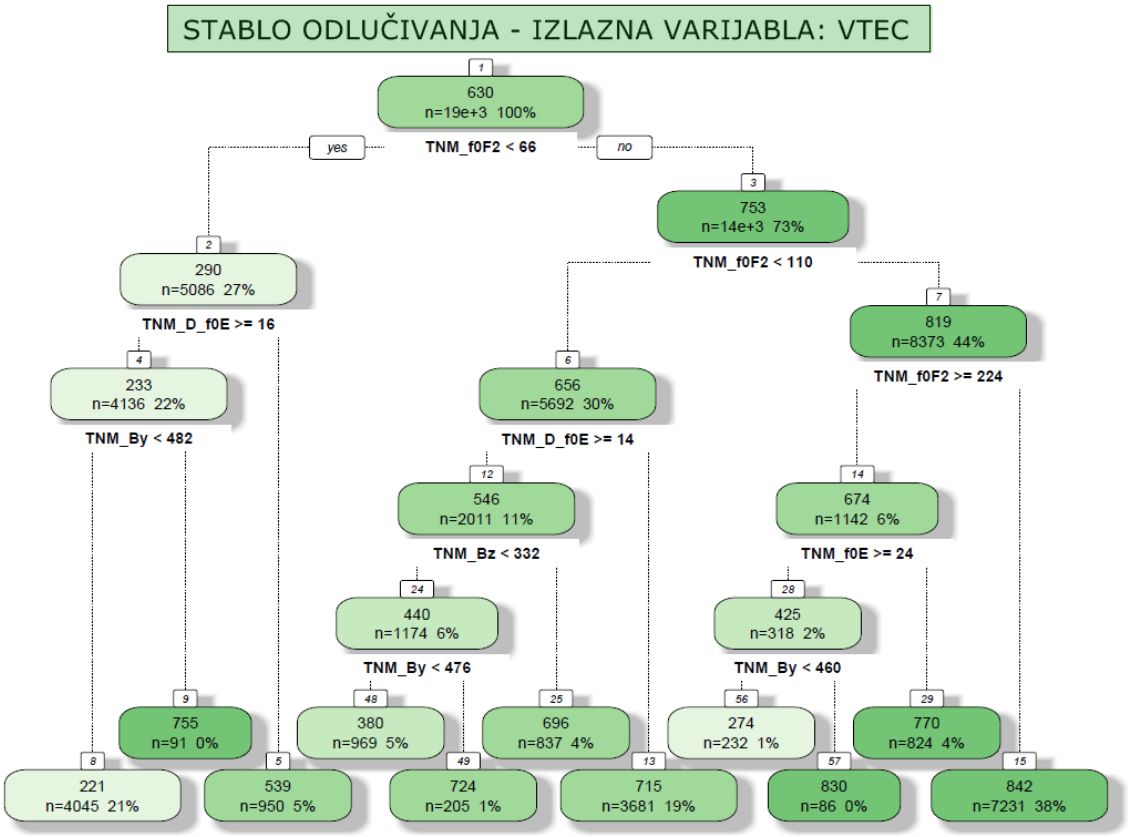


Slika 5.6: Korelacijska matrica pokazatelja svemirskog vremena za razdoblje 16. 6. – 4. 7. 2006 godine

Tablica 5.4: Prepoznate (mjerljive) korelacije ukupnog sadržaja elektrona s ostalim pokazateljima svemirskog vremena za razdoblje 16. 6. – 4. 7. 2006. godine

PARAMETAR	KOEFICIJENT KORELACIJE	PARAMETAR	KOEFICIJENT KORELACIJE	PARAMETAR	KOEFICIJENT KORELACIJE
Ap	0,019	f0F2	0,61	ΔDst	-0,019
Bx	-0,041	Kp	0,161	Δf0E	-0,57
By	0,149	SFD	0,02	Δf0Es	-0,269
Bz	-0,194	SSN	0,067	Δf0F2	0,05
Dst	-0,062	ΔAp	0,000	ΔKp	0,005
f0E	-0,341	ΔBx	0,013	ΔSFD	-0,000
f0Es	0,065	ΔBy	-0,062	ΔSSN	0,005
f0F1	-0,296	ΔBz	-0,019	ΔVTEC	0,009
f0F1	-0,237				

Model procjene ukupnog sadržaja elektrona temeljen na ulaznim podacima pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti tijekom promatranog razdoblja 16. 6. – 4. 7. 2006. godine (dani 167 – 185 u 2006. godini) prikazan je na slici 5.7.



Slika 5.7: Primijenjeni model stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom

5.2.4 Sažetak rezultata dobivenih primijenjenim prognostičkim modelom

Ulazni parametri korišteni pri izradi stabla odlučivanja su pokazatelji *By*, *Bz*, *Δf0E, f0E i f0F2*. U tablici 5.5 prikazane su značajke izrađenog modela.

Tablica 5.5: Značajke modela stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom

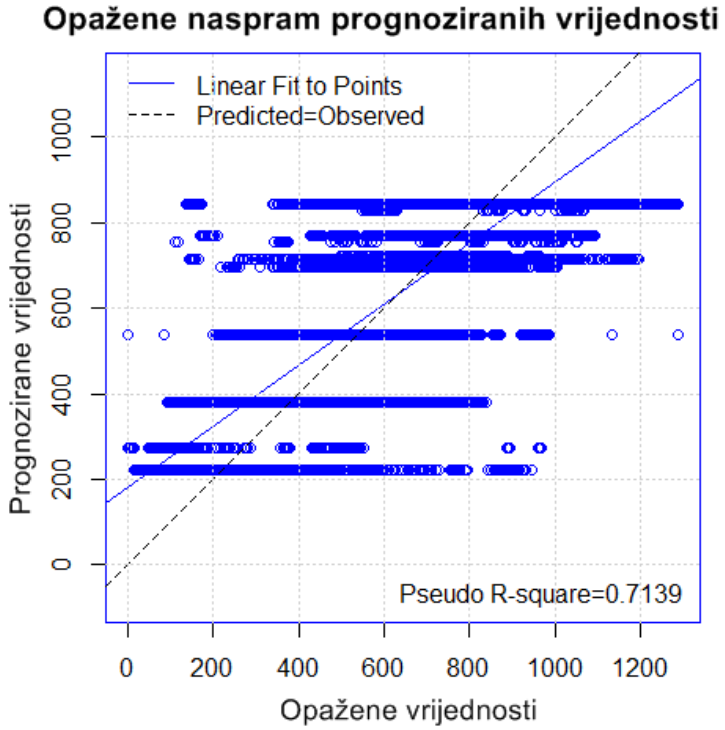
	Parametar složenosti [*cp*]	**Broj terminalnih čvorova [*nsplit*]**	**Relativna pogreška [*rel error*]**	**Pogreška križne validacije [*xerror*]**	**Standardno odstupanje [*xstd*]**
1	0,495918	0	1,00000	1,00018	0,0077382
2	0,056066	1	0,50408	0,50423	0,0067222
3	0,044784	2	0,44802	0,44821	0,0063561
4	0,022905	3	0,40323	0,40345	0,0061066
5	0,019817	4	0,38033	0,38064	0,0057652
6	0,017324	5	0,36051	0,36098	0,0056400
7	0,016912	6	0,34318	0,34663	0,0051926
8	0,015723	7	0,32627	0,33218	0,0047362
9	0,012416	8	0,31055	0,31124	0,0040849
10	0,011995	9	0,29813	0,30158	0,0040111
11	0,010000	10	0,28614	0,28691	0,0038374

U tablici 5.6 prikazana su pravila kojima je definiran primijenjeni model prognoze.

Tablica 5.6: Stablo odlučivanja prema pravilima – primijenjeni model

P	Vrijednosti					VTEC	C
15	f0F2≥66,5	f0F2≥109,5	f0F2<223,5			842	7231(38%)
8	f0F2<66,5	Δf0E≥15,5	By< 482,5			220,8	4045(21%)
13	f0F2≥66,5	f0F2< 109,5	Δf0E< 14,5			715,1	3681(19%)
48	f0F2≥66,5	f0F2< 109,5	Δf0E≥14,5	Bz<331,5	By<476,5	379,8	969(5%)
5	f0F2< 66,5	Δf0E< 15,5				538,6	950(5%)
25	f0F2≥66,5	f0F2< 109,5	Δf0E≥14,5	Bz>331,5		695,9	837(4%)
29	f0F2≥66,5	f0F2≥109,5	f0F2≥223,5	f0E<24		769,6	824(4%)
56	f0F2≥66,5	f0F2≥109,5	f0F2≥223,5	f0E≥24	By<460,5	274,3	232(1%)
49	f0F2≥66,5	f0F2< 109,5	f0E≥14,5	Bz<331,5	By≥476,5	724,1	205(1%)
9	f0F2<66,5	f0E≥15,5	By≥482,5			755	91(0%)
57	f0F2≥66,5	f0F2≥109,5	f0F2≥223,5	f0E≥24	By≥460,5	830	86(0%)

P – pravilo, C – pokrivenost



Slika 5.8 Opažene naspram prognoziranih vrijednosti slobodnog sadržaja elektrona izražene u (TECU/100) – primijenjeni prognostički model

Na slici 5.8 prikazano je vrednovanje općeg prognostičkog modela primijenjenog za razdoblje 2011/2012. godine na temelju prognoziranih i opaženih vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona. Pseudo R-kvadratna vrijednost predstavlja mjeru korelacije između opaženih i prognoziranih vrijednosti te iznosi 0,7139.

5.2.5 Završna razmatranja o rezultatima prognostičkog modela

U nastavku je prikazan sažetak rezultata korelacije promatranih pokazatelja u skladu s veličinama vrijednosti koeficijenta korelacije.

Na temelju rezultata *općeg* prognostičkog modela utvrđeno je kako ukupni sadržaj elektrona pokazuje najveću ovisnost (korelaciju) s *Bx*, *By* i *Bz* pokazateljima jakosti geomagnetskog polja.

Bx korelira s *Kp*, *Ap*, *Dst*, *SFD* i *SSN* pokazateljem. *By* pokazuje korelaciju s *SSN* i *SFD* pokazateljem, dok je vidljiva povezanost *Bz* pokazatelja s pokazateljima *Ap*, *Dst*, *SSN* i *SFD*.

Ap i *Dst* pokazatelji koreliraju s *SSN* i *SFD* pokazateljima.

Vrijednosti i promjene vrijednosti položaja φ, $\Delta\varphi$, λ, $\Delta\lambda$, h, Δh (geografska širina, geografska dužina i nadmorska visina) pokazuju sljedeće ovisnosti:

- geografska širina φ ($\Delta\varphi$) pokazuje korelaciju s pokazateljima *By*, *Bz*, *ΔBy*, *ΔBz*
- geografska dužina λ ($\Delta\lambda$) u korelaciji je s *By*, *Bz*, *Bx* i *VTEC* pokazateljima
- nadmorska visina h (Δh) u korelaciji je s pokazateljima *VTEC*, *By*, *Bz*, *ΔBy*, *Δ*Bz, *Bx* i *Dst*.

Na temelju rezultata *primijenjenog* modela (za razdoblje 16. 6. – 04. 7. 2006. godine), utvrđeno je kako ukupni sadržaj elektrona korelira i podložan je utjecaju *f0F2*, *By*, *Bz*, *Δf0E* i *f0E* pokazatelja. Ovi su pokazatelji korišteni u modelu prognoze. Osim toga, ukupni sadržaj elektrona pokazuje mjerljive korelacije s *Kp*, *Δf0Es*, *Δf0F1* i *f0F1* pokazateljem, dok pokazatelj promjene vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona (*ΔVTEC*) pokazuje ovisnost o pokazateljima *Δf0F1*, *f0E*, *Δf0E* i *Bz*.

Pokazatelji *f0F2*, *f0F1* i *Δf0E* pokazuju povezanost s *Bz* pokazateljem, dok je *Bz* podložan utjecaju *Dst* i *SSN* pokazatelja. Pokazatelj *By* pokazuje korelaciju s *Kp* pokazateljem, koji korelira s *ΔSSN* i *SSN* pokazateljima. *Dst* pokazatelj pokazuje korelaciju s *SFD* i *SSN* pokazateljem.

Promjene u vrijednostima ukupnog sadržaja elektrona mogu se predvidjeti na temelju opaženih geomagnetskih i ionosferskih poremećaja, za koje se može očekivati da će nastupiti nakon nastanka odnosnih pojava na Suncu i Sunčevoj površini, ovisno o vrsti poremećaja. Tijekom mirnih uvjeta svemirskog vremena, glavni utjecajni pokazatelj na dinamiku ukupnog sadržaja elektrona je ionosferski F2 sloj i njegove varijacije. Ove se promjene u dinamici F2 sloja mogu objasniti spregom s neutralnim atmosferskim slojevima te utjecajem veličina i pojava koje definiraju lokalnu ionosfersku dinamiku.

5.3 Opis predloženog modela ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja

Prijedlog novog regionalnog modela ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja prikazan je u nastavku poglavlja.

5.3.1 Značajke modela i uvjeti primjene

Model nespecifičnog dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje temeljen je na vremenskim nizovima dnevnog ionosferskog kašnjenja.

Model je definiran nizom od 5 funkcija koje predstavljaju intervale tijekom 24 sata, i zajedno čine algoritam procjene ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja. Uvjeti korištenja modela definirani su pokazateljima svemirskog vremena, razdobljem opažanja i područjem primjenjivosti:

- niska Sunčeva aktivnost (uz Sunčev ciklus)
- niska geomagnetska aktivnost
- nepobuđena ionosfera
- razdoblje ljetnih mjeseci i
- područje Jadranske regije (srednje geografske širine).

U definiranim uvjetima, model poprima geometrijski i matematički oblik prikazan u nastavku.

5.3.2 Definicija predloženog modela

Model se sastoji od pet komponenti:

$$t_D = f_0 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = \sum_{i=0}^{4} f_i, \tag{5.2}$$

gdje su:

t_D... ionosfersko kašnjenje, $f_i, i = 0, \ldots 4$ ... komponente modela.

Komponente modela definirane su na sljedeći način:

i) Noćna komponenta f_0;

$$f_0 = f_{0M}(t) = a_M \cdot t + b_M\,, \quad \text{za} \quad 0 \le t < \left(t_2 - \frac{P_2}{4}\right). \tag{5.3}$$

ii) Komponenta središnjeg lokalnog maksimuma f_1;

$$f_1 = f_1(t) = k_1\{A_1 \cdot \cos[B_1 \cdot (t - t_1)] + K_1\}, \quad \text{za} \quad \left(t_1 - \frac{P_1}{4}\right) \le t < \left(t_1 + \frac{P_1}{4}\right). \tag{5.4}$$

iii) Komponenta jutarnjeg lokalnog maksimuma f_2;

$$f_2 = f_2(t) = k_2\{A_2 \cdot \cos[B_1 \cdot (t - t_2)] + K_2\}, \quad \text{za} \quad \left(t_2 - \frac{P_2}{4}\right) \le t < \left(t_2 + \frac{P_2}{4}\right). \tag{5.5}$$

iv) Komponenta popodnevnog lokalnog maksimuma f_3;

$$f_3 = f_3(t) = k_3\{A_3 \cdot \cos[B_3 \cdot (t - t_3)] + K_3\}, \quad \text{za} \quad \left(t_3 - \frac{P_3}{4}\right) \le t < \left(t_3 + \frac{P_3}{4}\right). \tag{5.6}$$

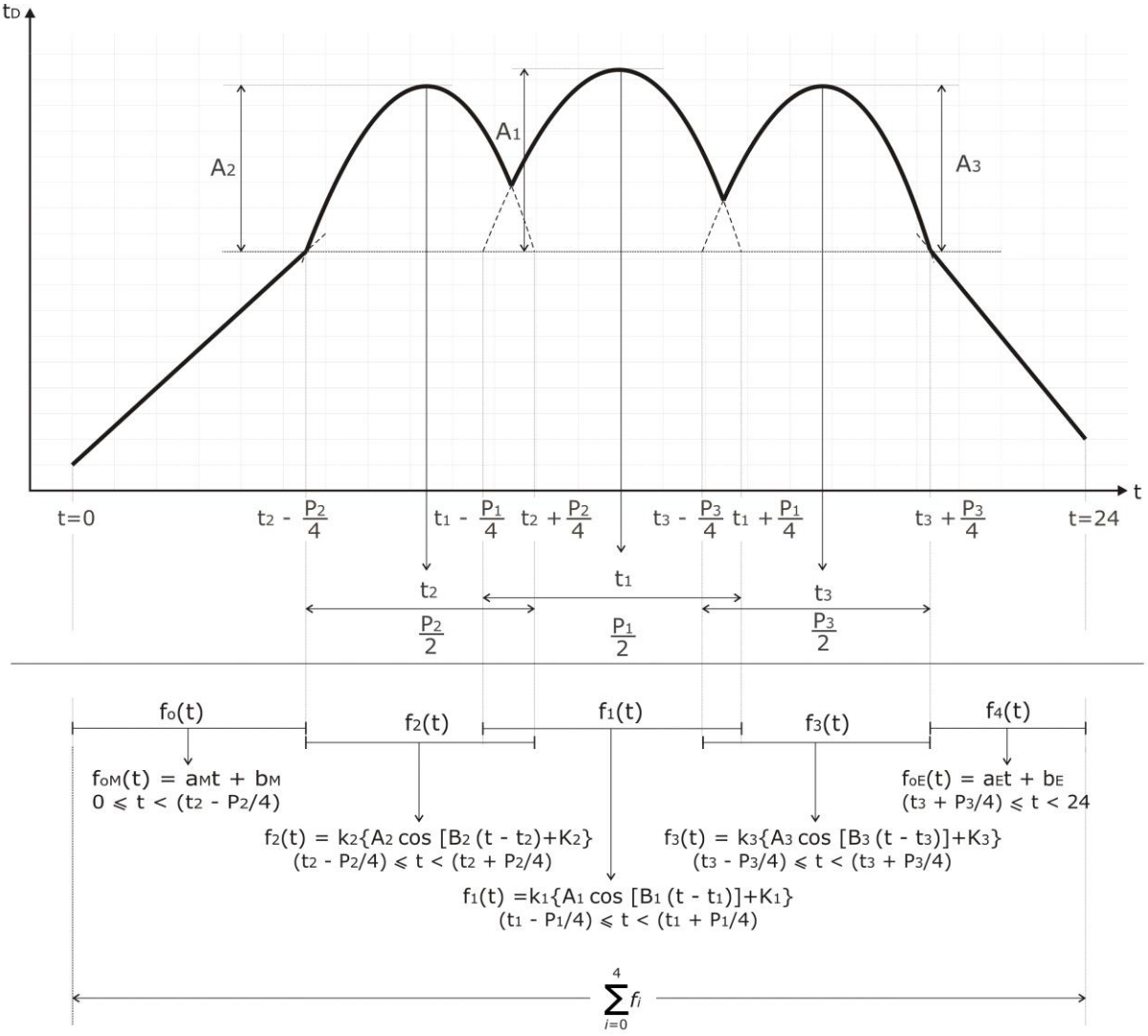
v) Večernja komponenta f_4;

$$f_4 = f_{0E}(t) = a_E \cdot t + b_E\,, \qquad \text{za} \qquad \left(t_3 + \frac{P_3}{4}\right) \leq t < 24. \tag{5.7}$$

Pri tome su:

t ... vrijeme za koje se proračunava ionosfersko kašnjenje, $a_{M,E}, b_{M,E}$ ... koeficijenti noćne, odnosno večernje komponente vrijednosti ionosferskog kašnjenja, $A_{1,2,3}$... vršne vrijednosti lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja, $t_{1,2,3}$... trenuci nastupa (faze) vršnih vrijednosti lokalnih maksimuma, $P_{1,2,3}$... periode lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja, pri čemu su $B_j = \frac{2\pi}{P_j}, j = 1, \ldots, 3$, $k_{1,2,3}$... koeficijenti optimizacije vrijednosti lokalnih maksimuma, $K_{1,2,3}$... vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom lokalnih maksimuma modelirane prema Klobucharovom modelu ispravke.

Konstrukcija modela prikazana je na slici 5.9.



Slika 5.9: Konstrukcija i razrada predloženog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja

Vrijednosti kontrolnih parametara prikazane su u tablici 5.7.

Tablica 5.7: Koeficijenti predloženog modela

Koeficijent	Naziv	Vrijednost
aM	Koeficijent smjera noćne komponente	0,8733
bM	Koeficijent sjecišta noćne komponente	1,3941
A1	Parametar vršne vrijednosti središnjeg lokalnog maksimuma	4,5021
P1	Parametar trajanja središnjeg lokalnog maksimuma	9,9803
t1	Parametar nastupa vršne vrijednosti središnjeg lokalnog maksimuma	13,0005
A2	Parametar vršne vrijednosti jutarnjeg lokalnog maksimuma	8,3037
P2	Parametar trajanja jutarnjeg lokalnog maksimuma	15,0587
t2	Parametar nastupa vršne vrijednosti jutarnjeg lokalnog maksimuma	8,596
A3	Parametar vršne vrijednosti popodnevnog lokalnog maksimuma	9,5305
P3	Parametar trajanja popodnevnog lokalnog maksimuma	12,9864
t3	Parametar nastupa vršne vrijednosti popodnevnog lokalnog maksimuma	17,8684
aE	Koeficijent smjera večernje komponente	-1,3759
bE	Koeficijent sjecišta večernje komponente	35,7096

Algoritam predloženog modela izrađen je u programskom razvojnom okruženju R [158]. Koeficijenti modela navedeni u tablici 5.7 korišteni su, osim pri izradi, tijekom cjelokupnog postupka verifikacije. U sljedećem poglavlju prikazani su rezultati verifikacije predloženog modela sa stvarnim ionosferskim kašnjenjem, te rezultati usporedbe vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobiveni predloženim modelom s vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenim prema Klobucharovom modelu ispravke.

6. VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG MODELA

Predloženi model ionosferskog kašnjenja verificiran je vrijednostima stvarnog ionosferskog kašnjenja. Modelirane vrijednosti uspoređene su s vrijednostima ionosferskog kašnjenja primjenom Klobucharovog modela ispravke. Osim toga, prikazana je usporedba dobivenih vrijednosti predloženog modela s vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenim na temelju podataka iz GIM ionosferskih mapa.

6.1 Ispitivanje modela unutar definiranih uvjeta i kriteriji uspješnosti

Verifikacija modela izvršena je prema vrijednostima kontrolnih parametara po svojim značajkama, na temelju sljedećih kriterija uspješnosti.

Promatrajući regionalni i vremenski karakter, predloženi model može se smatrati uspješnim ako ionosfersko kašnjenje opisuje 40 % točnije u odnosu na referentni (Klobucharov) model ispravke.

Također, model se može smatrati uspješnim ako se predloženim modelom postigne dvostruko veća apsolutna točnost ispravke ionosferskog kašnjenja u odnosu na referentni (Klobucharov) model.

Model se nadalje može smatrati uspješnim ako se modeliranim vrijednostima ionosferskog kašnjenja, stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja umanje za 75 %. Ovo je zahtjevana vrijednost točnosti opisa lokalne ionosferske dinamike. Predloženi model ionosferskog kašnjenja GPS signala ispitan je:

i) u razdoblju mirnog svemirskog vremena i nepobuđene ionosfere
ii) tijekom ljetnih mjeseci
iii) na području Jadranske regije.

6.2 Verifikacija modela i analiza pogrešaka

Prilikom verifikacije modela korišteno je vremensko razdoblje od 19 dana – dani 167 – 185 u 2006. godini (16. 6. – 4. 7. 2006. godine), a zatim isto razdoblje u godini 2007. Za potrebe verifikacije korišteni su podaci dnevnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobiveni s IGS stanica Medicina (Italija), Bolzano (Italija) i Matera (Italija). U tablici 6.1. prikazane su opće značajke korištenih IGS stanica.

Tablica 6.1: Opći podaci o korištenim IGS GNSS mjernim stanicama prilikom verifikacije predloženog modela

Oznaka stanice	**Ime stanice (država)**	**Geografska širina φ (N)**	**Geografska dužina λ (E)**	**Nadmorska visina h (m)**
bzrg	Bolzano (Italija)	46,4990	11,3368	328,8
medi	Medicina (Italija)	44,5199	11,6468	50,0
mate	Matera (Italija)	40,6491	16,7045	535,6

Stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivene su na način opisan u 3. poglavlju. Vrijednosti ionosferskog kašnjenja prema referentnom modelu (prema Klobucharu) dobivene su izradom programskog koda [139].

Analizirana je pogreška dnevnih vrijednosti dobivenih predloženim modelom s obzirom na vrijednosti ispravke ionosferskog kašnjenja dobivene po Klobucharu, a u odnosu na stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja. Odstupanja modeliranih vrijednosti definirana su [1]:

i) apsolutnom pogreškom:

$$P_A = |x_m - x_p| \tag{6.1}$$

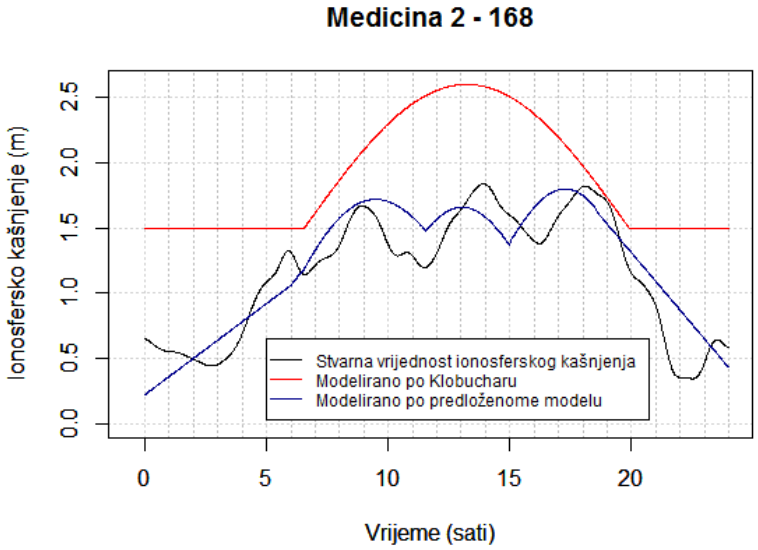
ii) relativnom pogreškom:

$$P_R = \frac{x_\mathrm{m} - x_\mathrm{p}}{x_\mathrm{p}} \cdot 100, \tag{6.2}$$

pri čemu su x_m... modelirane vrijednosti ionosferskog kašnjenja, x_p... prave vrijednosti ionosferskog kašnjenja.

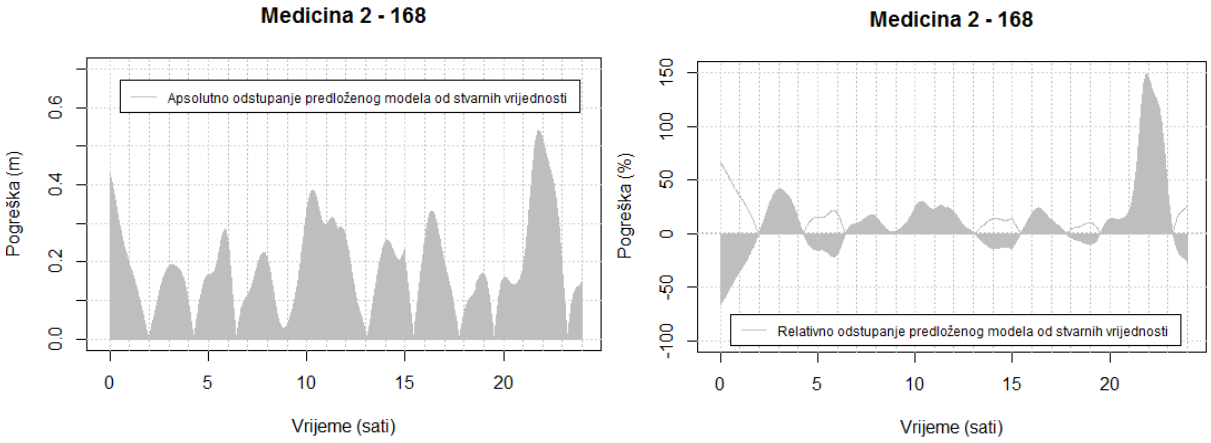
6.3 Verifikacija modela primjenom podataka s IGS GNSS stanice Medicina

Na slici 6.1. prikazane su stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja za 2. dan promatranog razdoblja, odnosno dan 168 (17. 6. 2006. godine), opažene na stanici Medicina (Italija). Prikazane su vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivene modeliranjem prema Klobucharu te vrijednosti dobivene prema predloženom modelu. Razlučivost svih vremenskih nizova je jedna minuta.



Slika 6.1: Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te prema predloženome modelu na stanici Medicina (Italija) za dan 168 u 2006. godini

Na slici 6.2 prikazane su apsolutne i relativne pogreške u odstupanju predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom promatranog dana.



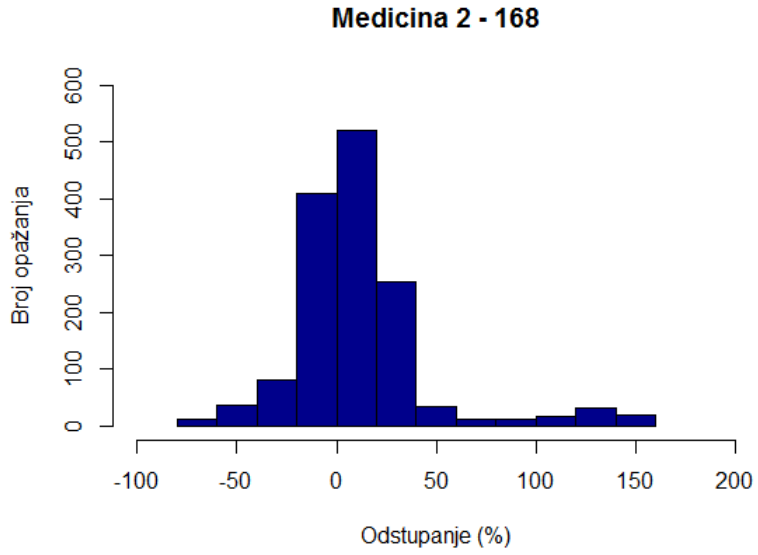
Slika 6.2. Apsolutno (lijevo) i relativno (desno) odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 168. dana u 2006. godini – stanica Medicina (Italija)

U tablici 6.2, relativne vrijednosti odstupanja izražene su u postocima, dok su apsolutne vrijednosti izražene u metrima. Srednja vrijednost odstupanja predloženog modela iznosi 10,6 %, odnosno 0,18 m, uz standardno odstupanje od 34,6 %, odnosno 0,12 m. Istovremeno, srednja vrijednost odstupanja prema Klobucharu iznosi 90.8 %, odnosno 0,73 m, uz standardno odstupanje od 81,3 %, odnosno 0,34 m.

Tablica 6.2: Statistički pokazatelji vrijednosti odstupanja modelirane ionosferske dinamike za dan 168 na IGS stanici Medicina (Italija)

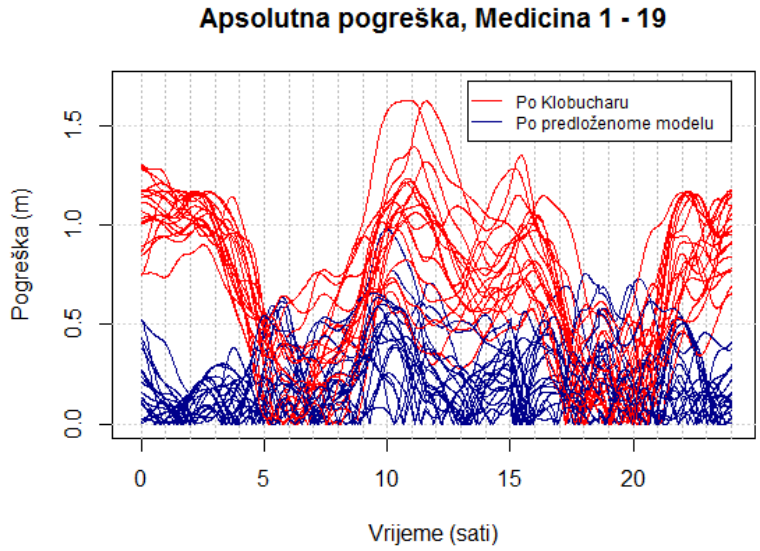
Relativne vrijednosti (%)							
Predloženi model				**Model prema Klobucharu**			
Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje
10,6446	6,9846	1199,753	34,6375	90,8382	59,0318	6603,635	81,2628
Apsolutne vrijednosti (m)							
Predloženi model				**Model prema Klobucharu**			
Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje
0,1849	0,1661	0,0135	0,1161	0,7297	0,8518	0,1136	0,3370

Relativne učestalosti izračunatih vrijednosti odstupanja dobivenih predloženim modelom za dan 168 za stanicu Medicina prikazane su na slici 6.3.



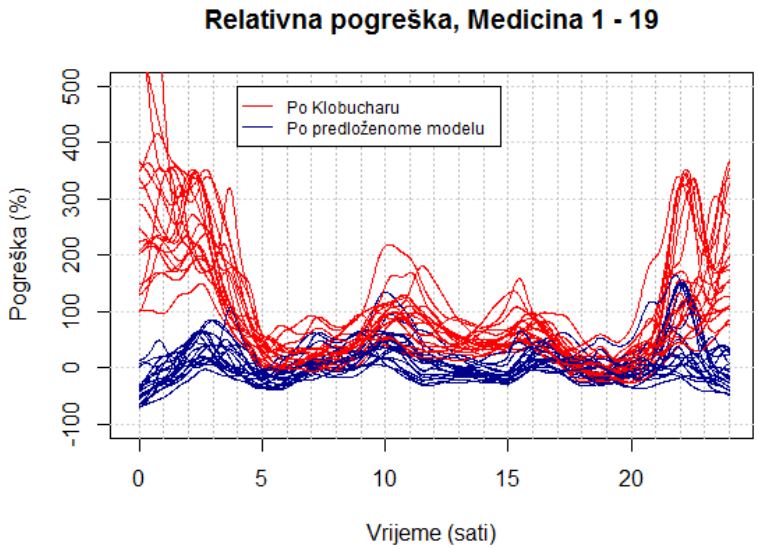
Slika 6.3: Histogram odstupanja modeliranih od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja na dan 168 na stanici Medicina (Italija)

Opisani postupak primijenjen je za cijelo razdoblje opažanja – dane 167 – 185, odnosno 19 dana u 2006. godini (grafički prikazi dnevnih vrijednosti stvarnog i modeliranog ionosferskog kašnjenja nalaze se u prilogu doktorskog rada). Na sljedećim slikama prikazane su pogreške Klobucharovog i predloženog modela u odnosu na stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja, pri čemu su dnevne pogreške prikazane za cjelokupno promatrano razdoblje.



Slika 6.4: Dijagram apsolutnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Medicina (Italija)

Vrijednosti pogreške predloženog modela u odnosu na stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja obrađene su na dnevnoj razini. U tablici 6.3 prikazani su statistički pokazatelji srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja ispravke predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za stanicu Medicina.



Slika 6.5: Dijagram relativnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Medicina (Italija)

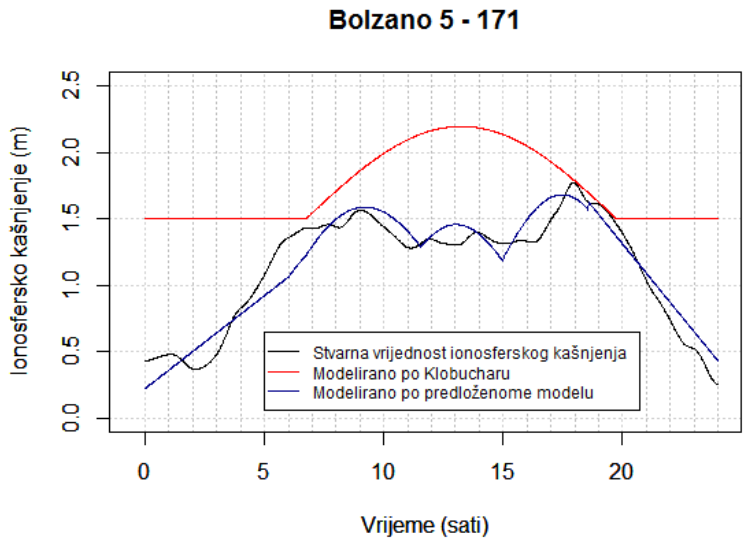
Tablica 6.3: Osnovni statistički pokazatelji [%] srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja korekcije predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za stanicu Medicina (Italija)

Dan	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje
1	22,01791	18,72423	761,0079	27,58637
2	10,64455	6,984598	1199,753	34,63745
3	-5,499538	-12,22023	1021,818	31,96588
4	15,5943	7,210929	1447,056	38,04018
5	7,422644	-1,744553	1262,047	35,5253
6	0,5632027	-2,643931	406,7798	20,16878
7	-5,873419	-13,89373	1172,064	34,23541
8	10,06032	-0,8500669	1365,262	36,94945
9	-2,147168	-6,640486	574,4347	23,96737
10	14,22325	7,683809	1164,3	34,12184
11	15,43221	5,991813	784,3752	28,0067
12	-2,79962	-10,98372	862,7963	29,37339
13	-0,0588561	-13,69867	1033,627	32,15007
14	13,41815	11,1522	326,0426	18,05665
15	15,81413	12,46263	754,8199	27,47399
16	11,29306	8,779677	498,7277	22,33221
17	20,61899	13,47302	1608,253	40,10303
18	13,57837	11,17108	338,0485	18,38609
19	-0,8432424	-4,216469	493,4769	22,21434

Srednje dnevne vrijednosti pogreške predloženog modela tijekom 19 dana kreću se od -5,87 % (7. dana opažanja) do 22,02 % (1. dana opažanja). Raspon standardnog odstupanja (22,05 %) kreće se od 18,06 % do 40,1 %. Što se tiče usrednjenih vrijednosti tijekom cijelog promatranog razdoblja, srednja vrijednost pogreške iznosi 8,08 %, uz standardno odstupanje od 8,96 %.

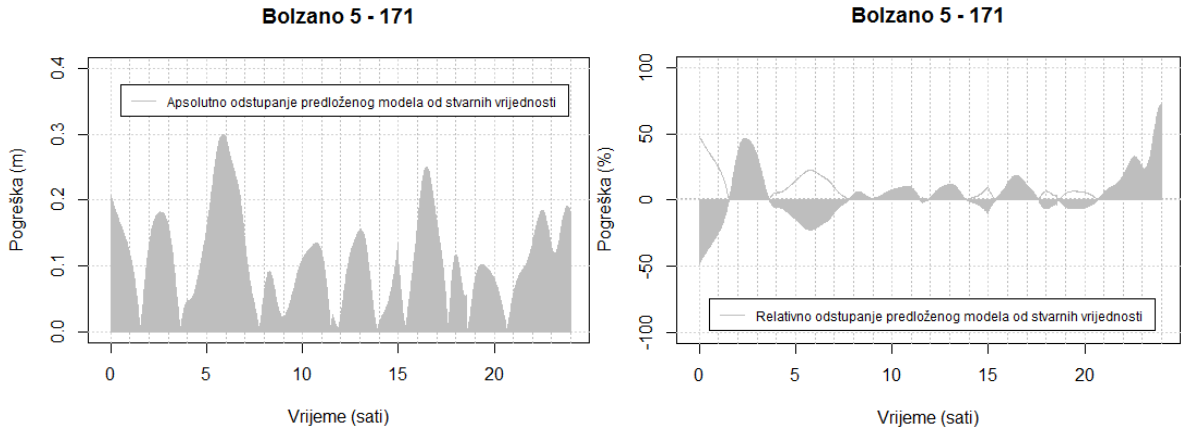
6.4 Verifikacija modela primjenom podataka s IGS GNSS stanice Bolzano

Na slici 6.6. prikazano je stvarno ionosfersko kašnjenje za dan 171 (20. 6. 2006. godine), opaženo na stanici Bolzano (Italija). Prikazano je modelirano ionosfersko kašnjenje prema Klobucharu, te modelirano ionosfersko kašnjenje prema predloženome modelu. Razlučivost svih vremenskih nizova je jedna minuta.



Slika 6.6: Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te prema predloženome modelu na stanici Bolzano (Italija) za dan 171 u 2006. godini

Na slici 6.7 prikazane su apsolutna i relativna pogreška odstupanja za promatrani dan za stanicu Bolzano.



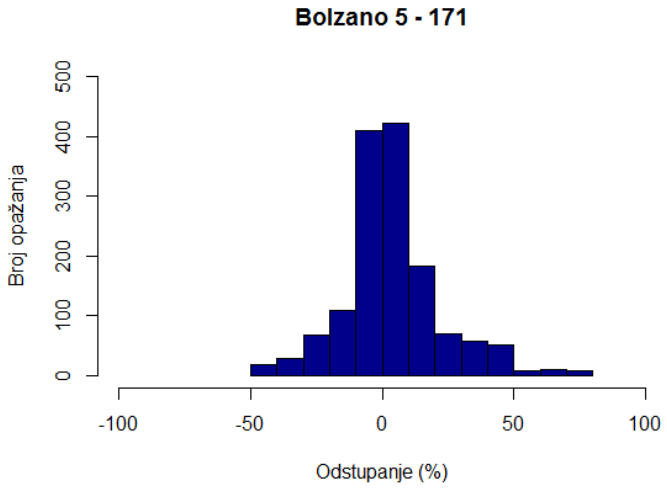
Slika 6.7. Apsolutno (lijevo) i relativno (desno) odstupanje predoženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 171. dana u 2006. godini – stanica Bolzano (Italija)

U tablici 6.4, relativne vrijednosti odstupanja izražene su u postocima, dok su apsolutne vrijednosti izražene u metrima. Srednja vrijednost odstupanja predloženog modela bila je 3,4 %, odnosno 0,11 m, uz standardno odstupanje od 18,4 %, odnosno 0,07 m. Istovremeno, srednja vrijednost odstupanja prema Klobucharu iznosila je 84 %, odnosno 0,6 m, uz standarno odstupanje od 93,2 %, odnosno 0,35 m.

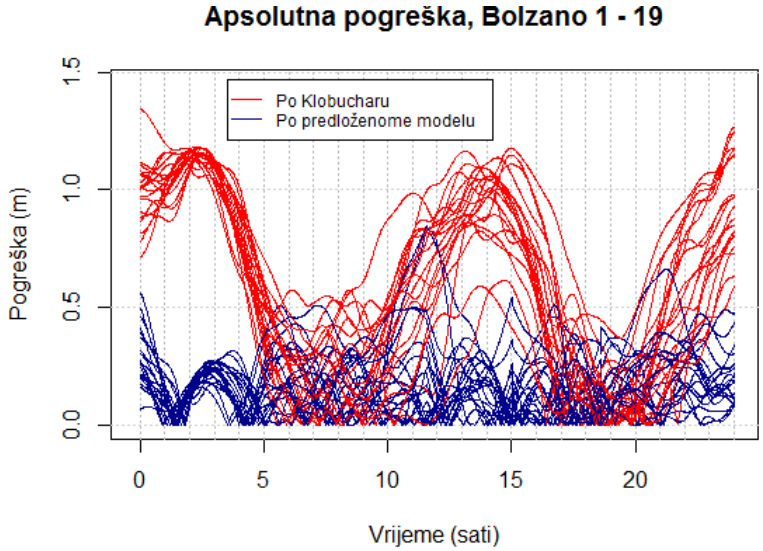
Tablica 6.4: Statistički pokazatelji vrijednosti odstupanja modelirane ionosferske dinamike za dan 171 na IGS stanici Bolzano (Italija)

Relativne vrijednosti (%)							
Predloženi model				**Model prema Klobucharu**			
Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standarno odstupanje	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standarno odstupanje
3,4466	1,5874	341,1776	18,471	83,9731	56,6531	8694,848	93,2462
Apsolutne vrijednosti (m)							
Predloženi model				**Model prema Klobucharu**			
Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standarno odstupanje	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standarno odstupanje
0,1081	0,10089	0,0048	0,06936	0,602	0,6846	0,1243	0,34566

Relativne učestalosti izračunatih vrijednosti odstupanja prikazane su na slici 6.8.

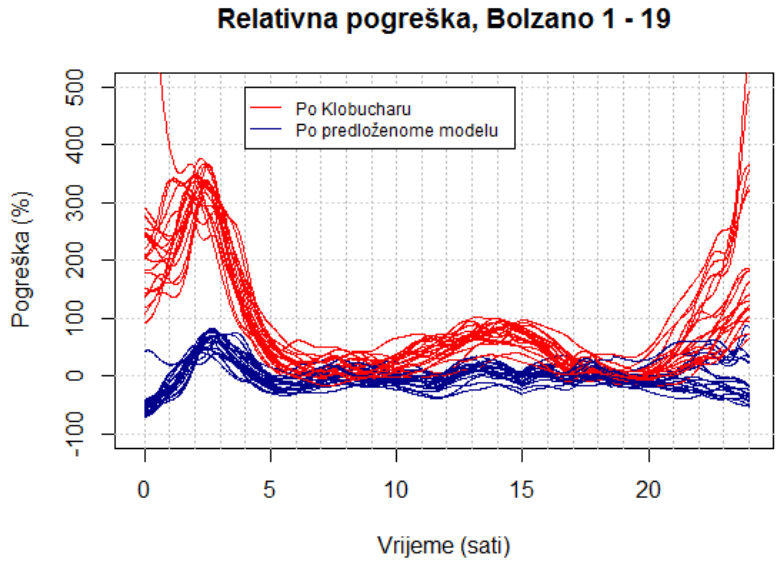


Slika 6.8: Histogram odstupanja modeliranih od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja na dan 171 na stanici Bolzano (Italija)



Slika 6.9: Dijagram apsolutnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Bolzano (Italija)

Opisani postupak primijenjen je za cijelo razdoblje opažanja – dane 167 – 185, odnosno 19 dana u 2006. godini (grafički prikazi nalaze se u prilogu doktorskog rada). Na slikama 6.9 i 6.10 prikazane su pogreške Klobucharovog i predloženog modela u odnosu na stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja, pri čemu su dnevne pogreške prikazane za cjelokupno promatrano razdoblje.



Slika 6.10: Dijagram relativnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Bolzano (Italija)

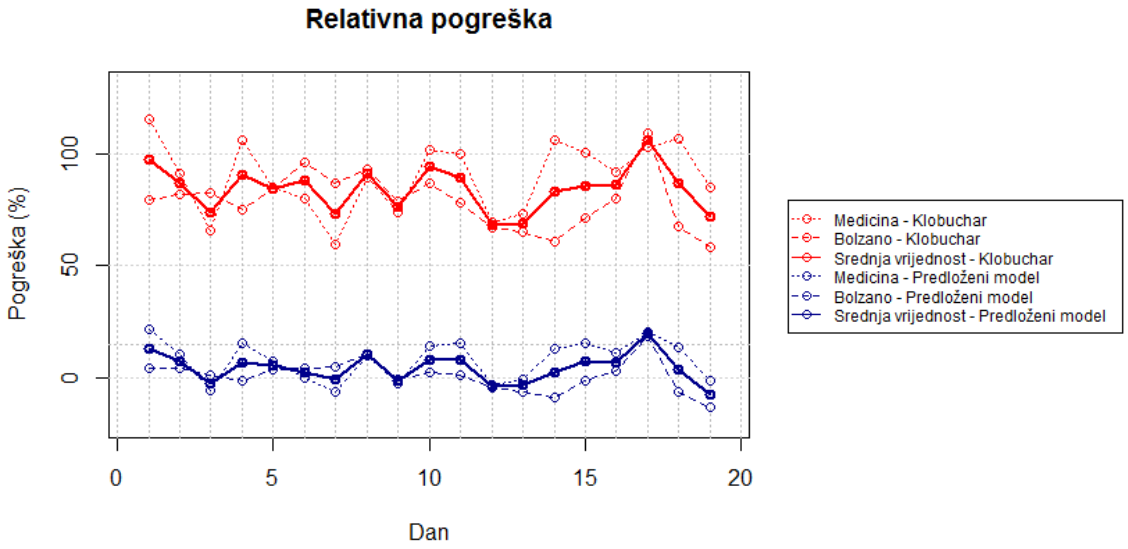
Tablica 6.5: Statistički pokazatelji srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja ispravke predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za stanicu Bolzano (Italija)

Dan	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje
1	4,780786	5,211696	741,1328	27,22375
2	4,90871	3,318613	558,5801	23,6343
3	1,523383	-2,760761	759,0083	27,55011
4	-1,098436	-0,3830762	335,0296	18,30381
5	3,750388	2,168995	340,1357	18,44277
6	4,486261	0,1847356	342,2537	18,5001
7	5,357613	2,853747	544,7519	23,33992
8	10,96078	8,386321	442,8385	21,04373
9	-0,1866046	-6,123191	423,0869	20,56908
10	2,895214	-2,106934	466,8337	21,60634
11	1,240781	0,6348912	284,9538	16,88058
12	-4,274764	140,4221	357,659	18,91188
13	-5,78941	-16,28878	936,8918	30,60869
14	-8,06431	-12,93124	635,1235	25,20166
15	-0,6886667	-3,810576	572,8619	23,93453
16	3,424131	-2,307054	547,1584	23,39142
17	19,12211	13,36366	637,962	25,25791
18	-5,879489	-10,73762	445,9314	21,11709
19	-12,88952	-17,12985	513,5597	22,66186

Vrijednosti pogreške predloženog modela u odnosu na stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja obrađene su na dnevnoj razini. U tablici 6.5 prikazani su statistički pokazatelji srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja ispravke predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za stanicu Bolzano. Srednje dnevne vrijednosti pogreške predloženog modela tijekom 19 dana kreću se od -12,89 % (19. dana opažanja) do 19,12 % (17. dana opažanja). Raspon standardnog odstupanja (13,73 %) kreće se od 16,88 % do 30,61 %. Što se tiče usrednjenih vrijednosti tijekom cijelog promatranog razdoblja, srednja vrijednost pogreške iznosi 1,24 %, uz standardno odstupanje od 7,11 %.

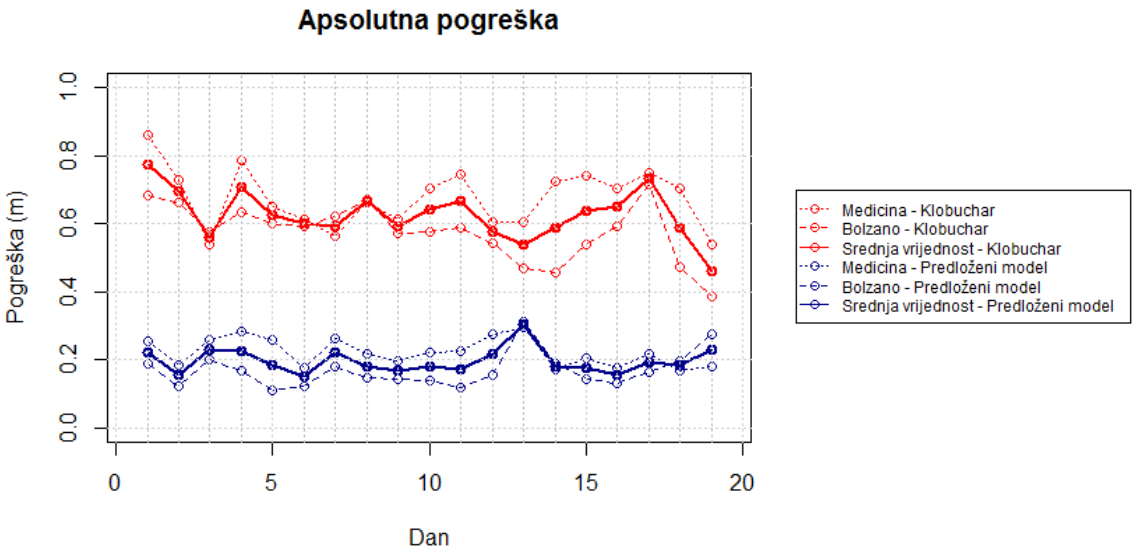
6.5 Usporedba rezultata verifikacije s obje stanice

Na temelju prikazanih podataka, obrađene su pogreške odstupanja predloženog modela za stanice Medicina i Bolzano, pri čemu su izračunate njihove srednje vrijednosti. Srednje pogreške prikazane su na slici 6.11, odnosno 6.12.

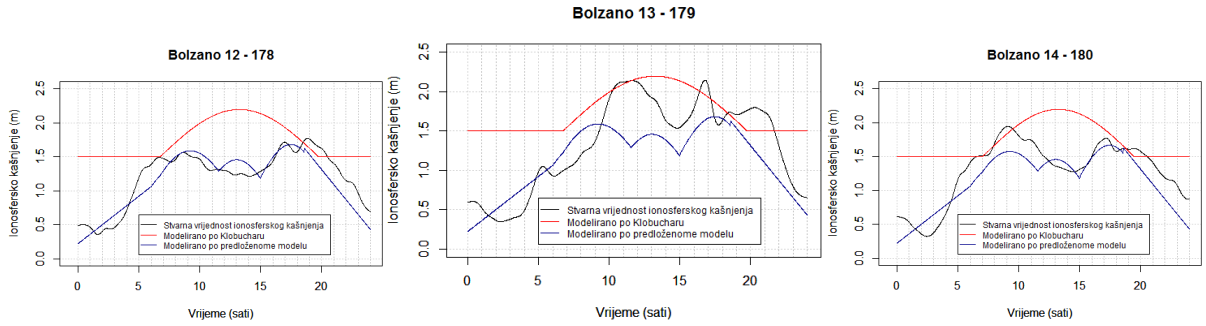


Slika 6.11: Dnevne srednje vrijednosti relativne pogreške Klobucharovog i predloženog modela tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini)

Ako se promatra apsolutna pogreška predloženog modela, srednja vrijednost za obje stanice iznosi 0,196 m, sa standardnim odstupanjem od 0,036 m. Na slici 6.12 može se uočiti odstupanje dnevne vrijednosti pogreške predloženog modela 13. dana opažanja, gdje je na obje IGS stanice opažena povećana pogreška modela. 13. dan promatranog razdoblja (dan 179 u 2006. godini) obilježava povećani ukupni sadržaj elektrona, uz specifični dnevni hod ionosferskog kašnjenja kako je prikazano slikom 6.13, a koji se razlikuje od dnevnog hoda opaženog ostalih dana. Uz dan u pitanju, prikazani su vremenski nizovi ionosferskog kašnjenja prethodnog i sljedećeg dana.

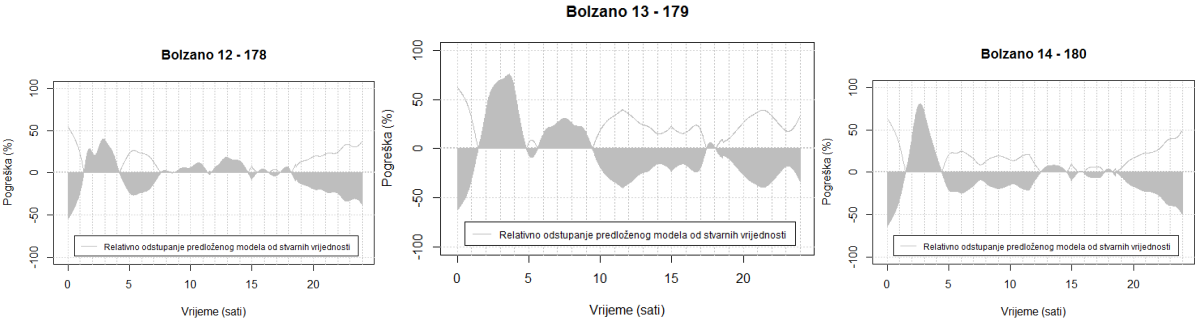


Slika 6.12: Dnevne srednje vrijednosti apsolutne pogreške Klobucharovog i predloženog modela tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini)



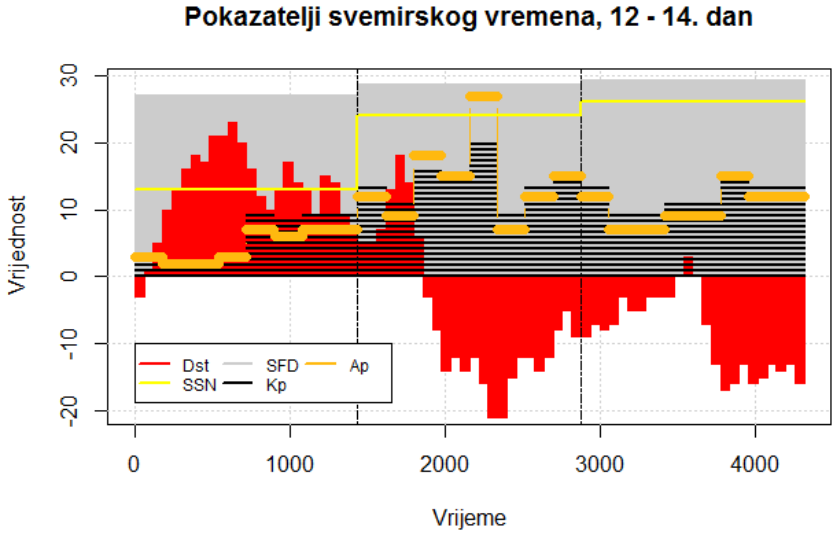
Slika 6.13: Stvarno i modelirano ionosfersko kašnjenje 13. dana promatranog razdoblja (dan 179 u 2006. godini) na stanici Bolzano (Italija)

Na slici 6.14 prikazane su dnevne relativne pogreške predloženog modela u odnosu na stvarno ionosfersko kašnjenje za dane 12, 13 i 14. Vidljivo je kako je, za razliku od prethodnog dana pogreška povećana, nakon čega se vraća na svoje uobičajene vrijednosti.

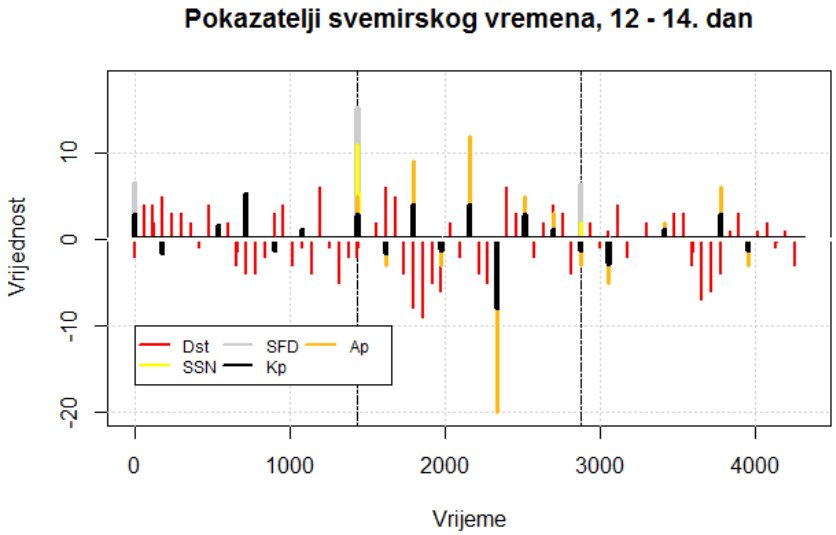


Slika 6.14: Odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja – 12. (lijevo), 13. (sredina) i 14. (desno) dan promatranog razdoblja

U skladu s pokazateljima svemirskog vremena unutar promatranog razdoblja, tijekom 13. dana uočene su blage, ali mjerljive varijacije Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti, što je prikazano na slici 6.15. Povećanja vrijednosti *SFD* i *SSN* pokazatelja te vrijednosti geomagnetskih pokazatelja *Kp*, *Ap*, i *Dst* ukazuju na nastanak mogućih poremećaja svemirskog vremena. Komponente jakosti geomagnetskog polja *Bx*, *By* i *Bz* 13. dana opažanja također ukazuju na komešanja u odnosu na prethodne dane.



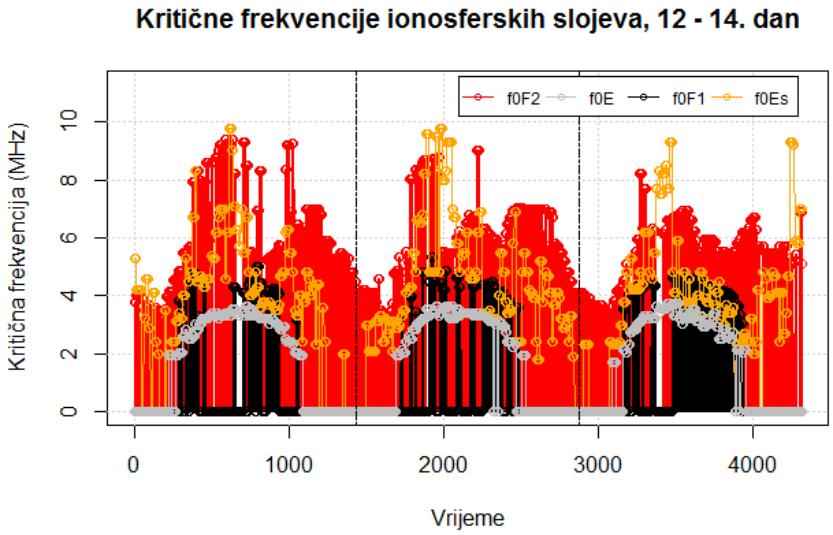
Slika 6.15: Relativne vrijednosti pokazatelja Sunčeve i geomagnetske aktivnosti tijekom 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja
Tipičan geomagnetski poremećaj može se vidjeti na primjeru Dst pokazatelja stanja uzbude magnetosfere. Isprekidanim linijama označen je 13. dan opažanja



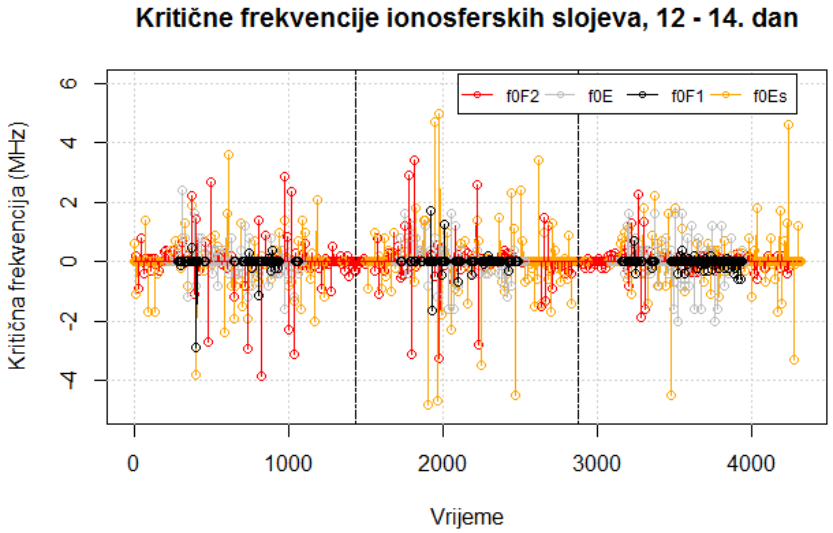
Slika 6.16: Opažene promjene u relativnim vrijednostima pokazatelja svemirskog vremena 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja
Isprekidanim linijama označen je 13. dan opažanja

U skladu s definiranim kriterijima, prevladavajući uvjeti mogu se i dalje klasificirati kao *mirno svemirsko vrijeme*, iako vrijednosti i promjene vrijednosti navedenih pokazatelja ukazuju na blage poremećaje (Slika 6.17). Na slici 6.18 prikazan je trodnevni (dani 12,

13 i 14) vremenski niz promjena u vrijednostima kritičnih frekvencija ionosferskih *f0F2*, *f0F1*, *f0E* i *f0Es* slojeva.



Slika 6.17: Pokazatelji ionosferske aktivnosti tijekom 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja Prikazane su kritične frekvencije f0F2, f0F1, f0E i f0Es sloja. Isprekidanim linijama označen je 13. dan opažanja



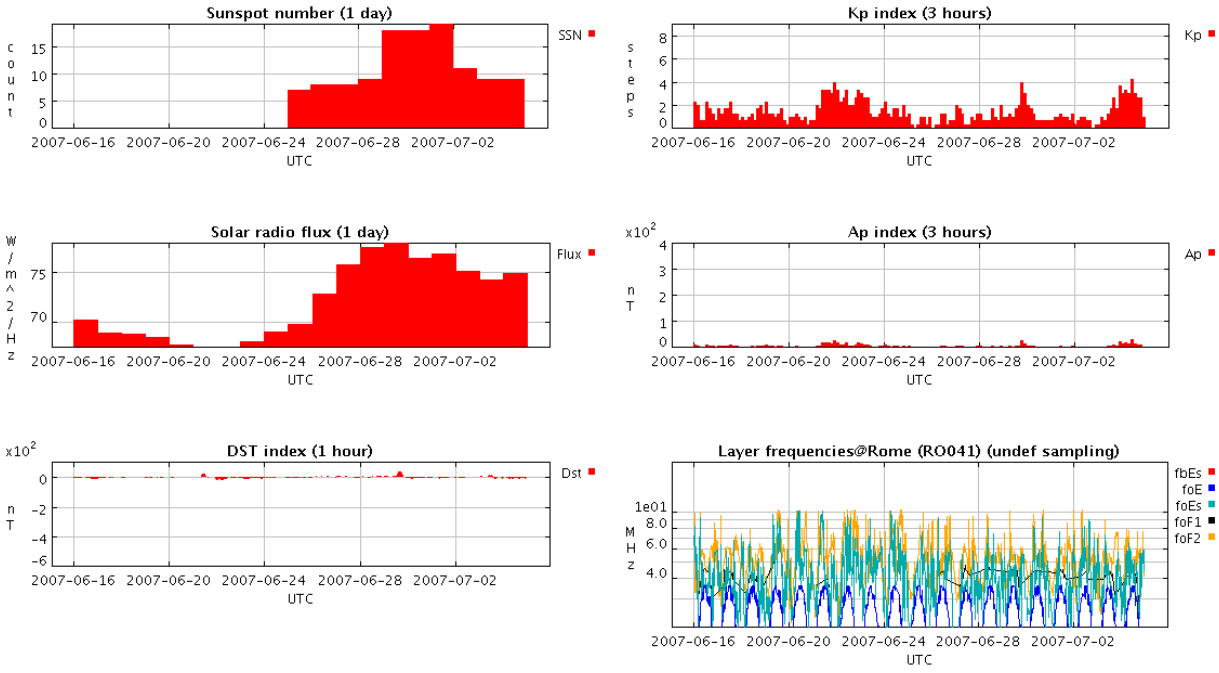
Slika 6.18: Promjene u vrijednostima kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva tijekom 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja
Isprekidanim linijama označen je 13. dan opažanja

Stanje narušenog svemirskog vremena, prvotno opaženo na temelju povećanja *SSN* i *SFD* vrijednosti, prethodilo je komešanju i varijacijama vrijednosti pokazatelja geomagnetske aktivnosti, što se odrazilo na promjene u gustoći i raspodjeli ionosferskih slojeva. Navedene pojave manifestirale su se na dinamiku dnevnog hoda ukupnog sadržaja elektrona, što je uzrokovalo veću pogrešku modeliranja ionosferskog kašnjenja za razliku od ostalih, mirnijih uvjeta, odnosno ostalih, mirnijih dana.

6.6 Verifikacija modela primjenom podataka s IGS GNSS stanice Matera

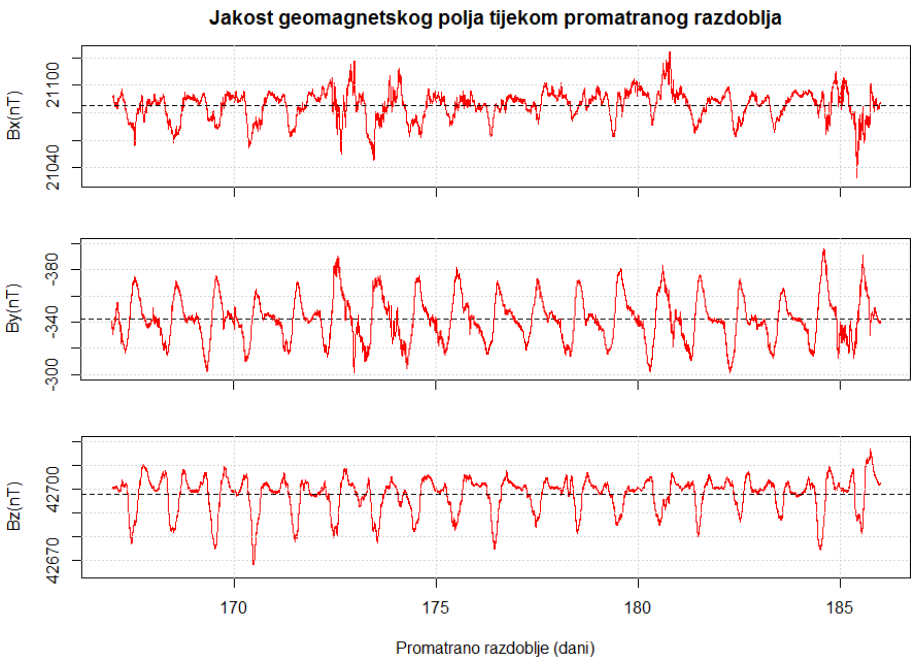
Predloženi model zadovoljavajuće opisuje lokalnu ionosfersku dinamiku, što je vidljivo na temelju dosad prikazanih primjera. U odnosu na Klobucharov model ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja, predloženi model pruža značajno veću točnost (približno tri puta veću točnost ako se promatraju dnevne vrijednosti odstupanja od stvarnih vrijednosti) pri opisivanju dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja.

U cilju potpunije verifikacije, model je ispitan u vremenskom razdoblju od 16. 6. –4. 7. 2007. godine (dani 167 – 185). Ovo je razdoblje odabrano u cilju definiranja istih uvjeta svemirskog vremena kao prethodne godine. Tijekom cijelog razdoblja prevladavali su uvjeti niske razine Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti, unutar graničnih vrijednosti definiranih u 3. poglavlju (Slika 6.19).



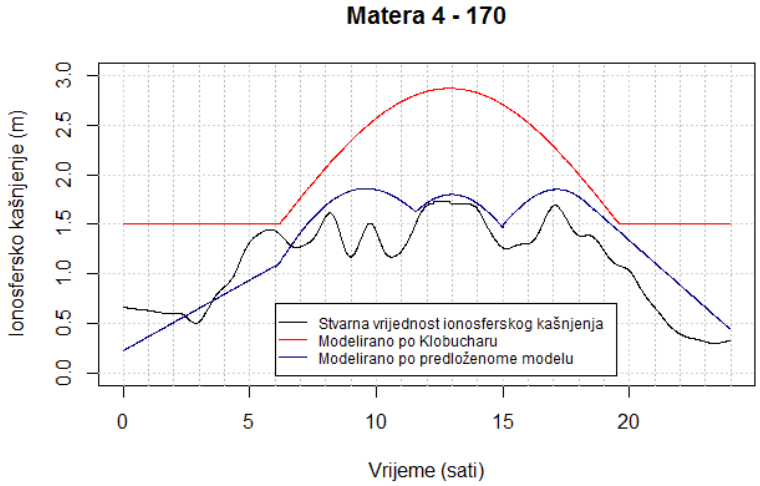
Slika 6.19: Vremenski nizovi pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti tijekom 16. 6. – 4. 7. 2007. godine

Prilikom odabira referentne IGS stanice, cilj je bio koristiti podatke sa stanice koja nije korištena pri verifikaciji 2006. godine, a koja je pružala dovoljnu kontinuiranost potrebnih podataka tijekom promatranog razdoblja. Stoga je odabrana IGS stanica Matera (Italija) – južni dio Jadranske regije. Na slici 6.20 prikazani su vremenski nizovi vrijednosti komponenata jakosti geomagnetskog polja u promatranom razdoblju 2007. godine. Podatkovne vrijednosti promatranih pokazatelja svemirskog vremena priložene su, u sklopu popratne dokumentacije doktorskog rada na digitalnom prijenosnom mediju.



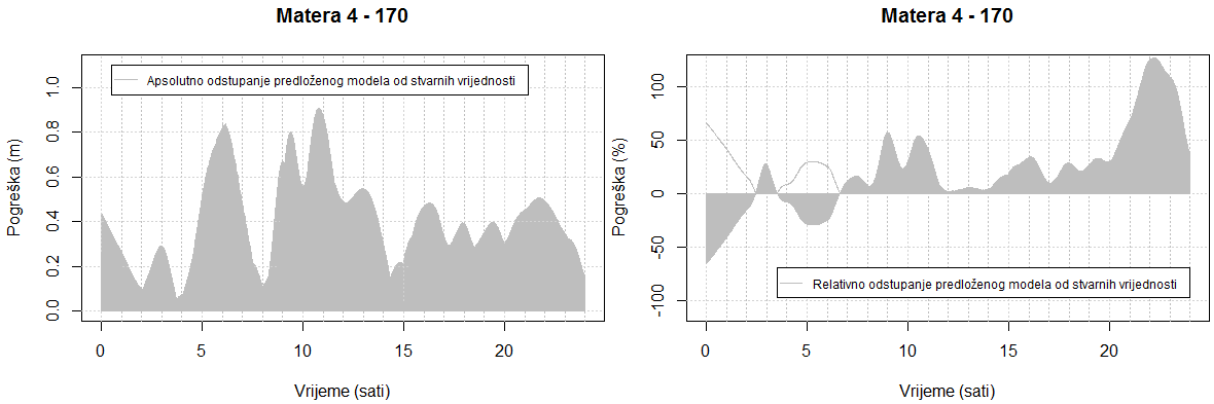
Slika 6.20: Vremenski nizovi sjeverne (Bx), istočne (By) i vertikalne (Bz) komponente jakosti geomagnetskog polja u danima 167 – 185 u 2007. godini

Na slici 6.21 prikazan je stvarni dnevni hod ionosferskog kašnjenja, ionosfersko kašnjenje modelirano po Klobucharu, te ionosfersko kašnjenje prema predloženome modelu.



Slika 6.21: Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te prema predloženome modelu na stanici Matera (Italija) za dan 170 u 2007. godini

Apsolutne i relativne pogreške u odstupanju predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dan 170 prikazane su na slici 6.22.



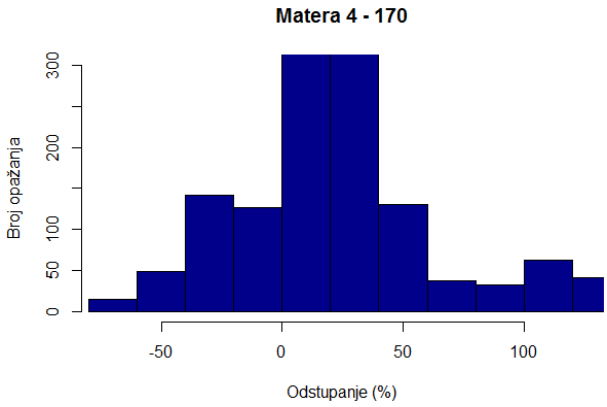
Slika 6.22: Apsolutno (lijevo) i relativno (desno) odstupanje predoženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 170. dana u 2006. godini – stanica Matera (Italija)

Srednja vrijednost odstupanja predloženog modela na dan 170 iznosila je 20,6 %, odnosno 0,28 m, uz standardno odstupanje od 39,5 %, odnosno 0,16 m. Istovremeno, srednja vrijednost odstupanja prema Klobucharu iznosila je 104,9 %, odnosno 0,87 m, uz standarno odstupanje od 90,2 %, odnosno 0,37 m.

Tablica 6.6: Statistički pokazatelji vrijednosti odstupanja modelirane ionosferske dinamike za dan 170 na IGS stanici Matera (Italija)

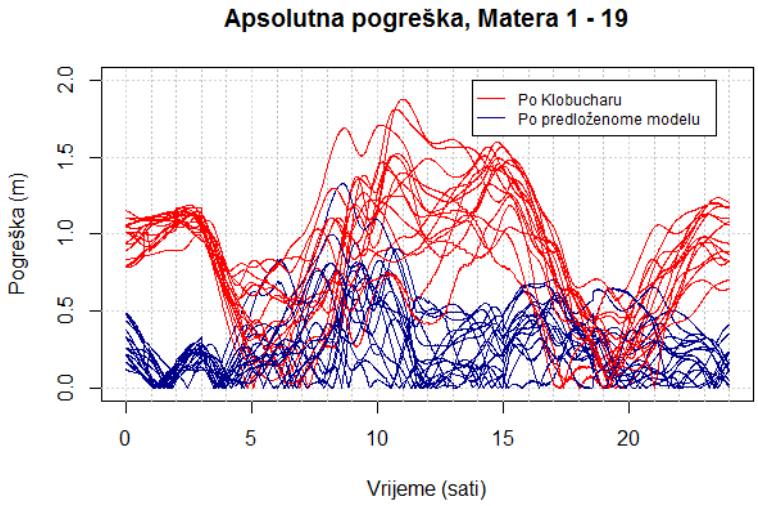
Relativne vrijednosti (%)							
Predloženi model				**Model prema Klobucharu**			
Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje
20,69198	16,27852	1560,9	39,50823	104,9467	77,6773	8144,088	90,2446
Apsolutne vrijednosti (m)							
Predloženi model				**Model prema Klobucharu**			
Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje
0,2766953	0,294962	0,026484	0,1627386	0,867694	0,89423	0,136855	0,3699387

Relativne učestalosti izračunatih vrijednosti odstupanja dobivenih predloženim modelom za dan 168. za stanicu Matera prikazane su na slici 6.23.

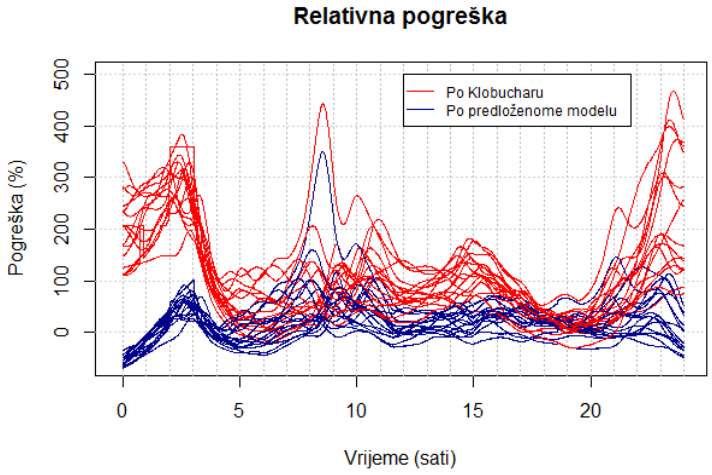


6.23: Histogram odstupanja modeliranih od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja na dan 170 na stanici Matera (Italija)

Tijekom promatranog razdoblja, dani 173, 175 i 180 nisu bili pogodni za obradu, stoga su izuzeti iz postupka verifikacije. Grafički prikazi verifikacije modela tijekom promatranog razdoblja za svaki dan nalaze se u prilogu doktorskog rada. Pogreške Klobucharovog i predloženog modela u odnosu na stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja prikazane su na slici 6.24, odnosno slici 6.25.



Slika 6.24: Dijagram apsolutnih pogrešaka kroz 24 sata tijekom promatranog razdoblja za stanicu Matera (Italija)



Slika 6.25: Dijagram relativnih pogrešaka kroz 24 sata tijekom promatranog razdoblja za stanicu Matera (Italija)

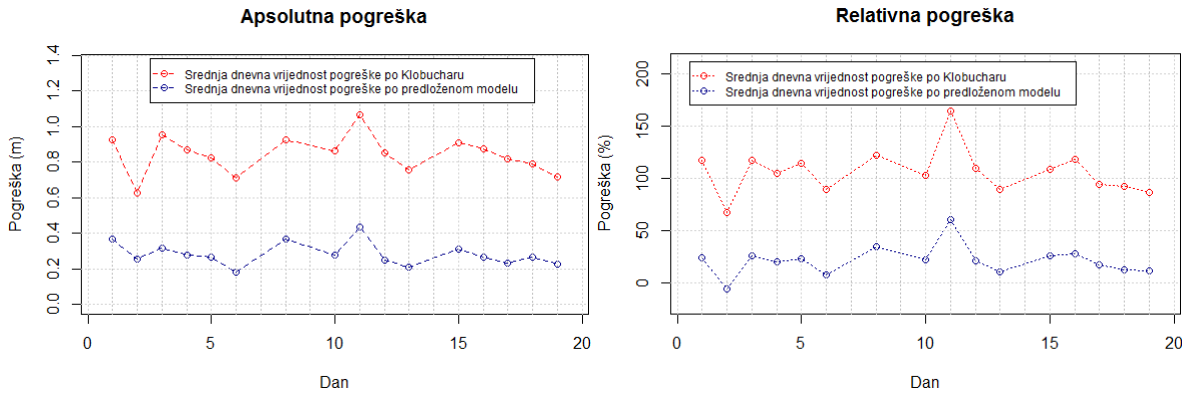
U tablici 6.7 prikazani su statistički pokazatelji srednjih dnevnih vrijednosti odstupanja predloženog modela od stvarnog ionosferskog kašnjenja, dobiveni obradom podataka s IGS stanice Matera u promatranom razdoblju.

Tablica 6.7: Statistički pokazatelji srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja ispravke predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za stanicu Matera (Italija)

Dan	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje
1	24,42263	28,02586	1517,267	38,95211
2	-5,274967	-9,827138	631,8833	25,13729
3	25,93972	27,35385	963,8639	31,04616
4	20,69198	16,27852	1560,9	39,50823
5	23,16158	18,86281	1082,796	32,90587
6	8,307791	1,858309	577,8143	24,03777
8	34,45389	38,33469	1687,041	41,07361
10	22,23108	17,86637	981,1975	31,32407
11	61,2315	42,51125	4453,639	66,73559
12	21,30292	19,72464	587,076	24,22965
13	11,16525	10,46559	516,225	22,72059
15	26,41117	31,13022	578,5975	24,05405
16	28,35185	24,71687	967,1595	31,09919
17	17,15122	13,14976	798,0263	28,24936
18	12,41802	0,3877148	1709,777	41,34945
19	11,55012	8,923094	913,2218	30,21956

Srednje dnevne vrijednosti pogreške predloženog modela tijekom 16 dana kreću se od -5,27 % (2. dana opažanja) do 61,23 % (11. dana opažanja). Raspon standardnog odstupanja (44,02 %) kreće se od 22,72 % do 66,74 %. Što se tiče usrednjenih vrijednosti tijekom cijelog promatranog razdoblja, srednja vrijednost pogreške iznosi 21,45 %, uz standardno odstupanje od 14,25 %.

Srednje dnevne vrijednosti pogreške predloženog modela i Klobucharovog modela ionosferskog kašnjenja prikazane su na slici 6.26.



Slika 6.26: Dnevne srednje vrijednosti apsolutne (lijevo) i relativne (desno) pogreške Klobucharovog i predloženog modela tijekom promatranog razdoblja na stanici Matera (Italija)

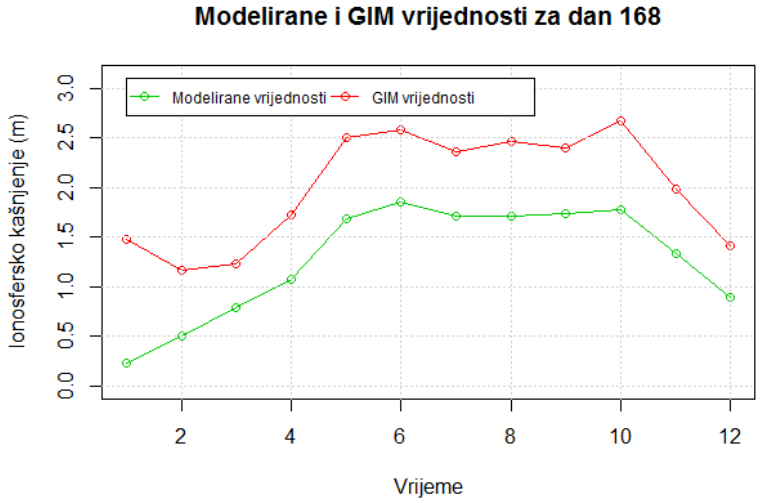
U geografskom području IGS stanice Matera, ionosferska dinamika pokazuje blage razlike u odnosu na opažanja s prethodnih stanica. Samim time je i pogreška predloženog modela izraženija. Promjene u dnevnom hodu ionosferske dinamike mogu se objasniti geografskim položajem stanice gdje je, za razliku od sjevernih stanica, utjecaj ekvatorijalnih procesa izraženiji (blizina geomagnetskog ekvatora).

6.7 Usporedba modeliranih vrijednosti s vrijednostima ionosferskog kašnjenja GIM numeričkih mapa

U nastavku je prikazana usporedba rezultata dobivenih predloženim modelom s vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenim na temelju podataka globalnih ionosferskih mapa (GIM). Kako na promatranom geografskom području nije postojala mogućnost proračuna ionosferskog kašnjenja za područje Republike Hrvatske, odnosno Sjevernog Jadrana, izabrane su GIM mape za geografsku lokaciju ($\varphi = 45^0\ N, \lambda = 015^0\ E$). Za potrebe ove usporedbe, a uzimajući u obzir standardiziranu vremensku razlučivost standardiziranih *IONEX* podataka (2 sata) [63, 160], razlučivost predloženog modela usklađena je s navedenim formatom. Pri usporedbi su korištena oba promatrana razdoblja, odnosno dani 167 – 185 u 2006. i 2007. godini. GIM vrijednosti dobivene su na temelju *IONEX.igsg* numeričkih mapa ukupnog sadržaja elektrona [150]. Podaci o vrijednostima ukupnog sadržaja elektrona tijekom promatranih razdoblja u *IONEX* standardiziranom formatu podataka priloženi su, u sklopu popratne dokumentacije doktorskog rada, na digitalnom prijenosnom mediju.

6.7.1 Usporedba modela s GIM podacima za 2006. godinu

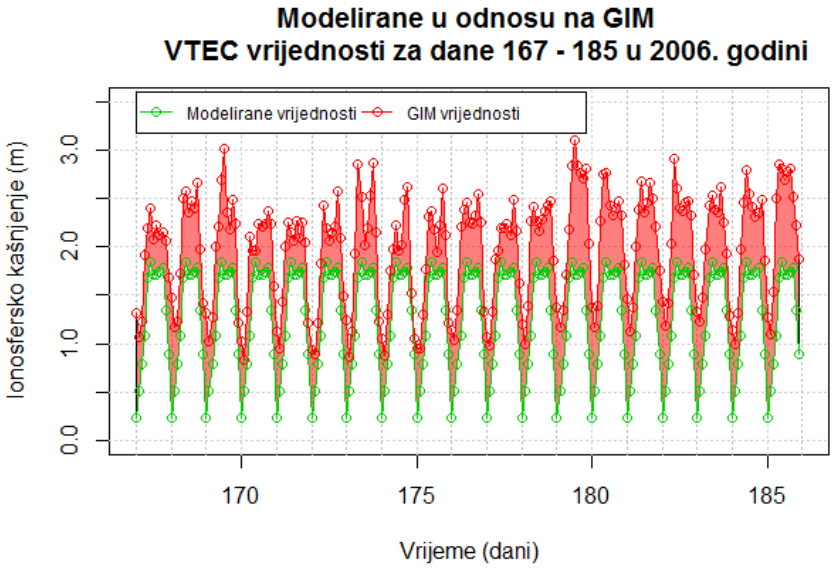
Primjer dnevnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivenog predloženim modelom i vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenim na temelju GIM mapa prikazan je na slici 6.27.



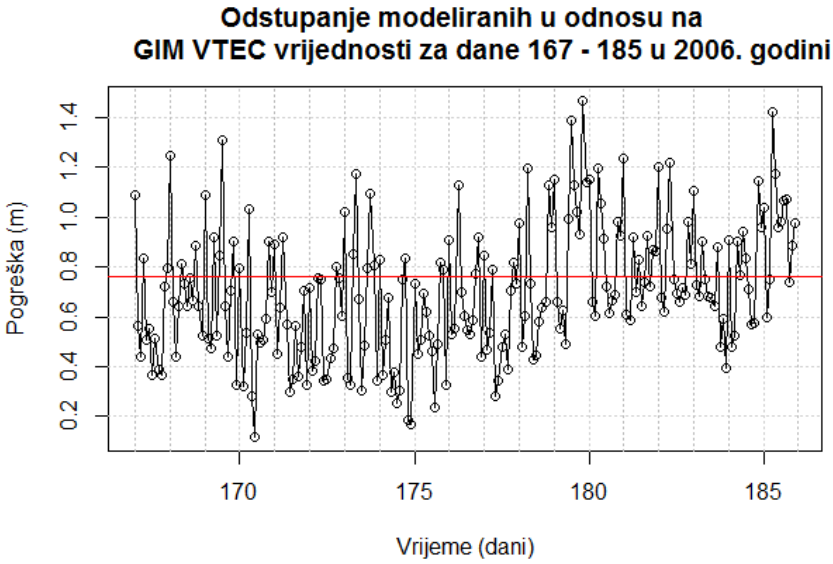
Slika 6.27: Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dan 168 u 2006. godini s vremenskom razlučivošću od 2 sata

Na slici 6.28 prikazano je odstupanje vrijednosti ionosferskog kašnjenja modeliranog po predloženom modelu od vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivenog na temelju GIM vrijednosti kroz razdoblje dana 167 – 185 u 2006. godini. Na slici 6.29 grafički su prikazane vrijednosti apsolutne pogreške između skupova vrijednosti za promatrano razdoblje.

U tablici 6.8 sažete su vrijednosti odstupanja među skupovima podataka.



Slika 6.28: Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2006. godini



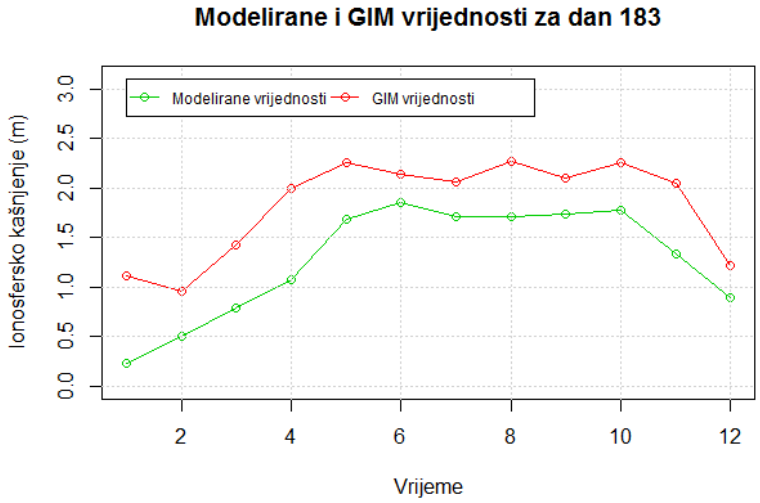
Slika 6.29: Prikaz odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti za dane 167 – 185 u 2006. godini uz naznačenu srednju vrijednost odstupanja

Tablica 6.8: Statistički pokazatelji odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2006. godini

Relativne vrijednosti odstupanja predloženog modela od GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja (%)							
Najmanja vrijednost	Prvi kvartil	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Treći kvartil	Najveća vrijednost
-84,620	-45,550	-37,850	-34,87	288,932	16,998	-26,84	-5,911
Apsolutne vrijednosti odstupanja predloženog modela od GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja (m)							
Najmanja vrijednost	Prvi kvartil	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Treći kvartil	Najveća vrijednost
0,116	0,506	0,701	0,684	0,069	0,263	0,885	1,47

6.7.2 Usporedba modela s GIM podacima za 2007. godinu

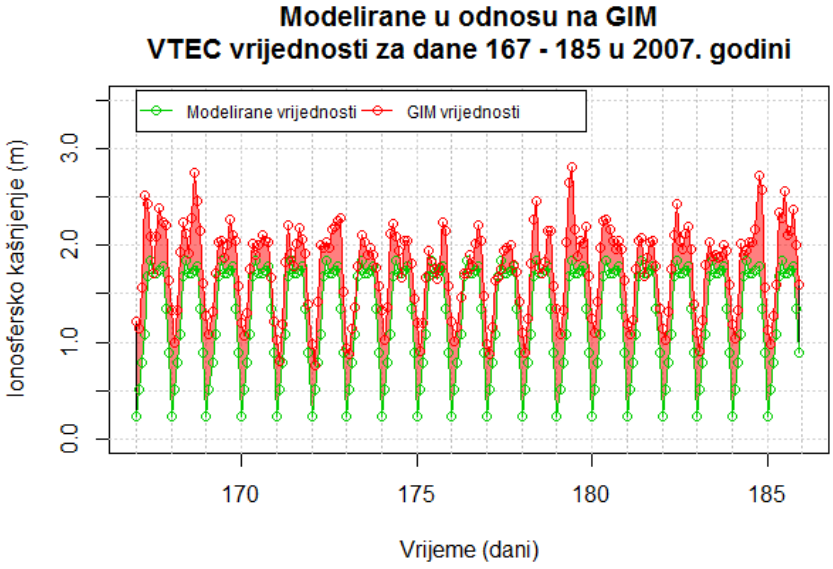
Primjer dnevnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivenog predloženim modelom i vrijednostima ionosferskog kašnjenja dobivenim na temelju GIM mapa prikazan je na slici 6.30.



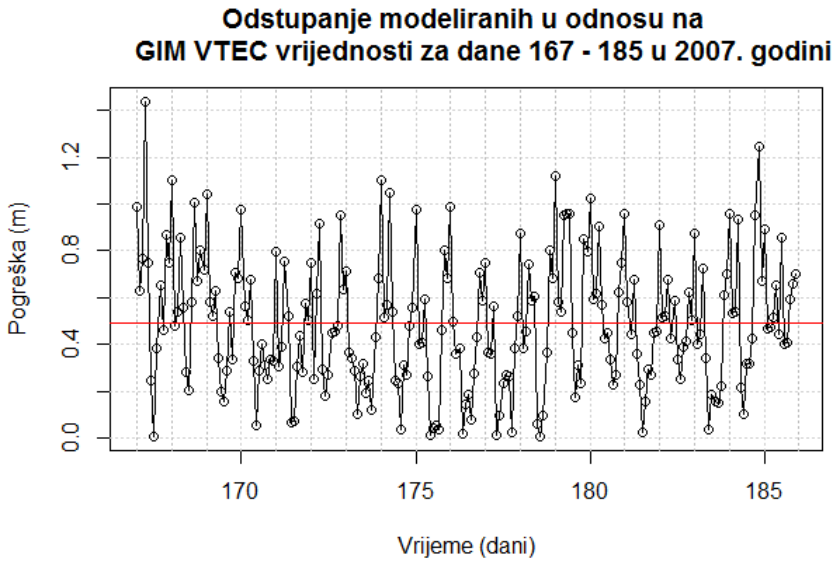
Slika 6.30: Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dan 183 u 2007. godini s vremenskom razlučivošću od dva sata

Na slici 6.31 prikazano je odstupanje vrijednosti ionosferskog kašnjenja modeliranog po predloženom modelu od vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivenog na temelju GIM vrijednosti kroz razdoblje dana 167 – 185 u 2007. godini. Na slici 6.32 grafički su prikazane vrijednosti apsolutne pogreške između skupova vrijednosti za promatrano razdoblje.

U tablici 6.9 sažete su vrijednosti odstupanja među skupovima podataka uz statistički opis odstupanja.



Slika 6.31: Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2007. godini



Slika 6.32: Prikaz odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti za dane 167 – 185 u 2007. godini uz naznačenu srednju vrijednosti odstupanja

Tablica 6.9 Statistički pokazatelji odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2007. godini

Relativne vrijednosti odstupanja predloženog modela od GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja (%)							
Najmanja vrijednost	Prvi kvartil	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Treći kvartil	Najveća vrijednost
-83,140	-41,900	-30,420	-27,35	444,184	21,076	-14,130	8,426
Apsolutne vrijednosti odstupanja predloženog modela od GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja (m)							
Najmanja vrijednost	Prvi kvartil	Srednja vrijednost	Median	Varijanca	Standardno odstupanje	Treći kvartil	Najveća vrijednost
0,006	0,282	0,490	0,457	0,079	0,280	0,675	1,438

6.7.3 Sažetak rezultata usporedbe

Odstupanje predloženog modela u odnosu na dobivene GIM vrijednosti veće je od odstupanja prilikom usporedbe sa stvarnim vrijednostima ionosferskog kašnjenja. GIM mape sadrže interpolirane VTEC vrijednosti za određene lokacije (prostorna razlučivost $\Delta\varphi = 2{,}5^0, \Delta\lambda = 5^0$), dobivene na temelju stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja s okolnih IGS stanica, kako je prikazano u 3. poglavlju. Također, vremenska razlučivost vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona je 2 sata. Pristup procjeni *DCB* vrijednosti kašnjenja razlikuje se ovisno o IAAC središtima unutar kojih se izrađuju GIM numeričke mape [71]. Konačni *IONEX.igsg* proizvod izrađuje se s točnošću od 2 – 8 TECU [35].

Navedeni razlozi mogući su uzrok povećanog odstupanja. Međutim, na temelju prikazane usporedbe vidljiva je sličnost lokalnog uzorka dnevne dinamike ionosferskog kašnjenja (linearna promjena vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom noćnih sati i postojanje više lokanih maksimuma ionosferskog kašnjenja tijekom dnevnih sati).

7. RAZMATRANJA O PREDLOŽENOME MODELU I REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA

Unutar ovoga poglavlja razmatra se uspješnost modela prema postavljenim kriterijima. Prikazan je sažetak rezultata verifikacije modela, na temelju koje se dokazuje njegova uspješnost. Uspješnost se ogleda kako na opisu lokalne ionosferske dinamike, tako i na uklanjanju pogreške ionosferskog kašnjenja u odnosu na referentni model ispravke.

Nakon sažetka rezultata verifikacije pristupilo se analizi dnevnih odstupanja prema komponentama predloženog modela, na temelju čega su razmotrena ograničenja modela i načini njihovog uklanjanja, odnosno poboljšanja modela.

Opisana je primjenjivost rezultata istraživanja dobivenih i opisanih u doktorskom radu. Navedena je primjena predloženog modela unutar satelitskih navigacijskih sustava te ostalih sustava koji se temelje na pružanim uslugama satelitske navigacije. Prikazan je značaj modela u pomorskim aplikacijama i mogućnost njegove primjene. Također, opisana je mogućnost primjene rezultata istraživanja u odnosu na postignute ciljeve i doprinose pri razumijevanju ionosferske dinamike i okoliša širenja signala za satelitsko određivanje položaja.

7.1 Uspješnost modela

U tablici 7.1 prikazan je sažetak rezultata postupka provjere uspješnosti modela. Srednje vrijednosti odstupanja modela od stvarnog ionosferskog kašnjenja i modeliranog ionosferskog kašnjenja po Klobucharu prikazane su za stanice Medicina i Bolzano (promatrano razdoblje 2006. godine), regionalno (usrednjena odstupanja dobivena na stanicama Medicina i Bolzano 2006. godine), te za stanicu Matera (promatrano razdoblje 2007. godine).

Uzevši u obzir odstupanja vrijednosti predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivenih na trima stanicama Jadranske regije (Medicina, Bolzano i Matera tijekom 2006. i 2007. godine), srednje apsolutno odstupanje modela po Klobucharu iznosi 0,698247 m uz standardno odstupanje od 0,093 m, dok srednje apsolutno odstupanje predloženog modela iznosi 0,22455 m uz standardno odstupanje od 0,053 m. Ako se promatra relativno odstupanje, po Klobucharu ono iznosi 92,4 % uz standardno odstupanje od 16,05 %, a po predloženom modelu 20,74 % uz standardno odstupanje od 7,33 %.

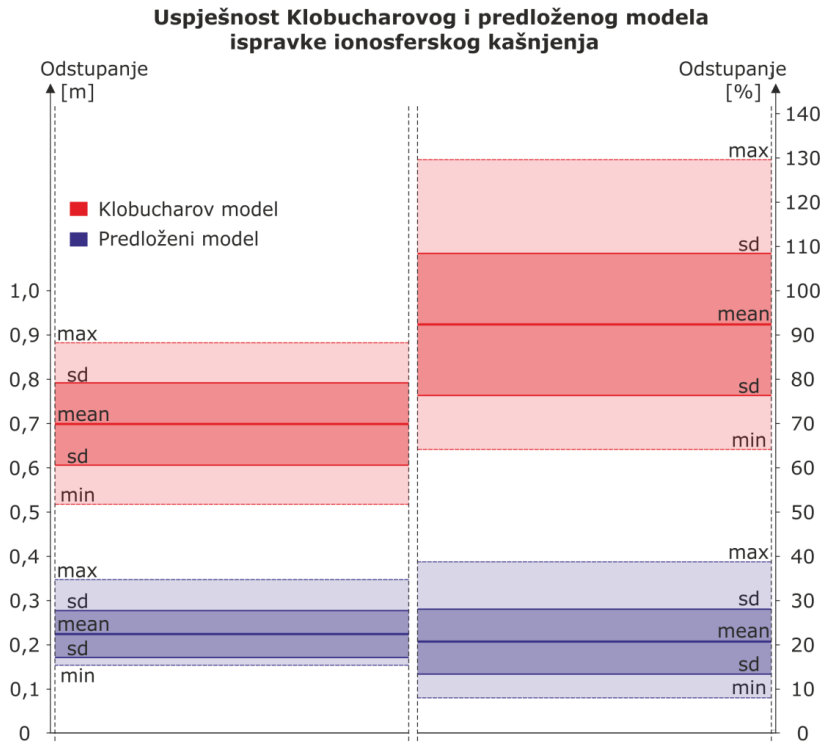
Tablica 7.1: Usporedba srednjih dnevnih vrijednosti relativnih i apsolutnih odstupanja predloženog modela i modela prema Klobucharu

Model prema Klobucharu						
Relativne vrijednosti odstupanja (%)						
Područje	**Najmanja vrijednost**	**Srednja vrijednost**	**Median**	**Standardno odstupanje**	**Najveća vrijednost**	**Raspon**
Medicina	64,15355	90,89836	90,83818	14,55209	115,43654	51,28299
Bolzano	60,94559	79,78668	80,58845	12,11407	108,75558	47,80999
Regionalno	70,76767	85,34252	86,35483	9,05187	105,6932	34,92554
Matera	67,38806	106,4313	107,01395	21,48793	164,7102	97,32214
Apsolutne vrijednosti odstupanja (m)						
Medicina	0,53963	0,67553	0,70208	0,0872	0,86141	0,32178
Bolzano	0,38533	0,57626	0,58901	0,08491	0,71709	0,33177
Regionalno	0,46248	0,6259	0,62554	0,07321	0,77199	0,30951
Matera	0,62698	0,84295	0,8586	0,10784	1,06873	0,44174
Predloženi model						
Relativne vrijednosti odstupanja (%)						
Područje	**Najmanja vrijednost**	**Srednja vrijednost**	**Median**	**Standardno odstupanje**	**Najveća vrijednost**	**Raspon**
Medicina	15,88123	23,00862	24,24169	4,14371	28,80237	12,92114
Bolzano	13,16428	17,75458	16,27365	3,60049	26,24894	13,08466
Regionalno	15,13709	20,3816	19,86367	2,90109	25,95268	10,81558
Matera	-5,27497	21,46973	21,767	14,25441	61,2315	66,50647
Apsolutne vrijednosti odstupanja (m)						
Medicina	0,16961	0,22321	0,21902	0,04141	0,29593	0,12632
Bolzano	0,10901	0,16939	0,15676	0,05239	0,31258	0,20357
Regionalno	0,15113	0,1963	0,18395	0,03719	0,30426	0,15312
Matera	0,18328	0,28105	0,26468	0,065	0,43419	0,25091

U Tablici t.2 prikazan je statistički opis srednjih vrijednosti ionosferskog kašnjenja na regionalnoj razini (Medicina i Bolzano) za dane 167 – 185 u 2006. godini, dok je u tablici 7.3 prikazan statistički opis srednje vrijednosti stvarnog ionosferskog kašnjenja za stanicu Matera za dane 167 – 185 u 2007. godini.

Tijekom promatranog razdoblja 2006. godine, modelom ispravke ionosferskog kašnjenja prema Klobucharu, pogreška uslijed ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja umanjena je za 46,7 %, dok je ista primjenom predloženog modela umanjena za 83,3 %. Tijekom istog razdoblja 2007. godine, modelom ispravke ionosferskog kašnjenja prema Klobucharu, pogreška uslijed ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja umanjena je za 21,3 %, dok je ista primjenom predloženog modela umanjena za 73,7 %.

Opisana odstupanja grafički su prikazana na slici 7.1.



Slika 7.1: Grafički prikaz odstupanja Klobucharovog i predloženog modela ispravke ionosferskog kašnjenja: srednje vrijednosti odstupanja (mean), standardna odstupanja (sd), najmanje vrijednosti odstupanja (min) i najveće vrijednosti odstupanja (max)

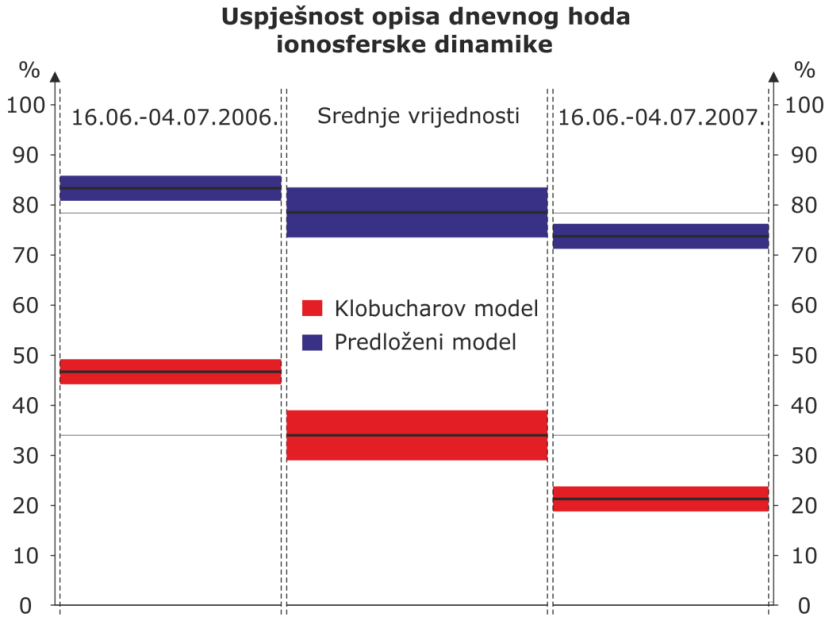
Tablica 7.2: Statistički opis regionalnog ionosferskog kašnjenja (usrednjene vrijednosti podataka sa stanica Medicina i Bolzano, dani 167 – 185 u 2006. godini)

Najmanja vrijednost	Prvi kvartil	Median	Srednja vrijednost	Standardno odstupanje	Treći kvartil	Najveća vrijednost
0,1568	0,7824	1,2688	1,1751	0,213	1,5264	2,4336

Tablica 7.3: Statistički opis ionosferskog kašnjenja opaženog na stanici Matera za dane 167 – 185 u 2007. godini

Najmanja vrijednost	Prvi kvartil	Median	Srednja vrijednost	Standardno odstupanje	Treći kvartil	Najveća vrijednost
0,3442	0,7274	1,1297	1,0706	0,4103	1,3844	1,7693

Na slici 7.2 grafički je prikazana uspješnost opisa ionosferske dinamike na promatranom području prema Klobucharovom, odnosno prema predloženom modelu ispravke.

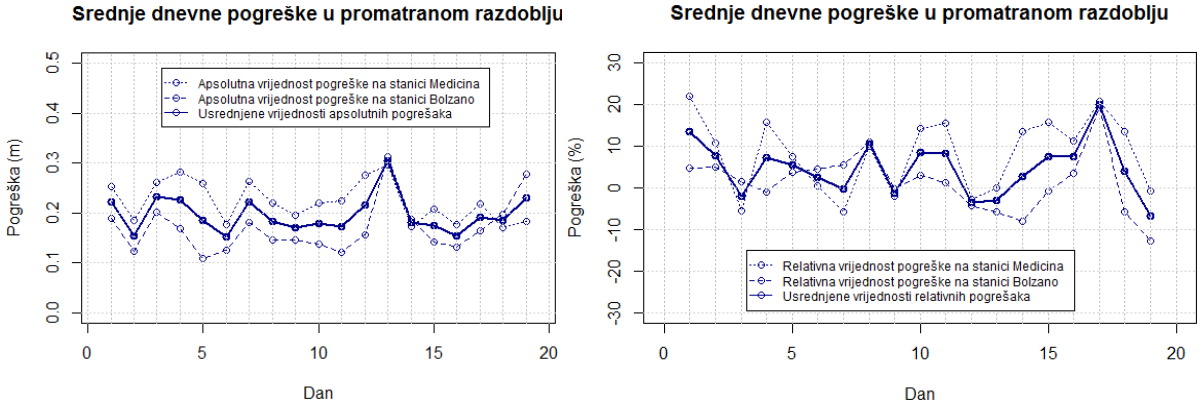


Slika 7.2: Uspješnost opisa lokalne ionosferske dinamike Klobucharovim i predloženim modelom tijekom promatranih razdoblja 2006. i 2007. godine

Rezultat je prikazan za 2006. i 2007. godinu te kao usrednjena vrijednost točnosti opisa: 34 % po Klobucharovom modelu, odnosno 78,5 % po predloženom modelu ispravke ionosferskog kašnjenja.

7.2 Analiza dnevnih pogrešaka

Odstupanja predloženog modela analizirana su u odnosu na stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 24 sata. U obzir je uzeto regionalno odstupanje (usrednjene vrijednosti stanica Bolzano i Medicina) predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom dana 167 – 185 2006. godine (Slika 7.3).

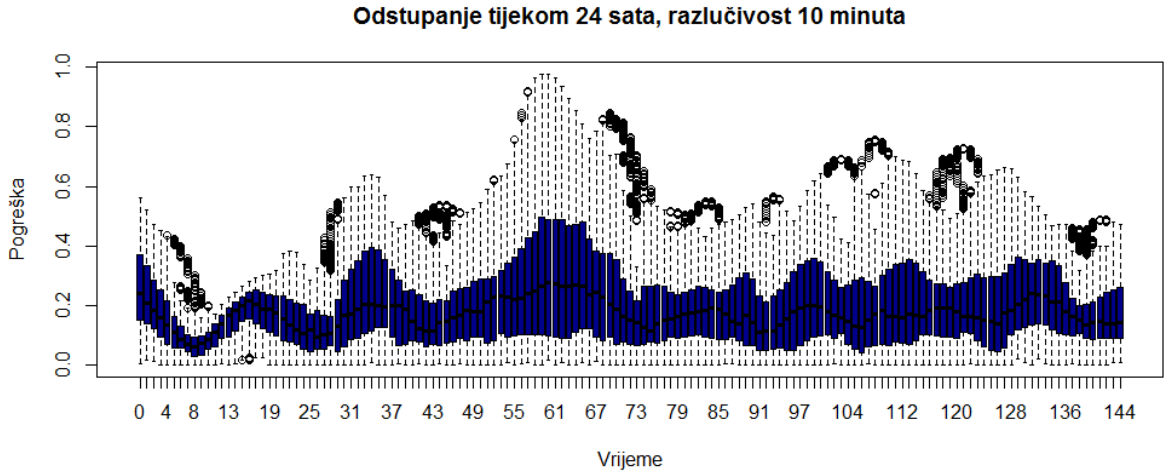


Slika 7.3: Srednje vrijednosti apsolutnih (lijevo) i relativnih (desno) dnevnih pogrešaka predloženog modela u odnosu na stvarno regionalno ionosfersko kašnjenje

Stvarno ionosfersko kašnjenje proračunato je za svaku minutu, što čini ukupno 1 440 opažanja tijekom jednog dana. Vrijednosti pogreške predloženog modela izračunate su s istom razlučivošću. Pogreška svakog opažanja unutar dana (svake minute) promatrana

je tijekom cijelog razdoblja opažanja, tj. 19 dana za obje stanice, što čini 38 skupova podataka.

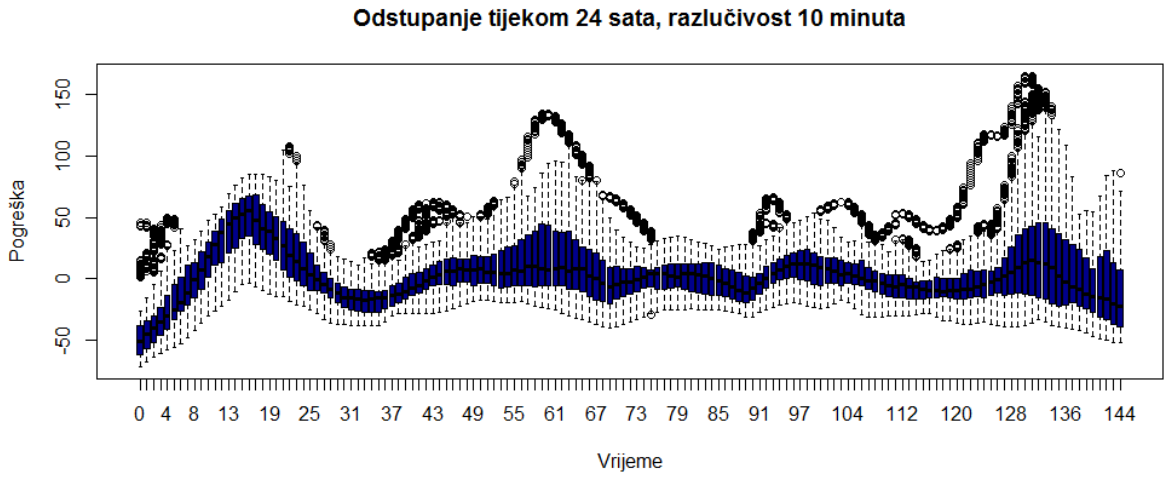
Dnevno odstupanje predloženog modela od regionalnog stvarnog ionosferskog kašnjenja prikazano je na slici 7.4, odnosno slici 7.5. Odstupanje je analizirano na temelju komponenata predloženog modela. U tablici 7.4, odnosno 7.5 prikazane su srednje vrijednosti odstupanja.



Slika 7.4: Regionalno apsolutno odstupanje (u m) predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 24 sata, prikazano s vremenskom razlučivošću skupova podataka od 10 minuta

Tablica 7.4: Apsolutno odstupanje modela prema komponentama (m)

Komponenta	$f0$	$f2$	$f1$	$f3$	$f4$
Najmanja vrijednost	0,0678	0,1566	0,1776	0,1495	0,1573
Prvi kvartil	0,1207	0,1839	0,182	0,1764	0,1874
Srednja vrijednost	0,1594	0,2341	0,1939	0,19	0,2063
Standardno odstupanje	0,05198	0,05284	0,02153	0,0227	0,02586
Median	0,1565	0,2268	0,1854	0,1894	0,2102
Treći kvartil	0,1884	0,2884	0,1906	0,2084	0,2219
Najveća vrijednost	0,2602	0,3111	0,2661	0,2287	0,2499
Raspon	0,1924	0,1545	0,0885	0,0792	0,0926



Slika 7.5: Regionalno relativno odstupanje (u %) predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 24 sata, prikazano s vremenskom razlučivošću skupova podataka od 10 minuta

Tablica 7.5: Relativno odstupanje modela prema komponentama (%)

Komponenta	$f0$	$f2$	$f1$	$f3$	$f4$
Najmanja vrijednost	0,06778	-15,16	-9,938	-10,16	-12,38
Prvi kvartil	0,1207	3,12	-2,965	0,8156	-6,904
Srednja vrijednost	0,1594	7,483	-0,99	5,289	2,736
Standardno odstupanje	0,051977	8,831306	3,218456	5,769666	12,07062
Median	0,1565	8,248	-0,4303	6,116	-3,067
Treći kvartil	0,1884	14,41	1,73	10,52	10,75
Najveća vrijednost	0,2602	19,55	2,935	12,72	28,13
Raspon	0,19242	34,71	12,873	22,88	40,51

Na temelju grafičkih i tabelarnih prikaza dnevnog odstupanja, vidljivo je kako su lokalni maksimumi prisutni, međutim nemaju uvijek istu vršnu vrijednost, širinu i vrijeme nastupa vršne vrijednosti. Ove varijacije odrazile su se na točnost modela pri opisu ionosferske dinamike, odnosno na raspršenje vrijednosti ispravke ionosferskog kašnjenja, iz razloga što su koeficijenti modela ostali nepromijenjeni tijekom cijelog postupka verifikacije.

Također, uočljiva je pogreška kod prve komponente modela u približno 03:00 i 22:00 sata. To je posljedica modeliranja linearnog porasta od 00:00 sati prema prvoj vršnoj vrijednosti ionosferskog kašnjenja, gdje ono zapravo pokazuje minimum upravo u 03:00 sata, nakon čega započinje linearni porast. Iako ova karakteristična najmanja vrijednost ukupnog sadržaja elektrona nije prisutna u svim opažanjima, njezina pojavnost utječe na točnost modela. Stoga je, u cilju poboljšanja modela u obzir potrebno

uzeti dodatnu komponentu, ili vrijeme trajanja modela definirati na temelju najmanje vrijednosti ionosferskog kašnjenja, odnosno u 03:00 sata.

7.3 Opća razmatranja

Na temelju prikazanih rezultata verifikacije, te uzimajući u obzir kriterije uspješnosti definirane u prošlom poglavlju, ista je potvrđena u odnosu na Klobucharov model ispravke. Uspješnost predloženog modela potvrđena je i u opisu dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja, koje je predloženim modelom umanjeno za 78,5 % na regionalnoj razini. Navedeno potvrđuje mogućnost primjene modela na cijelom području Jadranskog mora i okolne regije.

Predloženi model najbolje rezultate je postigao tijekom mirnih, stabilnih uvjeta svemirskog vremena, unutar kojih je dnevni hod ionosferskog kašnjenja pokazivao svoje karakteristične pravilnosti. U odnosu na stvarno ionosfersko kašnjenje, model je najlošije rezultate pokazao tijekom nastupa poremećaja koji su započeli krajem 12. dana opažanja, a svoje najveće vrijednosti dostigli tijekom 13. dana (dan 179 u 2006. godini), što je prikazano na temelju dnevnog hoda ukupnog sadržaja elektrona opaženog na stanici Bolzano (Italija). Uslijed nastupa poremećaja došlo je do općeg povećanja dnevnih vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona i poremećaja u uzorku dnevnog hoda, iako su višestruki porasti i padovi vrijednosti i dalje prisutni.

Vrijednosti ionosferskog kašnjenja dobivene predloženim modelom uspoređene su s GIM numeričkim mapama ukupnog sadržaja elektrona na području Jadranske regije. Usporedbi se pristupilo iz razloga nepostojanja referentne IGS stanice na području Republike Hrvatske. Usporedba je pokazala kako dnevni hod ukupnog sadržaja elektrona dobiven na temelju GIM mapa pokazuje blago povećane dnevne vrijednosti ionosferskog kašnjenja u odnosu na vrijednosti dobivene predloženim modelom. Razlozi mogućih odstupanja navedeni su u 6. poglavlju. No, karakteristična lokalna dnevna ionosferska dinamika prisutna je u oba slučaja, pri čemu je geometrijski oblik dnevnog hoda ukupnog sadržaja elektrona u oba slučaja gotovo isti.

Uz određena poboljšanja u samom postupku izrade modela (programskog koda), vrijednosti pogreške predloženog modela mogu se do određene mjere dodatno umanjiti. Između ostalog, to se odnosi na razdoblja preklapanja, u slučaju predloženog modela, kosinusnih komponenata.

Nespecifični uzorak dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja prisutan je na svim IGS stanicama, uključujući GIM lokaciju hrvatske obale Sjevernog Jadrana. Svaku lokaciju karakteriziraju blage, svojstvene razlike u vremenima nastupa vršnih vrijednosti lokalnih maksimuma, njihovom trajanju i amplitudama, kao i u linearnim komponentama noćnog i večernjeg porasta, odnosno pada vrijednosti ionosferskog kašnjenja. Ovi parametri nastupaju kao prilagođeni koeficijenti predloženog modela. Izvođenjem i podešavanjem koeficijenata za specifično područje unutar regije, isti se

može dodatno unaprijediti. To se, s korisničkog aspekta, odnosi na proučavanje značajki komponenata modela ovisno o specifičnoj lokaciji korisnika:

- komponenti noćnog i večernjeg nagiba
- značajki lokalnih maksimuma (vršnih vrijednosti)
- širina vršnih vrijednosti
- trenutaka nastupa vršnih vrijednosti.

7.4 Razmatranja o primjenjivosti modela

U odnosu na referentni model, predloženi model je pokazao bolje značajke pri opisu lokalne dinamike ionosferskog kašnjenja, što znači da je predloženim modelom moguće unaprijediti kvalitetu određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima, unaprjeđenjem točnosti mjerenja pseudoudaljenosti. Pri obradi satelitskih signala unutar Galileo i BeiDou satelitskih navigacijskih sustava se, kao kod sustava GPS, koristi tehnika višestrukog pristupa s kodnom raspodjelom (CDMA). Stoga je u navedenim sustavima moguće primijeniti predloženi model. U Beidou satelitskom navigacijskom sustavu implementiran je Klobucharov model ispravke ionosferskog kašnjenja.

Unatoč razvoju globalnih i regionalnih GNSS sustava, te sve većoj primjeni višefrekvencijskih i kombiniranih GNSS prijamnika, činjenica je kako jednofrekvencijski GPS prijamnici i dalje predstavljaju najzastupljeniju komercijalnu korisničku opremu.

Klobucharov model nastao je 70-ih godina prošlog stoljeća te je razvijen u skladu s tehnološkim mogućnostima toga doba. S obzirom na računalne sposobnosti današnjih uređaja, između ostalog *pametnih* telefona, implementacija predloženog modela ne bi trebala predstavljati problem.

Temeljne usluge koje pruža sustav GPS prisutne su u svakodnevnom životu. Kako u svojoj knjizi ''Digital Satellite Navigation and Geophysics'' navodi Ivan G. Petrovski – *'GPS je, poslije interneta, vjerojatno najšire primijenjena tehnologija'*. Usluge satelitske navigacije koriste se na individualnoj, regionalnoj, nacionalnoj i globalnoj razini, pri čemu se raspon primjene kreće od privatnih korisnika do korištenja u svrhe nacionalne sigurnosti. Uz to, nove primjene i korištenje GNSS sustava otkrivaju se na dnevnoj razini. Satelitska navigacija prisutna je u raznim područjima: industrijskim, informacijskim, društveno-ekonomskim te znanstvenoistraživačkim. Osim toga, usluge koje pružaju GNSS sustavi prisutne su u svim prometnim granama.

7.5 Primjenjivost u pomorskoj navigaciji

Modeliranje dinamike dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja kao doprinosa ublažavanju pogreške položaja određenog satelitskim navigacijskim sustavima primjenjivo je u raznim segmentima pomorske površinske navigacije, bilo da se radi o usluzi određivanja položaja ili ostalim primjenama temeljenim na tehnologiji satelitske navigacije (npr. usklađivanju vremena navigacijskih svjetala). Ovdje nije riječ o klasičnoj podjeli plovidbe na opću i obalnu [75], već o nizu standardnih i kritičnih, sadašnjih i

planiranih aplikacija koje podrazumijevaju visoku pouzdanost, točnost, integritet i procjenu rizika satelitski određenog položaja [141, 3, 78].

Tablica 7.6: Minimalni zahtjevi određivanja položaja (točnosti) GNSS sustavima za pomorske korisnike

Operacije	**Kriteriji na razini sustava/usluge**		**Operacije**	**Kriteriji na razini sustava/usluge**	
	Točnost			Točnost	
	Vodoravna (m)	Visinska (m)*		Vodoravna (m)	Visinska (m)*
Tegljači i potiskivači	1	NP	**Upravljanje navigacijskim pomagalima**	1	NP
Ledolomci	1	NP	**Lučke operacije**		
Automatsko izbjegavanje sudara	10	NP	VTS	1	NP
Kontrola praćenja plovidbenog putovanja	10	NP	Upravljanje (kontejnerskim) teretom	1	1
Automatski privez	0,1	NP	Provedba zakona	1	1
Upravljanje pomorskim prometom**			Rukovanje teretom	0,1	0,1
Koordinacija brod-brod	10	NP	**Istraživanje pomorskih nezgoda**		
Koordinacija brod-kopno	10	NP	Oceanska plovidba	10	NP
Upravljanje pomorskim prometom brod-kopno	10	NP	Obalna plovidba	10	NP
Traganje i spašavanje	10	NP	Prilazi lukama i plovidba u ograničenim uvjetima	1	NP
Hidrografija	1 – 2	0,1	**Odobalne operacije**		
Oceanografija	10	10	Istraživanje podmorja	1	NP
Pomorsko inženjerstvo, graditeljstvo, održavanje i upravljanje			Bušenje	1	NP
Jaružanje	0,1	0,1	Razvoj eksploatacijskih polja	1	NP
Polaganje kabela i cjevovoda	1	NP	Podrška proizvodnji	1	NP***
Građevinski radovi	0,1	0.1	Naknadna proizvodnja	1	NP***

NP – nije primjenjivo
** Uz mogućnost postojanja zahtjeva za vertikalnu točnost za određene lučke operacije i operacije u ograničenim vodama*
*** Pri upravljanju pomorskim prometom u nekim područjima može doći do zahtjeva za većom točnošću*
**** Kod postavljanja eksploatacijskih platformi visinska točnost <10 cm je neophodna*

Izvor: [75, 78]

Prepoznajući raspon i mogućnosti GNSS značajki, te sve veću (i rastuću) zastupljenost GNSS usluga, Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization* – IMO) je, u svojoj rezoluciji ''Izmijenjene i dopunjene smjernice pomorske politike uz izmijenjene i dopunjene zahtjeve za buduće globalne navigacijske satelitske sustave'' [78], proširila minimalne zahtjeve pružanih usluga, rada i standarda GNSS sustava i na ostale specifične primjene u pomorstvu [19].

U skladu s IMO razvojnom politikom za GNSS sustave [75, 78], pomorska se plovidba može podijeliti na oceansku i obalnu navigaciju, navigaciju u prilazima lukama i ograničenim plovnim putovima, te navigaciju u područjima luka i unutarnjim plovnim putovima. No, sve većom primjenom GPS/GNSS tehnologija postavljaju se i zahtjevniji zadaci, kao što su pomorske operacije, upravljanje pomorskim prometom, operacije traganja i spašavanja, hidrografija, oceanografija, pomorsko inženjerstvo i odobalne operacije, te operacije unutar lučkih sustava [78, 141]. U tablici 7.6 prikazani su minimalni zahtjevi za točnost određivanja položaja GNSS sustavima za pomorske korisnike sukladno IMO rezolucijama [75, 78], a koji se odnose na primjenu usluga satelitske navigacije osim u općim kategorijama plovidbe.

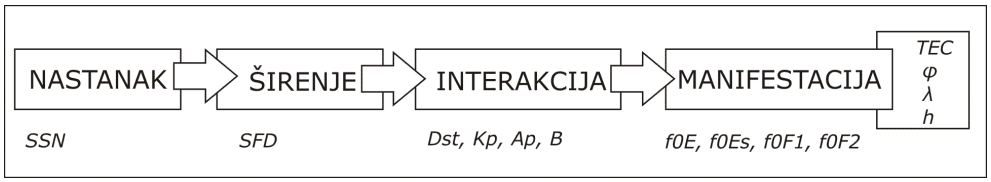
GPS sustav nastupa kao primarni izvor određivanja položaja na brodovima, pri čemu većinu korisničke opreme i dalje čine jednofrekvencijski satelitski prijamnici. Stoga se uklanjanje ionosferskog kašnjenja, osim u cilju smanjenja pogreške položaja, mora promatrati i s aspekta sigurnosne zalihosti. Sa stajališta vođenja pomorske navigacije, usluge zasnovane na satelitskoj navigaciji zauzimaju vodeće mjesto u primjenjivosti i važnosti unutar navigacijskih uređaja zapovjedničkog mosta. Današnji obvezni navigacijski uređaji, Informacijski sustav i prikaz elektroničkih karata (engl. *Electronic Chart Display and Information System* – ECDIS), te Sustav za automatsku identifikaciju (engl. *Automatic Identification System* – AIS) podrazumijevaju visoku točnost i integritet usluga GPS sustava. Štoviše, GPS nastupa kao njihova integrirana sastavnica [118, 76, 79, 74, 80]. Stoga, unaprjeđenjem rada i kvalitete određivanja položaja satelitskim navigacijskim sustavima moguće je doprinijeti poboljšanju rada i pouzdanosti ostalih vezanih pomorskih sustava i tehnologija.

7.6 Primjena rezultata istraživanja

Rezultati istraživanja mogu se primijeniti kao referentni okvir za daljnja istraživanja, uzimajući u obzir korištenu metodologiju i odnosne podatke. U radu je identificiran i modeliran lokalni dnevni hod ionosferske dinamike, što pruža temelje za daljnji razvoj modeliranja ionosferskog kašnjenja u različitim uvjetima svemirskog vremena na području srednjih geografskih širina i Jadranske regije.

U cilju identifikacije i kvalitativne procjene rizika učinaka ionosferskih i geomagnetskih poremećaja, razvijen je iskustveni prognostički model pogoršanja uvjeta okoliša širenja signala za satelitsko određivanje položaja. Ulazni podaci prognostičkog modela su pokazatelji Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti na temelju kojih se identificiraju poremećaji svemirskog vremena, njihova interakcija s geoprostorom, te

utjecaj na ionosfersku dinamiku i ukupni sadržaj elektrona. Na taj je način izrađen okvir djelovanja učinaka svemirskog vremena od nastanka odnosnih pojava do manifestacije na okoliš širenja signala za satelitsko određivanje položaja. Na slici 7.7 prikazan je okvir djelovanja učinaka svemirskog vremena na temelju korištenih pokazatelja.



Slika 7.6: Shema prognostičkog modela

Pojave nastale na Suncu prate se promatranjem broja Sunčevih pjega. Solarno zračenje upućuje na povećano širenje pojava i mogućnost ionosferskih i geomagnetskih poremećaja. Poremećaji se ogledaju u interakciji s geoprostorom i geomagnetskim poljem, što se može opaziti promatranjem pokazatelja stanja uzbude magnetosfere, pokazatelja stabilnosti geomagnetskog polja, te pokazatelja jakosti geomagnetskog polja. Geomagnetski poremećaji znak su mogućnosti pobude ionosfere, što se može opaziti na temelju ponašanja kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva. Navedeni slijed upućuje na manifestaciju pojava u obliku učinaka svemirskog vremena na dinamiku ukupnog sadržaja elektrona, što u konačnici utječe na mjerenje vremena širenja signala za satelitsko određivanje položaja.

Osim na satelitske navigacijske sustave, predloženi prognostički model identifikacije i procjene rizika učinaka svemirskog vremena primjenjiv je na sve sustave (navigacijske, tehnološke, društveno-ekonomske i ostale sustave) koji se temelje na uslugama satelitske navigacije: određivanju položaja korisnika, određivanju brzine kretanja korisnika, te usklađivanja korisničkog sata sa standardom vremena.

Konačno, rezultati istraživanja prikazani u doktorskom radu doprinose razumijevanju pojava svemirskog vremena i lokalne ionosferske dinamike, prvenstveno tijekom nepobuđene ionosfere, a zatim i uslijed poremećaja svemirskog vremena i raspodjele ionosferske morfologije.

8. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

''Sutra'' (imenica): 'Mistična zemlja u kojoj je smješteno 99 % cjelokupne ljudske produktivnosti, motivacije i postignuća.'

- *Nepoznat autor*

Ionosfersko kašnjenje signala za satelitsko određivanje položaja predstavlja najznačajniju utjecajnu veličinu u ukupnom proračunu pogreške položaja određenog jednofrekvencijskim GPS prijamnicima. Utjecaj ionosferskog kašnjenja proporcionalan je ukupnom sadržaju slobodnih elektrona u ionosferi, te je obrnuto proporcionalan kvadratu prijenosne frekvencije signala za satelitsko određivanje položaja. Dinamikom ukupnog sadržaja slobodnih ionosferskih elektrona iznad određenog područja definirana je lokalna ionosferska dinamika.

U nastojanju točnije ispravke ionosferskog kašnjenja u odnosu na referentni GPS model ispravke, u doktorskom radu predložen je regionalni model ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja. Svrha doktorskog rada ujedno je bila i motivacija za provedeno istraživanje: unaprjeđenje rada GPS/GNSS sustava i pružanih usluga. Model je temeljen na lokalnoj dinamici ukupnog sadržaja elektrona unutar područja Jadranskog mora i okolne regije. Stvarne vrijednosti ionosferskog kašnjenja proračunate su na temelju dvofrekvencijskih kodnih i faznih pseudoudaljenosti signala za satelitsko određivanje položaja. Na taj je način identificirana karakteristična lokalna dinamika dnevnog hoda ukupnog sadržaja elektrona. Dnevni hod ukupnog sadržaja elektrona opisan je linearnim porastom ukupnog sadržaja elektrona tijekom noćnih sati prema jutru, postojanjem tri lokalna maksimuma dnevnih vrijednosti, te linearnim padom ukupnog sadržaja elektrona u večernjim satima prema kraju dana.

Utvrđeno je kako se prisutne nespecifične pravilnosti pojavljuju u određenim uvjetima: u stanjima mirnog svemirskog vremena, nepobuđene ionosfere, te u razdobljima ljetnih mjeseci. U doktorskom radu je pruženo fizikalno objašnjenje pojave lokalne ionosferske dinamike na temelju prevladavajućih procesa i pojava koji se odvijaju u geoprostoru, a koji nastaju kao posljedica Sunčeve aktivnosti.

Regionalni model ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja razvijen je unutar definiranih uvjeta i prema kontrolnim parametrima. Model je verificiran podacima s različitih lokacija, čime je potvrđena njegova primjenjivost na cjelokupno područje Jadranske regije. Rezultati verifikacije pokazali su kako je predloženim modelom moguće umanjiti 78,5 % pogreške položaja uslijed ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja, u odnosu na 34% ispravke koju u istim uvjetima pruža referentni model dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja.

Također, u cilju definiranja okoliša širenja satelitskih signala za određivanje položaja, utemeljen je iskustveni prognostički model pogoršanja uvjeta satelitskog određivanja položaja uslijed učinaka svemirskog vremena. Na temelju promatranih pokazatelja, prognostički model slijedi tijek pojava svemirskog vremena od njihovog

nastanka, širenja kroz međuplanetarni prostor u obliku energijskih i materijalnih prijenosa, interakcije poremećaja sa Zemljinim geoprostorom, geomagnetskim poljem i ionosferom te konačno manifestacijom na okoliš širenja signala za satelitsko određivanje položaja.

U doktorskom radu ostvareni su svi željeni znanstveni doprinosi. Rezultati istraživanja doveli su do postavljenih ciljeva. Primjenom predloženog modela ispravke ionosferskog kašnjenja moguće je unaprijediti usluge koje pružaju satelitski navigacijski sustavi, čime je ispunjena svrha znanstvenog istraživanja.

Na način koji je prikazan u doktorskom radu omogućeno je vrednovanje rezultata istraživanja i predloženih modela te utvrđivanje uvjeta njihove primjene, kao i razvoja novih modela ukupnog sadržaja ionosferskih elektrona. Uspješnost modela uvjetovana je definiranim uvjetima svemirskog vremena. To otvara mogućnost daljnjeg modeliranja u cilju identifikacije ionosferskih poremećaja tijekom ostalih karakterističnih stanja okoliša širenja satelitskih signala: narušenih i ekstremnih uvjeta svemirskog vremena, iznenadnih Sunčevih poremećaja, te različitih razina Sunčeve aktivnosti.

Daljnja istraživačke aktivnosti također se odnose na proučavanje i primjenu pokazatelja svemirskog vremema čija dinamika nije razmatrana. Time bi se okvir djelovanja učinaka svemirskog vremena na satelitske navigacijske sustave proširio. To se prvenstveno odnosi na širenje i značajke Sunčevog vjetra i međuplanetarnog magnetskog polja, auroralnu aktivnost, aktivnost visokih geomagnetskih širina te visine vršnih vrijednosti ionosferskih slojeva. Cilj promatranja navedenih, dodatnih pokazatelja odnosi se na promatranje okoliša Sunce-Zemlja kao jedinstvenog, integriranog sustava. Pri tome je u obzir potrebno uzeti i pojave i procese koji nastaju uslijed sprege neutralnog zraka i ionosfere.

Na temelju proučavanja lokalnih uvjeta manifestacije učinaka svemirskog vremena doprinosi se razumijevanju ionosferskih procesa na promatranom području. Daljnja istraživanja je potrebno prostorno proširiti na temelju proučavanja mreže GIM numeričkih ionosferskih mapa Jadranske regije, koja trenutno, za većinu regije, nastupaju kao jedini izvor podataka o ukupnom sadržaju elektrona. Najučinkovitiji način proučavanja ionosferske dinamike, dnevnog hoda ukupnog sadržaja elektrona te pristupa uklanjanju pogreške položaja uslijed ionosferskog kašnjenja postiže se izravnim višefrekvencijskim GPS mjerenjima vremena širenja satelitskih signala, što je jedan od temeljnih preduvjeta za kvalitativno i kvantitativno istraživanje ionosferske dinamike na hrvatskom dijelu Jadranskog mora.

Stoga, doktorski rad i prikazani rezultati nastupaju kao temelj za daljnja istraživanja i buduće znanstvene aktivnosti.

POPIS LITERATURE

1. Publikacije

[1] Abramowitz, M. i Stegun, I. A. (1972) *Handbook of mathematical functions*. New York: Dover Publishing.

[2] AIAA. American Institute of Aeronautics and Astronautics. (1999) *Guide to Reference and Standard Ionosphere Models*. Reston: AIAA.

[3] AMS. American Meteorological Society. (2011) *Satellite Navigation & Space Weather: Understanding the Vulnerability & Building Resilience*. AMS.

[4] Angrisano, A. i dr. (2011) Ionospheric models comparison for single-frequency GNSS positioning. *Proceedings of European Satellite Navigation Conference*. London: The Royal Institute of Navigation. 29.11-1.12.2011.

[5] Appleton, E. V. (1932) Wireless studies of the ionosphere. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*. 71. str. 642–650.

[6] Appleton, E. V. (1946) Two anomalies in the Ionosphere. *Nature Letters to the Editors*. 3995. str. 691.

[7] Appleton, E. V. i Piggott, W. R. (1952) The morphology of storms in the F2 layer of the ionosphere I. Some statistical relationships. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 2 (4). str. 236-252.

[8] Bancroft, S. (1985) An Algebraic Solution of the GPS Equations. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*. 21 (7). str. 56-59.

[9] Banks, P. M., Schunk, R. W. i Raitt, W. J. (1976) The topside ionosphere: a region of dynamic transition. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 4. str. 381-440.

[10] Barclay, L. W. (ur.) (2003) *Propagation of radio waves*. 2nd edition. London: Institution of Engineering and Technology.

[11] Bent, R. B., Llewellyn, S. K. i Walloch, M. K. (1972). *Description and evaluation of the Bent Ionospheric model*. Volume 1. Melbourne: DBA Systems, Inc.

[12] Berkner, L. W. i Seaton, S. L. (1940) Ionospheric changes associated with the magnetic storm of March 24, 1940. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 45 (4). str. 393-418.

[13] Bilitza, D. (2002) Ionospheric Models for Radio Propagation Studies. In: Stone, W. R. (ur.) *Review of Radio Science 1999-2002*. New York: John Wiley & Sons.

[14] Bilitza, D. i dr. (2012) Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 86 (1). str. 99–106.

[15] Booker, H. G. (1954) Morphology of Ionospheric Storms. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*. 40 (10). str. 931–943. Washington, DC: PNAS.

[16] Brčić, D. (2012) Ensuring sustainability through utilisation of satellite navigation technology. *Proceedings of the 2012 International Conference on Transport Sciences (ICTS).* [CD, 14 str.] Portorož, Slovenija, 28.05.2012. Portorož: Fakulteta za pomorstvo in promet.

[17] Brčić, D. (2013) RINEX-based GNSS positioning performance data analysis using the open source tool. (ppt) *United Nations/Croatia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems*. Baška, Hrvatska, 21-25.04.2013. Beč: UN OOSA.

[18] Brčić, D., Filjar, R. & Kos, S. (2014) On identification of local GPS ionospheric delay anomaly in the Adriatic Sea area. *Proceedings of the 34th International Conference on Transportation Systems (KoREMA)*. str. 112-115. Dubrovnik, Hrvatska, 05-09.11.2014. Zagreb: KoREMA.

[19] Brčić, D., Kos, S. i Mohović Đ. (2014) IMO zahtjevi za navigacijsku opremu. U: Mohović, R. i Frančić, V. (ur.) (2014) *Vademecum Maritimus*. Četvrto izmijenjeno i dopunjeno izdanje. str. 72-112. Rijeka: Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

[20] Budden, K. G. (1985) *The propagation of radio waves: The theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere*. Cambridge: Cambridge University Press.

[21] Campbell, W. H. (2003) *Introduction to Geomagnetic Fields*. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press.

[22] Cannon, P. i dr. (2013) *Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure*. London: Royal Academy of Engineering.

[23] Carrano, C. S., Bridgwood, C. T. i Groves, K. M. (2008) Impacts of the December 2006 Solar Radio Bursts on GPS operations. *Proceedings of the 12th International Ionospheric Effects Symposium (IES)*. Alexandria, Virginia, 13-15.05.2008. Alexandria: JMG Associates.

[24] Chapman, S. (1931) The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth. *Proceedings of the Physical Society*. 43. str. 26-45.

[25] Coisson, P. i Radicella, S. M. (2005) Ionospheric topside models compared with experimental electron density profiles. *Annals of Geophysics*. 48 (3). str. 497-503.

[26] CSNO. China Satellite Navigation Office. (2013) *BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Intefrace Control Document: Open Service Signal. BDS-SIS-ICD Version 2.0*. Beijing: CSNO.

[27] Danilov, A. D. i Lastovička, J. (2001) Effects of geomagnetic storms in the ionosphere and atmosphere. *International Journal of geomagnetism and aeronomy*. 2 (3). str. 209–224.

[28] Davies, K. (1965) *Ionospheric Radio Propagation*. Washington, DC: National Bureau of Standards.

[29] Davies, K. (1990) *Ionospheric Radio*. London: Peter Peregrinus Ltd.

[30] Davis, C. J. i dr. (1997) Ionospheric and geomagnetic responses to changes in IMF Bz: a superposed epoch study. *Annales Geophysicae.* 15 (2). str. 217-230.

[31] Derevianko, A. i Pospelov, M. (2014) Hunting for topological dark matter with atomic clocks. *Nature Physics*. 10. str. 933-936.

[32] Di Giovanni, G. & Radicella, S. M. (1990) An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research*. 10 (11). str. 27-30.

[33] Doberstein, D. (ur.) (2012) *Fundamentals of GPS receivers*. New York: Springer.

[34] Doherty, P. i dr. (1994) Statistics of Time Rate of Change of Ionospheric Range Delay. *Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1994).* Salt Lake City, 20-23.09.1994. Manassas: The Institute of Navigation. str. 1589–1598.

[35] Dow, J. M., Neilan, R. E. i Rizos, C. (2009) The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*. 83 (3-4). str. 191-198.

[36] Dudeney, J. R. (1983) The accuracy of simple methods for determining the height of the maximum electron concentration of the F2-1ayer from scaled ionospheric characteristics. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 45 (8-9). str. 629-640.

[37] Dudeney, J. R. i Kressman, R. I. (1986) Empirical models of the electron concentration of the ionosphere and their value for radio communications purposes*. Radio Science*. 21 (3). str. 319-330.

[38] Dyrud, L. i dr. (2008) Ionospheric measurement with GPS: Receiver techniques and methods. *Radio Science*. 43 (6). str. 1-11.

[39] EU/ESA. European Commission/European Space Agency. (2010) *European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document. OS-SIS-ICD Issue 1.1*. Bruxelles: EU/ESA.

[40] European Union (EU). (2015) *Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users*. Bruxelles: European Union. 107 str.

[41] Farrell, J. A. (2008) *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors*. New York: McGraw & Hill.

[42] Feynman, R. P., Leighton R. B. i Sands, M. (2011) The Feynman Lectures on Physics. New York: Basic Books.

[43] Filjar, R. (2007) *Pogreška satelitskog određivanja položaja zbog ekstremnih ionosferskih poremećaja*. Doktorska disertacija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva.

[44] Filjar, R. (2008) A Study of Direct Severe Space Weather Effects on GPS Ionospheric Delay. *Journal of Navigation.* 61 (1). str. 115-128.

[45] Filjar, R. (2013) On genesis of GPS ionospheric model. *Proceedings of 7th GNSS Vulnerabilities and Solutions Conference.* Baška, 18-20.04.2013. Rijeka: University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies. str. 213-222.

[46] Filjar, R. i Huljenić, D. (2012) The importance of mitigation of GNSS vulnerabilities and risks. *Coordinates.* 8. str. 14-16.

[47] Filjar, R., Kos, S. i Brčić, D. (2011) Local model of quiet space weather GPS ionospheric delay for the area of Northern Adriatic. [recenzirano i prihvaćeno za objavu] *Proceedings of the 5th Global Navigation Satellite Systems Vulnerabilities and Solutions Conference*. Baška, 23-25.05.2011. London: The Royal Institute of Navigation.

[48] Filjar, R., Kos, S., Kos, T. (2012) A theoretical framework for understanding relationship between space weather indices and GPS ionospheric delay. *Proceedings of 6th GNSS Vulnerabilities and Solutions Conference.* Baška, 21-24.05.2012. Rijeka: University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies. str. 63-76.

[49] Filjar, R., Kos, T. & Kos. S. (2009) Klobuchar-Like Local Model of Quiet Space Weather GPS Ionospheric Delay for Northern Adriatic. *Journal of Navigation*. 62 (3). str. 543-554.

[50] Gillies, R. G. i dr. (2007) Modelling and observation of transionospheric propagation results from ISIS II in preparation for ePOP. *Annales Geophysicae*. 25 (1). str. 87–97.

[51] Good, G. A. (ur.) (2013) *History of Geophysics*. Volume 5. Washington, DC: American Geophysical Union.

[52] Goodman, J. M. (2005) *Space Weather and Telecommunications*. New York: Springer Science and Business Media.

[53] GPS Directorate. (2013) *IS-GPS-200H: Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*. Systems engineering & Integration. Los Angeles Air Force Base.

[54] GPS Directorate. (2013b) *IS-GPS-705: Navstar GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces*. Systems engineering & Integration. Los Angeles Air Force Base.

[55] Grebowsky, J. M. i Aikin, A. C. (2009) Planetary ionospheres – sources and dynamic drivers. *Proceedings IAU Symposium No. 257*. Cambridge: Cambridge University Press. str. 499-509.

[56] Groves, P. D. (2008) *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Boston: Artech House.

[57] Gurtner, W. i Estey, L. (2009) *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format*. V3.01. Pasadena: IGS Central Bureau. 44 str.

[58] Hargreaves, J. K. (1995) *The solar-terrestrial environment*. Cambridge: Cambridge University Press.

[59] Harrington, P. (2012) *Machine Learning in action*. Shelter Island: Manning.

[60] Hastie, T., Tibshirani, R. i Friedman, J. (2009) *The Elements of Statistical Learning*. Second Edition. New York: Springer Series in Statistics.

[61] Hatch, R. (1991) Instantaneous ambiguity resolution. *Proceedings of IAG International Symposium No. 107 on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing.* str. 209 – 308. New York: Springer-Verlag.

[62] Hernandez-Pajares, M. i dr. (2002) Combining GPS measurements and IRI model values for space weather specification. *Advances in Space Research*. 29 (6). str. 949–958.

[63] Hernandez-Pajares, M. i dr. (2009) The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*. 83 (3-4). str. 263-275.

[64] Hernandez-Pajares, M. i dr. (2011) The ionosphere: effects, GPS modelling and the benefits for space geodetic techniques. *Journal of Geodesy*. 85 (12). str. 887-907.

[65] Hernandez-Pajares, M., Zornoza J. M. J. i Subirana, J. S. (2005) *GPS Data processing: code and phase Algorithms, Techniques and Recipes*. 2nd edition. Barcelona: Centre de Publicacions del Campus Nord, UPC.

[66] Hines, C. O. (1960) Internal AGWs at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*. 38 (11). str. 1441–1481.

[67] Ho, C. M. i dr. (1996) Global Ionospheric Perturbations Monitored by the Worldwide GPS Network. *Geophysical Research Letters*. 23 (22). str. 3219-3222.

[68] Hulburt, E. O. (1974) Early theory of the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 36 (12). str. 2137-2140.

[69] Hunsucker, R. D. i Hargreaves, J. K. (ur.) (2003) *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*. Cambridge: Cambridge University Press.

[70] IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2003) IEEE Standard for Letter Designations for Radar-Frequency Bands. IEEE Std 521-2002. New York: IEEE Aerospace & Electronic Systems Society.

[71] IGS IWG. International GNSS Service Ionosphere Working Group. (2003) *Performance of IGS Ionosphere TEC maps*. IGS IONO WG Report V1.0.2. Pasadena: IGS Central Bureau.

[72] IGS. International GNS Service. (2013) RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. V3.02. *IGS RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC 104)*. Pasadena: IGS Central Bureau.

[73] IGS. International GNSS Service. (2013) IGS Site Guidelines. Pasadena: IGS Central Bureau Infrastructure Committee.

[74] IMO. International Maritime Organization. (1995) *Resolution A.817(19): Performance standards for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS).* London: IMO.

[75] IMO. International Maritime Organization. (1997) *Resolution A.860(20): Maritime policy for a future Global Navigation Satellite Systems (GNSS).* London: IMO.

[76] IMO. International Maritime Organization. (1998) *Resolution MSC.74(69): Adoption of new and amended performance standards.* London: IMO.

[77] IMO. International Maritime Organization. (2000) *Resolution MSC.115(73): Adoption of the revised performance standards for shipborne combined GPS/GLONASS receiver equipment*. London: IMO.

[78] IMO. International Maritime Organization. (2001) *Resolution MSC.915(22): Revised Maritime policy and requirements for a future Global Navigation Satellite Systems (GNSS).* London: IMO.

[79] IMO. International Maritime Organization. (2002) *Resolution MSC.917(22): Guidelines for onboard operational use of shipborne Automatic Identification Systems (AIS).* London: IMO.

[80] IMO. International Maritime Organization. (2006) *Resolution MSC.232(82): Adoption of the revised performance standards for Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS).* London: IMO.

[81] Jakowski, N., Leitinger, R. i Angling, M. (2004) Radio occultation techniques for probing the ionosphere. *Annals of Geophysics*. 47 (2-3). str. 1049-1066.

[82] Jursa, A. S. (ur.) (1985) *Handbook of geophysics and the space environment*. United States Air Force Geophysics Lanboratory.

[83] Kamide, Y. i Chian A. C. L. (ur.) (2007) *Handbook of the Solar-Terrestrial Environment*. New York: Springer Science and Business Media.

[84] Kaplan, E. D. & Hegarty, C.J. (ur.) (2006) *Understanding GPS: Principles and Application*. Second edition. Boston: Artech House.

[85] Kintner, P. M. i Ledvina, B. (2005) The ionosphere, radio navigation and global navigation satellite systems. *Advances in Space Research*. 35 (5). str. 788-811.

[86] Klobuchar i dr. (1995) Potential Ionospheric Limitations to GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS). *Journal of the Institute of Navigation.* 42 (2). str. 353–370.

[87] Klobuchar, J. A. (1975) A First-Order, Worldwide, Ionospheric, Time-Delay Algorithm. *IPL Project No. 4643*. Hanscom: Air Force Cambridge Research Laboratory. 25 str.

[88] Klobuchar, J. A. (1983) Ionospheric Effects on Earth-Space Propagation. *Environmental research paper No. 866*. Hanscom: Air Force Geophysics Laboratory. 33 str.

[89] Klobuchar, J. A. (1987) Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 23 (3). str. 325–331.

[90] Klobuchar, J. A. (1988) Ionospheric corrections for timing applications. *Proceedings of the 20th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Application and Planning Meeting*. [On CD] str. 193-204. Vienna (VA), 07-09.12.1988. Washington DC: Naval Observatory.

[91] Klobuchar, J. A. (1997) Real-time ionospheric science: The new reality. *Radio Science*. 32 (5). str. 1943-1952.

[92] Komjathy, A. i dr. (2004) The Ionospheric Impact of the October 2003 Storm Events on WAAS. *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*. str. 1298-1307. Long Beach, 21-24.09.2004. Manassas: ION.

[93] Kos, S., Filjar, R. i Brčić, D. (2012) Degradacija kvalitete GPS satelitskog određivanja položaja uslijed prekida rada satelita: analiza slučaja GPS PRN24 u Hrvatskoj. *Pomorstvo*. 26 (1). str. 165–179.

[94] Kouba, J. (2009) *A guide to using International GNSS Service (IGS) products*. Pasadena: IGS Central Bureau.

[95] Kulišić, P. i Lopac, V. (1991) *Elektromagnetske pojave i struktura tvari*. Zagreb: Školska knjiga.

[96] Lanyi, G. E. i Roth, T. (1988) A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio science*. 23 (4). str. 483-492.

[97] Lilensten, J., Pibaret, B. i Lemieux-Dudon, B. (2004) *A morphological study of the Integrated Total Electron Content and F region parameters using EISCAT in the frame of Space Weather*. EISCAT Technical Report 04/54. Kiruna: EISCAT Scientific Association.

[98] Liu, J., Zhao, B. i Liu, L. (2010) Time delay and duration of ionospheric total electron content responses to geomagnetic disturbances. *Annales Geophysicae*. 28 (3). str. 795-805.

[99] Lockwood, M. i dr. (1999) Predicting Solar Disturbance Effects on Navigation Systems. *Journal of Navigation*. 52 (2). str. 203–216.

[100] Lundstedt, H. (2010) *A Prototype Real-Time Forecast Service of Space Weather and Effects using Knowledge-Based Neurocomputing*. WP3220&WP3210. Noordwijk: ESA ESTEC.

[101] Maindonald, J. i Braun, W. J. (2010) *Data Analysis and Graphics Using R: An Example-Based Approach*. Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press.

[102] Manucci, A. J. i dr. (1998) A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Science*. 33 (3). str. 565-582.

[103] Manucci, A. J. i dr. (1999) *GPS and Ionosphere*. Revised Submission to URSI Reviews of Radio Science. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. 36 str.

[104] Martyn, D. F. (1953) The morphology of the ionospheric variations associated with magnetic disturbance: I. Variations at moderately low latitudes. *Proceedings of the Royal Society London*. 218 (A). str. 1-18.

[105] Mayaud, P. N. (1980) *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices*. Washington, DC: American Geophysical Union.

[106] McMorrow, D. (2011) *Impacts of Severe Space Weather on the Electric Grid*. Report JSR-11-320. The MITRE Corporation. McLean, VA, USA. 107 str.

[107] Melbourne, W. G. (2004) *Radio Occultations Using Earth Satellites: A Wave Theory Treatment*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory.

[108] Memarzadeh, Y. (2009) *Ionospheric modeling for Precise GPS Applications*. Ph. D. dissertation. Delft: University of Technology.

[109] Mendillo, M. (2006) Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Reviews of Geophysics*. 44 (4). 47 str.

[110] Mendillo, M. i dr. (2001) Modelling F2-layer seasonal trends and day-to-day variability driven by coupling with the lower atmosphere. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 64 (18). str. 1911-1931.

[111] Meyer-Vernet, N. (2007) *Basics of the Solar Wind*. Cambridge: Cambridge University Press.

[112] Mikhailov, A. V., Depueva, A. H. i Depuev, V. H. (2009) Quiet time F2-layer disturbances: seasonal variations of the occurrence in the daytime sector. *Annales Geophysicae.* 27 (1). str. 329–337.

[113] Misra, P. i Enge, P. (2004) *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance*. Lincoln: Ganga-Jamuna Press.

[114] Mukhtarov, P., Andonov, B. i Pancheva, D. (2013) Global empirical model of TEC response to geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 118 (10). str. 1–20.

[115] Murphy, K. P. (2012) *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. Massachusetts: The MIT Press.

[116] NASA GSFC. National Aeronautics and Space Administration's Goddard Space Flight Center. (1969) Magnetic Fields – Earth and Extraterrestrial. *NASA Space Vehicle Design Criteria (Environment) Special Publication SP-8017*. Washington, DC: Exotech. 70 str.

[117] NIMA. National Imagery and Mapping Agency. (2000) *World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*. Washington, DC: US DOD.

[118] Norris, A. (2010) *ECDIS and Positioning*. London: The Nautical Institute.

[119] Parkinson, B.W. i Spilker Jr., J. J. (ur.) (1996) *Global Positioning System: Theory and Applications*. Volume I. Washington, DC: AIAA.

[120] Perrone L. i De Franceschi, G. (1998) Solar, ionospheric and geomagnetic indices. Annals of Geophysics. 41 (5-6). str. 843-855.

[121] Petit, G. i Luzum, B. (ur.) (2010) IERS Conventions 2010. *IERS Technical Note No. 36*. Frankfurt am Main: International Earth Rotation and Reference Systems Service.

[122] Petrovski, I. (2014) *GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou for Mobile Devices*. Cambridge: Cambridge University Press.

[123] Petrovski, I. i Tsujii, T. (2012) *Digital Satellite Navigation and Geophysics: A Practical Guide with GNSS Signal Simulator and Receiver Laboratory*. Cambridge: Cambridge University Press.

[124] Poppe, B. B. i Jorden, P. J. (2006) *Sentinels of the Sun*. Boulder: Johnson Books.

[125] Prölss, G. W. (1995) Ionospheric F-region storms. U: Volland, H. (ur.) (1995) *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*. Volume II. str. 195–248. Boca Raton: CRC Press.

[126] Radicella, S. M. (2009) The NeQuick model genesis, uses and evolution. *Annals of Geophysics*. 52 (3-4). str. 417-422.

[127] RISDE. Russian Institute of Space Device Engineering. (2008) *GLONASS Interface Control Document (ICD): Navigation Radiosignal in L1, L2*. Moscow: RISDE.

[128] Rishbeth, H. (1974) Some problems of the F region. *Radio Science*. 9 (2). str. 183-187.

[129] Rishbeth, H. (1988) Basic physics of the ionosphere: a tutorial review. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*. 58 (6). str. S207–S223.

[130] Rishbeth, H. (2001) The centenary of solar-terrestrial physics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 63 (18). str. 1883-1890.

[131] Sandford, W. H. (1999) The Impact of Solar Winds on Navigation Aids. *Journal of Navigation*. 52 (1). str. 42–46.

[132] Schaer, S. (1999) *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*. Dissertation. Berne: University of Berne, Astronomical Institute.

[133] Schaer, S. (2008) Differential Code Biases (DCB) in GNSS Analysis. (ppt) *International GNSS Service Analysis Center Workshop.* Miami Beach, Florida, 02-06.06.2008. Pasadena: IGS & NGS.

[134] Scherrer, K. i dr. (ur.) (2005) *Space Weather: The Physics Behind a Slogan*. Berlin: Springer Science & Business Media.

[135] Schunk, R. i Nagy, A. (2009). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry*. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press.

[136] Seeber, G. (2003) *Satellite Geodesy*. 2nd edition. Berlin: Walter de Gruyter.

[137] Sharma, S. i dr. (2012) Study of ionospheric TEC during space weather event of 24 August 2005 at two different longitudes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 75-76. str. 133-140.

[138] Stamper i dr. (1999) Solar causes of the long-term increase in geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research*. 104 (A12). str. 28 325–28 342.

[139] Subirana, J. S., Zornoza J. M. J. i Hernandez-Pajares, M. (2013) *GNSS Data processing*, *Volume I: Fundamentals and algorithms*. Noordwijk: ESA Communications.

[140] Subirana, J. S., Zornoza J. M. J. i Hernandez-Pajares, M. (2013) *GNSS Data processing*, *Volume II: Laboratory Exercises*. Noordwijk: ESA Communications.

[141] Thomas, M. i dr. (2011) *Global Navigation Space Systems: reliance and vulnerabilities*. London: Royal Academy of Engineering.

[142] US DOD. USA Department of Defense. (2007) *Global Positioning System precise positioning service performance standard*. Washington, DC: US DOD.

[143] US DOD. USA Department of Defense. (2008) *Global Positioning System standard positioning service performance standard*. Washington, DC: US DOD.

[144] Wanninger, L. (1993) Effects of the Equatorial Ionosphere on GPS. *GPS World*. 4 (7). str. 48–54.

[145] Williams, G. J. (2009) Rattle: A Data Mining GUI for R. *R Journal*. 1-2. str. 45-55.

[146] Wilson, B. D. i Manucci, A. J. (1993) Instrumental Biases in Ionospheric Measurements Derived from GPS Data. *Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1993)*. str. 1343-1351. Salt Lake City, 22-24.09.1993. Manassas: ION.

[147] Zogg, J. (2009) *GPS: Essentials of Satellite Navigation, Compendium*. Thalwil: U-blox AG.

[148] Zolesi, B. i Cander, Lj. R. (2014) *Ionospheric Prediction and Forecasting*. New York: Springer.

2. Poveznice na korištene programske alate i baze podataka

[149] AIUB CODE. Astronomical Institute of the University of Berne, Center for Orbit Determination in Europe (2014) *Differential Code Bias IONEX DCB files*. [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1JlNGn0 (14.12.2014)

[150] CDDIS. The Crustal Dynamics Data Information System. (2014) *GNSS Atmospheric Products/Ionosphere*. [Online] Dostupno na: http://1.usa.gov/1zQJirj (02.02.2014)

[151] Hatanaka, Y. (2008) A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data. *Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan*. 55. str. 21-30 [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1L2svSr (02.10.2014)

[152] ICTP. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (2012) NeQuick 2 Web Model. [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1AdDqpp (14.01.2015)

[153] IGS. International GNSS Service. (2014) *GPS observables in RINEX format*. [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1wMnTtJ (21.03.2014)

[154] INTERMAGNET. International Real-Time Magnetic Observatory Network. (2014) [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1wMp1xA (02.02.2013)

[155] NGDC SPIDR. National Geophysical Data Center's Space Physics Interactive Data Resource. (2014) [Online] Dostupno na: http://1.usa.gov/10EEcPt (03.05.2014)

[156] NGL. Navigacijski GNSS Laboratorij. (2014) *Arhiva podataka*. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet.

[157] NOAA SWPC. National Oceanic and Atmospheric Association's Space Weather Prediction Center. (2015) Space Weather Scales. [Online] Dostupno na: http://1.usa.gov/1Czzhgd (01.02.2015)

[158] R Development Core Team (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. Beč: R Foundation for Statistical Computing. [Online] Dostupno na: http://bit.ly/19WExR5 (05.06.2014)

[159] Rinex GPS-TEC program Version 2.2 (*GPS Gopi*). (2011) [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1DgsrPE (13.09.2014)

[160] Schaer, S., Gurtner, W. i Feltens, J. (1998) *IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1*. International GNSS Service. [Online] Dostupno na: http://1.usa.gov/1Egg8Qn (31.10.2012)

[161] The ESA/UPC GNSS-Lab tool (gLAB). (2010) An advanced multipurpose package to process and analyse GNSS data. *Proceedings of 5th ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies (NAVITEC)*. str. 1-8. Noordwijk: European Space Agency (ESA) Communications. [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1L4ek11 (13.02.2014)

[162] US CORS. National Geodetic Survey. (2014) *Continuously Operating Reference Stations (CORS): GPS navigation messages in RINEX format.* [Online] Dostupno na: http://1.usa.gov/1DD3tpe (13.11.2014)

[163] VisualGPS LLC. (2014) *An multipurpose utility software for GPS output monitoring*. [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1zHgTxA (02.02.2014)

[164] WDC Kyoto. World Data Center for Geomagnetism. (2014) [Online] Dostupno na: http://bit.ly/1wNdOP9 (01.12.2014)

POPIS KRATICA

AGW – *Atmospheric Gravity Waves*

AIS – *Automatic Identification System*

C/A – *clear (coarse) acquisition code*

CDMA – *Code Division Multiple Access*

CME – *Coronal Mass Ejections*

CODE – *Center for Orbit Determination in Europe*

DCB – *Differential Code Bias*

DGPS – *Differential GPS*

DGR – *Di Giovanni – Radicella*

DOP – *Dilution of Precision*

DSSS – *Direct Sequence Spread Spectrum*

ECDIS – *Electronic Chart Display and Information System*

ECEF – *Earth Centered, Earth Fixed coordinate system*

ECI – *Earth Centered Inertial coordinate system*

EDOP – *Easting Dilution of Precision*

EIA – *Equatorial Ionization Anomaly*

ESOC – *European Space Operations Center*

FDMA – *Frequency Division Multiple Access*

GDOP – *Geometric Dilution of Precision*

GIM – *Global Ionospheric Maps*

GLONASS – *GLObal'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*

GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*

GSM – *Geocentric-Solar-Magnetospheric reference frame*

HDOP – *Horizontal Dilution of Precision*

IAAC – *IGS Ionosphere Associate Analysis Centers*

IAGA – *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*

IGS – *International GNSS Service*

IMF – *Inperplanetary Magnetic Field*

IMO – *International Maritime Organization*

IONEX – *IONosphere map Exchange Format*

IPP – *Ionospheric Pierce Point*

IWG – *IGS Ionosphere Working Group*

JPL – *Jet Propulsion Laboratory*

LEO – *Low Earth Orbit*

MEO – *Medium Earth Orbit*

MUF – *Maximum Usable Frequency*

NAVSTAR GPS – *NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System*

NDOP – *Northing Dilution of Precision*

NrCAN/EMR – *National Resources Canada Energy, Mines & Resources*

PDOP – *Positioning Dilution of Precision*

PPS – *Precise Positioning Service*

P(Y) – *Protected Code*

PRN – *Pseudorandom Noise Code*

RF – *Radio Frequency*

RINEX – *Receiver Independent Exchange Format*

SF – *solar flux*

SHF – *Super High Frequency*

SLM – *Single Layer Model*

SRB – *Solar Radio Bursts*

SPS – *Standard Positioning Service*

SSN – *Sunspot Number*

ST – *System Time*

STEC – *Slant Total Electron Content*

TDOP – *Time Dilution of Precision*

TEC – *Total Electron Content*

TECU – *Total Electron Content Unit*

TGD – *Total Group Delay*

TID – *Travelling Ionospheric Disturbances*

UERE – *User Equivalent Ranging Error*

UPC – *Universitat Politècnica de Catalunya*

UTC – *Universal Time Coordinated*

UV/EUV – *Ultraviolet/ Extreme Ultraviolet radiation*

VDOP – *Vertical Dilution of Precision*

VTEC – *Vertical Total Electron Content*

WGS-84 – *World Geodetic System 1984*

POPIS OZNAKA I SIMBOLA

1. UVOD

a_i ... vršne vrijednosti lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja

a_d ... vršna vrijednost središnjeg maksimuma ionosferskog kašnjenja

a_n, b_n ... koeficijenti linearnog porasta ionosferskog kašnjenja

d_{iono} ... dnevni hod ionosferskog kašnjenja

P_d ... period nastupa središnjeg maksimuma ionosferskog kašnjenja

P_i ... periodi nastupa lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja

t ... trenutak za koji se proračunava vrijednost ionosferskog kašnjenja

t_i ... vremena (faze) nastupa vršnih vrijednosti lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja

t_{d0} ... trenutak (faza) nastupa vršne vrijednosti središnjeg maksimuma ionosferskog kašnjenja

2. UČINCI IONOSFERSKIH POREMEĆAJA NA RAD I ZNAČAJKE SUSTAVA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA

Δt_i ... ionosfersko kašnjenje

B_L ... jakost uzdužne komponente magnetskog polja

B_{SW} ... jakost IMF polja

M_E ... magnetski moment Zemlje

$M_{TEC(z)}$... funkcija kartiranja

N_{SW} ... koncentracija Sunčevog vjetra

N_e ... gustoća ionosferskih elektrona

P_m ... jačina unosa energije u magnetosferu

a^+ ... pozitivni ion

b_u ... pogreška korisničkog sata [s]

e^- ... slobodni elektron

f_H ... žirofrekvencija elektrona

f_N ... frekvencija plazme

m_e ... masa elektrona

q_{m0} ... stopa stvaranja iona i elektrona pri $\chi = 0^0$

t_{s_i} ... trenutak odašiljanja signala

t_r ... trenutak prijama signala,

t_u ...pogreška korisničkog sata

v_{SW} ... brzina Sunčevog vjetra

$x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i}$... koordinate i-tog satelita u trenutku odašiljanja signala

x_u, y_u, z_u... koordinate korisnika u trenutku prijama signala

$\boldsymbol{v_c}$ ... sudarna frekvencija

α_L ... kvadratni koeficijent gubitka

β_L ... linearni koeficijent gubitka

θ_{SW} ... kut između IMF i sjevernog smjera geomagnetskog polja

θ_i ... kut zrake signala u zrakopraznom prostoru

θ_m ... kut upada zrake radiovala u odnosu na zemaljsko magnetsko polje

θ_r ... kut zrake u mediju

μ_0 ... permeabilnost zrakopraznog prostora

ρ_i ... izmjerena pseudoudaljenost s i-tog satelita

σ_R ... korisnička razdioba pogrešaka

σ_T ... ukupna pogreška položaja

χ_s ... zenitni kut smjera signala na referentnoj ionosferskoj visini (u ionosferskoj točki)

ω_p ... kritična frekvencija ionosferske plazme

ϵ_{ρ_i} ... ukupna pogreška u proračunu udaljenosti uslijed ostalih utjecajnih parametara [m]

ϵ_0 ... dielektrička konstanta

Δt_P ... kašnjenje valne grupe (koda) signala

Δt_r ... vremenski ekvivalent stvarnoj udaljenosti između prijamnika i satelita

Δt_Φ ... napredovanje vala nosioca satelitskog signala

Δt_ρ ... izmjereno vrijeme propagacije satelitskog signala

Δf ... dodatna vrijednost u Dopplerovom pomaku

Δt ... vrijeme propagacije satelitskog signala između prijamne i satelitske antene

$\Delta\rho$ ... ekvivalentno ionosfersko kašnjenje izmjerene pseudoudaljenosti

$\nabla(Nv)$ ... gubitak elektrona uslijed prijenosa

h ... Plankova konstanta (pri fotoionizaciji)

h ... visina

$N(h)$ ... gustoća slobodnih elektrona na visini h iznad površine Zemlje

Ca ... kalcij

D ... koeficijent difuzije

Fe ... željezo

$GDOP$ ... geometrijska razdioba točnosti

I ... intenzitet ionizirajućeg zračenja

L ... stopa gubitka elektrona uslijed procesa rekombinacije

Mg ... magnezij

N ... dušik (I.)

N ... gustoća slobodnih elektrona (II.)

O ... kisik

$STEC$ ... TEC vrijednost pri $\chi \neq 0^0$

T ... temperatura

TEC ... ukupni sadržaj ionosferskih elektrona

$VTEC$ ... vertikalna TEC vrijednost

a ... neutralni atom

c ... brzina širenja elektromagnetskih valova u zrakopraznom prostoru

e ... naboj elektrona

f ... frekvencija signala za satelitsko određivanje položaja

k ... Boltzmannova konstanta

l ... najkraća geometrijska udaljenost

m ... masa čestice

n ... indeks loma

n ... koncentracija atoma ili molekula podložnih I zračenju (pri Chapmanovoj funkciji ionizacije)

q ... stopa stvaranje elektrona

r ... geometrijska (stvarna) udaljenost između prijamne i satelitske antene

s ... put signala između korisnika i satelita

v ... brzina širenja elektromagnetskih valova u mediju (pri indeksu loma)

v ...sudarna učestalost elektrona i neutralnih čestica

w ... brzina vertikalnog gibanja

z ... reducirana visina neutralnog plina

$\boldsymbol{B}$ ... jakost magnetskog polja

$\boldsymbol{v}$ ... brzina polja

$\boldsymbol{v}$ ... brzina pomaka plazme

Ω ... Faradayeva rotacija

δt_D ... ukupna pogreška mjerenja vremena uslijed ostalih utjecajnih parametara

δt_D ...ukupno vremensko odstupanje uslijed ostalih pogrešaka pri mjerenju vremena širenja satelitskog signala

δt_H ... kašnjenje nastalo unutar sklopovske opreme

δt_I ... vremenski ekvivalent ionosferskog kašnjenja

δt_M ... kašnjenje uzrokovano višestrukim putovima

δt_N ... kašnjenje uzrokovano šumom prijamnika

δt_T ... vremenski ekvivalent troposferskog kašnjenja

δt ... odstupanje satelitskog sata

η ... ionizacijska učinkovitost

λ ... duljina upadnog elektromagnetskog vala

ρ ... izmjerena udaljenost (pseudoudaljenost) između korisničke i satelitske antene

σ ... apsorpcijski presjek

χ ... zenitni kut Sunca

ω ... kutna valna frekvencija

3. DOSADAŠNJA POSTIGNUĆA U ISTRAŽIVANJU I MODELIRANJU DINAMIKE IONOSFERSKOG KAŠNJENJA

R ... broj Sunčevih pjega

g ... broj skupina Sunčevih pjega

s ... broj pojedinačnih pjega

k ... korekcijski koeficijent ovisan o opservatoriju

H ... vodoravna komponenta geomagnetskog polja

D ... deklinacija

I ... inklinacija (pri geomagnetskom polju)

B_x, B_y, B_z... komponente jakosti geomagnetskog polja

Kp ... pokazatelj promjene vodoravne komponente geomagnetskog polja

Dst ... pokazatelj stanja uzbude magnetosfere

AE ... pokazatelj aktivnosti auroralnog mlaza

Q ... pokazatelj geomagnetske aktivnosti visokih širina

Ap ... linearni ekvivalent Kp pokazatelja

aa ... pokazatelj globalne geomagnetske aktivnosti

$f0F2$ ... kritična frekvencija F2 sloja

$f0F1$ ... kritična frekvencija F1 sloja

$f0E$ ... kritična frekvencija E sloja

$f0E_S$ ... kritična frekvencija E_S sloja

h_mF2 ... visina vršne vrijednosti F2 sloja

h_mF1 ... visina vršne vrijednosti F1 sloja

h_mE ... visina vršne vrijednosti E sloja

y_mF2 ... polovica ukupne visine F2 sloja

M(3000)F2... propagacijski faktor

Φ_c, P_c ... linearne kombinacije faznih i kodnih pseudoudaljenosti

$f_{1,2}$ ... L1 i L2 GPS frekvencije

Φ_1 ... pseudoudaljenost dobivena mjerenjem faza GPS L1 vala nosioca

Φ_2 ... pseudoudaljenost dobivena mjerenjem faza GPS L2 vala nosioca

P_1 ... pseudoudaljenost dobivena pomoću GPS L1 kodiranog signala

P_2 ... pseudoudaljenost dobivena pomoću GPS L2 kodiranog signala

$\Delta\rho_R^i$ ... razlika između stvarne udaljenosti i izmjerene pseudoudaljenosti između referentnog prijamnika i *i*-tog satelita

r_R^i ... stvarna (geometrijska) udaljenost između referentnog prijamnika i *i*-tog satelita

ρ_R^i ... izmjerena pseudoudaljenost između referentnog prijamnika i *i*-tog satelita

$\Delta\rho_R^i(t)$ ... ispravak pseudoudaljenosti

$\Delta\dot{\rho}_R^i(t_R)$... stopa ispravke pseudoudaljenosti

$\rho_{UC}^i(t)$ ...izmjerena pseudoudaljenost korisničkog prijamnika ispravljena diferencijskim prijamnikom

p ... udaljenost između referentne i korisničke stanice [m]

d_R ... udaljenost između referentnog prijamnika i satelita

χ_R' ... zenitni kut satelita u ionosferskoj točki referentne stanice

ρ ... ne-disperzivna veličina geometrijske kombinacije

λ_1, λ_2 ... valne duljine vala nosioca na GPS L1 i L2 frekvencijama

n_1, n_2 ... broj diskontinuiteta valova nosioca na GPS L1 i L2 frekvencijama

τ, ε ... disperzivne komponente instrumentalnog kašnjenja

I ... vrijednost ionosferskog kašnjenja u kodnim i faznim mjerenjima pseudoudaljenosti

P_I ... ionosferska kombinacija razlike kodnih merenja

Φ_I ... ionosferska kombinacija razlike faznih merenja

TEC_P ... proračunata TEC vrijednost na temelju kodnih razlika pseudoudaljenosti

TEC_ϕ ... proračunata TEC vrijednost na temelju faznih razlika pseudoudaljenosti

k ... oznaka za epohu

s ... oznaka za satelit

P_{II} ... polinom drugog reda

N_I ... broj uzoraka

$\hat{P}$ ... *izglađeno* kodno mjerenje

B_{rs} ... ujednačivač odstupanja

σ_i ... procijenjena standardna pogreška šuma

i ...trenuci opažanja (pri B_{rs})

R ... radijus Zemlje

H ... visina ionosferskog SLM sloja

E ... kut elevacije satelita

$\Omega(\varphi, \lambda, t)$... funkcija numeričke mape

φ ... geografska širina

λ ... geografska dužina

t ... vrijeme

H ... broj harmonika korištenih za prikaz dnevnih varijacija

T ... satni kut u rasponu od -180^0 do 180^0

$G_k(\varphi, \lambda)$... funkcija geografskih koordinata

I_f ... ispravka ionosferskog kašnjenja prema NeQuick modelu

Az … pokazatelj efektivne razine ionizacije

μ … modificirana dipolarna širina

a_0, a_1, a_2… koeficijenti NeQuick modela ispravke

t_{iV} ... vertikalno ionosfersko kašnjenje

t_n ... noćna vrijednost ionosferskog kašnjenja

A ... vršna vrijednost ionosferskog kašnjenja (amplituda)

P ... period kosinusne komponente

t ... epoha (trenutak) za koji se računa ionosfersko kašnjenje (prema Klobucharovom modelu)

t_0 ... trenutak pojave vršne vrijednosti ionosferskog kašnjenja

α_n, β_n ... koeficijenti Klobucharovog modela

4. METODOLOGIJA RADA

a ... koeficijent smjera

b ... koeficijent sjecišta *y*-osi

A_i ... parametar vršne vrijednosti *i*-tog lokalnog maksimuma

x_i ... parametar trenutka nastupa vršne vrijednosti *i*-tog lokalnog maksimuma

P_i ... parametar vremena trajanja *i*-tog lokalnog maksimuma

h ... nadmorska visina

Δ_{M} ... razlika u odnosu na prošlo mjerenje

5. MODEL NESPECIFIČNOGA DNEVNOG HODA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA SIGNALA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA

t_D ... ionosfersko kašnjenje

f_0 ... noćna komponenta

f_1 ... komponenta središnjeg lokalnog maksimuma

f_2 ... komponenta jutarnjeg lokalnog maksmuma

f_3 ... komponenta popodnevnog lokalnog maksimuma

f_4 ... večernja komponenta

t ... trenutak za koji se proračunava ionosfersko kašnjenje

$a_{M,E}, b_{M,E}$... koeficijenti linearnog porasta, odnosno pada vrijednosti ionosferskog kašnjenja

$k_{1,2,3}$ ...koeficijenti optimizacije vrijednosti lokalnih maksimuma

$A_{1,2,3}$ ... vršne vrijednosti lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja

$t_{1,2,3}$ ... trenuci nastupa (faze) vršnih vrijednosti lokalnih maksimuma

$P_{1,2,3}$ ... periode lokalnih maksimuma ionosferskog kašnjenja

$B_{1,2,3}$ ... parametri perioda lokalnih maksimuma

$K_{1,2,3}$ ...vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom lokalnih maksimuma modelirane prema Klobucharovom modelu ispravke

6. VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG MODELA

P_A ... apsolutna pogreška

P_R ... relativna pogreška

x_m ... modelirane vrijednosti ionosferskog kašnjenja

x_p ... prave vrijednosti ionosferskog kašnjenja

POPIS SLIKA

Broj	Naziv slike	Stranica
2.1	Segmenti GPS sustava	6
2.2	GPS satelitska konstelacija promatrana s ekvatorijalne ravnine i raspored nazivne GPS konstelacije u ravninskoj projekciji	7
2.3	Mjerenje i ispravke vremena širenja satelitskog signala unutar prijamnika	8
2.4	Osnovni koncept satelitskog određivanja položaja	10
2.5	Prikaz stvarne udaljenosti i proračunate pseudoudaljenosti između prijamne i satelitske antene te područja neodređenosti proračunatog položaja	11
2.6	Odnos stvarne udaljenosti i izmjerene pseudoudaljenosti između korisničke i satelitske antene na temelju izmjerenog vremena propagacije satelitskog signala.	11
2.7	Struktura i modulacija L1 C/A satelitskog signala za određivanje položaja	13
2.8	Raspršeni spektar GPS signala na L1 prijenosnoj frekvenciji	13
2.9	Postupak korelacije primljenog (satelitskog) i generiranog (replike) PRN koda, i mjerenje faze/pomaka kodnog zapisa	15
2.10	Postupak procjene položaja satelitskim navigacijskim sustavima	16
2.11	Kompozicija proračunate pseudoudaljenosti između satelitske i korisničke antene	18
2.12	Utjecaj povoljne i nepovoljne prostorne razdiobe satelita na područje neodređenosti položaja korisnika	19
2.13	Pojednostavljeni prikaz pojava svemirskog vremena	22
2.14	Prikaz ionosferskih slojeva u odnosu na međusobni položaj Sunca i Zemlje	23
2.15	Tipični vertikalni profil gustoće elektrona u ionosferi srednjih širina za vrijeme niske i visoke Sunčeve aktivnosti	24
2.16	Shematski dijagram značajki širenja gravitacijskih valova	28
2.17	Vertikalni temperaturni profil Zemljinih slojeva neutralne atmosfere, uz prikaz donjih ionosferskih slojeva	29
2.18	Ovisnost ukupnog sadržaja elektrona o međusobnom položaju satelitske i korisničke antene – putu signala za satelitsko određivanje položaja	31
2.19	Interakcija međuplanetarnog i geomagnetskog polja kada ona pokazuju isti i suprotni smjer	33
2.20	Superponirani dijagram promjena u kritičnoj frekvenciji sloja f0F2 u razdobljima ionosferskih oluja	34
2.21	Prikaz ionosferskog kašnjenja naspram operativnih frekvencija tehnoloških sustava za vrijednosti ukupnog sadržaja elektrona od 10^{16} – 10^{19} e/m^2	35
2.22	Propagacija zrake signala kroz atmosferske medije različitih indeksa loma	37
3.1	Komponente geomagnetskog polja	43
3.2	Dijagram ionosferskog profila gustoće elektrona s prikazom karakterističnih ionosferskih pokazatelja	45
3.3	Konstrukcija Bentovog modela gustoće elektrona	49
3.4	Postupak procjene ukupnog sadržaja elektrona dvofrekvencijskim GPS	51

	prijamnicima	
3.5	Pojednostavljeni prikaz metode određivanja ukupnog sadržaja elektrona na temelju GPS dvofrekvencijskih mjerenja i pripadajuće korištene veličine	52
3.6	Značajke GPS kodnih i faznih dvofrekvencijskih mjerenja	53
3.7	Prikaz razlika kodne (PI) i fazne (LI) pseudoudaljenosti tijekom dnevnog prolaska PRN 2 i PRN 17 GPS satelita iznad IGS stanice Medicina	54
3.8	Šum kodne pseudoudaljenosti prikazan na primjeru dnevnog prolaska (lukova podataka) satelita iznad korisnika	56
3.9	Snimka zaslona tijekom postupka proračuna vertikalnog ionosferskog profila NeQuick modelom ispravke ionosferskog kašnjenja	59
3.10	GPS (Klobucharov) ionosferski korekcijski model	60
3.11	Nespecifični dnevni hod ionosferskog kašnjenja GPS signala za satelitsko određivanje položaja	62
4.1	Geografski prikaz područja istraživanja	65
4.2	Vremenski nizovi pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti tijekom 16. 6. – 4. 7. 2006. godine	65
4.3	Dijagram obrade RINEX podataka	67
4.4	PI ionosferska kombinacija tijekom jednog dana kod prolazaka svih satelita, odnosno kod prolaska satelita PRN 13	68
4.5	Dnevni hod ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja	69
4.6	Geografski prikaz mjernih stanica pomoću kojih su dobivene vrijednosti lokalnih pokazatelja stanja svemirskog vremena	70
4.7	Vremenski nizovi sjeverne (*Bx*), istočne (*By*) i vertikalne (*Bz*) komponente jakosti geomagnetskog polja u danima 167 – 185. 2006. godine	72
4.8	Prikaz srednjih vrijednosti lokalne dnevne ionosferske dinamike izražen u vremenskim koracima od 30 minuta	74
5.1	Primjer dnevnog hoda kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva (*f0F2* sloja) i ukupnog sadržaja elektrona	78
5.2	Kruženje poremećaja u ionosferskom F području	79
5.3	Korelacijska matrica pokazatelja svemirskog vremena (lijevo) i hijerarhijski prikaz (dendrogram) podskupova (desno)	80
5.4	Opći model stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom	81
5.5	Opažene naspram prognoziranih vrijednosti slobodnog sadržaja elektrona izražene u (*TECU*/10) – opći prognostički model	83
5.6	Korelacijska matrica pokazatelja svemirskog vremena za razdoblje 16. 6. – 4. 7. 2006 godine	84
5.7	Primijenjeni model stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom	85
5.8	Opažene naspram prognoziranih vrijednosti slobodnog sadržaja elektrona izražene u (*TECU*/100) – primijenjeni prognostički model	86
5.9	Konstrukcija i razrada predloženog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja	89
6.1	Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te prema predloženome modelu na stanici Medicina (Italija) za dan 168 u 2006. godini	92

6.2	Apsolutno i relativno odstupanje predoženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 168. dana u 2006. godini – stanica Medicina (Italija)	93
6.3	Histogram odstupanja modeliranih od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja na dan 168 na stanici Medicina (Italija)	94
6.4	Dijagram apsolutnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Medicina (Italija)	94
6.5	Dijagram relativnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Medicina (Italija)	95
6.6	Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te prema predloženome modelu na stanici Bolzano (Italija) za dan 171 u 2006. godini	96
6.7	Apsolutno i relativno odstupanje predoženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 171. dana u 2006. godini – stanica Bolzano (Italija)	96
6.8	Histogram odstupanja modeliranih od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja na dan 171 na stanici Bolzano (Italija)	97
6.9	Dijagram apsolutnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Bolzano (Italija)	97
6.10	Dijagram relativnih dnevnih pogrešaka tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini) za stanicu Bolzano (Italija)	98
6.11	Dnevne srednje vrijednosti relativne pogreške Klobucharovog i predloženog modela tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini)	99
6.12	Dnevne srednje vrijednosti apsolutne pogreške Klobucharovog i predloženog modela tijekom promatranog razdoblja (dani 167 – 185 u 2006. godini)	100
6.13	Stvarno i modelirano ionosfersko kašnjenje 13. dana promatranog razdoblja (dan 179. u 2006. godini) na stanici Bolzano (Italija)	100
6.14	Odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja – 12. (lijevo), 13. (sredina) i 14. (desno) dan promatranog razdoblja	100
6.15	Relativne vrijednosti pokazatelja Sunčeve i geomagnetske aktivnosti tijekom 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja	101
6.16	Opažene promjene u relativnim vrijednostima pokazatelja svemirskog vremena 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja	101
6.17	Pokazatelji ionosferske aktivnosti tijekom 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja	102
6.18	Promjene u vrijednostima kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva tijekom 12., 13. i 14. dana promatranog razdoblja	102
6.19	Vremenski nizovi pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti tijekom 16.6. – 4.7.2007. godine	103
6.20	Vremenski nizovi sjeverne (*Bx*), istočne (*By*) i vertikalne (*Bz*) komponente jakosti geomagnetskog polja u danima 167 – 185 u 2007. godini	104
6.21	Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te prema predloženome modelu na stanici Matera (Italija) za dan 170 u 2007. godini	104

6.22	Apsolutno i relativno odstupanje predoženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 170. dana u 2006. godini – stanica Matera (Italija)	105
6.23	Histogram odstupanja modeliranih od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja na dan 170 na stanici Matera (Italija)	105
6.24	Dijagram apsolutnih pogrešaka kroz 24 sata tijekom promatranog razdoblja za stanicu Matera (Italija)	106
6.25	Dijagram relativnih pogrešaka kroz 24 sata tijekom promatranog razdoblja za stanicu Matera (Italija)	106
6.26	Dnevne srednje vrijednosti apsolutne (lijevo) i relativne (desno) pogreške Klobucharovog i predloženog modela tijekom promatranog razdoblja na stanici Matera (Italija)	107
6.27	Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dan 168 u 2006. godini s vremenskom razlučivošću od 2 sata	108
6.28	Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2006. godini	109
6.29	Prikaz odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti za dane 167 – 185 u 2006. godini uz naznačenu srednju vrijednost odstupanja	109
6.30	Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dan 183 u 2007. godini s vremenskom razlučivošću od 2 sata	110
6.31	Prikaz modeliranih i GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2007. godini	110
6.32	Prikaz odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti za dane 167 – 185 u 2007. godini uz naznačenu srednju vrijednosti odstupanja	111
7.1	Grafički prikaz srednjih odstupanja Klobucharovog i predloženog modela ispravke ionosferskog kašnjenja	114
7.2	Uspješnost opisa lokalne ionosferske dinamike Klobucharovim i predloženim modelom tijekom promatranih razdoblja 2006. i 2007. godine	115
7.3	Srednje vrijednosti apsolutnih i relativnih dnevnih pogrešaka predloženog modela u odnosu na stvarno regionalno ionosfersko kašnjenje	115
7.4	Regionalno apsolutno odstupanje (u m) predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 24 sata, prikazano s vremenskom razlučivošću skupova podataka od 10 minuta	116
7.5	Regionalno relativno odstupanje (u %) predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja tijekom 24 sata, prikazano s vremenskom razlučivošću skupova podataka od 10 minuta	117
7.6	Shema prognostičkog modela	122

POPIS TABLICA

Broj	Naziv tablice	Stranica
2.1	Struktura GPS satelitskih signala	14
2.2	Značajke GPS L5 civilnog signala	15
2.3	Ukupni proračun pogreške satelitskog određivanja položaja	20
2.4	Procjenjena gustoća slobodnih elektrona unutar ionosferskih slojeva	26
2.5	Utjecaj ukupnog sadržaja elektrona na značajke širenja GPS L1 signala za satelitsko određivanje položaja	34
3.1	Osnovni pokazatelji geomagnetske aktivnosti	44
3.2	Raspon opaženih vrijednosti [MHz] kritičnih frekvencija ionosferskih slojeva tijekom promatranih razdoblja	45
3.3	Vrijednosti pokazatelja Sunčeve, geomagnetske i ionosferske aktivnosti kojima su definirani mirni uvjeti svemirskog vremena	46
3.4	Parametri nespecifičnih maksimuma u dnevnoj dinamici ionosferskog kašnjenja GPS signala za satelitsko određivanje položaja	63
4.1	Opći podaci o korištenim IGS GNSS mjernim stanicama prilikom identifikacije lokalne ionosferske dinamike	64
4.2	Opći podaci o korištenim pokazateljima stanja svemirskog vremena i pripadajućim mjernim stanicama uz učestalost opažanja	70
4.3	Kriteriji mirnog svemirskog vremena i nepobuđene ionosfere	71
4.4	Statistički opis promatranih pokazatelja	71
4.5	Statistički pokazatelji srednjih vrijednosti ionosferskog kašnjenja (m)	75
5.1	Prepoznate (mjerljive) korelacije ukupnog sadržaja elektrona s ostalim pokazateljima svemirskog vremena	81
5.2	Značajke modela stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom	82
5.3	Stablo odlučivanja prema pravilima – opći model	82
5.4	Prepoznate (mjerljive) korelacije ukupnog sadržaja elektrona s ostalim pokazateljima svemirskog vremena za razdoblje 16. 6. – 4. 7. 2006. godine	84
5.5	Značajke modela stabla odlučivanja s ukupnim sadržajem elektrona kao izlaznom varijablom	85
5.6	Stablo odlučivanja prema pravilima – primijenjeni model	86
5.7	Koeficijenti predloženog modela	90
6.1	Opći podaci o korištenim IGS GNSS mjernim stanicama prilikom verifikacije predloženog modela	91
6.2	Statistički pokazatelji vrijednosti odstupanja modelirane ionosferske dinamike za dan 168 na IGS stanici Medicina (Italija)	93
6.3	Osnovni statistički pokazatelji [%] srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja korekcije predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za stanicu Medicina (Italija)	95
6.4	Statistički pokazatelji vrijednosti odstupanja modelirane ionosferske dinamike za dan 171. na IGS stanici Bolzano (Italija)	97
6.5	Statistički pokazatelji srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja ispravke predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja	98

	za stanicu Bolzano (Italija)	
6.6	Statistički pokazatelji vrijednosti odstupanja modelirane ionosferske dinamike za dan 170 na IGS stanici Matera (Italija)	105
6.7	Statistički pokazatelji srednjih dnevnih relativnih vrijednosti odstupanja ispravke predloženoga modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja za stanicu Matera (Italija)	107
6.8	Statistički pokazatelji odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2006. godini	109
6.9	Statistički pokazatelji odstupanja modeliranih u odnosu na GIM vrijednosti ionosferskog kašnjenja za dane 167 – 185 u 2007. godini	111
7.1	Usporedba srednjih dnevnih vrijednosti relativnih i apsolutnih odstupanja predloženog modela i modela prema Klobucharu	113
7.2	Statistički opis regionalnog ionosferskog kašnjenja (usrednjene vrijednosti stanica Medicina i Bolzano, dani 167 – 185 u 2006. godini)	114
7.3	Statistički opis ionosferskog kašnjenja opaženog na stanici Matera za dane 167 – 185 u 2007. godini	114
7.4	Apsolutno odstupanje modela prema komponentama (m)	116
7.5	Relativno odstupanje modela prema komponentama (%)	117
7.6	Minimalni zahtjevi određivanja položaja (točnosti) GNSS sustavima za pomorske korisnike	120

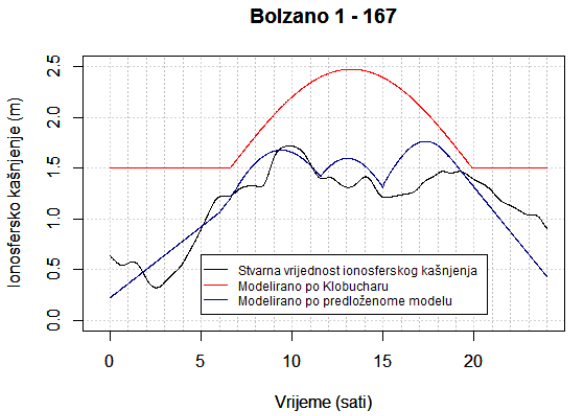
PRILOG

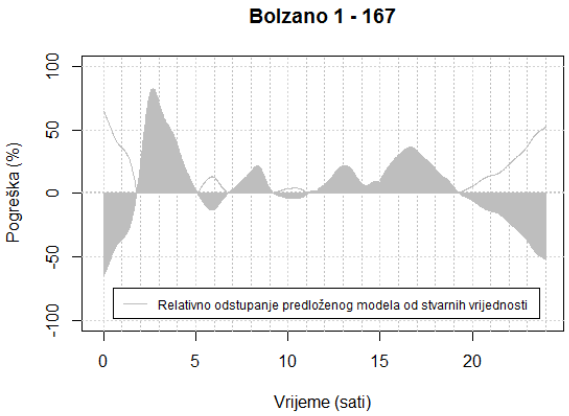
a) Verifikacija predloženog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja na temelju podataka s IGS stanica Bolzano i Medicina

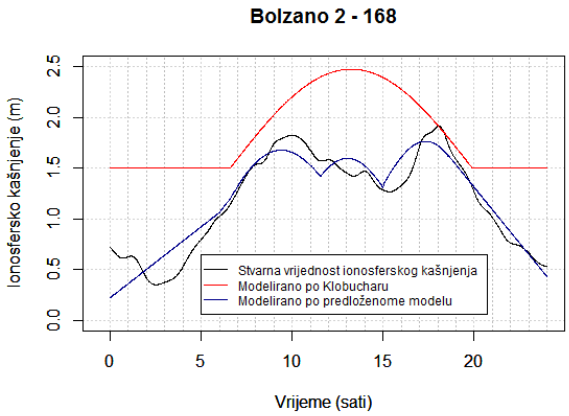
---

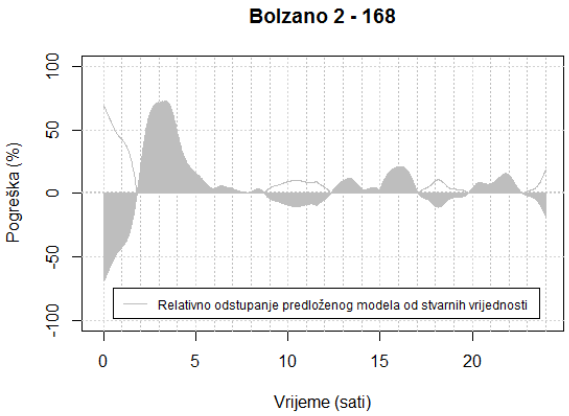
Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te ionosfersko kašnjenje modelirano prema predloženom modelu

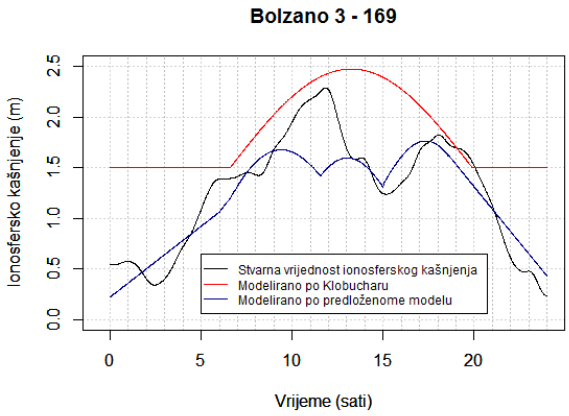
Relativna odstupanja vrijednosti ispravke predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja

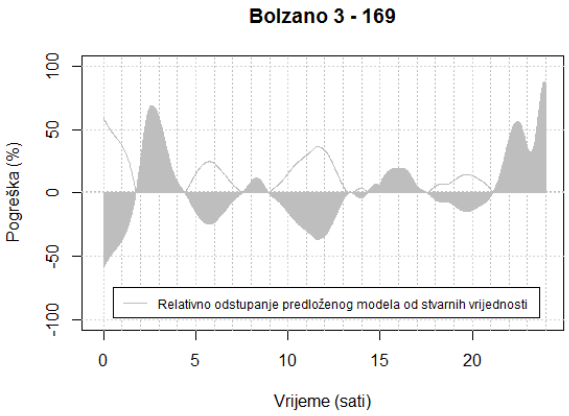


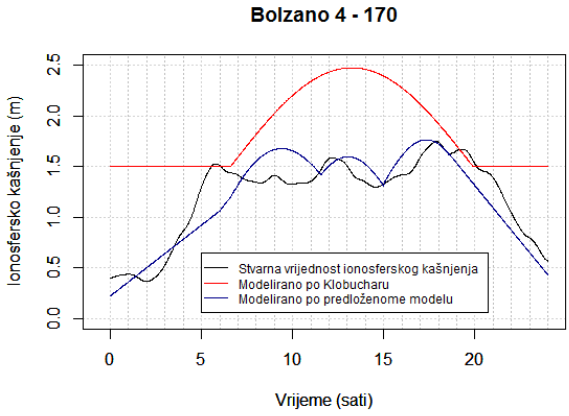


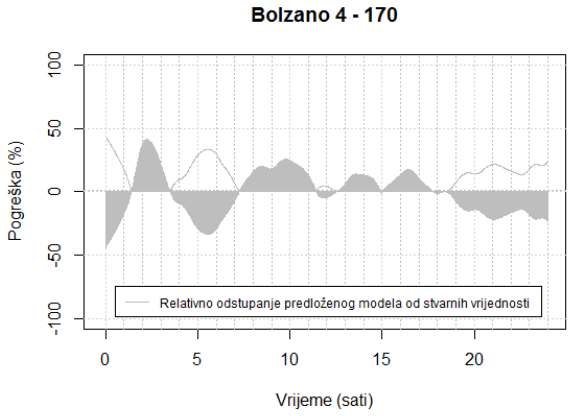


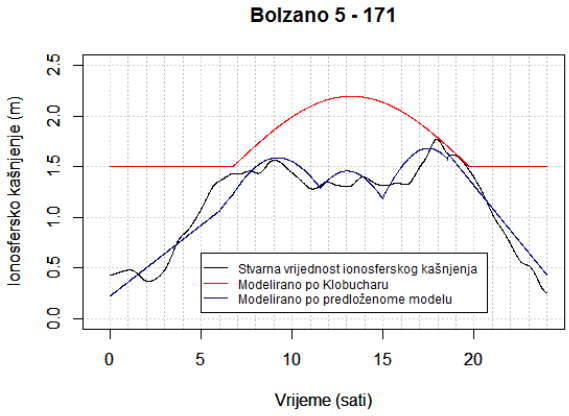


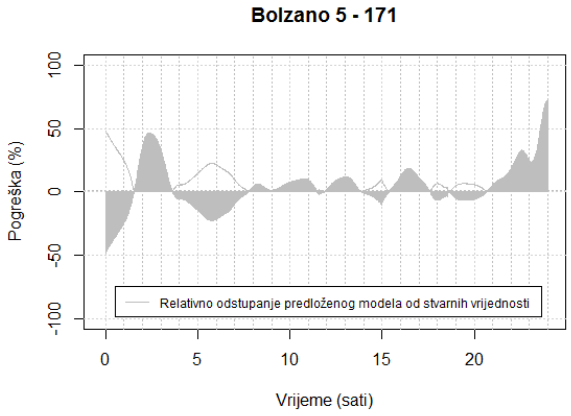


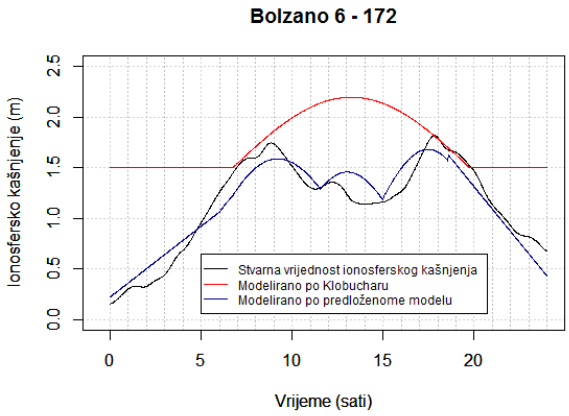


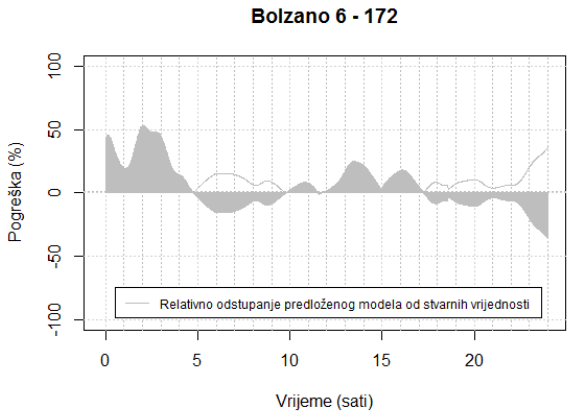

Bolzano 4 - 170
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

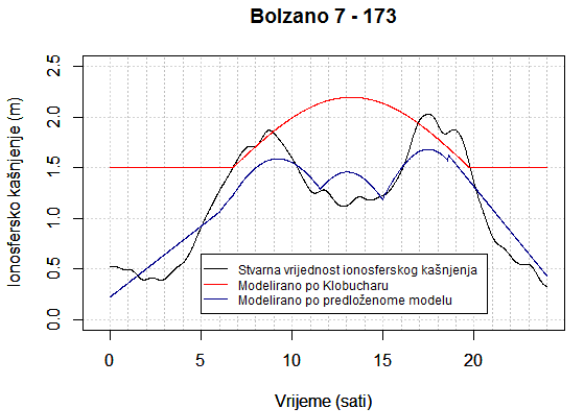

Bolzano 4 - 170
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

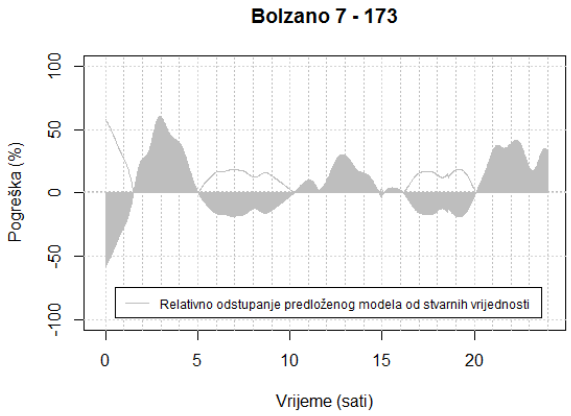

Bolzano 5 - 171
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

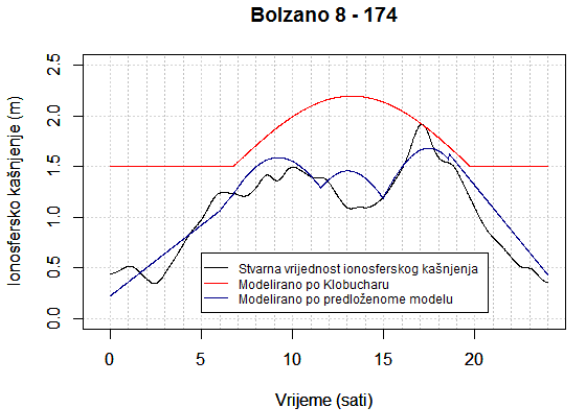

Bolzano 5 - 171
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

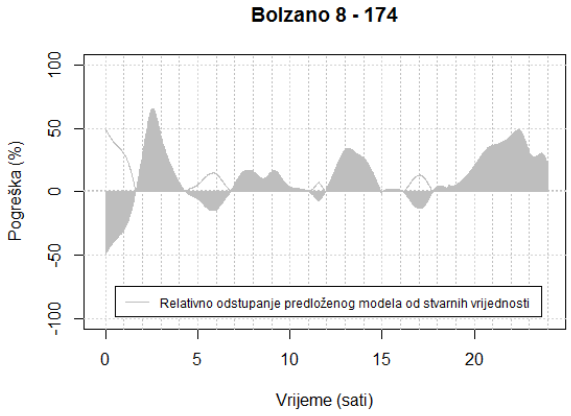

Bolzano 6 - 172
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

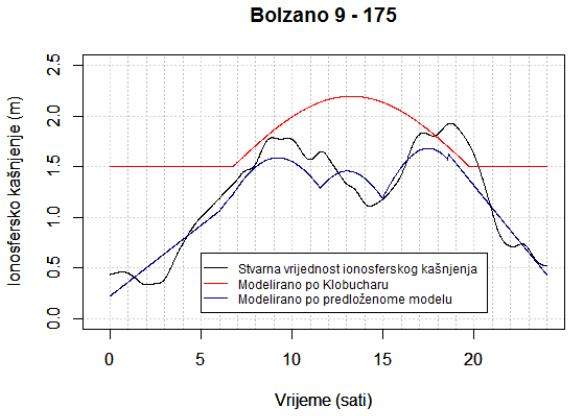

Bolzano 6 - 172
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

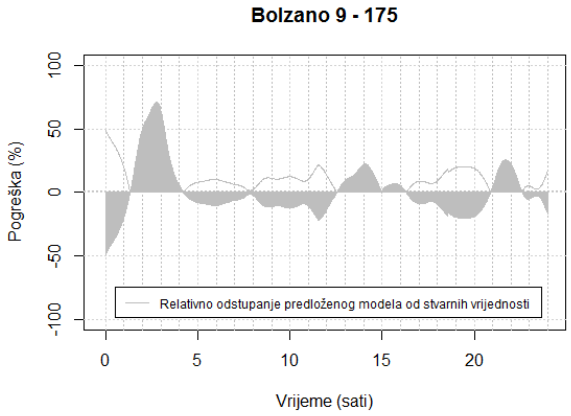

Bolzano 7 - 173
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

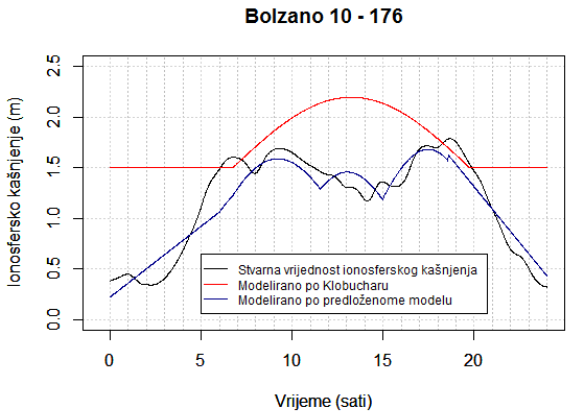

Bolzano 7 - 173
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

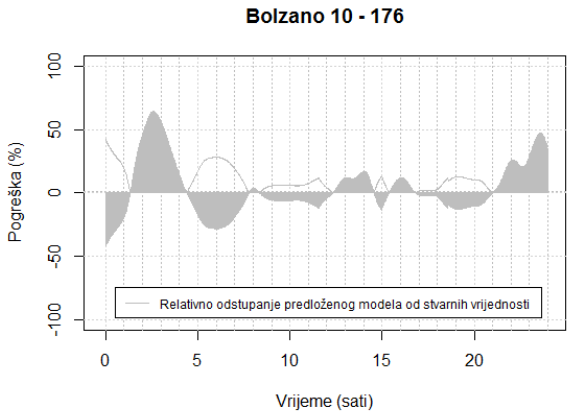

Bolzano 8 - 174
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

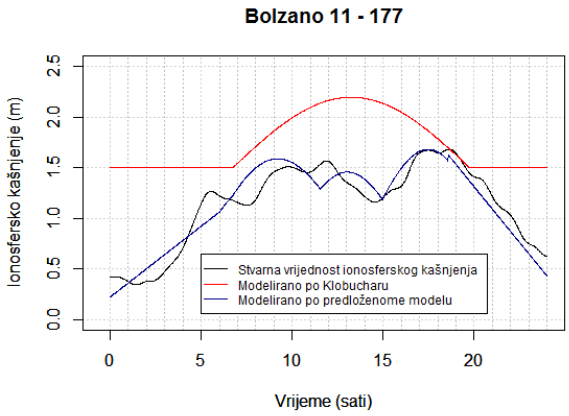

Bolzano 8 - 174
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

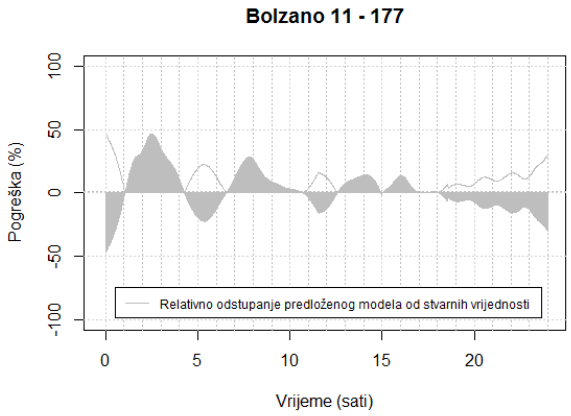

Bolzano 9 - 175
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

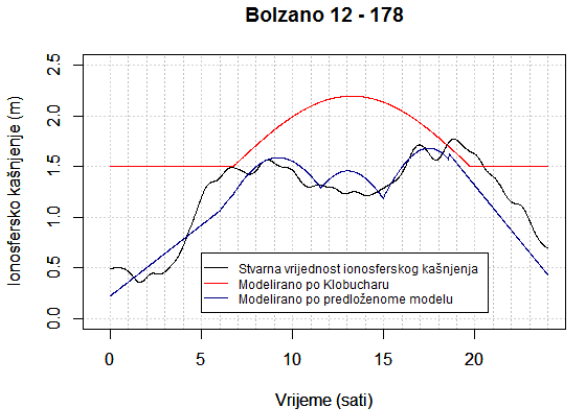

Bolzano 9 - 175
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

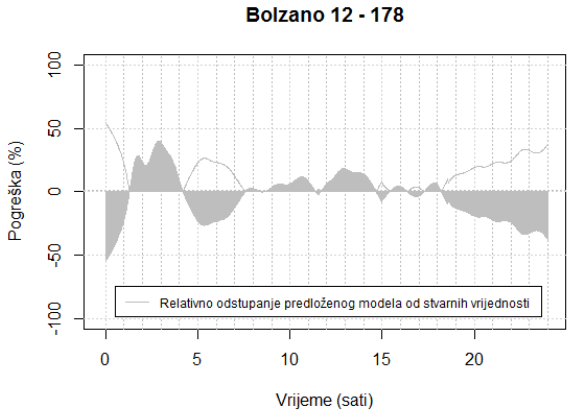

Bolzano 10 - 176
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

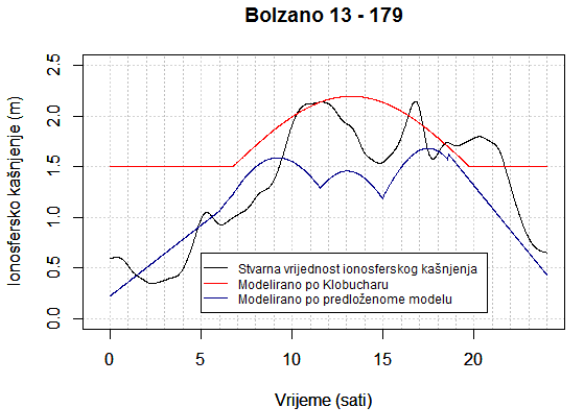

Bolzano 10 - 176
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

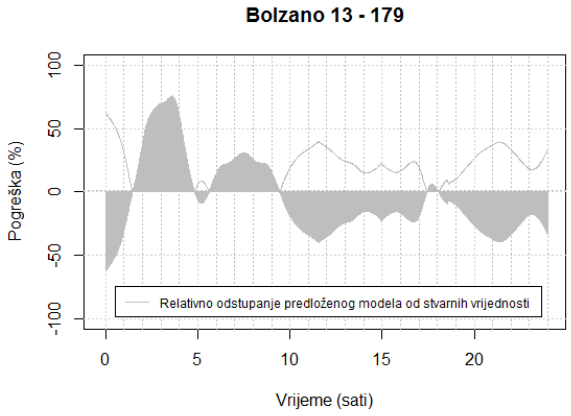

Bolzano 11 - 177
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

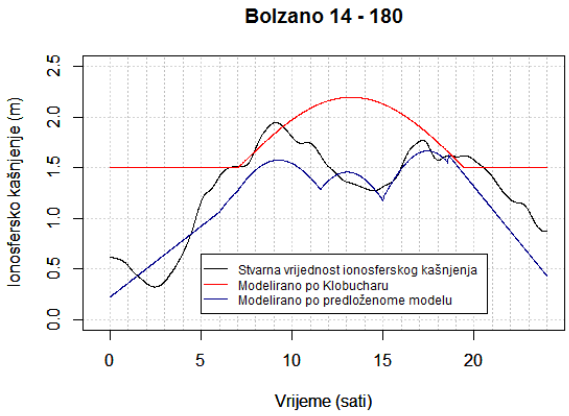

Bolzano 11 - 177
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

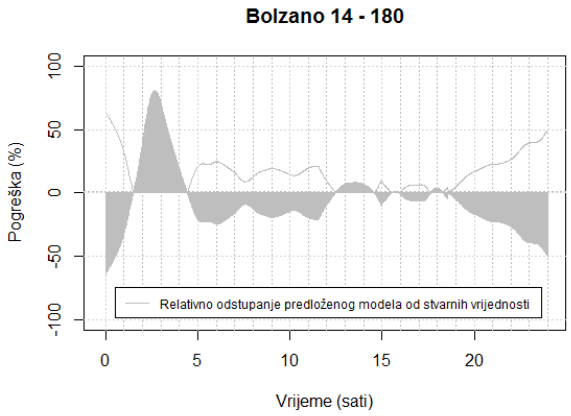

Bolzano 12 - 178
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

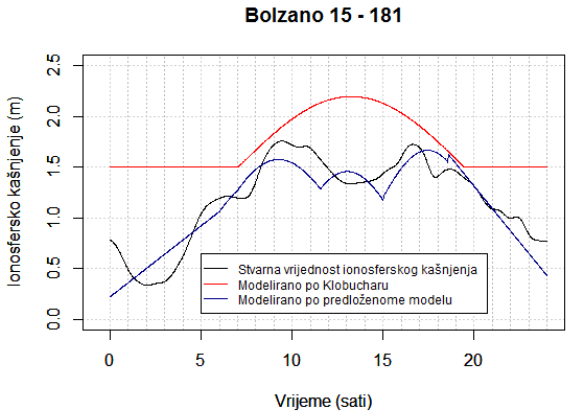

Bolzano 12 - 178
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

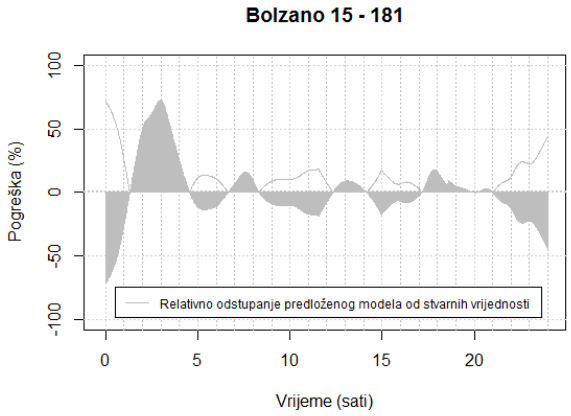

Bolzano 13 - 179
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

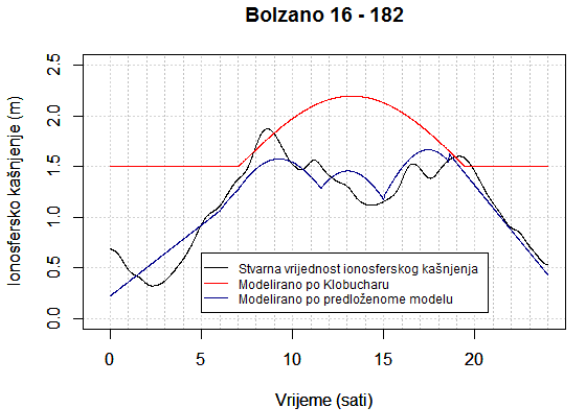

Bolzano 13 - 179
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

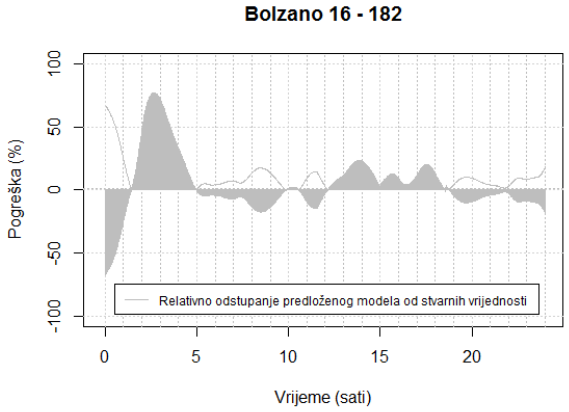

Bolzano 14 - 180
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

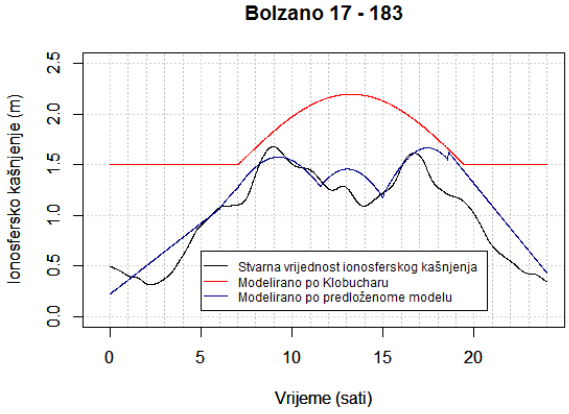

Bolzano 14 - 180
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

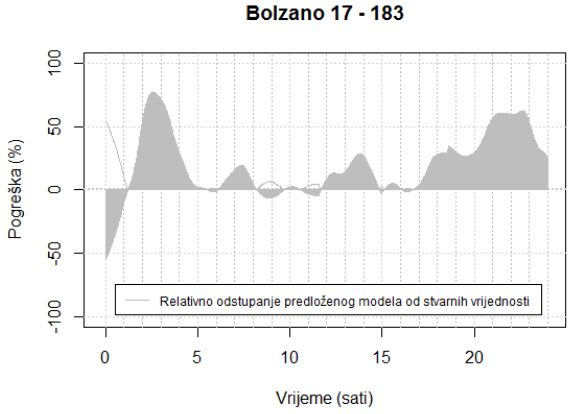

Bolzano 15 - 181
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

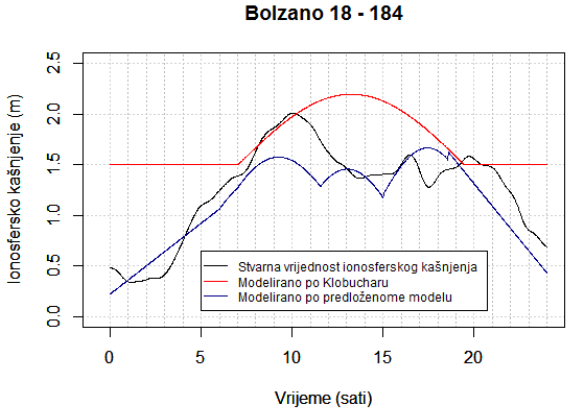

Bolzano 15 - 181
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

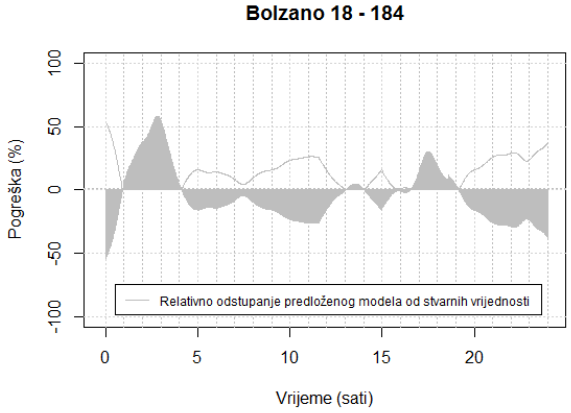

Bolzano 16 - 182
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

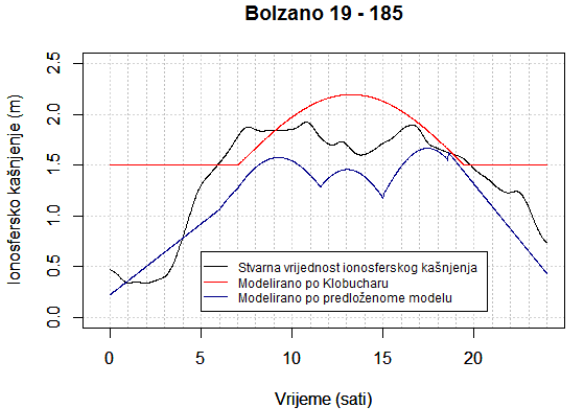

Bolzano 16 - 182
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

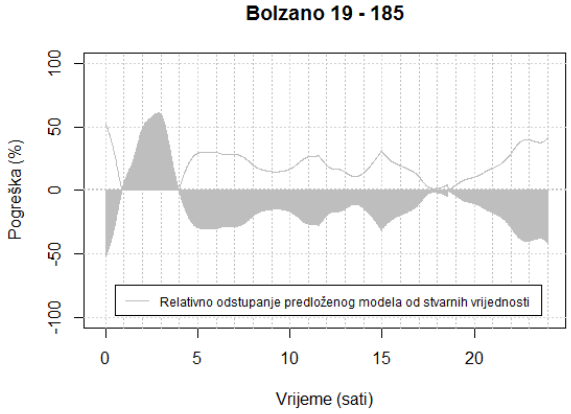

Bolzano 17 - 183
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

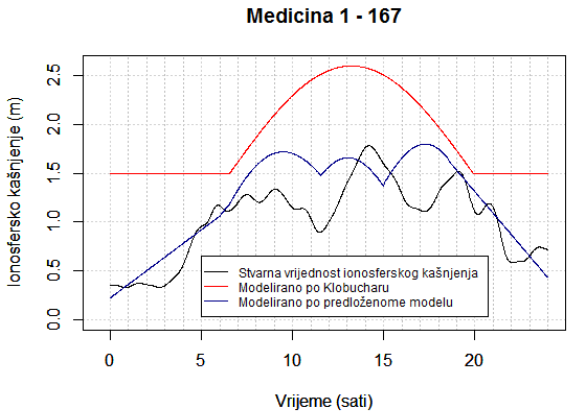

Bolzano 17 - 183
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

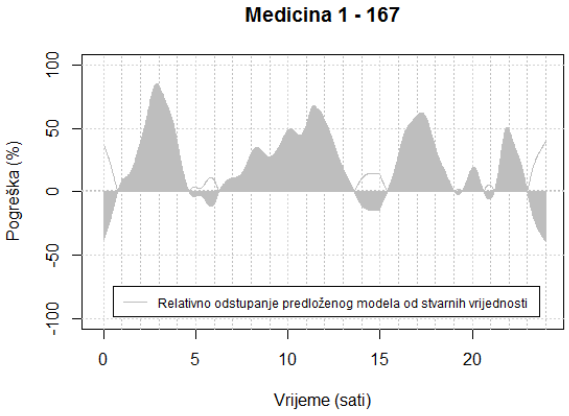

Bolzano 18 - 184
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

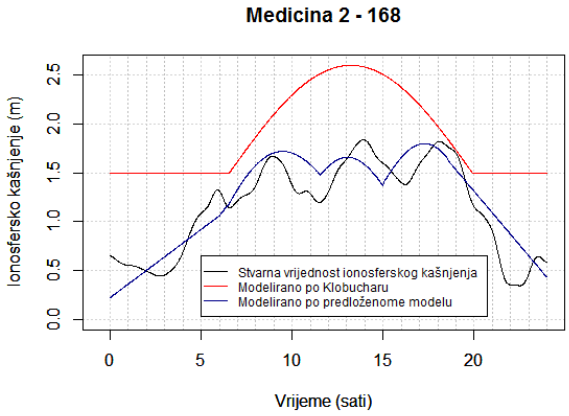

Bolzano 18 - 184
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

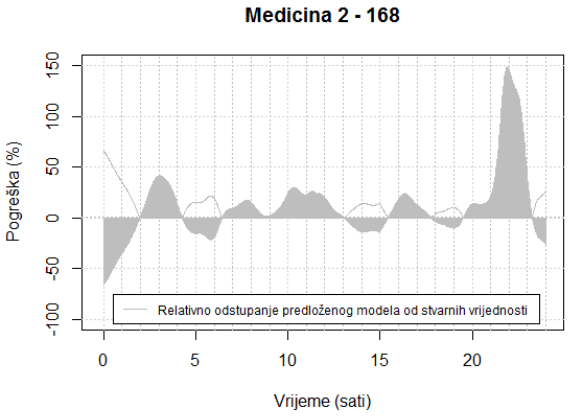

Bolzano 19 - 185
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

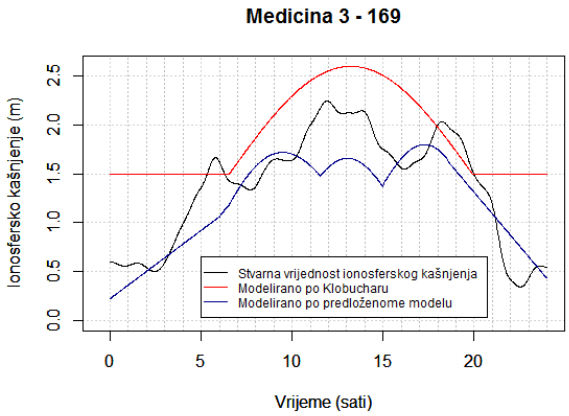

Bolzano 19 - 185
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

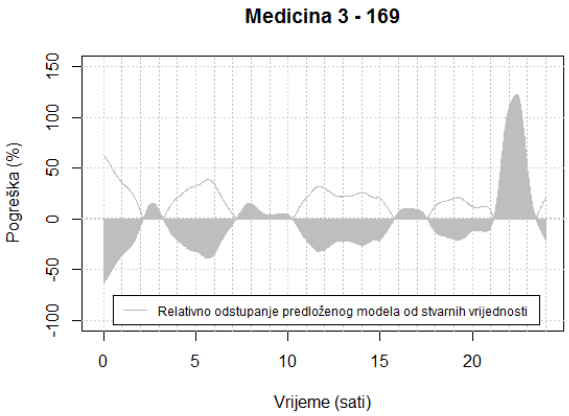

Medicina 1 - 167
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

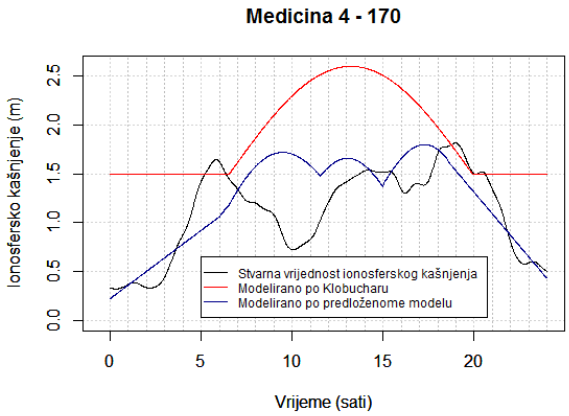

Medicina 1 - 167
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

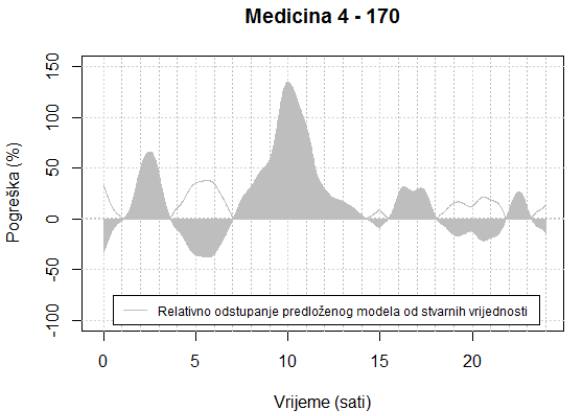

Medicina 2 - 168
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

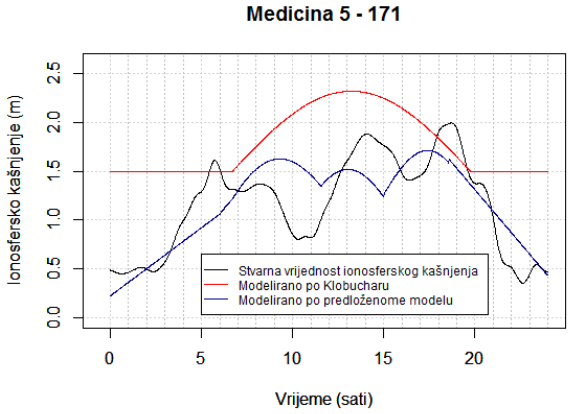

Medicina 2 - 168
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
150
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

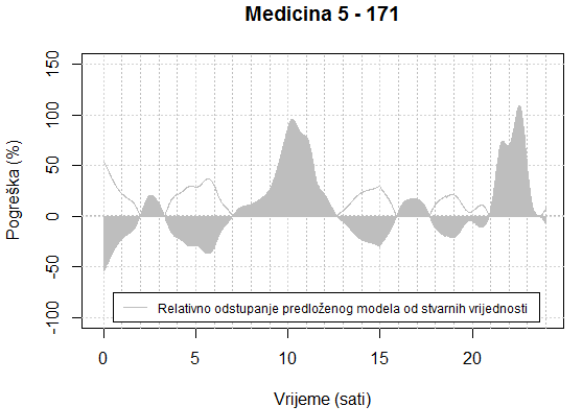

Medicina 3 - 169
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

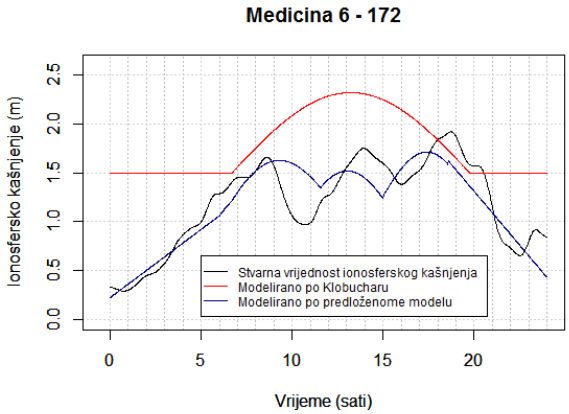

Medicina 3 - 169
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
150
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

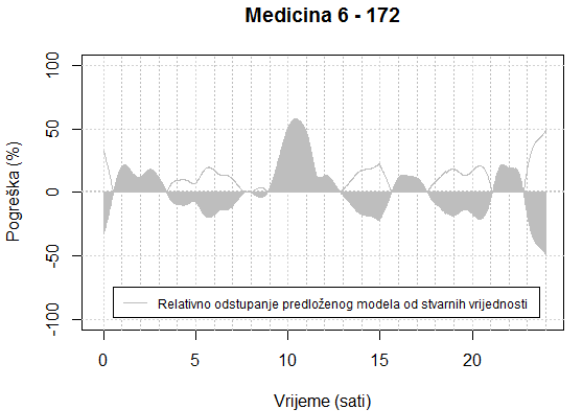

Medicina 4 - 170
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

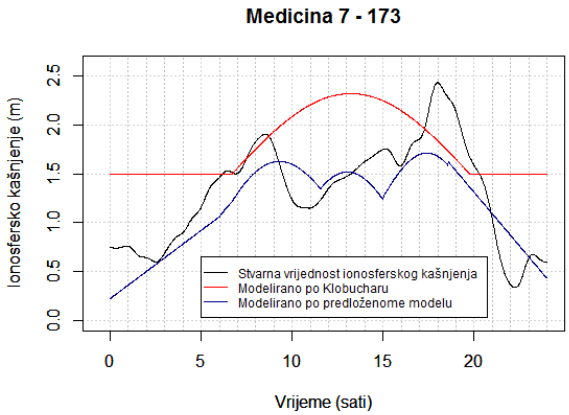

Medicina 4 - 170
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
150
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

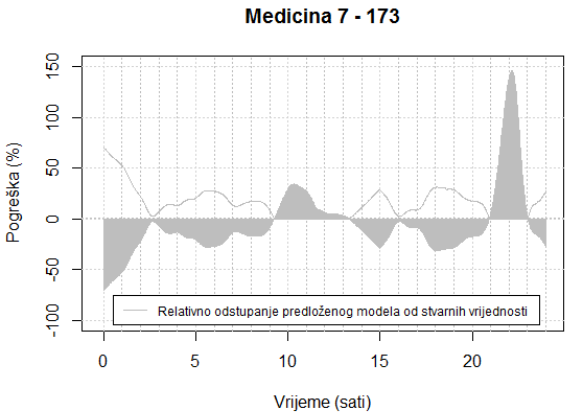

Medicina 5 - 171
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

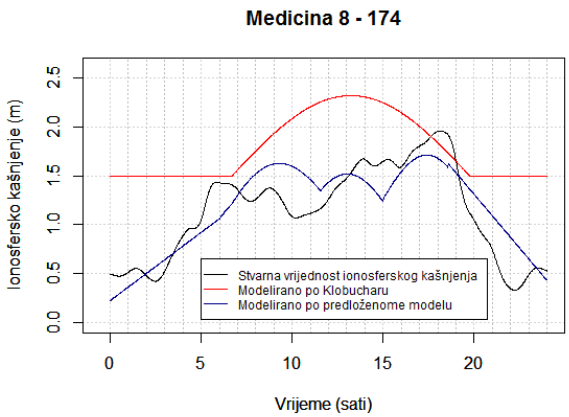

Medicina 5 - 171
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
150
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

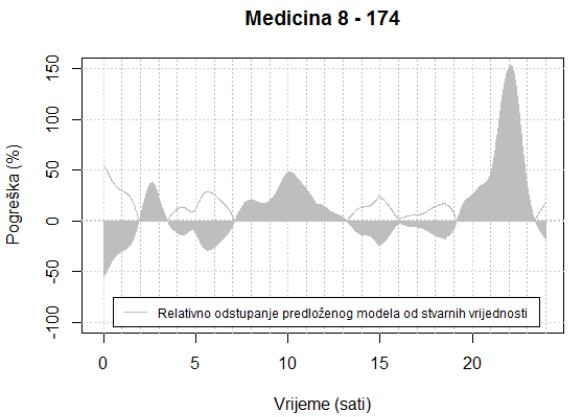

Medicina 6 - 172
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

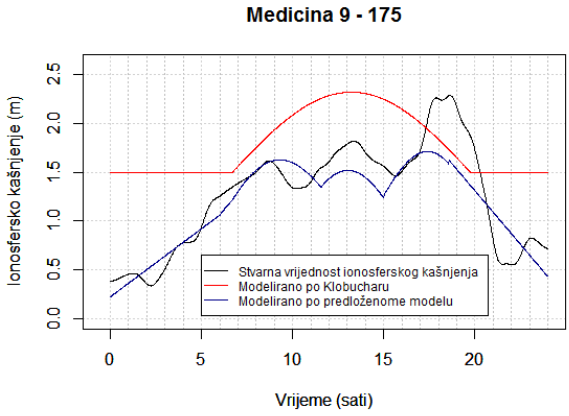

Medicina 6 - 172
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

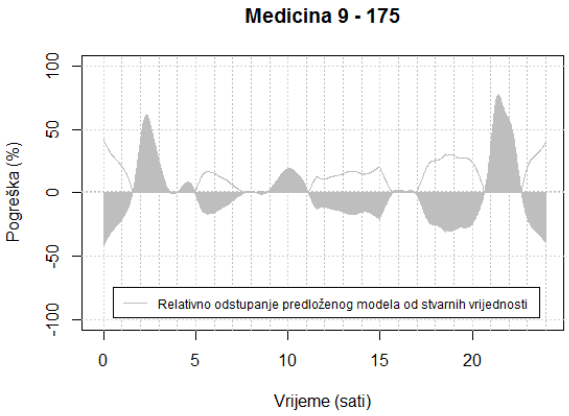

Medicina 7 - 173
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

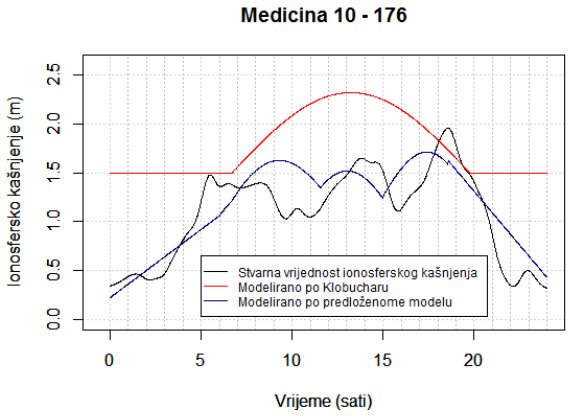

Medicina 7 - 173
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
150
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

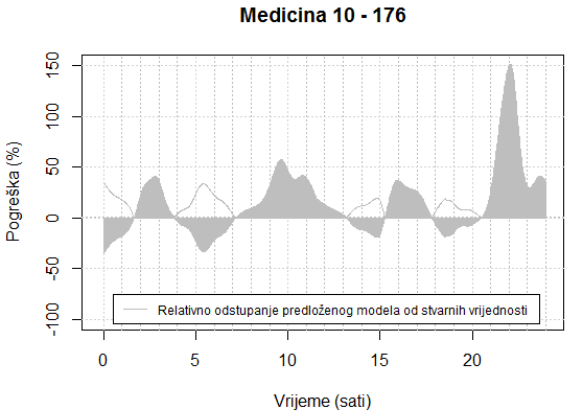

Medicina 8 - 174
Ionosfersko kašnjenje (m)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

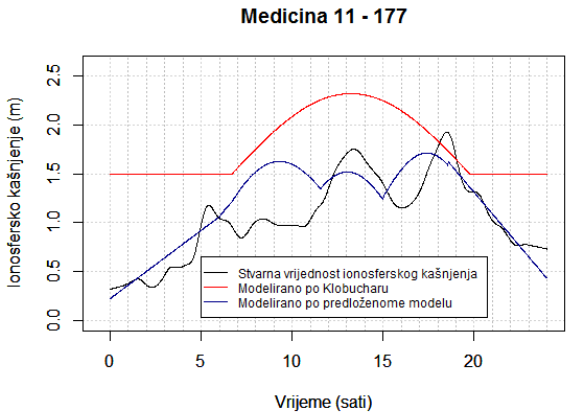

Medicina 8 - 174
Pogreška (%)
-100
-50
0
50
100
150
0
5
10
15
20
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

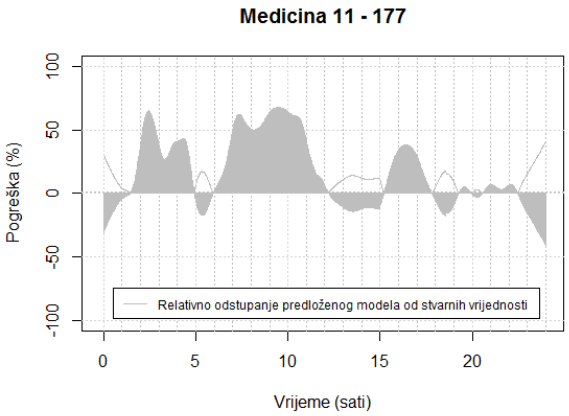

Medicina 9 - 175
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

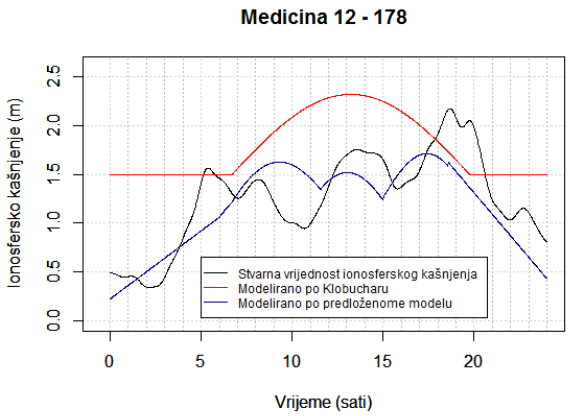

Medicina 9 - 175
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

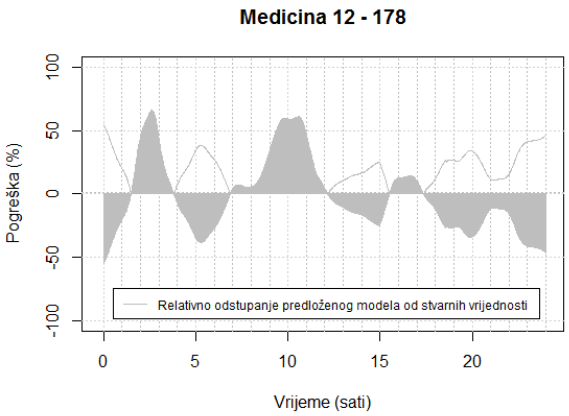

Medicina 10 - 176
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

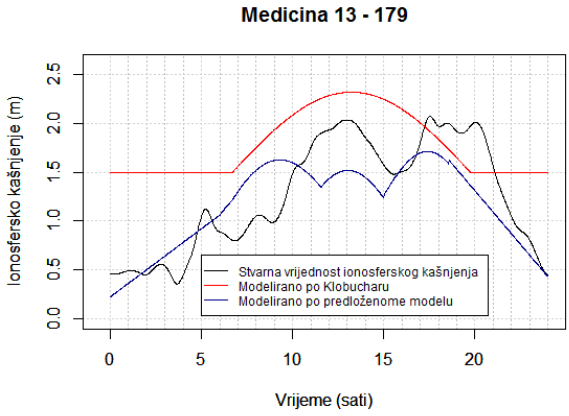

Medicina 10 - 176
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

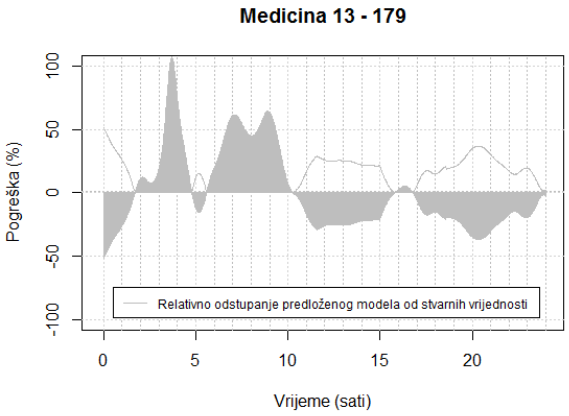

Medicina 11 - 177
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

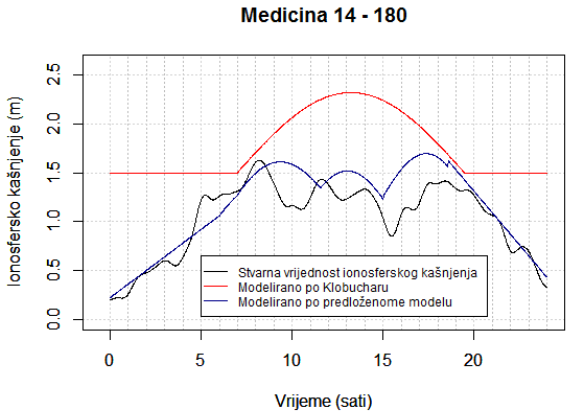

Medicina 11 - 177
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

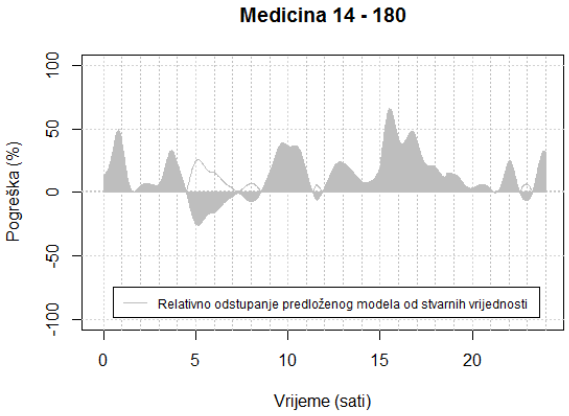

Medicina 12 - 178
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

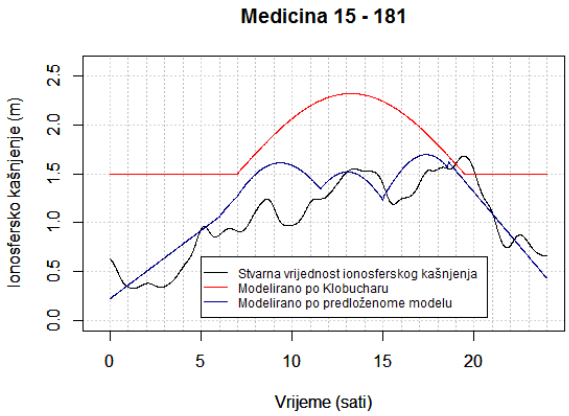

Medicina 12 - 178
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

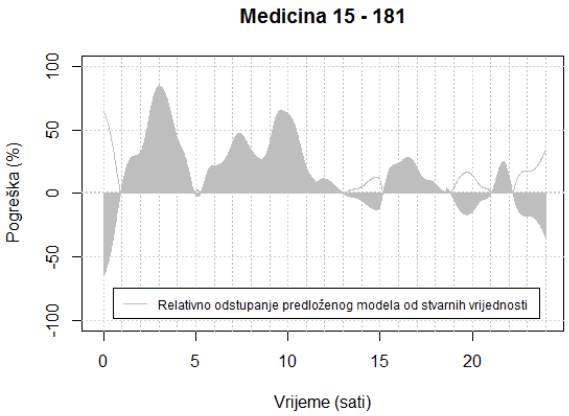

Medicina 13 - 179
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

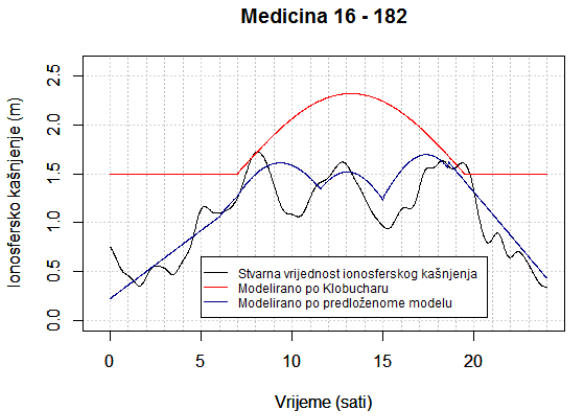

Medicina 13 - 179
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

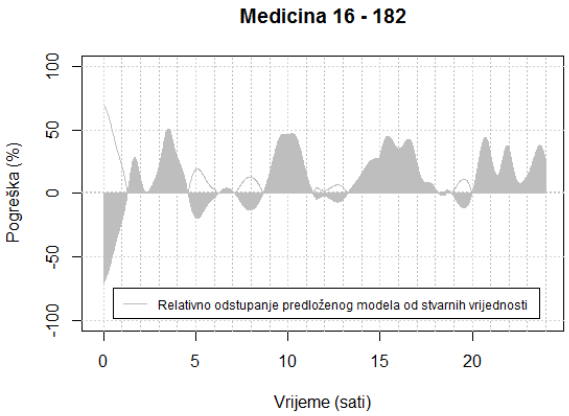

Medicina 14 - 180
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

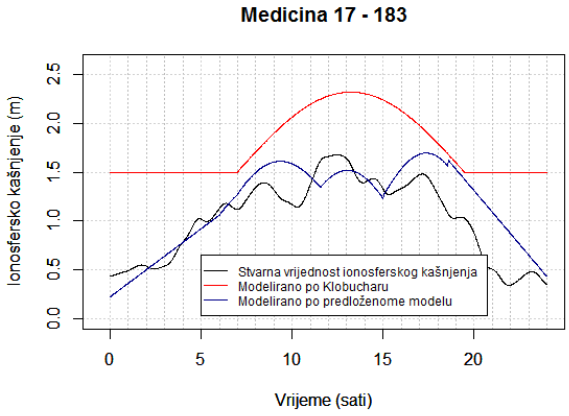

Medicina 14 - 180
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

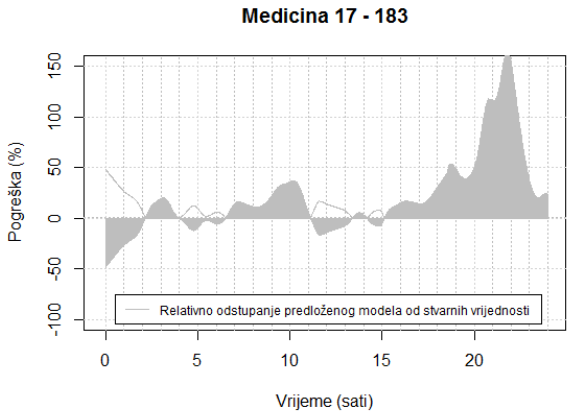

Medicina 15 - 181
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

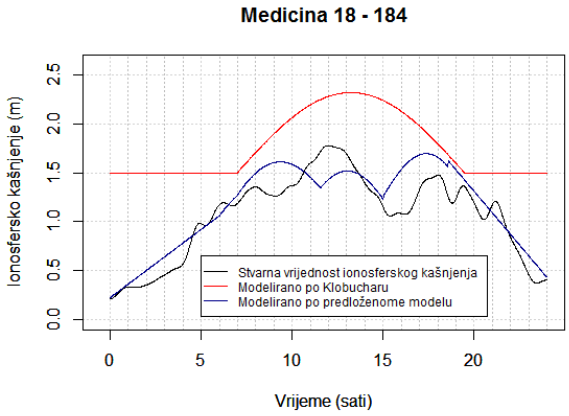

Medicina 15 - 181
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

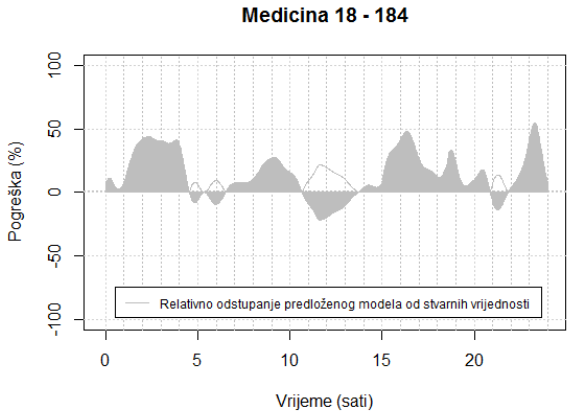

Medicina 16 - 182
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

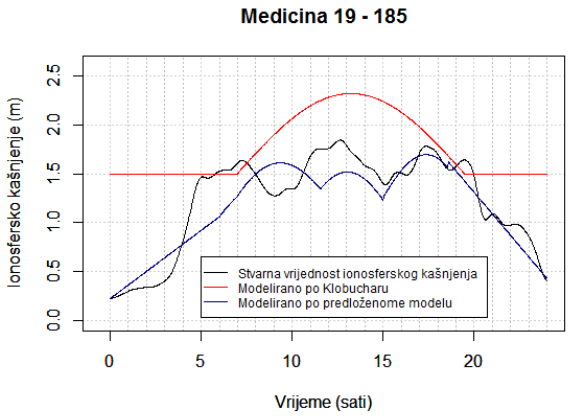

Medicina 16 - 182
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

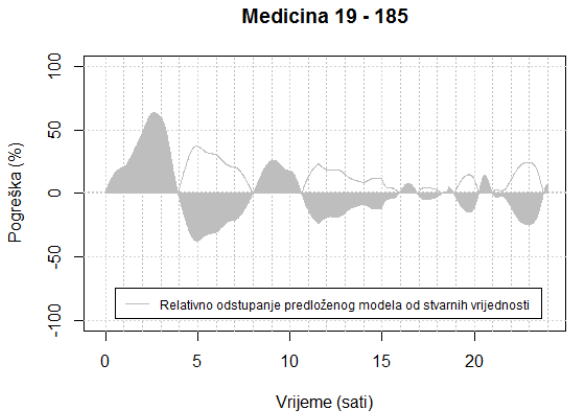




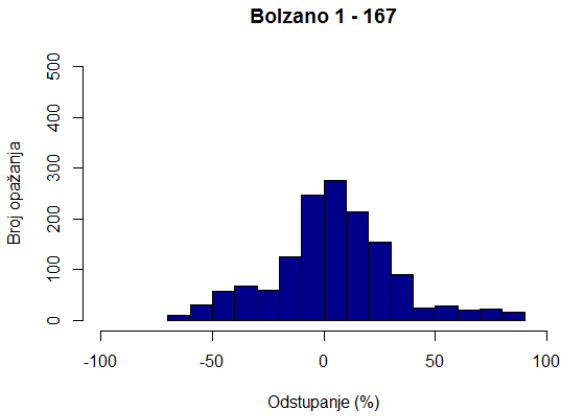


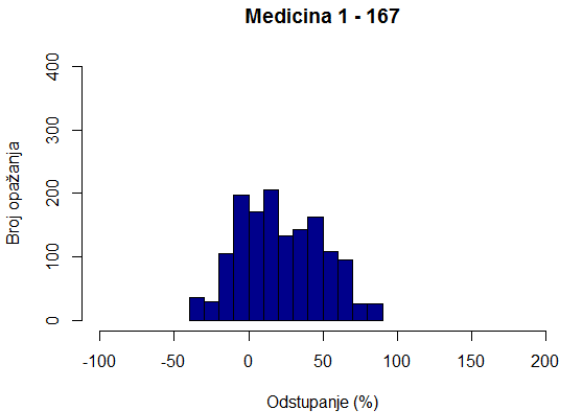


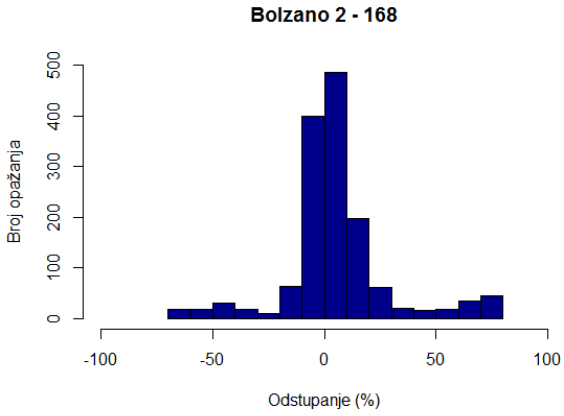


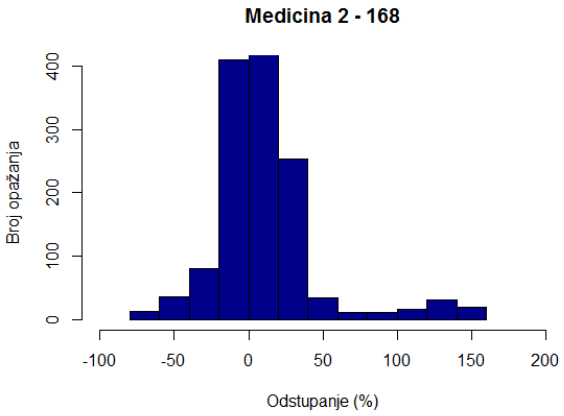


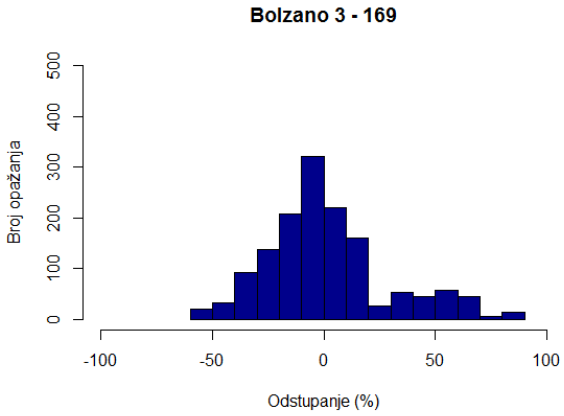
Relativne učestalosti izračunatih vrijednosti odstupanja dobivenih predloženim modelom

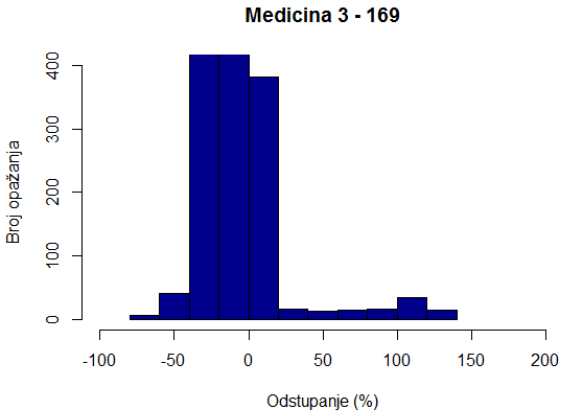


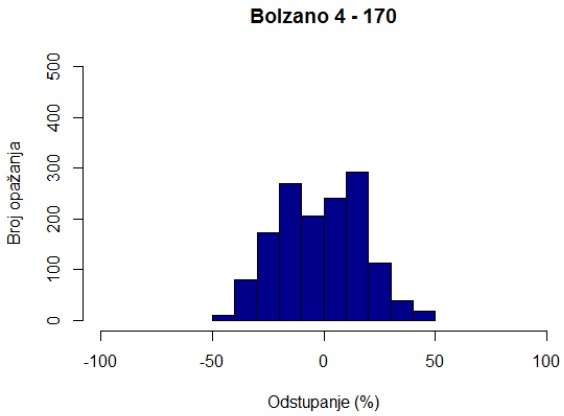


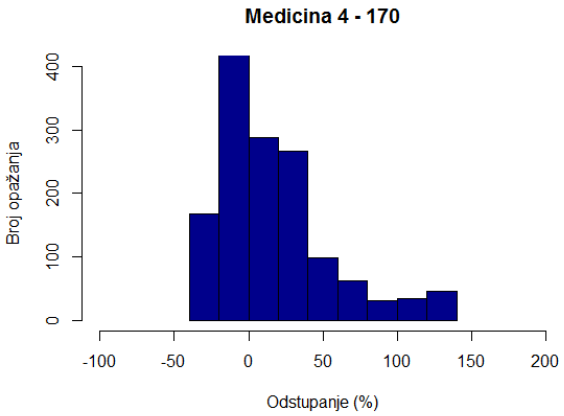

Bolzano 2 - 168
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

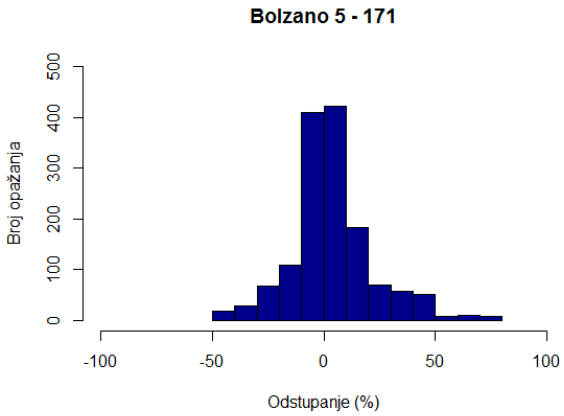

Medicina 2 - 168
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

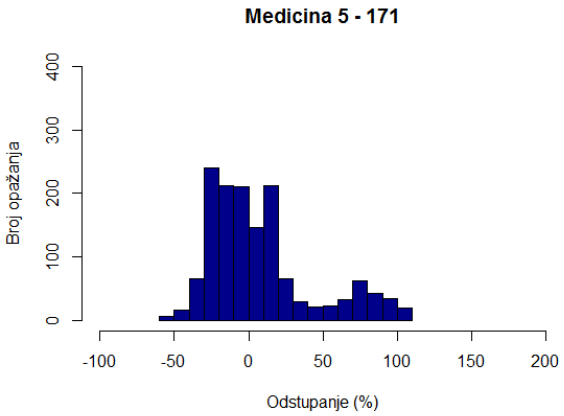

Bolzano 3 - 169
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

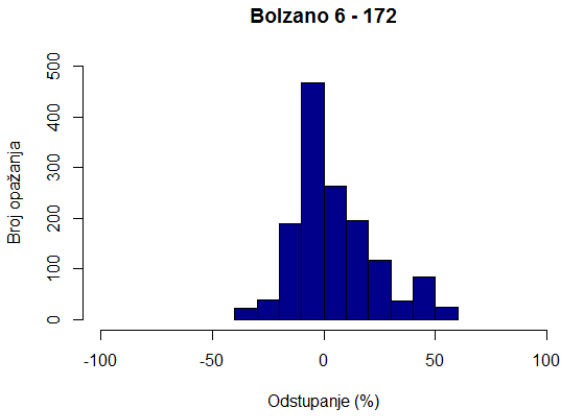

Medicina 3 - 169
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

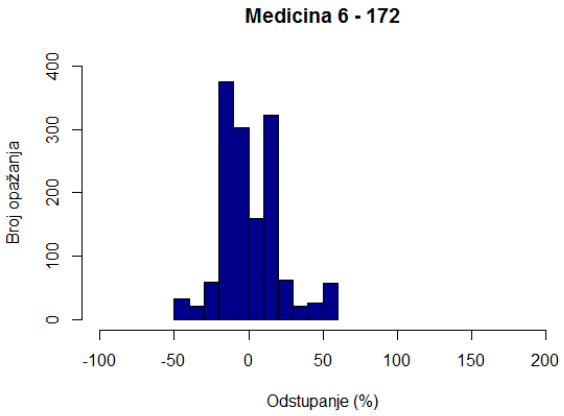

Bolzano 4 - 170
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

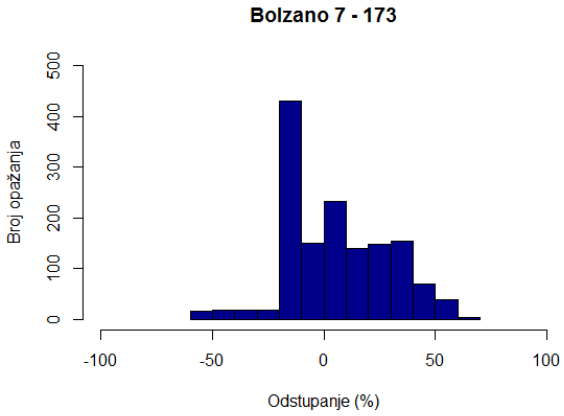

Medicina 4 - 170
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

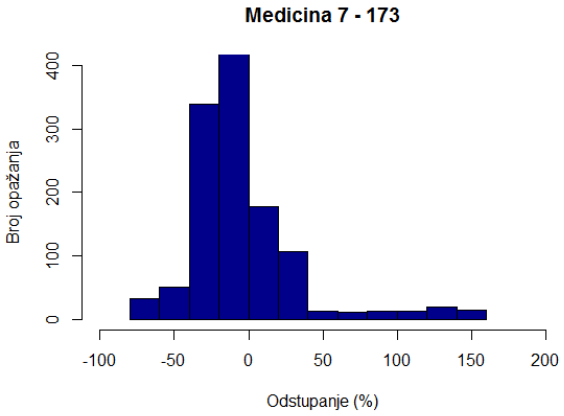

Bolzano 5 - 171
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

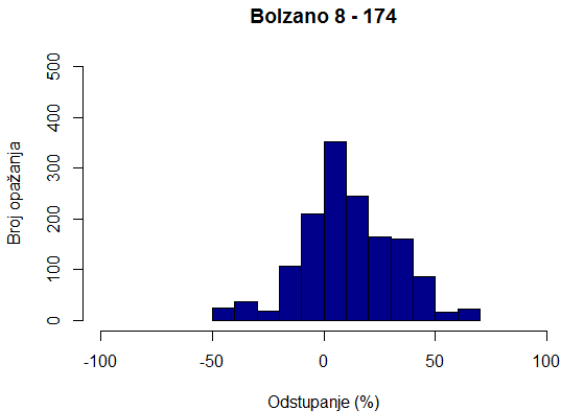

Medicina 5 - 171
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

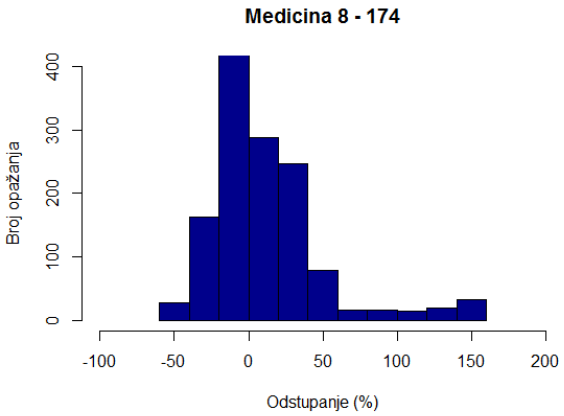

Bolzano 6 - 172
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

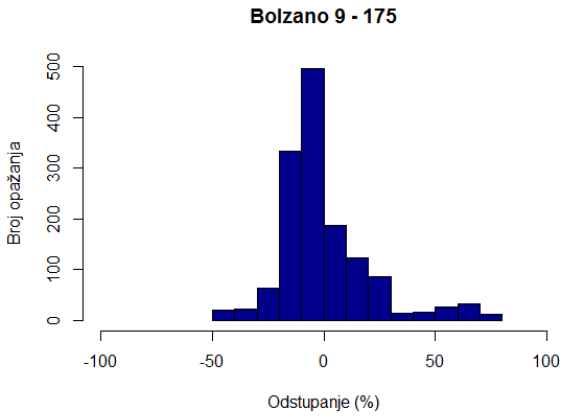

Medicina 6 - 172
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

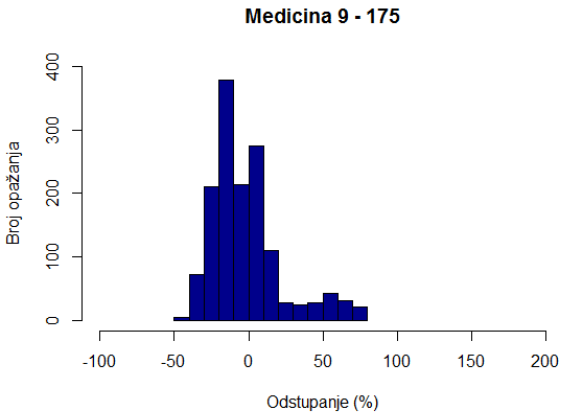

Bolzano 7 - 173
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

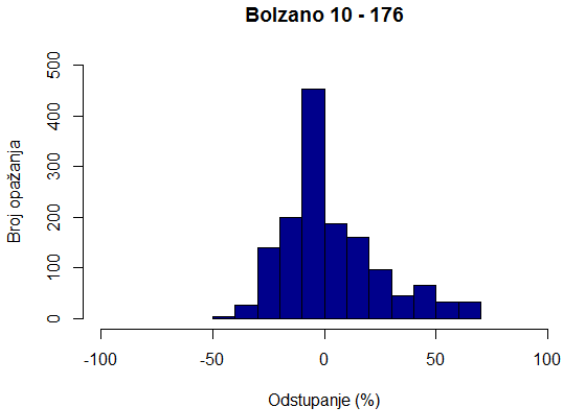

Medicina 7 - 173
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

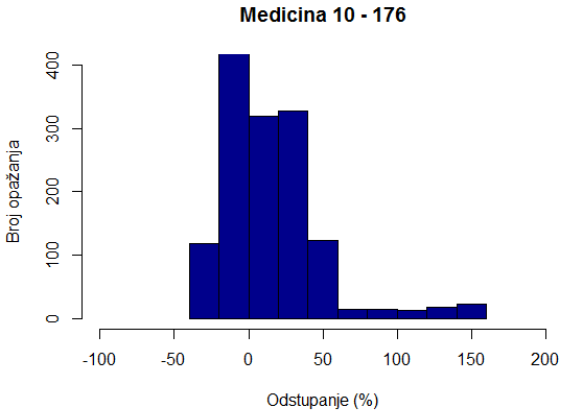

Bolzano 8 - 174
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

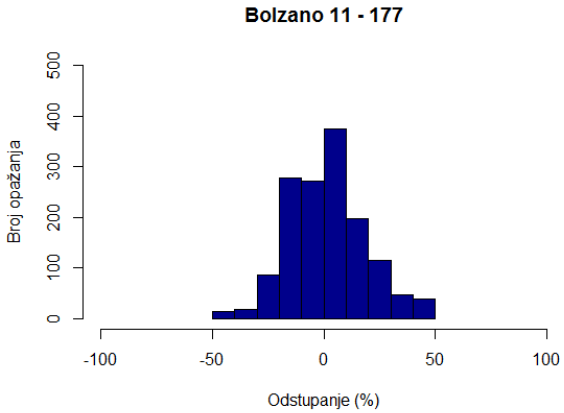

Medicina 8 - 174
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

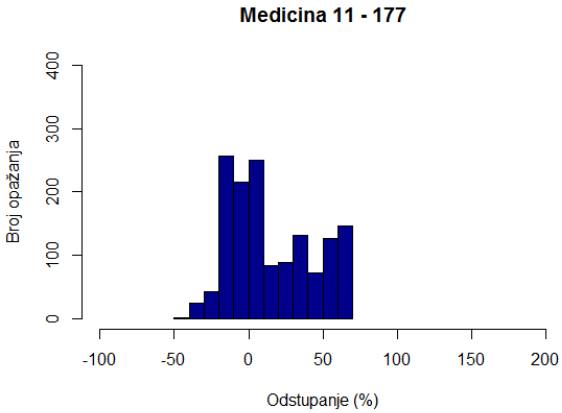

Bolzano 9 - 175
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

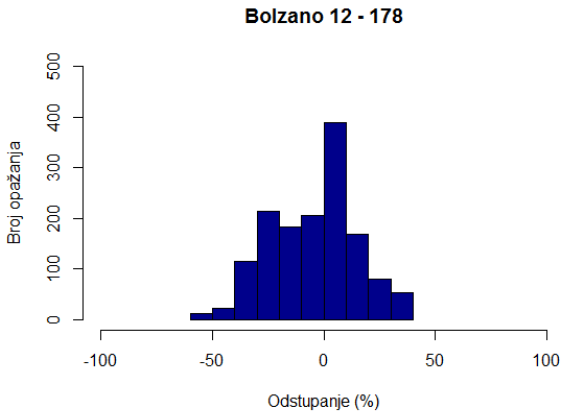

Medicina 9 - 175
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

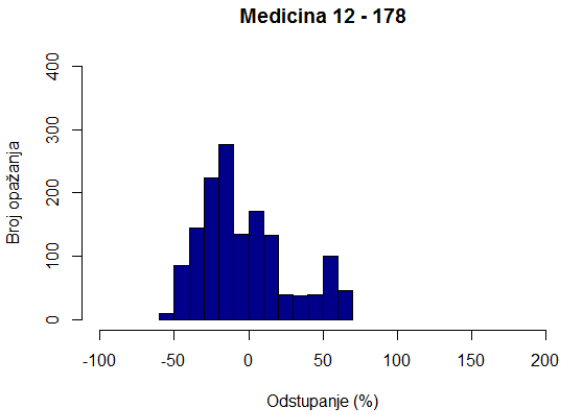

Bolzano 10 - 176
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

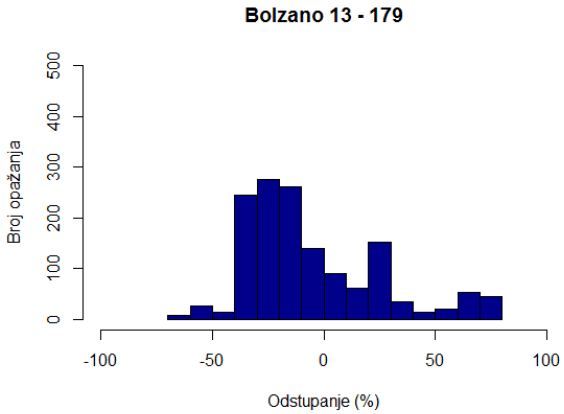

Medicina 10 - 176
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

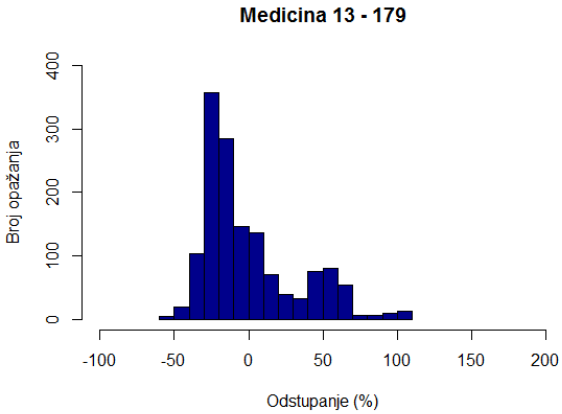

Bolzano 11 - 177
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

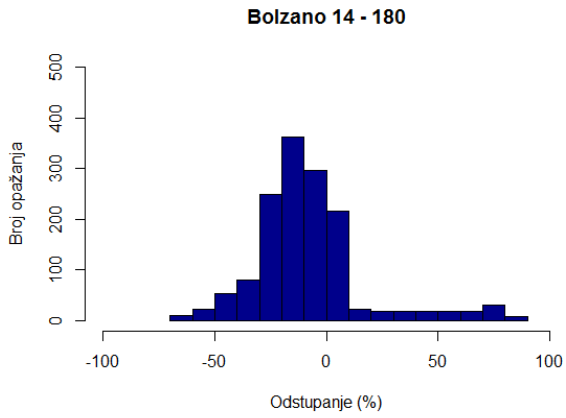

Medicina 11 - 177
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

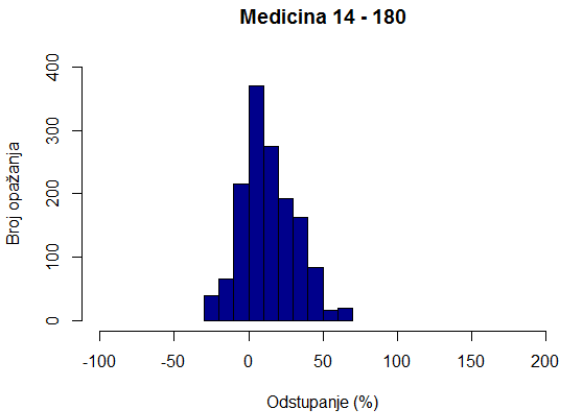

Bolzano 12 - 178
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

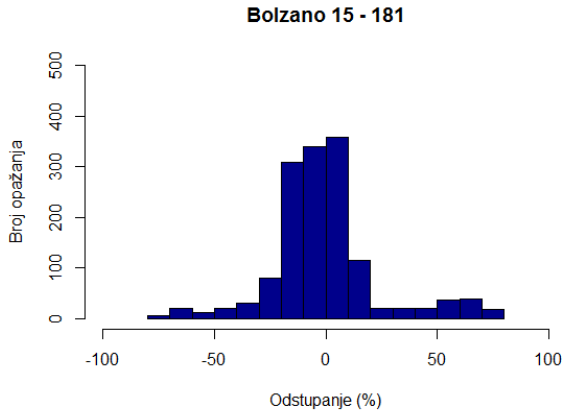

Medicina 12 - 178
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

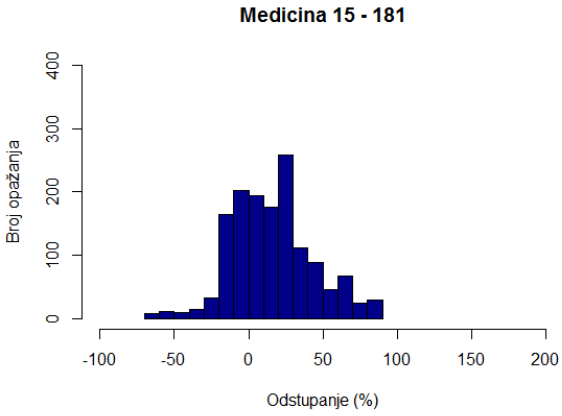

Bolzano 13 - 179
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

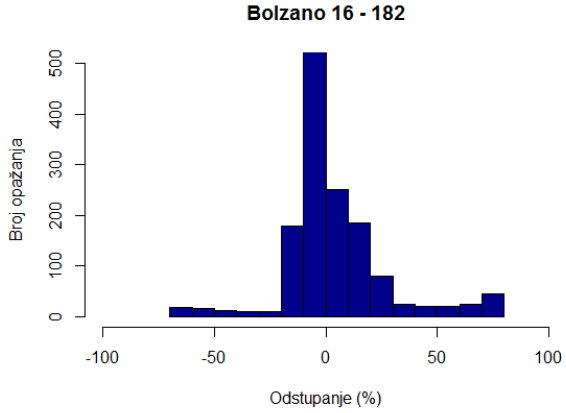

Medicina 13 - 179
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

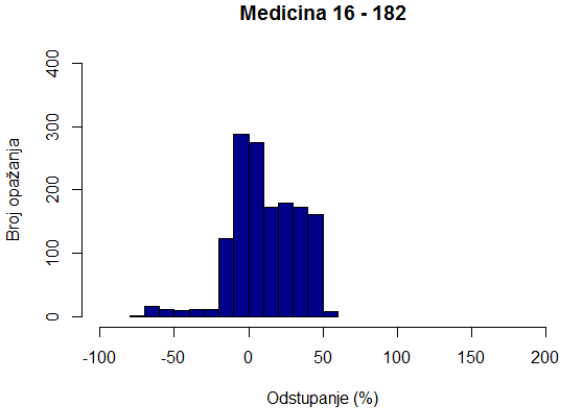

Bolzano 14 - 180
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

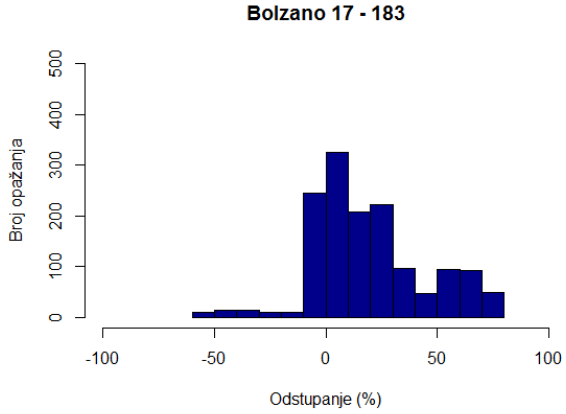

Medicina 14 - 180
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

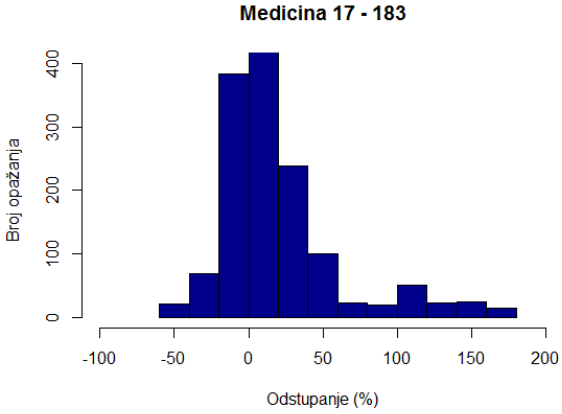

Bolzano 15 - 181
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

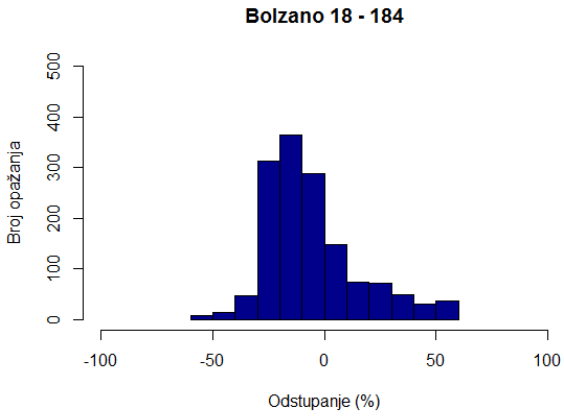

Medicina 15 - 181
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

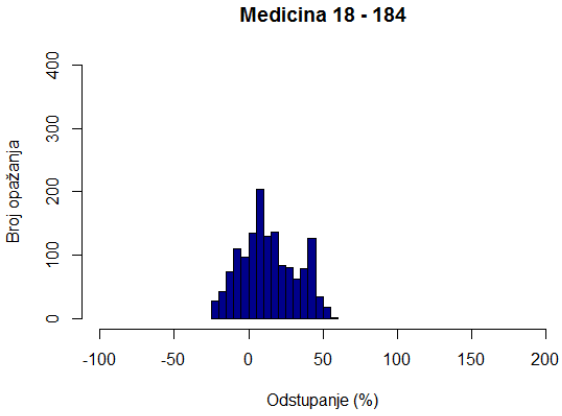

Bolzano 16 - 182
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

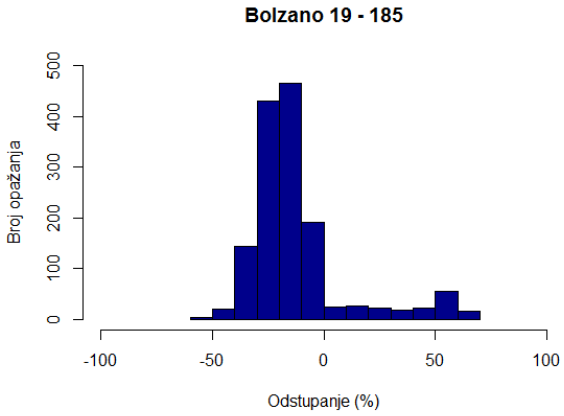

Medicina 16 - 182
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)

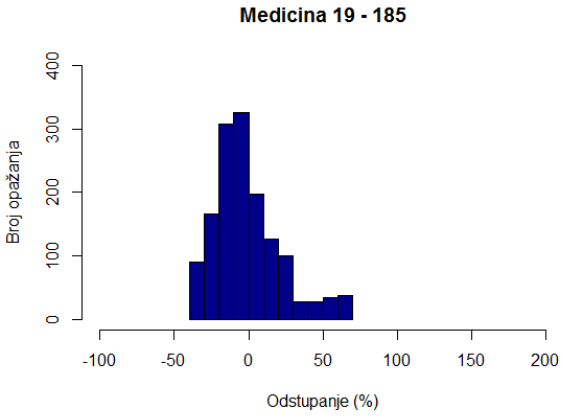

Bolzano 17 - 183
Broj opažanja
0
100
200
300
400
500
-100
-50
0
50
100
Odstupanje (%)


Medicina 17 - 183
Broj opažanja
0
100
200
300
400
-100
-50
0
50
100
150
200
Odstupanje (%)





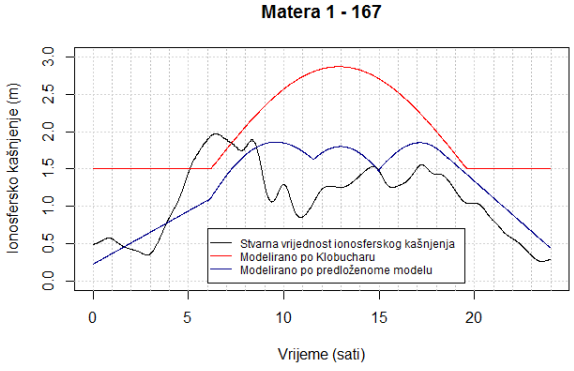




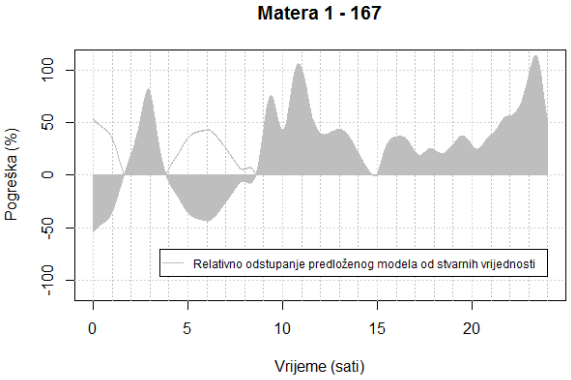
b) Verifikacija predloženog modela dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja na temelju podataka s IGS stanice Matera

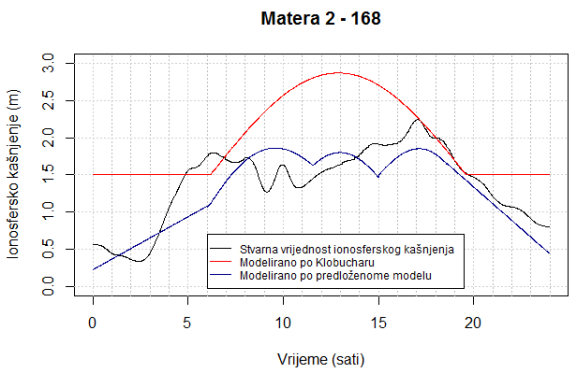
---

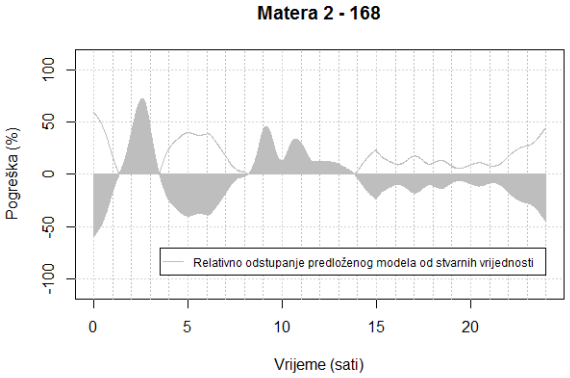
Stvarno ionosfersko kašnjenje, ionosfersko kašnjenje modelirano prema Klobucharu te ionosfersko kašnjenje modelirano prema predloženom modelu

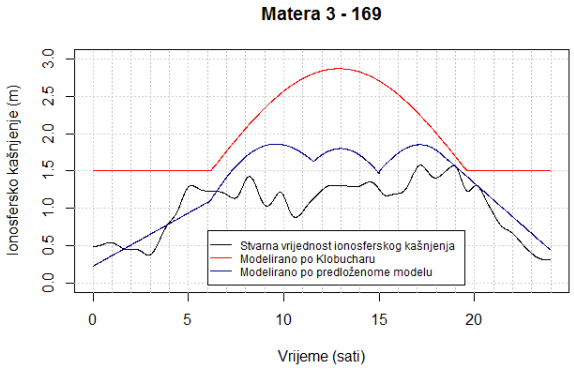


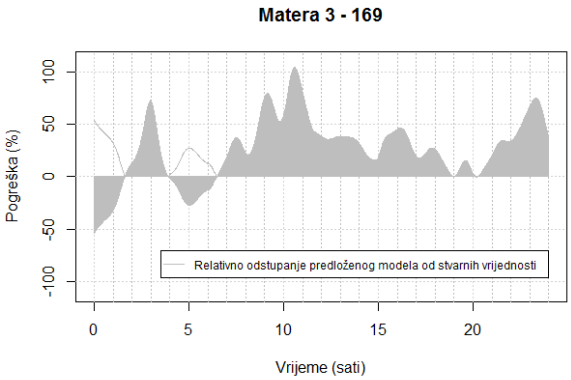
Odstupanja vrijednosti ispravke predloženog modela od stvarnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja

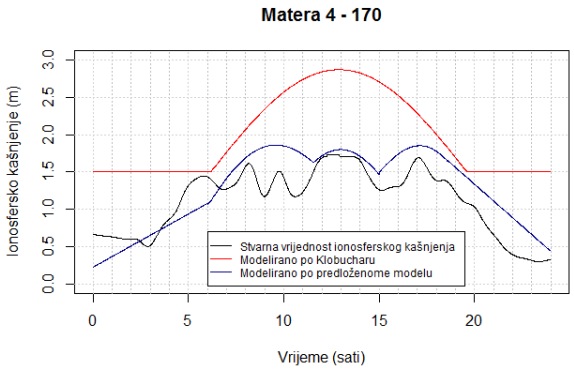


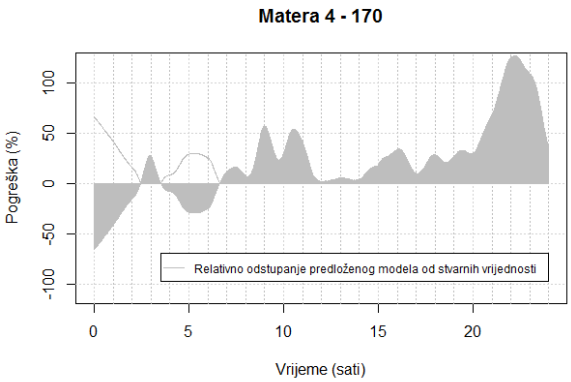

Matera 2 - 168
Ionosfersko kašnjenje (m)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu
Vrijeme (sati)

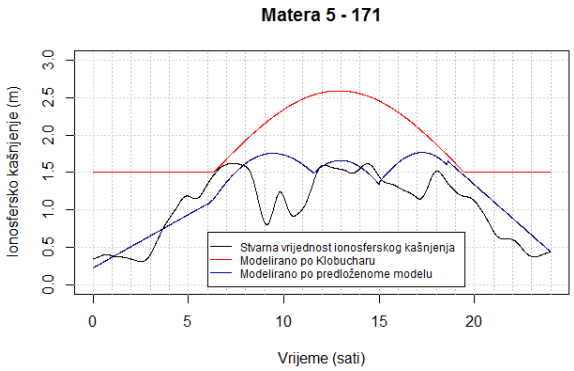

Matera 2 - 168
Pogreška (%)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti
Vrijeme (sati)

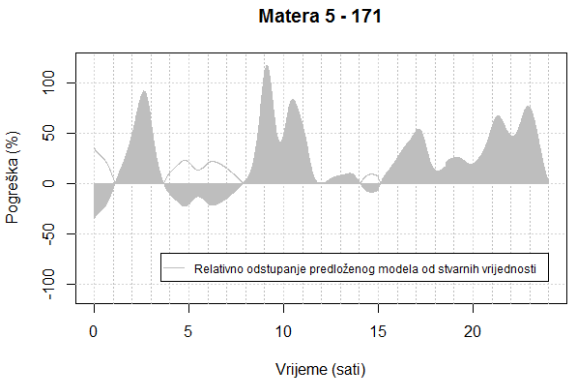

Matera 3 - 169
Ionosfersko kašnjenje (m)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu
Vrijeme (sati)

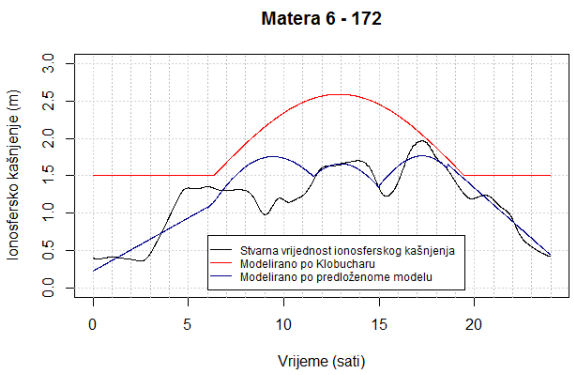

Matera 3 - 169
Pogreška (%)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti
Vrijeme (sati)

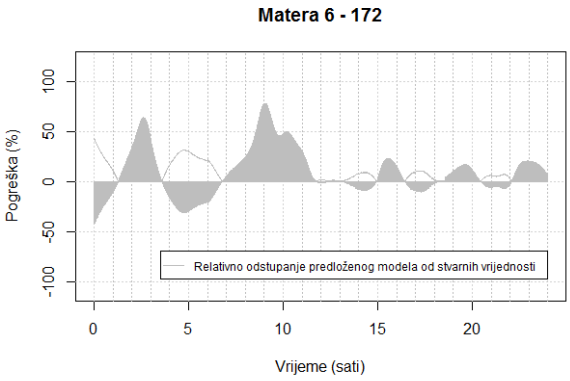

Matera 4 - 170
Ionosfersko kašnjenje (m)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu
Vrijeme (sati)

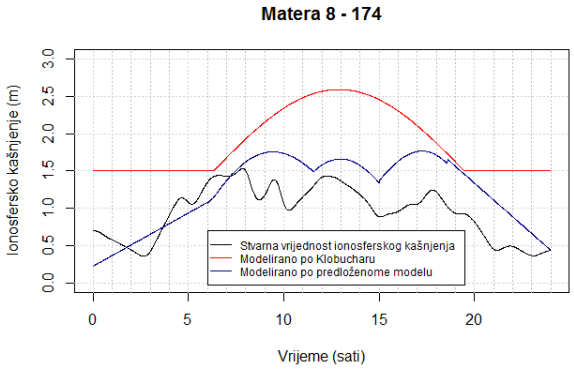

Matera 4 - 170
Pogreška (%)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti
Vrijeme (sati)

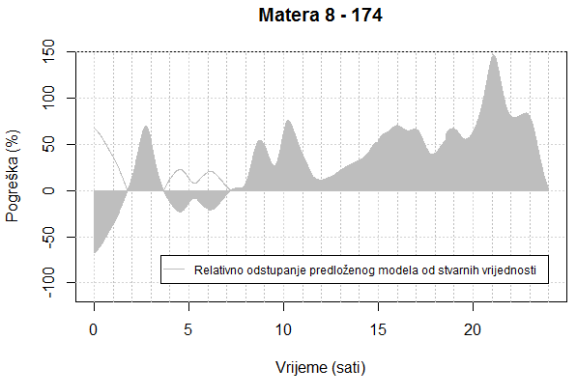

Matera 5 - 171
Ionosfersko kašnjenje (m)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu
Vrijeme (sati)

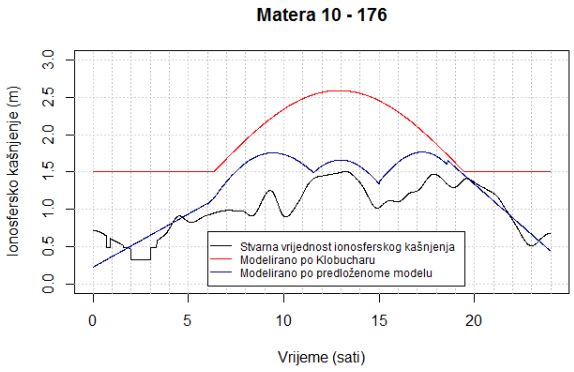

Matera 5 - 171
Pogreška (%)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti
Vrijeme (sati)

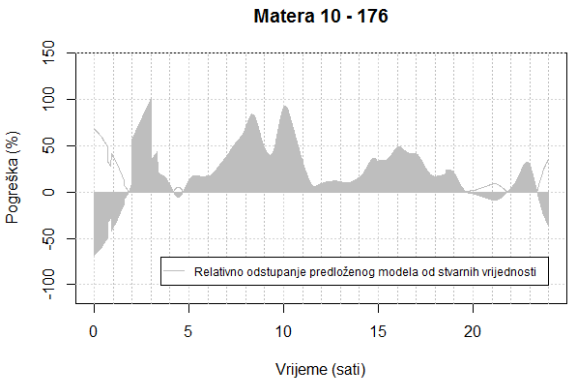

Matera 6 - 172
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

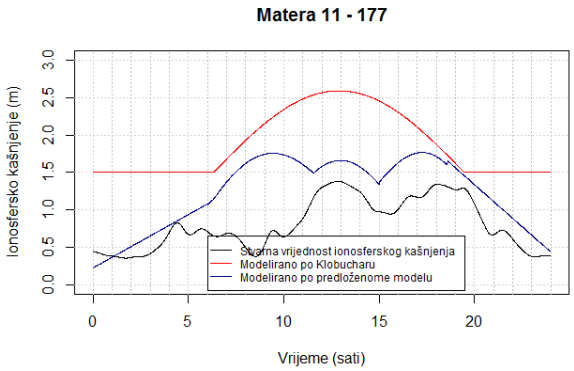

Matera 6 - 172
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

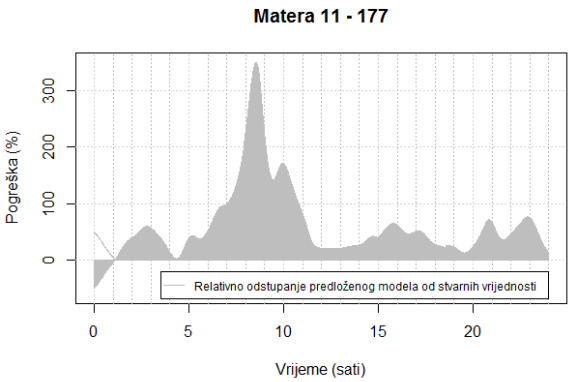

Matera 8 - 174
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

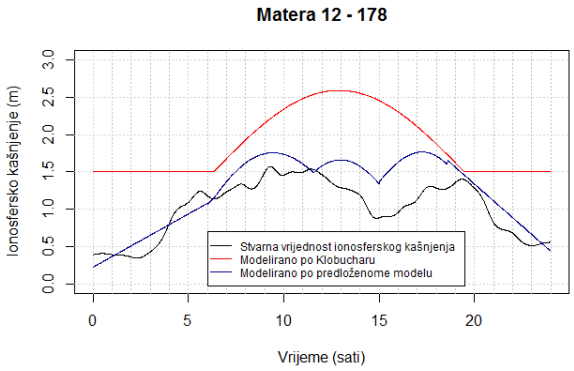

Matera 8 - 174
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

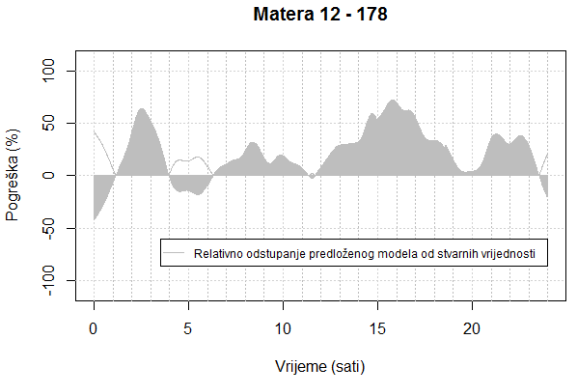

Matera 10 - 176
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

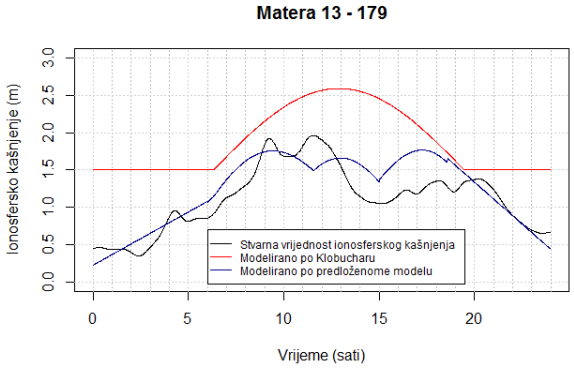

Matera 10 - 176
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

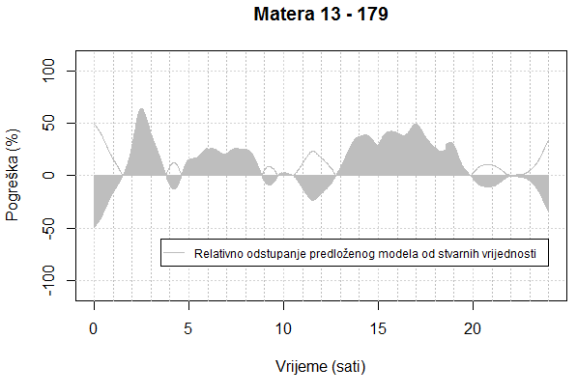

Matera 11 - 177
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

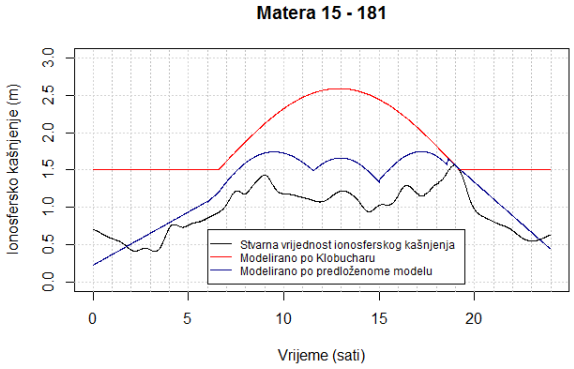

Matera 11 - 177
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

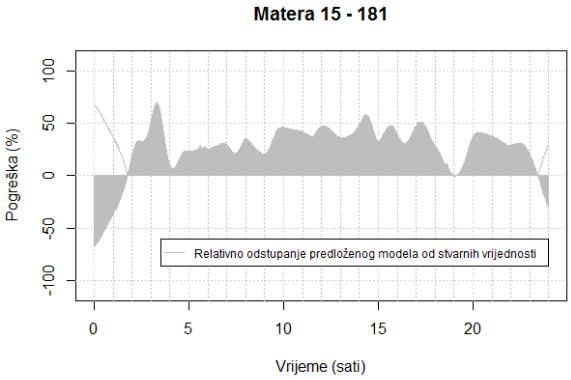

Matera 12 - 178
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

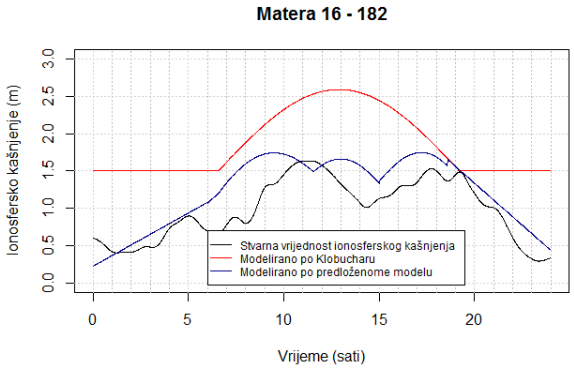

Matera 12 - 178
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

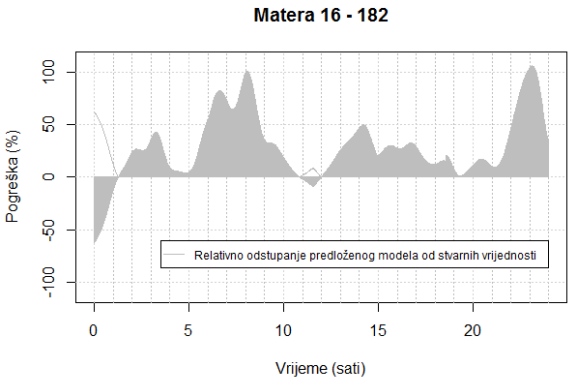

Matera 13 - 179
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

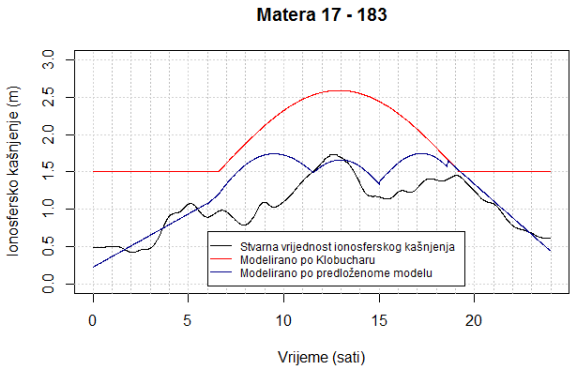

Matera 13 - 179
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

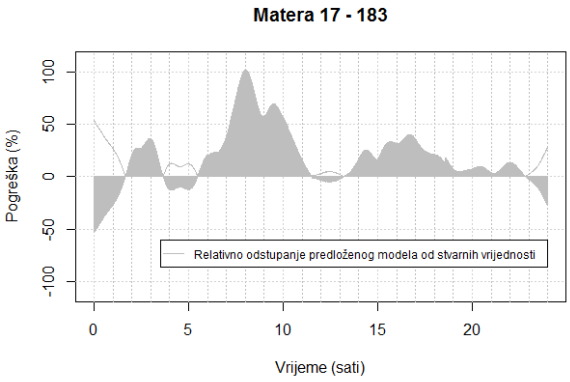

Matera 15 - 181
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

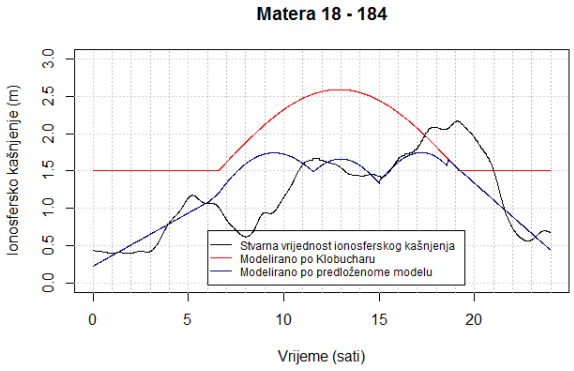

Matera 15 - 181
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

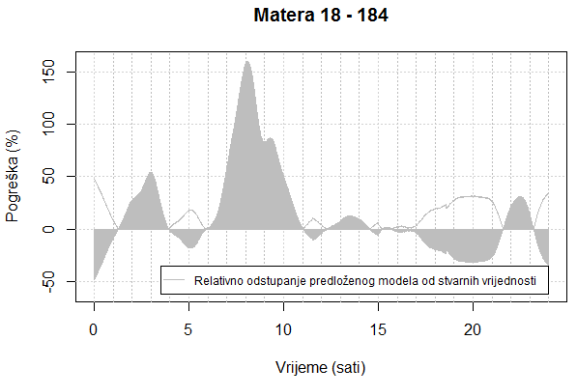

Matera 16 - 182
Ionosfersko kašnjenje (m)
Vrijeme (sati)
Stvarna vrijednost ionosferskog kašnjenja
Modelirano po Klobucharu
Modelirano po predloženome modelu

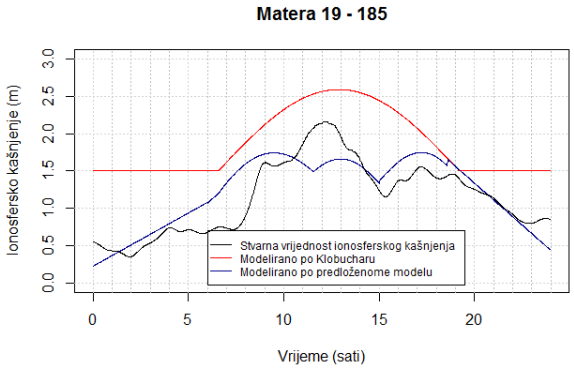

Matera 16 - 182
Pogreška (%)
Vrijeme (sati)
Relativno odstupanje predloženog modela od stvarnih vrijednosti

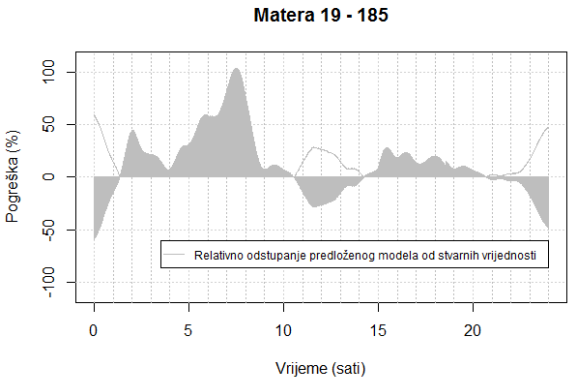




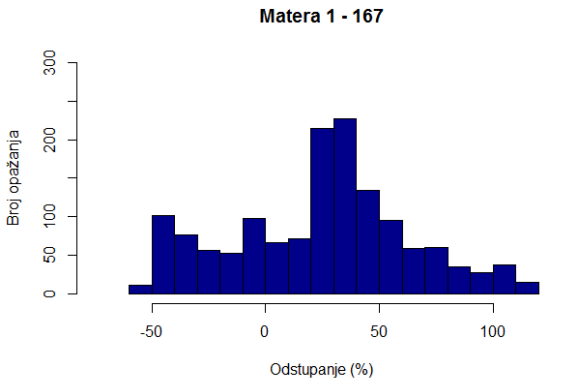


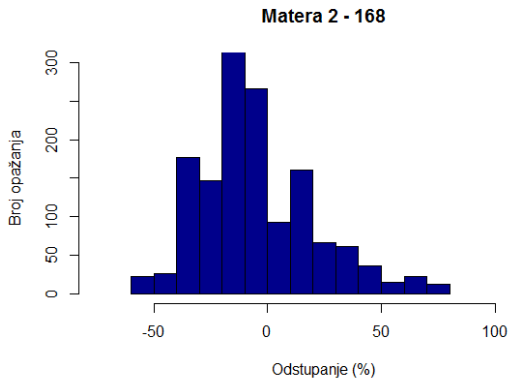


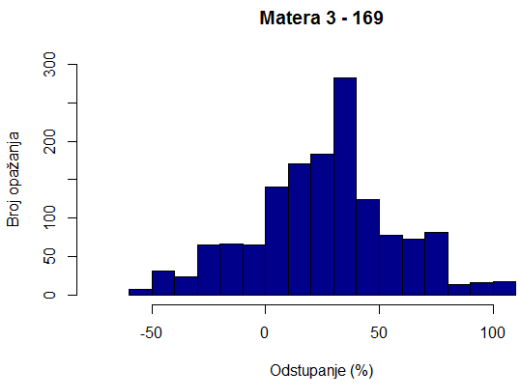


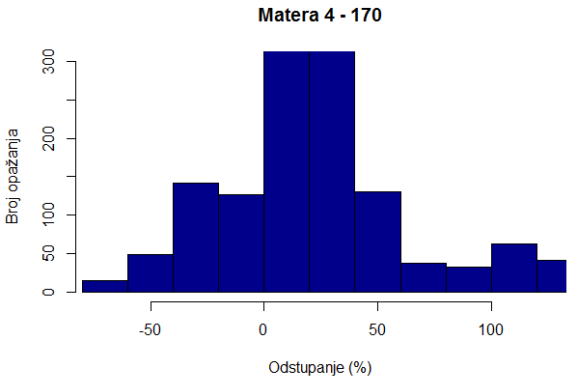


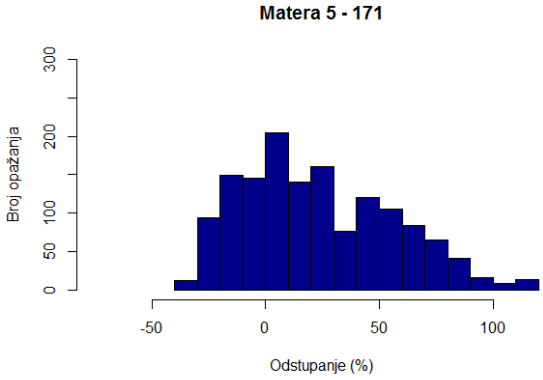
Relativne učestalosti izračunatih vrijednosti odstupanja dobivenih predloženim modelom

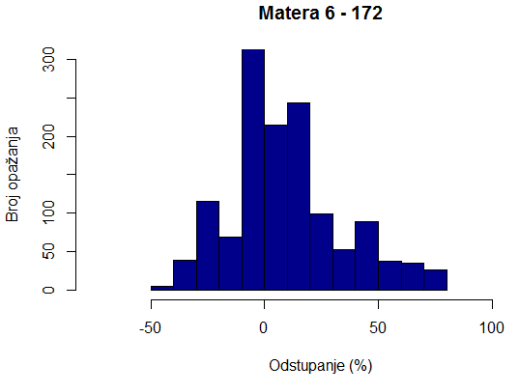


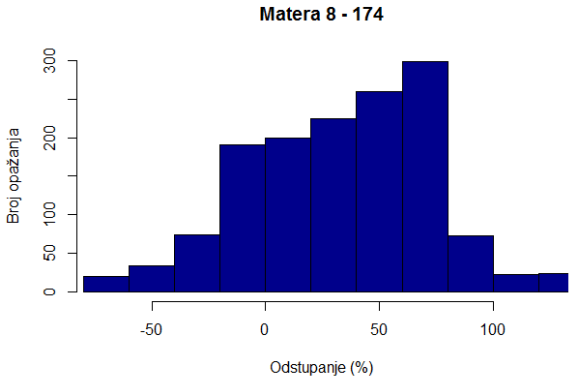


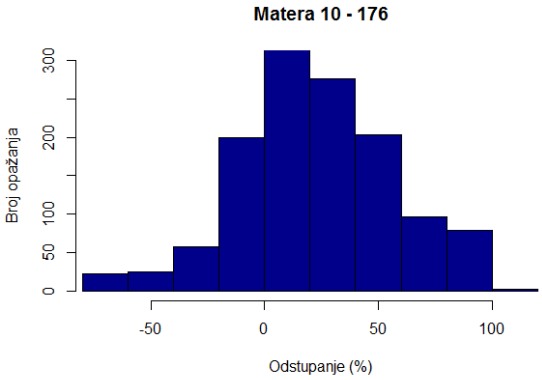

Matera 3 - 169
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

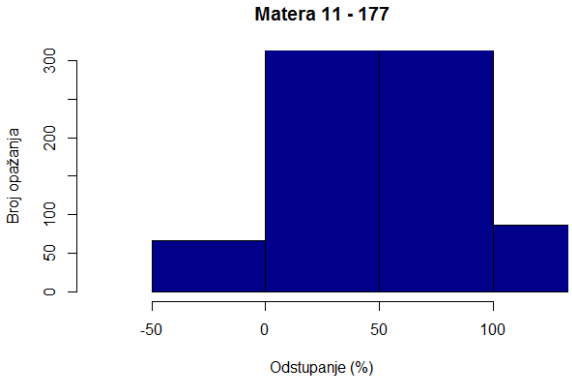

Matera 4 - 170
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

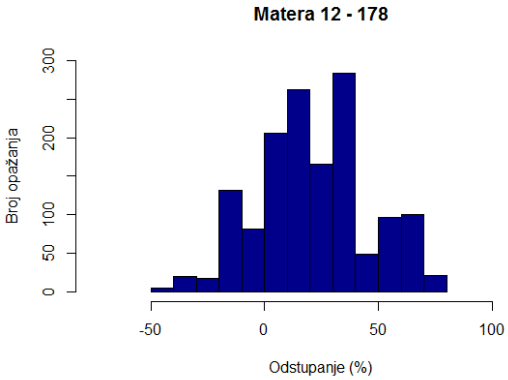

Matera 5 - 171
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

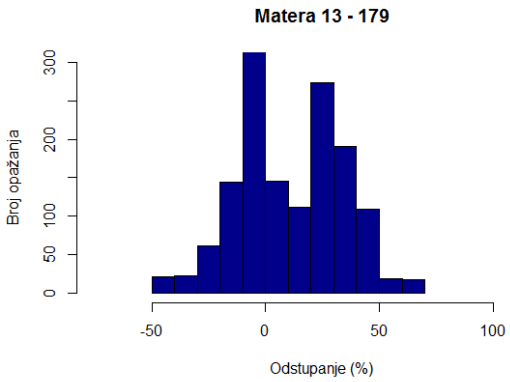

Matera 6 - 172
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

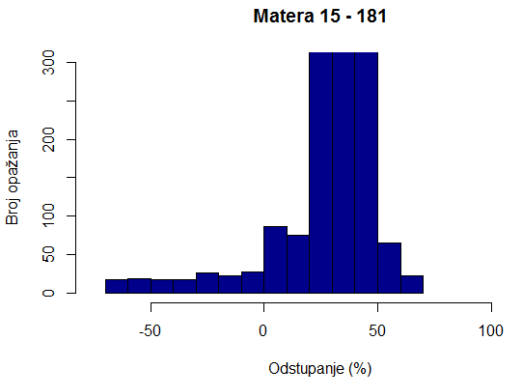

Matera 8 - 174
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

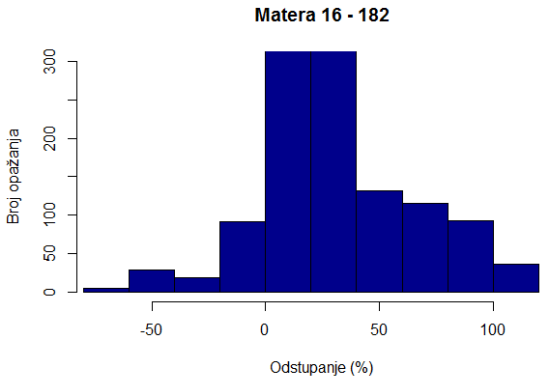

Matera 10 - 176
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

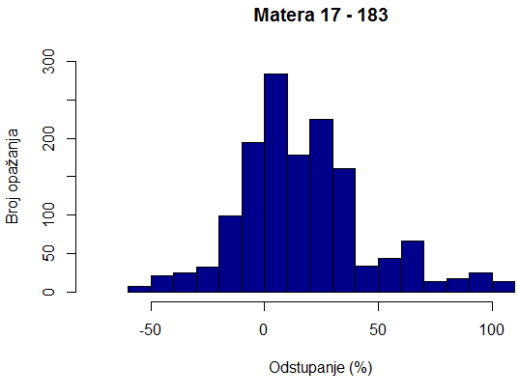

Matera 11 - 177
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

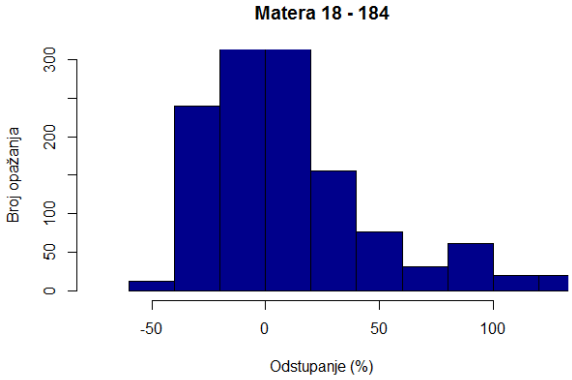

Matera 12 - 178
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)

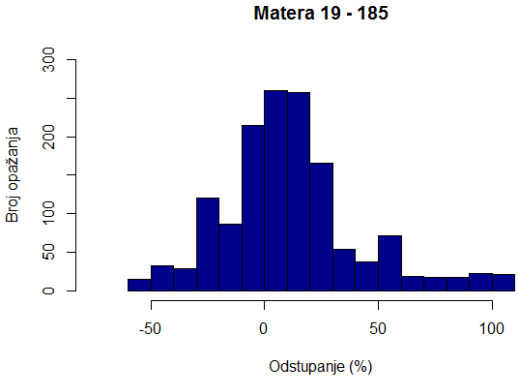

Matera 13 - 179
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)


Matera 15 - 181
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)


Matera 16 - 182
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)


Matera 17 - 183
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)


Matera 18 - 184
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)


Matera 19 - 185
Broj opažanja
0
50
100
200
300
-50
0
50
100
Odstupanje (%)