

# Priprema neovisnih ispravaka ionosferskog kašnjenja satelitskog signala u IONEX zapisu

---

Škrtić, Tina

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:054379>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij računarstva

Diplomski rad

**PRIPREMA NEOVISNIH ISPRAVAKA  
IONOSFERSKOG KAŠNJENJA SATELITSKOG SIGNALA  
U IONEX ZAPISU**

Rijeka, rujan 2024.

Tina Škrtić

1191206149

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij računarstva

Diplomski rad

**PRIPREMA NEOVISNIH ISPRAVAKA  
IONOSFERSKOG KAŠNJENJA SATELITSKOG SIGNALA  
U IONEX ZAPISU**

Mentor: prof. dr. sc. Renato Filjar

Rijeka, rujan 2024.

Tina Škrtić  
1191206149

Rijeka, 6. svibnja 2024.

Zavod: **Zavod za računarstvo**  
Predmet: **Usluge zasnovane na lokaciji**  
Grana: **2.09.02 Informacijski Sustavi**

## **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Pristupnik: **Tina Škrtić (1191206149)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij računarstva  
Modul: Programsko inženjerstvo

Zadatak: **Priprema neovisnih ispravaka ionosferskog kašnjenja satelitskog signala u IONEX zapisu /  
Preparation of independent corrections of ionospheric delay of satellite signal in IONEX  
record**

Opis zadatka:

Ionosfersko kašnjenje satelitskog signala je najznačajniji pojedinačni uzrok pogrešaka satelitskog određivanja položaja. Izvedba satelitskog navigacijskog prijemnika u obliku programski određenog radija omogućuje primjenu neovisnih modela ispravaka štetnih učinaka ionosferskog kašnjenja, pri čemu ispravke mogu biti definirane u obliku prostorne rešetke na dnevnoj bazi, a potrebe naknadne analize ili određivanja položaja u stvarnom vremenu. U navedenim primjenama koriste se posebni zapisi ispravaka, poput međunarodno prihvaćenog standarda IONEX. U ovom radu je potrebno: (1) prikazati postupak satelitske procjene položaja i ispravka ionosferskog kašnjenja za potrebe satelitske procjene položaja, (2) prikazati standard zapisa ispravaka IONEX, (3) razviti programsku podršku koja će zadanim modelom ispravka (Klobuchar model) integriranim u programsku podršku odrediti ispravke GPS ionosferskog kašnjenja na zadanoj prividnoj prostornoj rešetki s elementima (5 stupnjeva geografske širine \* 5 stupnjeva geografske dužine) u razdoblju od 24 sata poizvoljno izabranog dana, te (4) dobivenu matricu ispravaka pohraniti u posebnu datoteku u IONEX zapisu. Ispravnost programske podrške je potrebno provjeriti u postupku naknadne procjene položaja programskim alatom RTKLIB/RTKPOST. Programsku podršku razviti u programskom okruženju za statističko računarstvo R te njen kod priložiti diplomskom radu.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija 20. ožujka 2024.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

---

prof. dr. sc. Renato Filjar

---

prof. dr. sc. Miroslav Joler

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADBI RADA

Izjavljujem da sam diplomski rad pod naslovom „Priprema neovisnih ispravaka ionosferskog kašnjenja satelitskog signala za potrebe satelitskog određivanja položaja u IONEX zapisu,, izradila samostalno. Svi dijelovi rada, nalazi ili ideje koje su u radu citirane ili se temelje na drugim izvorima, bilo da su u pitanju knjige, znanstveni ili stručni članci, internetske stranice, propisi i sl. u radu su jasno označeni kao takvi te adekvatno navedeni u popisu literature.

Rijeka, 2. rujna 2024.

Tina Škrtić

---

## **ZAHVALA**

*Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Renatu Filjaru na dragocjenom vodstvu, podršci i stručnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada.*

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POVIJESNI PREGLED MODELA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA I ISPRAVAK KAŠNJENJA U IONOSFERI .....	3
2.1. Iskustva u korištenju tehnika za ispravak kašnjenja u ionosferi .....	4
2.2. Pregled odabranih programskih alata za obradu GPS podataka i ispravak kašnjenja u ionosferi.....	10
3. SATELITSKA PROCJENA POLOŽAJA I ISPRAVCI KAŠNJENJA U IONOSFERI. 14	
3.1. Postupak za procjenu položaja pomoću satelita.....	14
3.2. Pregled utjecaja ionosferskog kašnjenja na točnost satelitskog određivanja položaja	16
3.3. Razvoj modela ispravka s aspekta integracije u programsku podršku.....	17
4. IONEX MODEL ZAPISA I ISPRAVAK IONOSFERSKOG KAŠNJENJA.....	21
4.1. Uvod u IONEX zapis i njegovu upotrebu u satelitskom određivanju položaja .....	21
4.2. Zapis zaglavlja IONEX datoteke.....	21
4.3. Zapis podataka u IONEX datoteci .....	22
5. RAZVOJ RAČUNALNE PROGRAMSKE PODRŠKE ZA INTEGRACIJU ODABRANOG MODELA ISPRAVAKA ZA ODREĐIVANJE POLOŽAJA .....	24
5.1. Proces razvoja programske podrške: izbor programskog jezika i razvojnog okruženja .....	24
5.2. Ulazni i izlazni podaci.....	25
5.3. Struktura i učitavanje navigacijske datoteke .....	25
5.3.1. Struktura navigacijske datoteke .....	26
5.3.2. Učitavanje navigacijske datoteke.....	27
5.4. Primjena algoritma za generiranje ispravka .....	29
5.4.1. Pregled zadatka .....	29
5.4.2. Karakteristike ionosferskog kašnjenja .....	30
5.4.3. Geometrijske procjene Klobucharevog algoritma .....	31
5.4.4. Zemljin kut.....	32
5.4.5. Izračun srednje ionosferske lokacije.....	33
5.4.6. Pretvorba geodetske širine u geomagnetsku širinu.....	34
5.4.7. Izračun lokalnog vremena.....	35
5.4.8. Faktor nagnutosti .....	35
5.4.9. Sažetak jednadžbi algoritma .....	36
6. REZULTATI .....	40
6.1. IONEX format.....	40

6.2. Prikaz rezultata algoritma.....	41
6.3. Pregled implementacije i programskog koda korištenog u razvoju programske podrške .....	42
6.4. Rasprava o ograničenjima programske podrške i potencijalnim područjima za poboljšanje.....	43
7. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA .....	46
POPIS OZNAKA I KRATICA.....	52
POPIS SLIKA.....	54
SAŽETAK .....	55
ABSTRACT.....	56
PRILOG: PROGRAMSKI KOD .....	57



## 1. UVOD

Satelitski navigacijski sustavi su postali neizostavni u mnogim aspektima modernog društva [1]. Njihova primjena obuhvaća širok raspon područja, uključujući osobne navigacijske uređaje, geodeziju, izradu digitalnih karata, transport i logistiku [1-4]. Satelitsko određivanje položaja pruža korisnicima precizne informacije o lokaciji, bez obzira na njihov položaj na Zemlji ili doba dana [4]. Međutim, preciznost podataka o lokaciji dobivenih pomoću GNSS-a (Globalnog satelitskog navigacijskog sustava) može biti narušena različitim čimbenicima, kao što su atmosferski uvjeti, kvaliteta prijemnika i geometrija satelitske konstelacije [4]. Jedan od najvećih izvora pogrešaka je ionosfersko kašnjenje, koje može uzrokovati odstupanja u procjenama položaja od nekoliko metara [3]. Zbog toga su razvoj i primjena modela za ispravke ionosferskog kašnjenja od važni za postizanje visoke točnosti u satelitskom određivanju položaja [1].

Ionosfera je sloj atmosfere bogat električki nabijenim česticama koje mogu utjecati na brzinu širenja elektromagnetskih valova [1]. Radio signali GPS-a i drugih satelitskih navigacijskih sustava moraju proći kroz ionosferu na putu do prijemnika na Zemlji [1]. Ionosfersko kašnjenje nastaje kada satelitski signal prolazi kroz ionosferu, sloj atmosfere ispunjen električki nabijenim česticama. [1, 3, 4]. Satelitski signal putuje brže kroz vakuum svemira nego kroz ionosferu, što rezultira kašnjenjem signala. Ovo kašnjenje može znatno utjecati na točnost određivanja položaja, posebno kada se zahtijeva visoka preciznost [4]. Ionosfersko kašnjenje može varirati ovisno o gustoći elektrona ionosfere, na koju utječu čimbenici kao što su doba dana, godišnje doba i solarna aktivnost [2].

Ionosfersko kašnjenje može uzrokovati pogreške u procjenama satelitskog određivanja, što može imati značajne implikacije na primjene koje zahtijevaju visoku točnost, kao što su mjerenja i mapiranja [3]. Kako bi se ublažili učinci ionosferskog kašnjenja, razvijeni su modeli ispravaka poput Klobucharevog modela, koji je standardno korišten za GPS sustav [3]. Učinkovitost modela s obzirom na točnost može biti ograničena zbog prostorne i vremenske varijabilnosti ionosfere. [4]. Kako bi se riješilo ovo ograničenje, neovisni modeli ispravaka se mogu razviti pomoću prostornih mreža i dnevne analize podataka [1]. Razvoj programske podrške za izračun ispravaka ionosferskog kašnjenja na specifičnoj prostornoj mreži tijekom 24 sata poboljšava točnost satelitskog određivanja položaja, omogućujući preciznije prilagodbe u stvarnom vremenu. [4-6].

Transparentna konstrukcija prijemnika satelitske navigacije u obliku programski definiranog radija omogućuje primjenu nezavisnih modela ispravaka, pri čemu se ispravci mogu svakodnevno ažurirati u prostornoj mreži za potrebe naknadne analize ili određivanja položaja u stvarnom

vremenu [4]. U svrhu pravilnog praćenja i primjene ovih ispravaka, koriste se posebni zapisi poput IONEX (IONosphere Map Exchange Format) zapisa [5]. IONEX je međunarodno prihvaćen standard za razmjenu ionosferskih mapa [5]. Ovaj standard omogućuje pohranu podataka o ionosferskom kašnjenju u obliku matrica, što olakšava pristup i primjenu ispravaka [5].

Cilj ovog rada je razviti programsku podršku za integraciju odabranog modela ispravaka u programsku podršku za određivanje položaja.

Specifični ciljevi istraživanja su:

- (i) Razviti programsku podršku u programskom okruženju R za određivanje GPS ionosferskih ispravaka kašnjenja na prostornoj mreži s razmakom ( $5^\circ \times 5^\circ$ ) u razdoblju od 24 sata proizvoljno odabranog dana, koristeći Klobucharev model.
- (ii) Pohraniti matricu dobivenih ispravaka u posebnu datoteku u IONEX formatu.

Očekivani doprinos rada je u poboljšanju točnosti satelitskog određivanja položaja, što je značajno za različite primjene kao što su navigacija, vizualizacija prostornih podataka, geodetska mjerenja i druge primjene.

Poglavlje 2, *Povijesni pregled modela za satelitsko određivanje položaja i ispravak kašnjenja u ionosferi*, daje pregled najpoznatijih modela i tehnika ispravljanja ionosferskog kašnjenja, programskih alata za obradu GPS podataka i ispravke kašnjenja u ionosferi. *Procjena položaja pomoću satelita i ispravci kašnjenja u ionosferi* je tema trećeg poglavlja u kojem se govori o postupku za procjenu položaja satelita, uključujući korištenje GPS promatranja i podataka o satelitskim efemeridama. U četvrtom poglavlju, *IONEX model zapisa i ispravci ionosferskog kašnjenja*, predstavljen je zapis IONEX i njegova upotreba u satelitskom određivanju položaja. O procesu razvoja računalnog programa se govori u petom poglavlju (*Razvoj programske podrške za integraciju odabranog modela ispravaka za određivanje položaja*) koje obuhvaća pregled arhitekture programa, te Klobucharev algoritam za određivanje ispravaka kašnjenja signala u ionosferi na zadanoj prostornoj mreži. Poglavlje 6 (*Rezultati*) prikazuje su rezultate ispitivanja, uključujući razmatranje formata IONEX datoteka koji se koristi za pohranu rezultata algoritma. Također su prikazani stvarni podaci u IONEX formatu kako bi se ilustrirao rezultat algoritma za određenu epohu. Zaključak je dan u sedmom poglavlju koje daje sažetak glavnih nalaza i doprinosa rada.

## 2. POVIJESNI PREGLED MODELA ZA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA I ISPRAVAK KAŠNJENJA U IONOSFERI

Tehnologija satelitskog određivanja položaja je značajno evoluirala od lansiranja prvog umjetnog satelita, Sputnika 1, 1957. godine. U početnim fazama, satelitska navigacija je bila prvenstveno namijenjena vojnoj i znanstvenoj upotrebi. No, s razvojem GPS-a tijekom 1970-ih i njegovim potpunim operativnim statusom u 1990-ima, satelitska navigacija je postala dostupna široj javnosti. Od tada, tehnologija satelitskog određivanja položaja je postala neizostavan dio modernog društva, s primjenama u navigaciji, geodeziji, poljoprivredi, pomorstvu, zrakoplovstvu i drugim sektorima. [1] Najpoznatiji modeli za satelitsko određivanje položaja i ispravak kašnjenja u ionosferi uključuju:

- Klobucharev model - razvijen 1980-ih. Jednostavan empirijski model koji se koristi za ispravak ionosferskog kašnjenja u GPS sustavu. Koristi osam koeficijenata emitiranih od satelita za predviđanje kašnjenja [1,3,6].
- NeQuick model - razvijen 2000-ih. Empirijski model ionosfere razvijen za brze izračune ukupnog sadržaja elektrona (TEC). Koristi se u Galileovom i drugim GNSS sustavima [1,6].
- Globalne ionosferske karte (GIM - Global Ionospheric Maps) - razvijene 1990-ih. Karte koje pružaju globalne prikaze ionosferskog sadržaja elektrona. Koriste mjerenja sa zemaljskih stanica i GNSS satelita [1,7].
- Dvofrekventni modeli - razvijeni 1990-ih nadalje. Koriste dvije frekvencije za direktno mjerenje i ispravak ionosferskog kašnjenja.
- MODIP model (Modified Dip Latitude) - razvijen 1980-ih. Model koji koristi magnetski koordinatni sustav bolji prikaz varijabilnosti ionosfere, posebno u ekvatorijalnim i polarnim regijama [6].
- IRI (International Reference Ionosphere) - razvijen 1970-ih. Standardni model za ionosferu koji pruža podatke o gustoći elektrona, temperaturama i drugim parametrima ionosfere [1].
- TOMION model - razvijen 2000-ih. Model koji koristi tomografske tehnike za rekonstrukciju 3D strukture ionosfere [7].
- SBAS (Satellite-Based Augmentation Systems): *Wide Area Augmentation System* (WAAS) - razvijen od strane Federalne uprave za zrakoplovstvo u Sjedinjenim Američkim Državama, prvi put pušten u upotrebu 2003. godine. *European Geostationary Navigation*

*Overlay Service* (EGNOS) - razvijen od strane Europske svemirske agencije (ESA), Europske komisije (EC) i Eurocontrol-a, EGNOS je postao operativan 2009. godine. SBAS sustavi koriste mrežu zemaljskih referentnih stanica za prikupljanje podataka o GPS satelitima i ionosferskim uvjetima, a zatim koriste geostacionarne satelite za slanje podataka o ispravcima korisnicima, poboljšavajući tako točnost, integritet, dostupnost i kontinuitet GNSS signala [1, 6].

- Neuralne mreže i strojno učenje - razvijene 2020-ih. Moderni modeli koji koriste strojno učenje i umjetne neuronske mreže za predviđanje ionosferskog kašnjenja koristeći velike količine GNSS podataka.

Navedeni modeli se koriste za poboljšanje točnosti satelitskog određivanja položaja i smanjenje pogrešaka uzrokovanih ionosferskim kašnjenjem. Svaki od njih ima svoje specifične primjene i koristi se u različitim GNSS sustavima ovisno o potrebama i zahtjevima korisnika [6].

## **2.1. Iskustva u korištenju tehnika za ispravak kašnjenja u ionosferi**

Određivanje položaja pomoću globalnog satelitskog navigacijskog sustava (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) se temelji na mjerenju vremena prolaska signala koje sateliti odašilju do prijemnika na Zemlji [6]. Prijemnik procjenjuje svoj položaj mjerenjem vremenskih razlika između signala primljenih s više satelita i korištenjem tehnika trilateracije<sup>1</sup>[4]. Međutim, na signale koje odašilju sateliti utječe nekoliko izvora pogreške, kao što su atmosferska kašnjenja, koja mogu unijeti pogreške u procjenu položaja. Tijekom godina su identificirani različiti čimbenici kao izvori pogrešaka koji mogu utjecati na točnost sustava satelitskog određivanja položaja [4]. Jedan od najznačajnijih izvora pogreške je kašnjenje u ionosferi, koje je posljedica ionizacije gornje atmosfere sunčevim zračenjem, te ovisi o frekvenciji signala i gustoći elektrona ionosfere [6]. Ionosfera unosi kašnjenje u radio signale koje emitiraju sateliti, što može dovesti do pogrešaka u satelitskom određivanju položaja. Ionosfersko kašnjenje posebno je značajno za jednofrekventne GPS prijemnike, jer oni ne mogu razlikovati ionosfersko i atmosfersko kašnjenje [6]. Kašnjenje može doseći nekoliko metara u jednofrekventnim GNSS prijemnicima koji rade u pojasu L1, što ga čini značajnim izvorom pogreške u GNSS određivanju položaja [6].

---

<sup>1</sup> Trilateracija je tehnika koja se koristi u geometriji i zemljomjerstvu za određivanje položaja točke u prostoru mjerenjem udaljenosti do te točke od tri ili više poznatih točaka s poznatim položajima. Drugim riječima, to je metoda određivanja lokacije nepoznate točke mjerenjem udaljenosti do nje od tri ili više poznatih točaka. U GPS-u, trilateracija se koristi za određivanje lokacije prijamnika na površini Zemlje mjerenjem udaljenosti do više GPS satelita. Mjerenjem vremena koje je potrebno signalima da putuju od satelita do prijamnika, mogu se izračunati udaljenosti do satelita i odrediti lokacija prijamnika [1, 4].

Kako bi se ublažili učinci ionosferskog kašnjenja, predloženo je nekoliko metoda računanja ispravaka. Jedna od najčešćih metoda je korištenje dvofrekventnih mjerenja, gdje se ionosfersko kašnjenje procjenjuje usporedbom faznih kašnjenja signala koji se prenose na dvije različite frekvencije. Druga metoda je korištenje ionosferskih modela, koji su matematičke funkcije koje procjenjuju ionosfersko kašnjenje na temelju lokacije korisnika i doba dana. Globalne ionosferske karte (GIM) još su jedna metoda ispravka koja daje globalne procjene kašnjenja u ionosferi na temelju mreže zemaljskih GNSS prijemnika [6, 7, 8].

Prvi modeli ispravka ionosferskog kašnjenja uvedeni su početkom 1990-ih, uključujući Globalne karte ionosfere (GIM - Global Ionospheric Maps). GIM-ovi su globalni modeli koji predstavljaju ionosfersko kašnjenje kao funkciju zemljopisne širine, dužine i vremena. Ovi modeli temelje se na mjerenjima iz mreže zemaljskih ionosonda i GNSS prijemnika. GIM-ovi omogućuju procjenu ionosferskog kašnjenja za bilo koje mjesto i vrijeme, te su primjenjivi za sve glavne satelitske sustave, uključujući GPS, GLONASS i Galileo [6]. Ipak, GIM-ovi imaju svoja ograničenja, kao što su niska vremenska razlučivost i činjenica da se temelje na mjerenjima sa Zemlje, što može dovesti do netočnosti u područjima s manjim brojem mjernih stanica [8].

Neke od najranijih tehnika za ispravljanje kašnjenja u ionosferi su uključivale korištenje jednofrekventnih prijemnika s poznatim ionosferskim modelima i mjerenje ukupnog sadržaja elektrona (TEC - *total electron content*) ionosfere korištenjem zemaljskih prijemnika. Ove rane tehnike imale su ograničenu točnost, a pojava dvofrekventnih GPS prijemnika 1990-ih dovela je do značajnih poboljšanja u ispravku kašnjenja u ionosferi [9]. Klobucharev model je često korišten model ispravka za kašnjenja u ionosferi u aplikacijama Globalnog satelitskog navigacijskog sustava (GNSS - *Global Navigation Satellite System*), uključujući GPS. Model je razvio John Klobuchar 1987. godine i temelji se na pretpostavci da se ionosfera može modelirati kao tanka ljuska koja okružuje Zemlju na fiksnoj visini. Model daje procjenu ionosferskog kašnjenja za određenu lokaciju i vrijeme korištenjem skupa koeficijenata koji se korisnicima odašilju korisnicima s GPS satelita [3]. Klobucharev model (Slika 2.1) daje procjenu vertikalnog ionosferskog kašnjenja  $ION_{VERT}$  za dnevne i noćne uvjete temeljem osam koeficijenata koji se prenose u navigacijskoj poruci.

Klobucharev model uključuje i ispravak za dnevne i noćne uvjete, s tim da je vrijednost tijekom noći konstantna. Za izračun su potrebne vrijednosti korisnikove geografske širine, geografske dužine, elevacijskog kuta i azimuta promatranog satelita, te Klobucharevi koeficijenti  $\alpha_n$  i  $\beta_n$  iz navigacijske poruke. Vrijednost ionosferskog kašnjenja tijekom dana se može izračunati iz izraza (2.1): [6]

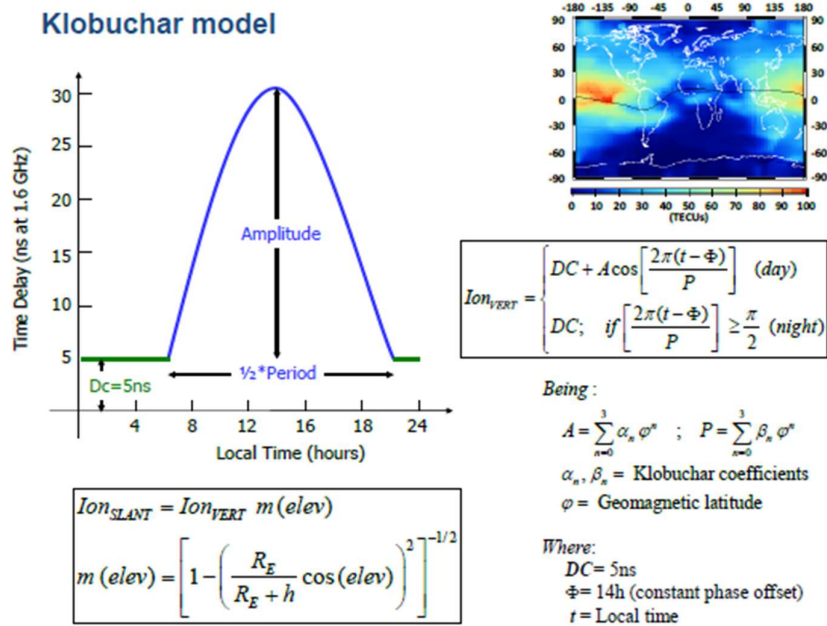
$$Ion_{VERT} = DC + A \cdot \cos((2\pi \cdot (t - \phi)) / P), \quad (2.1)$$

gdje je A amplituda, P je period, DC globalni ispravak i  $\phi$  je geomagnetska zemljopisna širina. Koeficijenti za A i P su prenošeni putem navigacijskih poruka s GPS satelita, a uključuju četiri koeficijenta za A i četiri za P koji se koriste u dvama polinomima trećeg stupnja (Slika 2.1). Ovi koeficijenti se ažuriraju od strane GPS Ground Control Segmenta u skladu sa sezonskim i solarnim aktivnostima.

Za izračun kašnjenja signala koji putuje od satelita do prijemnika kroz ionosferu, potrebno je uzeti u obzir vertikalno kašnjenje i promjenu u smjeru pravca putanje signala kroz ionosferu prema izrazu (2.2)

$$Ion_{SLANT} = Ion_{VERT} \left[ 1 - \left( \frac{R_E}{R_E + h} \cos(elev) \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (2.2)$$

gdje je *elev* elevacijski kut. Za visinu *h* ionosferskog sloja se uzima vrijednost 350 km za GPS i 375 km za Beidou, a  $R_E$  je 6 378 km.



Slika 2.1: Klobucharev model: prikaz algoritma. [6]

Za signale GPS-a koji rade na frekvencijama L1 (1575.42 MHz) i L2 (1227.60 MHz), ionosfersko kašnjenje se izračunava pomoću frekvencijskog faktora koji se odnosi na omjer frekvencija. Frekvencijski faktor *F* za L1 i L2 je dan izrazom (2.4): [3]

$$F_{L1} = 1.0, F_{L2} = (f_{L1}/f_{L2})^2 = 1.65, \quad (2.3)$$

gdje su  $f_{L1}$  i  $f_{L2}$  frekvencije signala.

Ukratko, Klobucharev model za korekciju ionosferskog kašnjenja koristi empirijske koeficijente koji se ažuriraju prema sezonskim i solarnim uvjetima. Model se temelji na procjeni ukupnog sadržaja elektrona (TEC) duž putanje signala i omogućuje prilagodbu kašnjenja na temelju promjena u ionosferskom sadržaju [3].

Klobucharev model karakterizira jednostavnost i niska cijena izračuna, te se koristi u GPS, Glonass i Beidou sustavima [3]. Koeficijente potrebne za ispravke emitiraju GPS sateliti te su dostupni svim korisnicima, što olakšava implementaciju. Međutim, model koristi fiksne koeficijente, što ograničava prilagodljivost promjenjivim ionosferskim uvjetima, i ima smanjenu točnost tijekom geomagnetskih oluja ili visoke solarne aktivnosti, te na području visoke zemljopisne širine, te u blizini ekvatora. Zbog toga može doći do pogrešaka u procjenama ionosferskog kašnjenja, posebno tijekom razdoblja intenzivne ionosferske aktivnosti [4].

Kako bi se povećala točnost ispravaka ionosferskog kašnjenja, razvijeni su napredniji modeli, poput globalnih ionosferskih mapa (GIM), koje pružaju globalni prikaz gustoće elektrona u ionosferi. Ovi modeli se temelje na kombinaciji podataka prikupljenih sa zemaljskih stanica za praćenje ionosfere, GNSS promatranja i drugih izvora, što omogućuje preciznije procjene ionosferskog kašnjenja u usporedbi s Klobucharevim modelom. Iako su precizniji, ovi napredni modeli zahtijevaju znatno više računalnih resursa i nisu toliko široko dostupni kao Klobucharev model [7].

Za izračun ionosferskog kašnjenja koristeći GIM, postupak je sljedeći [6, 7]:

1. GIM se generira iz podataka prikupljenih s mreže zemaljskih ionosonda i GNSS prijemnika. Ovi podaci daju informacije o gustoći elektrona u različitim dijelovima ionosfere.
2. Kalkulacija TEC-a slijedi prema izrazu (2.5):

$$TEC = \int_{h_1}^{h_2} N_e dh, \quad (2.4)$$

gdje je  $N_e$  gustoća elektrona u funkciji visine  $h$ , a  $h_1$  i  $h_2$  su granice putanje signala kroz ionosferu.

1. Ionosfersko kašnjenje koristeći GIM se može izračunati putem izraza (2.6):

$$T_{iono} = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2}, \quad (2.5)$$

gdje su  $TEC$  ukupni sadržaj elektrona duž putanje signala (u TEC jedinicama),  $f$  frekvencija signala (u Hz).

Klobucharev model je jednostavan i široko korišten model ispravka za ionosfersko kašnjenje u GPS-u i drugim GNSS aplikacijama. Iako ima ograničenja u pogledu točnosti, ostaje koristan alat za mnoge primjene. Kako bi se poboljšala točnost ispravka kašnjenja u ionosferi, razvijene su naprednije tehnike, uključujući dvofrekventna mjerenja i globalne modele ionosfere. Ove tehnike omogućuju preciznije procjene ionosferskog kašnjenja i smanjuju pogreške u satelitskom određivanju položaja [10].

U 1990-ima je razvijen *Ionospheric Correction Algorithm* (ICA). ICA je metoda koja se temelji na modelu ispravljanja kašnjenja u ionosferi koristeći fizički model ionosfere za procjenu kašnjenja. Ovaj model se temelji na Chapmanovoj teoriji slojeva, koja prikazuje ionosferu kao sastavljenu od tankih slojeva ioniziranog plina. ICA koristi mjerenja dvofrekventnih prijemnika za procjenu i ispravljanje ionosferskog kašnjenja. ICA je preciznija metoda ispravljanja ionosferskih kašnjenja od Klobucharevog modela, ali je računalno intenzivna i zahtijeva veliku količinu procesorske snage [11].

Standardni model ispravka za Glonass sustav je *Glonass Broadcast Ionospheric Correction* (BIC) model, koji pruža ispravak za korisnike Glonass sustava koji koriste jednu frekvenciju. BIC model emitiraju sami Glonass sateliti i temelji se na osnovnom modelu Klobuchar, s određenim prilagodbama. Ove prilagodbe su nužne zbog razlika u strukturi signala između Glonass i GPS sustava, kao i zbog specifičnih karakteristika ionosfere na globalnoj razini. [12]

Slično tome, za sustav Beidou, standardni model ispravka je *Beidou Navigation Satellite System* (BDS) *Ionospheric Correction Model*, koji pruža ispravak za korisnike s jednom frekvencijom Beidou sustava. BDS model se također temelji na modelu Klobuchar, ali s određenim izmjenama kako bi se uzele u obzir jedinstvene karakteristike Beidou sustava, kao što su struktura njegovih signala i lokacija njegovih satelita. [13]

Razvoj ovih ionosferskih modela ispravka za različite GNSS sustave naglašava važnost ublažavanja štetnih učinaka ionosferskog kašnjenja za točno određivanje položaja i navigaciju.

Za ispravljanje ionosferskog kašnjenja, u literaturi su predložene razne tehnike. Najčešće korišteni pristupi uključuju dvofrekventna GNSS mjerenja, globalne ionosferske karte (GIM) te primjenu lokalnih ionosferskih modela.

Dvofrekventni GPS prijemnici nalaze široku primjenu u ispravku kašnjenja u ionosferi. Ovi prijemnici mjere kašnjenje u dva frekvencijska pojasa, L1 i L2, što omogućuje određivanje ionosferskog kašnjenja oduzimanjem dvaju mjerenja. Ionosfersko kašnjenje se tada može ispraviti pomoću algoritma za ionosferske ispravke koji je razvio Međunarodni GNSS servis (IGS -



*International GNSS Service*) [14]. Ova se metoda obično koristi u sustavima kinematičkog određivanja položaja u stvarnom vremenu (RTK – *real-time kinematic*). Međutim, ova metoda nije prikladna za jednofrekventne prijemnike [15].

Globalne ionosferske karte (GIM - Global Ionospheric Maps) i dalje su često korištena tehnika za ispravak ionosferskog kašnjenja. GIM-ovi prikazuju raspodjelu gustoće elektrona u ionosferi na globalnoj razini [16]. Karte se izrađuju svakih 2 sata na temelju kombinacije GPS podataka i drugih zemaljskih promatranja ionosfere. GIM-ovi omogućuju procjenu ionosferskog kašnjenja za bilo koju lokaciju i vrijeme, te se uglavnom koriste u aplikacijama za naknadnu obradu podataka [17]. Iako pružaju preciznije procjene ionosferskog kašnjenja, zahtijevaju veće računalne resurse i dostupnost većeg broja podataka. Odabir modela ovisi o specifičnoj primjeni i potrebnoj razini točnosti.

Lokalni modeli ionosfere se također koriste za ispravak kašnjenja u ionosferi, posebno u regijama gdje GIM-ovi možda neće dati točne ispravke, a uključuju korištenje opažanja iz mreže prijemnika za generiranje modela ionosfere u određenoj regiji. Lokalni modeli su razvijeni korištenjem GPS mjerenja i drugih izvora podataka, kao što su ionosonde i nekoherentni radari raspršenja. Ovi modeli mogu pružiti točne ispravke ionosferskog kašnjenja za određene lokacije i vremena s obzirom da su prilagođeni određenoj geografskoj regiji. Međutim, ovi modeli zahtijevaju gustu mrežu GPS prijemnika, čije održavanje može biti skupo [17].

Tehnike strojnog učenja za korekciju kašnjenja u ionosferi nedavno su predložene. Na primjer, razvijen je model temeljen na neuronskoj mreži za predviđanje kašnjenja u ionosferi pomoću GPS promatranja [18]. Utvrđeno je da takvi modeli nadmašuju postojeće modele u pogledu točnosti i računalne učinkovitosti. Međutim, tehnike strojnog učenja zahtijevaju velike količine podataka za obuku modela, a točnost modela uvelike ovisi o kvaliteti i količini tih podataka [18].

Modeli ispravka za ionosferska kašnjenja u GNSS aplikacijama prošli su kroz nekoliko faza razvoja tijekom godina, od jednostavnih modela ispravka do naprednijih fizičkih modela i tehnika strojnog učenja [18-21]. Svaki model ima svoje prednosti i ograničenja, a izbor modela ovisi o specifičnoj primjeni i potrebnoj razini točnosti. U novijim studijama se predlaže korištenje tehnika strojnog učenja za ispravak kašnjenja u ionosferi. Na primjer, model koji se temelji na neuronskoj mreži razvijen je za predviđanje kašnjenja u ionosferi pomoću GPS promatranja [18-20]. Utvrđeno je da model radi bolje od postojećih modela u smislu točnosti i računalne učinkovitosti [18-19].

Izbor tehnike ispravka kašnjenja u ionosferi ovisi o čimbenicima kao što su dostupnost dvofrekventnih mjerenja, točnost potrebna za primjenu određivanja položaja i računalni resursi dostupni za obradu podataka.

## 2.2. Pregled odabranih programskih alata za obradu GPS podataka i ispravak kašnjenja u ionosferi

Postojeći programski alati za obradu GPS podataka i ispravak kašnjenja u ionosferi ključni su za učinkovitu i točnu obradu GNSS podataka i određivanje položaja jer omogućuju smanjenje pogrešaka nastalih uslijed ionosferskog kašnjenja, ubrzavaju proces obrade i automatski primjenjuju ispravke čime čine obradu podataka učinkovitijom i preciznijom [9]. Razvijeni su različiti programski alati za obavljanje različitih zadataka vezanih uz obradu GPS podataka i ispravak kašnjenja u ionosferi. Najčešće korišteni programski alati za obradu GPS podataka i ispravak kašnjenja u ionosferi uključuju RTKLIB (*Real-Time Kinematic Library*), GAMIT (*GPS Analysis*) i Bern GNSS računalni program [22-24].

RTKLIB je programski paket otvorenog koda za obradu GNSS podataka i kinematičko (RTK) određivanje položaja u stvarnom vremenu koji pruža alate za stvarno vrijeme i naknadnu obradu GPS podataka [22]. Objavljen je 2006.g., a razvili su ga Tomoji Takasu i Akio Yasuda, Tokyo University of Marine Science and Technology [22]. Program uključuje algoritme za ispravak kašnjenja u ionosferi i može se koristiti s jednofrekventnim i dvofrekventnim GPS prijemnicima [22]. Omogućuje visoku preciznost određivanja položaja koristeći samo GNSS signale, bez potrebe za baznim stanicama. Podržava GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou i QZSS i naširoko se koristi u raznim istraživačkim i praktičnim primjenama [22-23]. RTKLIB podržava ispravak kašnjenja u ionosferi korištenjem različitih modela, uključujući ionosferski model emitiranja, globalni ionosferski model i lokalne ionosferske modele. Međutim, RTKLIB može imati ograničenu točnost u nekim scenarijima, kao što su područja s jakim ionosferskim poremećajima [22].

GAMIT je programski paket koji je 1990-ih razvio *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) za obradu GPS podataka i geodetsku analizu [23]. Računalna programska podrška uključuje algoritme za ispravak kašnjenja u ionosferi pomoću GIM-ova i lokalnih modela ionosfere [23]. Pruža skup programa za analizu GPS podataka, uključujući precizno određivanje položaja točaka, određivanje osnovne linije i analizu vremenskih serija [23]. GAMIT također podržava ispravak kašnjenja u ionosferi korištenjem različitih modela, uključujući ionosferski model emitiranja i globalni ionosferski model [23]. Međutim, GAMIT može biti složeniji za postavljanje i korištenje u usporedbi s drugim programskim alatima [23].

*Bern GNSS Software* je programski paket koji je 1990-ih razvilo Sveučilište u Bernu za obradu GPS podataka i geodetsku analizu [24]. Omogućuje sveobuhvatan skup alata za obradu GPS podataka, uključujući precizno određivanje položaja točaka, relativno određivanje položaja i

podešavanje mreže [24]. Programski paket nudi nekoliko modula za obradu podataka, uključujući pretprocesiranje podataka, podešavanje mreže i transformaciju koordinata [24]. *Bern GNSS* program podržava ispravak kašnjenja u ionosferi koristeći različite modele, uključujući model ionosfere emitiranja i globalni model ionosfere [24]. Konkretno, program *Bern GNSS* koristi kombinaciju različitih modela kašnjenja u ionosferi kao što su model Klobuchar, model NeQuick i model GIM, za ispravljanje kašnjenja u ionosferi u GNSS signalima [24]. Programska podrška se koristi za različite primjene, uključujući studije deformacije kore, atmosferske studije i geodetska istraživanja. Međutim, program *Bern GNSS* može imati strmiju krivulju učenja u usporedbi s drugim programskim alatima [24].

*TSAalyzer* je programski alat otvorenog koda razvijen 2010-ih koji je specijaliziran za analizu vremenskih nizova GNSS podataka [21, 25]. Funkcije koje pruža *TSAalyzer* uključuju vizualizaciju i interakciju s vremenskim serijama, analizu metodom najmanjih kvadrata, spektralnu analizu te interaktivnu inspekciju za otkrivanje pomaka u podacima [25]. *TSAalyzer* također može čitati različite vremenske serije u različitim formatima podataka pomoću alata za konverziju podataka i komentara zaglavljaju unutar programa [25].

Za rad s podacima Sentinel satelita vrijedi istaknuti ESA-in SNAP-IGS (Sentinel Application Platform - InSAR Geocoding System) - programski alat koji je razvila Europska svemirska agencija (ESA), s posebnim naglaskom na Interferometrijsku sintetičku radarsku aperturu (InSAR) i geokodiranje [26]. SNAP-IGS je prvi put objavljen 2014. godine i osmišljen je za obradu i analizu podataka s ESA-inih Sentinel satelita, posebno Sentinel-1. Alat omogućuje precizno geokodiranje radarskih podataka kako bi se točno mapirali na zemljopisne koordinate [26]. Koristi se za precizno mjerenje deformacija tla i građevinskih struktura, te pomaže u praćenju i analizi potresa i drugih geoloških događaja [26]. Primjenjuje se u praćenju prirodnih resursa, kao što su šume, vodeni resursi i poljoprivredno zemljište, ali omogućuje i praćenje urbanog razvoja i promjena u infrastrukturi [26].

Još jedan popularan programski alat je *GNSStk Apps*, paket otvorenog koda čiji je razvoj financirao Laboratorij za svemirske i geofizičke znanosti, koji je dio Laboratorija za primijenjena istraživanja na Sveučilištu Texas u Austinu, a pruža širok raspon funkcija za obradu GNSS podataka, uključujući precizno određivanje položaja točke, diferencijalni GNSS i ispravak kašnjenja u ionosferi [27]. Biblioteka GNSStk uključuje konverzije između reprezentacija vremena, efermidske izračune, modele atmosferskog kašnjenja, strukture podataka koje sadrže promatranja mapirana prema epohama, satelitima, izvorima i vrstama promatranja [27]. Programska podrška

je izvedena modularno, s lako prilagodljivim funkcijama, što je čini fleksibilnim alatom za širok raspon primjena [27].

Sljedeći programski alat vrijedan spomena je *Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning* (CSRS-PPP) razvijen od strane *Natural Resources Canada* [28]. PPP je tehnika obrade GPS podataka koja omogućuje visokoprecizno određivanje položaja bez potrebe za referentnom stanicom. Programska podrška uključuje algoritme za ispravak kašnjenja u ionosferi, što je čini moćnim alatom za aplikacije kao što su geodezija, geofizika i navigacija [28-30].

*GNSS Data Preprocessing Software (GDPS)* je alat otvorenog koda namijenjen za predobradu GNSS podataka koji je napisan u Pythonu [31]. Radi na Windows i Linux operativnim sustavima i podržava obradu podataka u formatima RINEX od verzije 2.11 do 4.01. GDPS nudi četiri glavna funkcionalna modula: prevođenje formata, uređivanje podataka, provjeru kvalitete i dodatne alate, a korisnicima omogućuje prilagođavanje postavki obrade putem jednostavnog grafičkog sučelja [31].

Uz navedene programske alate, dostupni su i drugi komercijalni i programski paketi otvorenog koda za obradu GPS podataka i ispravak kašnjenja u ionosferi. Neki primjeri uključuju komercijalni programski paket *Trimble Business Center* [32] i programski paket otvorenog koda GNSS-SDR (*Software Defined Radio*) [33].

U pogledu performansi, izravno uspoređivanje ovih programskih alata može biti izazovno zbog različitih značajki i mogućnosti koje nude za specifične primjene. Općenito, RTKLIB je poznat po svojoj fleksibilnosti i jednostavnosti u korištenju, dok GAMIT nudi veću preciznost i moćnije analitičke mogućnosti [22]. RTKLIB, kao programska podrška otvorenog koda, široko se koristi za obradu GPS podataka u stvarnom vremenu i naknadnu obradu [20, 22]. Iako je vrlo funkcionalan, može imati strmiju krivulju učenja i zahtijevati određenu tehničku stručnost za optimalnu upotrebu [31]. S druge strane, GAMIT je u znanstvenoj zajednici cijenjen zbog svoje preciznosti u analizi GPS podataka i pruža različite mogućnosti obrade, uključujući precizno određivanje položaja [23]. Međutim, njegova implementacija i korištenje mogu biti zahtjevni u usporedbi s nekim drugim programskim alatima [31].

Program Bern GNSS poznat je po svojoj točnosti i pouzdanosti, a njegovo korisničko sučelje olakšava korištenje i korisnicima s manje tehničkog znanja [24]. Odabir odgovarajućeg programskog alata ovisit će o specifičnim potrebama i zahtjevima korisnika, razini tehničke stručnosti i vrsti analize koja se provodi. RTKLIB je često izbor za one koji traže svestrani alat otvorenog koda [22], dok GAMIT nudi napredne značajke i visoku preciznost za znanstvene

analize [23]. Bern GNSS može biti odgovarajuća opcija za korisnike koji preferiraju intuitivno korisničko sučelje i raznovrsne mogućnosti obrade [24].

### **3. SATELITSKA PROCJENA POLOŽAJA I ISPRAVCI KAŠNJENJA U IONOSFERI**

Postupak za procjenu položaja pomoću satelita uključuje korištenje GPS promatranja i podataka satelitskih efemerida za određivanje točne lokacije satelita u svemiru, te istraživanja u ovom području imaju za cilj razviti i poboljšati metode koje se koriste za procjenu položaja pomoću satelita u orbiti korištenjem GPS promatranja i podataka satelitskih efemerida [1].

GPS promatranja se sastoje od vremena prijena signala sa satelita i vremena prijema signala od strane GPS prijemnika [34]. Usporedbom vremena odašiljanja i prijema signala, GPS prijemnik može odrediti udaljenost između satelita i prijemnika. Međutim, sama udaljenost nije dovoljna za određivanje točnog položaja satelita. GPS prijemnik također mora znati lokaciju satelita u svemiru, koju dobiva iz vrijednosti satelitskih efemerida [34].

#### **3.1. Postupak za procjenu položaja pomoću satelita**

Satelitski efemeridni podaci pružaju informacije o orbiti svakog GPS satelita, uključujući njegovu lokaciju, brzinu i ubrzanje [4, 34]. Ove informacije su ključne za određivanje položaja pomoću satelita u bilo kojem trenutku [34]. Podatke o efemeridama svaki GPS satelit prenosi u navigacijskoj poruci koja se kontinuirano emitira [4]. GPS prijemnici prikupljaju te podatke iz navigacijske poruke i koriste ih za izračunavanje položaja [1, 4].

Postupak za procjenu položaja putem satelita uključuje nekoliko koraka [4, 34]. Prvo, GPS prijemnik prikuplja GPS opažanja s najmanje četiri satelita [4]. Ovo je neophodno jer prijemnik mora znati udaljenost između sebe i svakog satelita kako bi odredio svoj položaj [1, 34]. Nakon što GPS prijemnik prikupi GPS opažanja s najmanje četiri satelita, može početi procjenjivati svoj položaj [4, 34]. Mjerenje vremena koje je potrebno signalu da putuje od satelita do prijemnika naziva se pseudodomet i pod utjecajem je grešaka kao što su atmosferska kašnjenja i pristranost sata prijemnika [1, 34]. Kako bi ispravio te pogreške i dobio točne pseudodomete, GPS prijemnik mora moći pratiti više GPS satelita istovremeno [4, 34]. To prijemniku omogućuje korištenje signala s više satelita za rješavanje pristranosti sata prijemnika i procjenu pravih pseudodometata [1, 4]. Nakon što se dobiju točni pseudodometi, oni se mogu koristiti u kombinaciji sa satelitskim efemeridnim podacima za procjenu položaja prijemnika [1, 4]. Efemeridni podaci daju informacije o lokaciji i kretanju satelita, dok pseudodometi daju udaljenost između satelita i prijemnika [4, 34]. Postoje različite tehnike koje se koriste za procjenu položaja satelita korištenjem

pseudodometama i podataka o efemeridama, uključujući procjenu najmanjih kvadrata i Kalmanovo filtriranje [35]. Ove tehnike uključuju minimiziranje razlike između opaženih pseudodometama i očekivanih pseudodometama, na temelju podataka satelitskih efemerida [35].

Procjena metodom najmanjih kvadrata je matematička metoda koja se koristi za procjenu nepoznatih parametara u modelu minimiziranjem zbroja kvadrata reziduala između promatranih podataka i predviđenih vrijednosti iz modela [36]. U kontekstu satelitskog određivanja položaja, nepoznati parametri odnose se na položaj i pristranost sata satelita, dok se promatrani podaci sastoje od mjerenja dometa između satelita i GPS prijemnika [36].

Cilj procjene metodom najmanjih kvadrata je pronaći položaj i pristranost sata koji minimiziraju razliku između izmjerenih raspona i raspona predviđenih modelom. To se postiže definiranjem objektivne funkcije koja mjeri razliku između promatranih i predviđenih raspona, a zatim pronalaženjem vrijednosti nepoznatih parametara koji minimiziraju tu funkciju. Funkcija cilja obično je zbroj kvadrata reziduala, koji se računa prema izrazu (3.1):

$$S = \sum (\rho - \rho_{\text{predviđeno}})^2 \quad (3.1)$$

gdje je

S zbroj kvadrata reziduala za sva dostupna mjerenja,

$\rho$  je izmjereni raspon, a

$\rho_{\text{predviđeno}}$  je predviđeni raspon iz modela [1].

Kako bismo minimizirali funkciju cilja, uzimamo parcijalne derivacije od S u odnosu na nepoznate parametre (tj. položaj i pristranost sata) i postavljamo ih na nulu. To nam daje sustav linearnih jednadžbi koje se mogu riješiti korištenjem standardnih metoda linearne algebre kako bi se dobile vrijednosti nepoznatih parametara koji minimiziraju funkciju cilja. Procijenjen položaj satelita koja daje najmanju vrijednost S smatra se najboljim rješenjem. [36]

Nakon što smo procijenili položaj i pristranost sata satelita korištenjem metode najmanjih kvadrata, možemo upotrijebiti ove informacije za izračun ionosferskog kašnjenja i drugih ispravaka koje je potrebno primijeniti na GPS mjerenja kako bismo dobili točne položaje [37-40].

Kalmanovo filtriranje je algoritam koji se koristi za procjenu stanja sustava na temelju mjerenja i matematičkog modela sustava. Kalmanov filter je rekurzivni algoritam koji procjenjuje stanje sustava u svakom vremenskom intervalu na temelju mjerenja u tom vremenskom intervalu i procijenjenog stanja u prethodnom vremenskom intervalu [35-37].

Kalmanov filter funkcionira održavajući vjerojatnost procjene stanja sustava, koja se ažurira u svakom vremenskom intervalu na temelju mjerenja i modela sustava. Procjena se sastoji od vektora srednje vrijednosti i matrice kovarijance koji predstavljaju očekivanu vrijednost odnosno nesigurnost stanja. Filter ažurira procjenu koristeći proces u dva koraka: predviđanje i ispravak [35-37].

U koraku predviđanja, filter koristi model sustava za predviđanje stanja u sljedećem vremenskom intervalu na temelju procjene trenutnog stanja. Predviđanje je predstavljeno vektorom srednje vrijednosti i matricom kovarijance koja obuhvaća očekivanu vrijednost i nesigurnost predviđanja [37].

U koraku ispravka, filter koristi mjerenje za ažuriranje predviđene procjene stanja. Mjerenje se uspoređuje s predviđenim mjerenjem koje se dobiva primjenom mjernog modela na predviđenu procjenu stanja. Razlika između mjerenja i predviđenog mjerenja naziva se rezidual mjerenja, koji se koristi za ispravljanje procjene predviđenog stanja. Ispravak je predstavljen vektorom srednje vrijednosti i matricom kovarijance koja obuhvaća ažuriranu procjenu i smanjenu nesigurnost [37].

Kalmanov filter je optimalan procjenitelj u smislu da minimizira srednju kvadratnu pogrešku procjene. Također je učinkovit estimator u smislu da može obraditi veliki broj mjerenja i nelinearnih modela sustava. Međutim, to zahtijeva poznavanje modela sustava i statistike buke mjerenja, što može biti teško dobiti u praksi [37].

U kontekstu satelitskog određivanja položaja, Kalmanov filter može se koristiti za procjenu položaja, brzine i pristranosti sata satelita na temelju GPS mjerenja i podataka satelitskih efemerida. Filter se također može koristiti za procjenu ionosferskog kašnjenja i drugih izvora pogrešaka koji utječu na GPS mjerenja [37].

Metode najmanjeg kvadrata i Kalmanovo filtriranje se razlikuju u pristupu i pretpostavkama. Metoda najmanjih kvadrata je jednostavnija i brža, ali pretpostavlja da su pogreške u mjerenjima normalno distribuirane i nezavisne, dok je Kalmanovo filtriranje sofisticiranije i može se nositi sa složenijim modelima i pogreškama, ali zahtijeva više računalne snage i može biti teže za implementaciju [35].

### **3.2. Pregled utjecaja ionosferskog kašnjenja na točnost satelitskog određivanja položaja**

Ionosfera je sloj Zemljine atmosfere koji se proteže od oko 60 km do preko 1000 km visine. Ovaj sloj je ioniziran Sunčevim ultraljubičastim zračenjem, što dovodi do stvaranja slobodnih elektrona



i pozitivnih iona. Ove slobodne nabijene čestice u ionosferi mogu uzrokovati kašnjenje i izobličenje GPS signala dok prolaze kroz ovaj sloj [4].

Ionosfera različito utječe na različite frekvencije GNSS signala, što je posljedica disperzivne prirode ionosfere [38]. U kontekstu satelitske navigacije, to znači da više frekvencije prolaze kroz ionosferu s manjim utjecajem, dok niže frekvencije trpe veća kašnjenja i smetnje [38].

Učinak kašnjenja u ionosferi na GPS signale obrnuto je proporcionalan kvadratu frekvencije signala, što znači da je učinak kašnjenja veći na frekvenciji L2 (1227,60 MHz) nego na frekvenciji L1 (1575,42 MHz) [4]. Kašnjenje može varirati od nekoliko metara do nekoliko desetaka metara, ovisno o gustoći elektrona u ionosferi. Ovo kašnjenje može uzrokovati značajne pogreške u GPS određivanju položaja, posebno u područjima s visokom ionosferskom aktivnošću [39].

Višefrekventni GNSS prijemnici imaju značajnu prednost jer mogu pratiti razlike u ionosferskim smetnjama na različitim frekvencijama (L1, L2, L5), čime se omogućuje ispravak ionosferskih pogrešaka [38]. L1 frekvencija (1575.42 MHz) ima manje ionosferskih smetnji u odnosu na niže frekvencije poput L2 (1227.60 MHz) i L5 (1176.45 MHz) [38]. Više frekvencije (poput L1) su manje pogođene ionosferskim kašnjenjem u usporedbi s nižim frekvencijama (L2, L5) [38]. Razlika između ovih frekvencija može se koristiti za procjenu i ispravak ionosferskog kašnjenja.

Dvofrekventni prijemnici (koji prate L1 i L2 frekvencije) imaju prednost nad jednofrekventnim prijemnicima jer mogu koristiti razlike u kašnjenju između signala različitih frekvencija kako bi modelirali i uklonili dio ionosferske pogreške.

Razlika između frekvencija (npr. razlika između L1 i L2 je 347.82 MHz, a između L1 i L5 je 398.97 MHz) je dovoljno velika da omogući procjenu ionosferskog kašnjenja pomoću modela kao što je Klobucharev model [38].

Postoji nekoliko kombinacija frekvencija (L1/L2, L1/L5, L2/L5), koje omogućuju prijemnicima da preciznije procijene ionosfersko kašnjenje [38].

Višefrekventni prijemnici mogu koristiti sve tri frekvencije (L1, L2, L5) za još preciznije modeliranje i ispravljanje ionosferskih utjecaja [38].

### **3.3. Razvoj modela ispravka s aspekta integracije u programsku podršku**

Integracija modela ispravka u programsku podršku važan je aspekt postizanja točnog i pouzdanog određivanja položaja u Globalnim satelitskim navigacijskim sustavima (GNSS). Razvoj programske podrške zahtijeva razvoj algoritama koji se mogu koristiti za implementaciju modela ispravka u stvarnom vremenu. Jedan od najčešće korištenih modela ispravka je tehnika

diferencijalnog ispravka, koja koristi referentnu stanicu za procjenu pogrešaka koje unose različiti čimbenici, kao što su ionosfera, troposfera i pogreške satelitskog sata. Procijenjene pogreške zatim se emitiraju korisničkim prijemnicima, koji primjenjuju ispravke na svoja mjerenja kako bi se postiglo točno određivanje položaja [39-42].

Točnost modela ispravka utječe na postizanje točnosti određivanja položaja. Razvijeno je nekoliko tehnika za poboljšanje točnosti modela ispravka, kao što je upotreba više referentnih stanica, uključivanje regionalnih modela ionosfere i upotreba algoritama strojnog učenja. IGS-ova usluga u stvarnom vremenu za globalno modeliranje ukupnog sadržaja elektrona u ionosferi primjer je modela ispravka koji koristi globalnu mrežu referentnih stanica i algoritama strojnog učenja za procjenu ispravaka kašnjenja u ionosferi u stvarnom vremenu. Pokazalo se da model poboljšava točnost GNSS određivanja položaja smanjenjem grešaka kašnjenja u ionosferi [40-44].

Integracija modela ispravka u programsku podršku uključuje nekoliko koraka. Prvo, važno je odrediti optimalni format podataka za ulazne i izlazne podatke. U slučaju ispravaka kašnjenja u ionosferi, izlazni podaci mogu uključivati ispravke koji se primjenjuju na neobrađena GPS mjerenja, a ulazni podaci mogu uključivati podatke GPS promatranja, podatke o ionosferi i druge pomoćne podatke [44]. Ulazni i izlazni formati podataka trebaju biti kompatibilni sa programskom platformom koja se koristi za obradu GPS mjerenja, kao što je popularni programski paket otvorenog koda, RTKLIB [22].

Nakon što se odrede ulazni i izlazni formati podataka, model ispravka se može implementirati kao modul unutar programske platforme. To može uključivati razvoj novog koda ili modificiranje postojećeg koda [42]. Važno je osigurati da je modul ispravka kompatibilan s cjelokupnom arhitekturom programske platforme i da ne utječe značajno na izvedbu ili stabilnost programa.

U članku "Performance Assessment of PPP Surveys with Open Source Software Using the GNSS GPS–GLONASS–Galileo Constellations" [45], autori su predložili dva modela za precizno određivanje položaja točaka (PPP) koristeći *open-source* program. Prvi model se temelji na kombinaciji GPS i GLONASS satelitskih konstelacija. PPP pristup temelji se na nediferenciranim i nekombiniranim opažanjima satelita na frekvencijama L1 i L2. Autori su koristili program otvorenog koda RTKLIB za procjenu položaja prijemnika, a performanse modela ocijenili su uspoređujući rezultate s onima dobivenim iz komercijalnog programskog paketa. Drugi model [45] koji su predložili autori se temelji na kombinaciji GPS-a, GLONASS-a i Galileo satelitskih konstelacija. Pristup PPP je koristio nediferencirana (bez razlike između satelita) i nekombinirana (bez kombiniranja signala s različitih frekvencija) opažanja satelita na frekvencijama L1, L2 (GPS frekvencije) i E1 (frekvencija sustava Galileo) kako bi izračunao položaj prijemnika [45]. Za

procjenu položaja prijemnika ponovno je korišten računalni program otvorenog koda RTKLIB, a performanse modela ocijenjene su usporedbom rezultata s onima dobivenim iz komercijalnog programskog paketa [45]. Rezultati su pokazali da je PPP pristup koji koristi kombiniranu GPS i GLONASS konstelaciju postigao subdecimetarsku točnost (preciznija - manje od 10 cm), dok je PPP pristup koji koristi kombiniranu GPS, GLONASS i Galileo konstelaciju postigao decimetarsku točnost (unutar 10 cm) [45]. Autori su također istaknuli prednosti korištenja računalnog programa otvorenog koda za PPP istraživanja, uključujući fleksibilnost prilagodbe računalnog programa i potencijalne uštede troškova u usporedbi s komercijalnim računalnim programskim paketima. [45]

Model za izvođenje globalne izrade karata ionosfere i procjene diferencijalnog kodnog odstupanja pomoću računalnog programa GIMAS je usmjeren na rješavanje izazova u modeliranju ionosfere tijekom razdoblja niske i visoke solarne aktivnosti. Računalni program GIMAS se koristi za generiranje karata ionosfere s prostornom rezolucijom od 2,5 stupnjeva zemljopisne širine i 5 stupnjeva zemljopisne dužine. Model koristi skup ionosferskih modela, kao što su Međunarodna referentna ionosfera (IRI), NeQuick i Klobuchar modeli, za procjenu ukupnog sadržaja elektrona (TEC) u ionosferi. Predloženi model koristi kombinaciju računalnog programa GIMAS i modificirane verzije algoritma za procjenu pristranosti diferencijalnog koda (DCB). Algoritam procjenjuje DCB-ove različitih satelitskih sustava, uključujući GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou. Model primjenjuje postupak u dva koraka za procjenu DCB-ova. U prvom koraku, DCB-ovi GPS i GLONASS sustava procjenjuju se pomoću računalnog programa GIMAS. U drugom koraku se procjenjuju DCB-ovi sustava Galileo i BeiDou koristeći procijenjene DCB-ove GPS-a i GLONASS-a kao reference. Ovaj model nudi rješenje za izazove u modeliranju ionosfere tijekom razdoblja niske i visoke solarne aktivnosti poboljšanjem točnosti mapiranja ionosfere i DCB procjene. Rezultati pokazuju da predloženi model ima veću točnost u usporedbi s drugim modelima ionosfere. Model je također koristan u poboljšanju točnosti GNSS aplikacija koje se oslanjaju na precizne modele ionosfere, kao što su PPP, atmosferska tomografija i daljinska detekcija [9, 46].

Mikesell i suradnici [47] predlažu računalni programski paket pod nazivom *IonoSeis* koji modelira koseizmičke ionosferske poremećaje uzrokovane potresima. Paket uključuje četiri različita modela koji omogućuju procjenu vertikalnog ukupnog sadržaja elektrona (VTEC) i njegovih prostornih gradijenata. Ovi modeli koriste GPS podatke prikupljene tijekom i nakon potresa za procjenu ionosferskih poremećaja. Modeli uključuju jednoslojni model, dvoslojni model, model tanke ljuske i generalizirani model inverzije. Paket uključuje i alate za obradu GPS podataka i

vizualizaciju rezultata. Cilj je paketa pružiti istraživačima alat za proučavanje učinaka potresa na ionosferu i poboljšati praćenje i predviđanje potresa [47].

## **4. IONEX MODEL ZAPISA I ISPRAVAK IONOSFERSKOG KAŠNJENJA**

Jedan od načina ispravljanja ionosferskog kašnjenja je korištenje ionosferskih modela, koji daju procjene ukupnog sadržaja elektrona (Total electron content - TEC) duž putanje signala. Format Ionosphere Map Exchange (IONEX) se koristi za razmjenu informacija o ionosferi između različitih organizacija i zemalja. IONEX datoteke sadrže TEC podatke u mrežnom formatu, koji se mogu koristiti za interpolaciju TEC vrijednosti u bilo kojoj točki u prostoru i vremenu. TEC je broj slobodnih elektrona prisutnih u okomitom stupcu ionosfere iznad jedinice površine. TEC se obično izražava u jedinicama TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ ). Vrijednosti VTEC, koje predstavljaju okomiti TEC, izvedene su integracijom gustoće elektrona duž linije vidljivosti između GPS prijemnika i satelita. Vrijednosti VTEC, koje predstavljaju okomiti TEC, izvedene su integracijom gustoće elektrona duž linije vidljivosti između GPS prijemnika i satelita [40].

### **4.1. Uvod u IONEX zapis i njegovu upotrebu u satelitskom određivanju položaja**

Format IONEX (IONosphere map EXchange) je standardni format datoteke koji se koristi za predstavljanje i razmjenu podataka o ionosferi, posebno karata ukupnog sadržaja elektrona (TEC). Ove su karte imaju različite primjene, uključujući satelitsku navigaciju, radio komunikaciju i istraživanje svemirskog vremena. Format IONEX je definirana Međunarodna služba GNSS (IGS) i naširoko se koristi u znanstvenim i inženjerskim zajednicama. Temelji se na globalnim kartama ionosfere stvorenim promatranjima GPS-a i drugih GNSS satelita. Ove karte se generiraju pomoću različitih tehnika, uključujući zemaljske stanice za praćenje ionosfere i satelitska mjerenja.

Svaki zapis karte sadrži TEC vrijednosti za određenu epohu. Podaci su obično organizirani u obliku mreže, s koordinatama zemljopisne širine i dužine. IONEX model se može koristiti u GNSS aplikacijama za ispravak kašnjenja u ionosferi. Podržava ga većina GNSS programa i može se lako ugraditi u tijekove rada GNSS obrade. Model IONEX također se koristi u aplikacijama u stvarnom vremenu, kao što je kinematičko određivanje položaja u stvarnom vremenu (RTK), kako bi se osigurali ispravci kašnjenja ionosfere u gotovo stvarnom vremenu.

### **4.2. Zapis zaglavlja IONEX datoteke**

Zaglavlje datoteke je organizirano u tablicu koja sadrži dva stupca: u lijevom stupcu, dužine 60 znakova, su vrijednosti, a u desnom stupcu, dužine 25 znakova, su nazivi podataka za svaki red. Ako je u jednom redu tablice više podataka, nazivi u desnom stupcu su odvojeni znakom „/“, a

vrijednosti u lijevom stupcu moraju zadovoljavati određenu dužinu i poravnanje. Prvi red sadrži tri vrijednosti: brojčanu verziju IONEX formata, tip datoteke, te teoretski model ili satelistski sustav. Verzija IONEX formata sadrži tačno jedno mjesto iza decimalne točke, zauzima 8 znakova i poravnata je desno. Nakon toga je prostor ispunjen razmacima do 20-og znaka. Druga vrijednost zauzima znakove od 21 do 40 i sadrži naziv tipa datoteke, te je poravnata lijevo, a treća vrijednost zauzima znakove od 41 do 60, također je poravnata lijevo, i sadrži naziv teoretskog modela ili satelitskog sustava. Drugi obavezni red također ima tri vrijednosti: naziv programa koji generira datoteku, agenciju koja izvršava program, te datum kreiranja datoteke.

Zaglavlje mora sadržavati sve obavezne redove, a može sadržavati i opcionalne redove, kao što su opis, komentari i broj satelita. Obavezni redovi su: IONEX VERSION / TYPE, PGM / RUN BY / DATE, EPOCH OF FIRST MAP, EPOCH OF LAST MAP, INTERVAL, # OF MAPS IN FILE, MAPPING FUNCTION, ELEVATION CUTOFF, OBSERVABLES USED, BASE RADIUS, MAP DIMENSION, HGT1 / HGT2 / DHGT, LAT1 / LAT2 / DLAT, LON1 / LON2 / DLON, END OF HEADER. Na slici 4.1 je prikazano zaglavlje IONEX datoteke.

```

----|----1|0---|---2|0---|---3|0---|---4|0---|---5|0---|---6|0---|---7|0---|---8|
      1.1          IONOSPHERE MAPS          GNSS          IONEX VERSION / TYPE
ionpgm v1.0      aiub                      29-jan-96 17:29  PGM / RUN BY / DATE
example of an ionex file containing 2-dimensional tec maps COMMENT
global ionosphere maps for day 288, 1995  DESCRIPTION
modeled by spherical harmonics ...      DESCRIPTION
      1995      10      15      0      0      0      EPOCH OF FIRST MAP
      1995      10      16      0      0      0      EPOCH OF LAST MAP
      21600                                           INTERVAL
      5                                               # OF MAPS IN FILE
      COSZ                                           MAPPING FUNCTION
      20.0                                           ELEVATION CUTOFF
double-difference carrier phase          OBSERVABLES USED
      80                                               # OF STATIONS
      24                                               # OF SATELLITES
      G      80      24                               SYS / #STA / #SAT
      6371.0                                           BASE RADIUS
      2                                               MAP DIMENSION
      400.0 400.0 0.0                                HGT1 / HGT2 / DHGT
      85.0 -85.0 -5.0                                LAT1 / LAT2 / DLAT
      0.0 355.0 5.0                                LON1 / LON2 / DLON
      -1                                               EXPONENT
tec values in 0.1 tec units; 9999, if no value available COMMENT
height values in 0.1 km                      COMMENT
                                           END OF HEADER

```

*Slika 4.1: Zaglavlje IONEX datoteke [5]*

### 4.3. Zapis podataka u IONEX datoteci

Nakon zaglavlja slijedi odjeljak s podacima, koji sadrži stvarne podatke TEC karte. Svaka TEC karta je predstavljena nizom vrijednosti organiziranih u obliku mreže. Mreža je definirana

rasponima zemljopisne širine i dužine navedenim u zaglavlju. Svaka TEC karta počinje redom koji označava redni broj karte, te u desnom stupcu sadrži tekst „START OF TEC MAP“. Drugi red karte sadrži epohu, nakon čega slijedi opcionalna vrijednost eksponenta koji je potrebno primijeniti na podatke kako bi se dobile stvarne vrijednosti. Sljedeći redovi predstavljaju vrijednosti za svaku zemljopisnu širinu. Obavezan je red s oznakom „LAT/LON1/LON2/DLON/H“ u desnom stupcu, koji kao vrijednosti sadrži zemljopisnu širinu, raspon zemljopisnih dužina, razmak zemljopisnih dužina i visinu. Same vrijednosti su organizirane u tablicu, gdje svaka ćelija sadrži 5 znakova, sve do zadnjeg vrijednosti, nakon koje je ostatak reda prazan. Karta završava redom koji počinje rednim brojem karte, a u desnom stupcu sadrži tekst „END OF TEC MAP“. Zadnji red datoteke u desnom stupcu sadrži tekst „END OF FILE“ [5].

```

1
1995 10 15 0 0 0
85.0 0.0 355.0 5.0 400.0
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
80.0 0.0 355.0 5.0 400.0
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
...
-85.0 0.0 355.0 5.0 400.0
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
...
1
2
1995 10 15 6 0 0
85.0 0.0 355.0 5.0 400.0
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
...
5
1
85.0 0.0 355.0 5.0 400.0
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000

```

Slika 4.2: Podaci u IONEX datoteci [5]

## **5. RAZVOJ RAČUNALNE PROGRAMSKE PODRŠKE ZA INTEGRACIJU ODABRANOG MODELA ISPRAVAKA ZA ODREĐIVANJE POLOŽAJA**

Klobucharev model je algoritam koji se koristi za izračun ionosferskog kašnjenja GPS signala. Koristi skup koeficijenata koji se prenose u poruci GPS signala za modeliranje kašnjenja u ionosferi na temelju lokacije GPS korisnika i trenutnog vremena. Model je jednostavan i računalno učinkovit, ali ima neka ograničenja, kao što je manja preciznost tijekom razdoblja visoke aktivnosti ionosfere.

U razvoju programske za određivanje GPS ionosferskih ispravaka kašnjenja, Klobucharev model se može koristiti kao zadani model ispravka u računalnog programu. Za određivanje GPS ionosferskih ispravaka kašnjenja na danoj prostornoj mreži u razdoblju od 24 sata proizvoljno odabranog dana primijenjeni su sljedeći koraci:

1. Izdvojeni su potrebni podatci za implementaciju Klobucharevog modela, uključujući alfa i beta koeficijente iz navigacijske datoteke.
2. Definirana je funkcija koja koristi Klobucharev model za izračunavanje faktora ispravka kašnjenja u ionosferi za zadani skup GPS koordinata i doba dana. Funkcija uzima u obzir kao ulaz alfa i beta parametre, GPS koordinate i vrijeme.
3. Funkcija je iskorištena za izračunavanje faktora ispravka ionosferskog kašnjenja za danu prostornu mrežu tijekom razdoblja od 24 sata proizvoljno odabranog dana. Rezultati su pohranjeni u posebnu datoteku u zapisnik IONEX.
4. Datoteka je učitana pomoću programa RTKLIB kako bi se provjerila točnost formata.

### **5.1. Proces razvoja programske podrške: izbor programskog jezika i razvojnog okruženja**

Proces razvoja programske podrške za određivanje ispravaka kašnjenja GPS-a u ionosferi na danoj prostornoj mreži uključuje odabir programskog jezika i razvojnog okruženja. Korišten je programski jezik R zbog njegove prikladnosti za zadatke statističkog računanja i analize podataka.

R je programski jezik otvorenog koda koji se široko koristi u zajednici znanosti o podacima za statističku analizu, strojno učenje i vizualizaciju podataka. Široko je podržan, a dostupni su mnogi paketi za različite zadatke, uključujući analizu GPS podataka.

Proces razvoja programske podrške je uključivao sljedeće korake:



1. Postavljanje R okruženja: Instalirana je najnovija verzija R i RStudio na računalo i konfigurirani su potrebni paketi i biblioteke potrebni za aplikaciju.
2. Priprema podataka: Pripremljeni su potrebni GPS podatci za odabrano razdoblje [43] i obrađeni su pomoću programskih alata za analizu GPS podataka kako bi izdvojili potrebne podatke, kao što su klobucharevi koeficijenti.
3. Izvedba algoritma: Napravljen je algoritam za određivanje ispravaka kašnjenja GPS signala a u ionosferi na danoj prostornoj mreži koristeći zadani model ispravka.
4. Kodiranje: implementiran je algoritam u R koristeći RStudio IDE.
5. Primjena algoritma na prostornu rešetku: Klobucharev algoritam primijenjen je na svaku točku zadane prostorne rešetke za zadano vrijeme.
6. Izlazni podaci: Dobiveni ispravci zapisani su u izlaznu datoteku IONEX formatu.

Klobucharev model daje vrijednosti ispravaka kašnjenja u sekundama. Koeficijenti Klobucharevog modela su dobiveni iz podataka o emitiranim GPS efemeridama, koji su dostupni iz GPS navigacijske poruke koju odašilju GPS sateliti. Koeficijenti se prenose u obliku parametara točke ionosferske mreže (IGP), koji se interpoliraju kako bi se odredili ispravci kašnjenja ionosfere za danu lokaciju i vrijeme.

## **5.2. Ulazni i izlazni podaci**

Ulazni podaci su navigacijska datoteka u RINEX formatu, i datum. RINEX format [48] omogućuje jednostavnu razmjenu podataka između različitih vrsta GPS prijemnika i programa za obradu podataka.

Izlazna datoteka algoritma se sprema u obliku IONEX zapisa. IONEX zapis se koristi u razmjeni i pohrani informacija o totalnom elektronskom sadržaju (TEC) ionosfere [49]. Razvijen kako bi podržao razmjenu dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih TEC karata između različitih geodetskih i geofizičkih zajednica, IONEX format omogućuje precizno predstavljanje i analizu ionosferskog TEC-a [49].

## **5.3. Struktura i učitavanje navigacijske datoteke**

Za pokretanje algoritma ovog rada potrebno je prvo učitati i obraditi navigacijsku datoteku, koja sadrži korekcijske parametre ION ALPHA i ION BETA. Alfa koeficijenti predstavljaju vertikalno kašnjenje na referentnoj visini (obično 450 km) u ionosferi i izraženi su u metrima. Beta koeficijenti predstavljaju brzinu promjene ionosferskog kašnjenja u odnosu na visinu iznad referentne visine. Izraženi su u metrima po kilometru. ION BETA daje točniji prikaz kašnjenja,

posebno za signale koji putuju kroz različite visine u ionosferi. Ovo potpoglavlje prikazuje strukturu navigacijske datoteke i prolazi kroz najvažnije dijelove programskog koda za učitavanja i obradu ulaznih podataka za daljnju analizu u algoritmima za određivanje položaja, a odnosi se na ispravak ionosferskog kašnjenja i transformaciju podataka. Pomoću alfa i beta koeficijenata iz zaglavlja, izračunava se ionosfersko kašnjenje. Ovaj ispravak se primjenjuje na pseudodomet kako bi se poboljšala točnost procjene udaljenosti između satelita i prijemnika. Za obradu podataka i implementaciju algoritma je korišten programski jezik R.

### 5.3.1. Struktura navigacijske datoteke

Navigacijska datoteka se sastoji od zaglavlja i tijela datoteke. Iz zaglavlja datoteke je potrebno dohvatiti alpha i beta koeficijente. Kraj zaglavlja je označen s "END OF HEADER", a nakon te oznake počinje tijelo datoteke.

Svaki red tijela datoteke sadrži informacije o jednom opažanju satelita. Podaci u svakom redu obuhvaćaju informacije o vremenu, pseudodometu između satelita i prijemnika, te druge relevantne informacije.

Zaglavlje i početak tijela datoteke prikazan je na slici 5.1.

```

2.11          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
teqc 2020oct7 UNAVCO Archive Ops 20220411 00:39:08UTCPGM / RUN BY / DATE
Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc|Linux 64|=+ COMMENT
1.6764D-08 1.4901D-08 -1.1921D-07 -5.9605D-08 ION ALPHA
1.0854D+05 3.2768D+04 -2.6214D+05 -6.5536D+04 ION BETA
-9.313225746155D-10-6.217248937901D-15 233472 2205 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
END OF HEADER

12 22 4 9 23 59 44.0-1.979451626539D-04-5.798028723802D-12 0.000000000000D+00
3.000000000000D+00 3.293750000000D+01 4.296964700113D-09 1.607347693420D+00
1.620501279831D-06 8.734087692574D-03 7.756054401398D-06 5.153568239212D+03
6.047840000000D+05-1.396983861923D-07 1.456903973304D+00-2.011656761169D-07
9.695117740455D-01 2.332187500000D+02 1.271579856462D+00-7.922472859938D-09
-2.035799084918D-10 1.000000000000D+00 2.204000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-1.257285475731D-08 3.000000000000D+00
5.997060000000D+05 4.000000000000D+00

2 22 4 10 0 0 0.0-6.530159153044D-04-2.273736754432D-13 0.000000000000D+00
7.400000000000D+01 1.493750000000D+01 4.545546483114D-09 3.052723178837D+00
9.238719940186D-07 2.052856772207D-02 3.376975655556D-06 5.153643352509D+03
0.000000000000D+00 3.855675458908D-07-3.001062668478D+00 7.078051567078D-08
9.658514915686D-01 3.140625000000D+02-1.425712229426D+00-7.952116951876D-09
8.071764792832D-11 1.000000000000D+00 2.205000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-1.769512891769D-08 7.400000000000D+01
-7.182000000000D+03 4.000000000000D+00

9 22 4 10 0 0 0.0-3.447276540101D-04 2.387423592154D-12 0.000000000000D+00
2.500000000000D+01-3.065625000000D+01 4.563047212089D-09-7.128057369344D-01
-1.663342118263D-06 2.116133342497D-03 9.203329682350D-06 5.153590238571D+03
0.000000000000D+00-7.078051567078D-08-8.480259540849D-01 6.332993507385D-08
9.542604288229D-01 1.981562500000D+02 1.876689205604D+00-7.968903365383D-09
1.389343586023D-10 1.000000000000D+00 2.205000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 1.396983861923D-09 2.500000000000D+01
-7.182000000000D+03 4.000000000000D+00

20 22 4 10 0 0 0.0 5.159000866115D-04-2.273736754432D-13 0.000000000000D+00
1.300000000000D+01-8.684375000000D+01 5.050210361533D-09-2.374900313114D+00
-4.399567842484D-06 4.873134079389D-03 5.071982741356D-06 5.153549106598D+03
0.000000000000D+00-9.313225746155D-08-2.032524421063D+00-1.154839992523D-07
9.422664038293D-01 2.674375000000D+02-3.126730001312D+00-8.383920652519D-09
-1.021471119801D-10 1.000000000000D+00 2.205000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00-8.381903171539D-09 1.300000000000D+01
-7.182000000000D+03 4.000000000000D+00

```

*Slika 5.1: Zaglavlje i tijelo navigacijske datoteke*

### 5.3.2. Učitavanje navigacijske datoteke

Za čitanje alfa i beta koeficijenata iz navigacijske datoteke kreirana je funkcija `parse_navigation`, koja učitava datoteku pomoću gotove `readLines` funkcije, prolazi kroz datoteku red po red dok ne stigne do kraja zaglavlja označenog tekстом „END OF HEADER“, te traži red koji završava oznakom „ION ALPHA“ i red koji završava oznakom „ION BETA“ (Slika 5.2). Na početku pronađenog reda se nalaze tražena četiri koeficijenta.

```

parse_navigation <- function(filename) {
  lines <- readLines(filename)
  alphas <- NULL
  betas <- NULL

  i <- 1
  while(!grepl("END OF HEADER", lines[i], ignore.case = TRUE)) {
    if (grepl("ION ALPHA", lines[i], ignore.case = TRUE)){
      trimmed <- strsplit(trimws(gsub(" +", " ", lines[i])), " ")[[1]]
      trimmed <- trimmed[1:4]
      trimmed <- unlist(lapply(trimmed, function(x) gsub("D", "E", x)))
      alphas <- as.numeric(trimmed)
    }

    if (grepl("ION BETA", lines[i], ignore.case = TRUE)){
      trimmed <- strsplit(trimws(gsub(" +", " ", lines[i])), " ")[[1]]
      trimmed <- trimmed[1:4]
      trimmed <- unlist(lapply(trimmed, function(x) gsub("D", "E", x)))
      betas <- as.numeric(trimmed)
    }

    i <- i+1
  }

  return(list(alphas = alphas, betas = betas))
}

```

*Slika 5.2: Programski kod „Učitavanje navigacijske datoteke“*

## 5.4. Primjena algoritma za generiranje ispravka

### 5.4.1. Pregled zadatka

Globalni položajni sustav (GPS) predstavlja tehnološki napredak za modernu navigaciju i određivanje položaja. Temeljni koncept GPS-a je precizan izračun položaja pojedinca ili objekta na Zemljinoj površini triangulacijom signala iz mreže satelita u svemiru [50].

Međutim, sam GPS ne garantira iznimnu točnost i pouzdanost. Glavni izazov s kojim se suočavaju korisnici GPS-a diljem svijeta je prisutnost pogrešaka u izračunima. Među tim pogreškama posebno se ističe ionosfersko kašnjenje. Ionosfersko kašnjenje je fenomen koji se javlja kada GPS signali prolaze kroz Zemljinu ionosferu – sloj atmosfere koji se proteže otprilike od 60 do 2000 kilometara iznad površine Zemlje. Ovaj sloj sadrži slobodne elektrone koji mogu usporiti i promijeniti putanju GPS signala, uzrokujući pogreške u određivanju položaja [51].

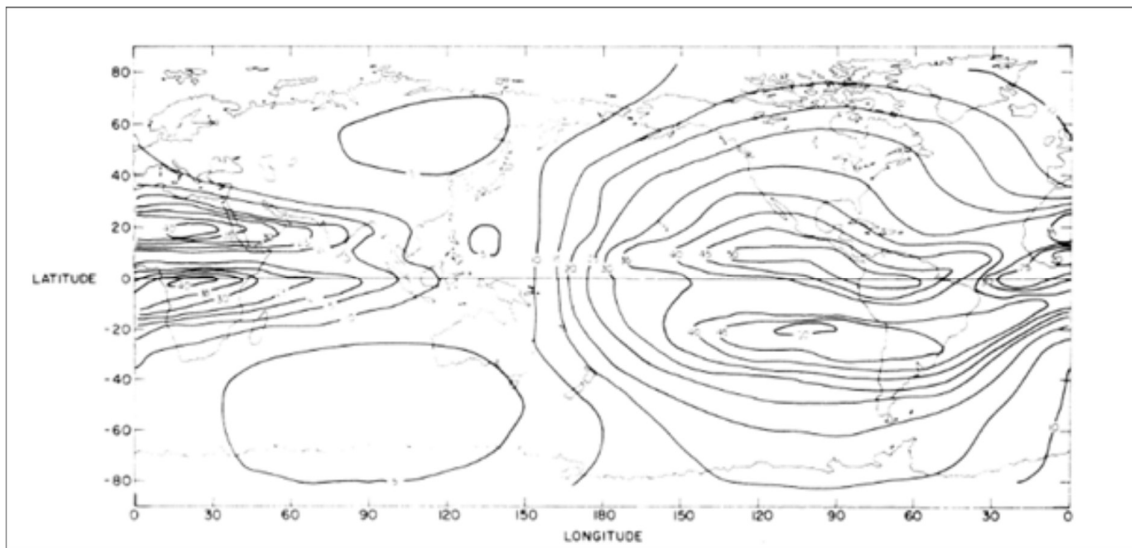
Samo kašnjenje proizlazi iz ionizacije gornjeg sloja atmosfere koje uzorkuje fluktuacije u brzini GPS signal i posljedično utječe na točnost određivanja položaja. Ukratko, kada GPS signali prolaze kroz ionosferu, njihova se brzina mijenja zbog različitih razina ionizacije u atmosferi te dolazi do kašnjenja signala. Kao rezultat toga izračunati položaj GPS prijemnika može biti pogrešan za nekoliko metara, a u nekim slučajevima i više, ovisno o opsegu ionosferskih poremećaja.

Rješavanje problema kašnjenja dodatno otežava nepredvidiva priroda ionosfere. Ionosferski uvjeti mogu varirati zbog raznih čimbenika, uključujući solarnu aktivnost, geografski položaj i doba dana. Kao rezultat toga, utjecaj ionosferskog kašnjenja fluktuiraju tijekom dana i razlikuje se između različitih regija, što ga čini izazovnim problemom za učinkovito rješavanje. Netočno određivanje položaja može dovesti do ozbiljnih problema u različitim domenama. Uobičajeni modeli za ispravak ionosferskog kašnjenja, poput Klobucharevog modela, često nisu dovoljno precizni za sve geografske regije i uvjete. Zbog toga postoji potreba za razvojem neovisnih modela ispravaka koji mogu pružiti točnije i prilagodljivije ispravke. U okviru ovog rada, cilj je razviti programski alat koji će omogućiti generiranje i primjenu ovih neovisnih ispravaka, te ih zapisati u međunarodno prihvaćenom IONEX formatu.

Predloženi algoritam ispravka koristi prostornu rešetku kako bi pružio detaljne informacije o ionosferskom kašnjenju na dnevnoj bazi. Tako generirani ispravci mogu se koristiti za naknadnu analizu ili za poboljšanje točnosti u stvarnom vremenu pri određivanju položaja pomoću GPS sustava.

#### 5.4.2. Karakteristike ionosferskog kašnjenja

Što se tiče samog ionosferskog kašnjenja ono ima nekoliko glavnih karakteristika. Najvažniji parametar je ukupni broj elektrona s kojima radioval uzajamno djeluje na putu od satelita do GPS prijemnika [3]. Ukupan broj elektrona u ionosferi se označava s mjernom jedinicom TEC (engl. Total Electron Content). Kroz razna istraživanja pokazalo se da je TEC u mnogim dijelovima svijeta najveći oko 14 sati po lokalnom vremenu [3]. Također, bitno je i napomenuti da se najveće koncentracije elektrona ne nalaze oko ekvatora već na oko 15 stupnjeva iznad ili ispod ekvatora (Slika 5.3).



Slika 5.3: Konture prosječnog mjesečnog ionosferskog kašnjenja [3]

Pored TEC-a, sljedeće značajke ionosferskog kašnjenja su važne za razumijevanje i modeliranje [51]:

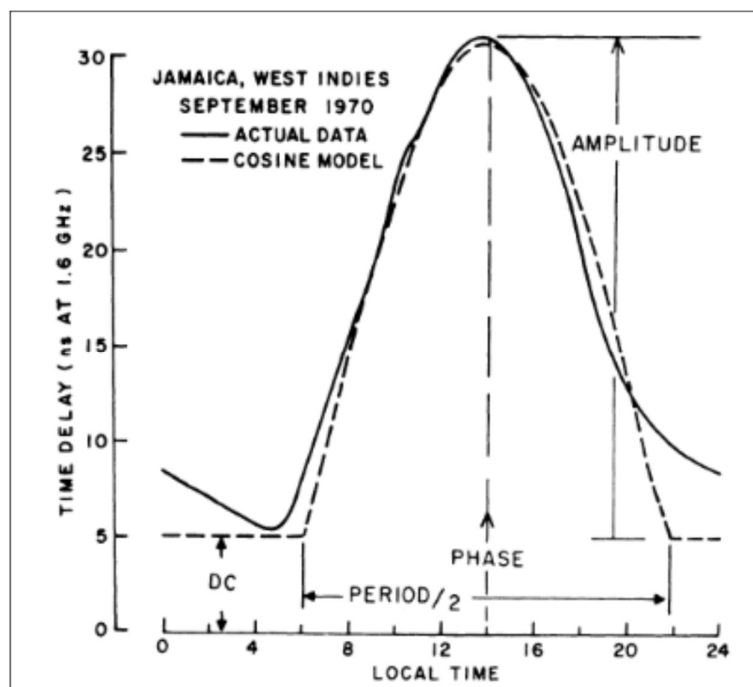
1. Slojevita struktura: Ionosfera se sastoji od slojeva (D, E, F sloj) s različitim gustoćama elektrona, što utječe na brzinu i karakteristike prolaska elektromagnetskih valova kroz nju.
2. Varijabilnost: Gustoća elektrona u ionosferi varira ovisno o vremenskim uvjetima, sezonskim promjenama, solarnoj aktivnosti i geografskom položaju. To može uzrokovati fluktuacije u ionosferskom kašnjenju tijekom dana i u različitim geografskim regijama.
3. Utjecaj na GNSS signale: Ionosfersko kašnjenje uzrokuje značajne pogreške u mjerenjima udaljenosti između satelita i GNSS prijemnika, što može dovesti do netočnosti u određivanju položaja. Upravo zbog toga se koriste modeli i ispravci ionosferskog kašnjenja kako bi se smanjile ove pogreške.

4. Utjecaj na različite GNSS sustave: Ionosfersko kašnjenje utječe na različite GNSS sustave (kao što su GPS, GLONASS, Galileo, Beidou) na različite načine zbog njihovih različitih frekvencija signala i satelitskih konstelacija.
5. Modeliranje i ispravci: Postoje različiti modeli i algoritmi za ispravljanje ionosferskog kašnjenja kako bi se poboljšala točnost GNSS određivanja položaja. Primjeri uključuju Klobucharev model, IONEX zapise i druge naprednije matematičke modele.

Ove značajke utječu na razvoj sustava i tehnika za precizno određivanje položaja temeljenog na GNSS tehnologiji.

#### 5.4.3. Geometrijske procjene Klobucharevog algoritma

Razvoj samog algoritma zahtijeva balansiranje nekoliko faktora, uključujući računalnu složenost, znanstvena saznanja o varijacijama TEC-a, ograničene koeficijente u satelitskim porukama te operativna područja korisnika [48]. Algoritam je izveden za korisnike jedno-frekvencijskog GPS-a te koristi kosinusnu reprezentaciju dnevne TEC varijacije [47]. U nastavku (Slika 5.4) je prikazana pojednostavljena kosinusna krivulja prilagođena mjesečnoj prosječnoj varijaciji TEC-a iz postaje na Jamajci.



Slika 5.4: Odnos stvarnog kašnjenja i kosinusne krivulje [3]

Sam algoritam se oslanja na četiri primarna parametra: konstantnu noćnog vremena (DC), amplitudu, fazu i period kosinusnog izraza. Daljnjom analizom koja se temelji na geografskoj širini otkriveno je da se DC i faza mogu učinkovito držati konstantnima. Stoga je DC postavljena na konstantnih 5 nanosekundi, a faza na 14 sati po lokalnom vremenu. Preostali parametri, amplituda i period, definirani su kao polinomi trećeg stupnja poravnani po geomagnetskoj širini s koeficijentima koji se prenose putem satelitskih poruka [3]. Ti koeficijenti su izračunati iz empirijskog modela globalne ionosfere za različita 10-dnevna razdoblja tijekom godine i različite uvjete sunčevog toka (engl. solar flux) [3]. Stvarni kosinusni prikaz vremenskog kašnjenja ionosfere je znatno jednostavniji od složenih geometrijskih izračuna potrebnih za određivanje točne geografske lokacije, vremena i zenitnog kuta za algoritam vremenskog kašnjenja. Budući da se GPS sateliti obično promatraju pod kosim kutevima elevacije, ionosfera izravno iznad promatrača nije prikladna za korisnike s jednom frekvencijom.

Umjesto toga, ukupni sadržaj elektrona (TEC) treba odrediti na geografskoj točki gdje putanja zraka sa svakog satelita presijeca prosječnu visinu ionosfere, smještena na srednjoj vertikalnoj visini od 350 km duž putanje satelita [3]. Također je bitno izračunati nagnutost ili faktor nagiba za ovu srednju lokaciju u ionosferi i zatim pomnožiti okomiti TEC dobiven iz algoritma s tim faktorom. Dodatno, budući da je TEC najbolje predstavljen u geomagnetskim, a ne u geodetskim koordinatama, potrebno je provesti konverziju u geomagnetsku širinu. Međutim, kada bi se primijenili svi precizni geometrijski izračuni, zahtjevi za računanjem postali bi pretjerano opterećujući. Stoga su, kako bi se pojednostavio proces, uvedene različite pojednostavljene pretpostavke u svrhu izračuna ovih geometrijskih funkcija [3]. U nastavku su opisana spomenuta pojednostavljivanja.

#### 5.4.4. Zemljin kut

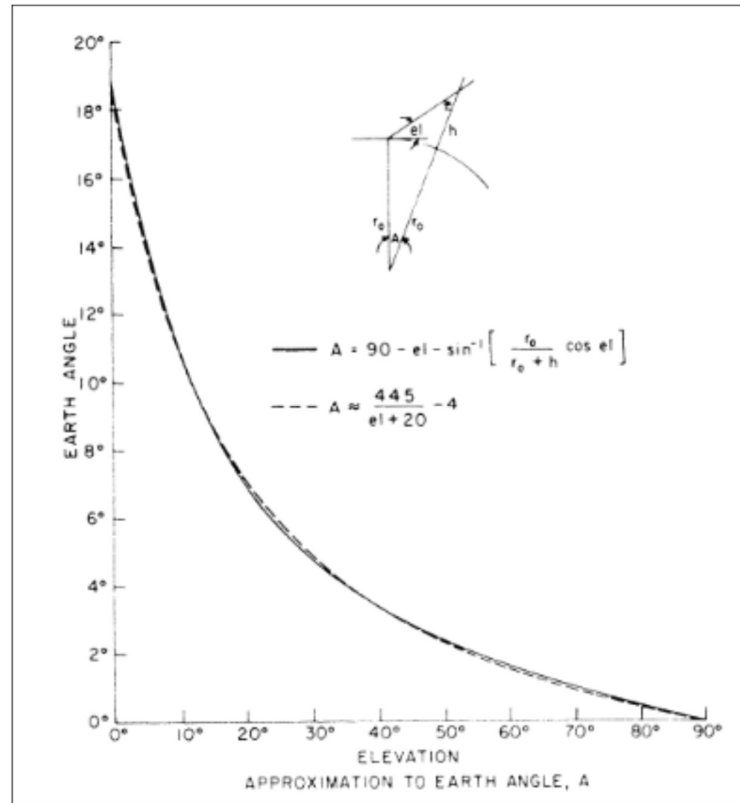
Izračuni TEC-a provode se na točnoj točki sjecišta satelitske zrake s ionosferom, a ne na lokaciji promatrača. Za promatrača blizu Zemljine površine koji gleda u satelit s elevacijom od 50 stupnjeva, sjecište ionosfere udaljeno je otprilike 140 stupnjeva od promatračeve lokacije na Zemlji. Ovaj pristup je ključan jer TEC može pokazati značajne gradijente za Zemljine kutove znatno ispod 140 stupnjeva. Stoga je bitno odrediti točnu točku sjecišta satelita s ionosferom, a ne oslanjati se isključivo na lokaciju promatrača [3]. Slika 5.5 prikazuje programski kod za primjer formule za računanje zemljinog kuta u R-u.

```
psi <- (0.0137 / (elevation_angle + 0.11)) - 0.022
```

*Slika 5.5: Programski kod „Zemljin kut“*



Slika 5.6 daje i točne i približne prikaze Zemljinih kutova u odnosu na kut elevacije satelita. Približni oblik uvodi minimalnu pogrešku, ostajući ispod 0,2 stupnjeva za sve kutove elevacije veće od 100 stupnjeva. Na 50 i 0 stupnjeva elevacije, odstupanje od točnog oblika iznosi samo 0,4 odnosno 0,3 stupnjeva.

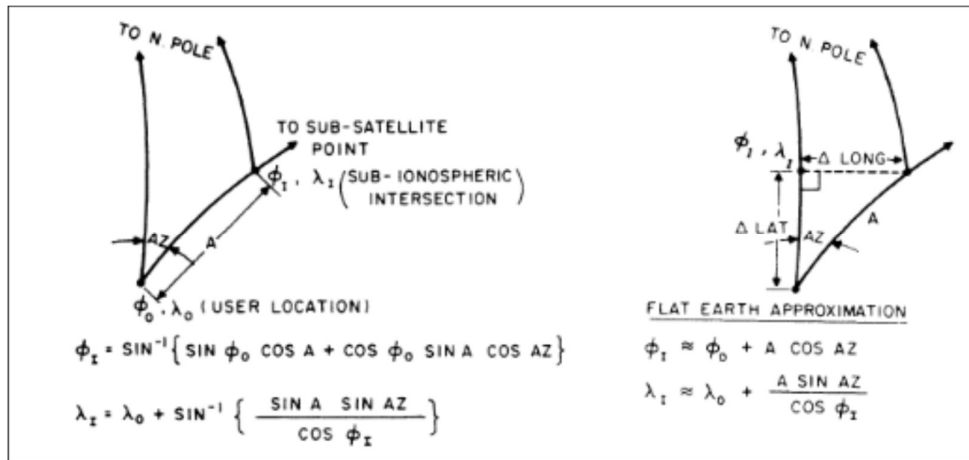


Slika 5.6: Procjena kuta [3]

#### 5.4.5. Izračun srednje ionosferske lokacije

Specifične jednadžbe korištene za izračun koordinata ionosferskog presjeka i popratne aproksimacije ravne Zemlje detaljno su prikazane na slici 5.7. Na niskim i srednjim geografskim širinama, korištenje približnog oblika za izračun koordinata ionosferskog presjeka rezultira minimalnim pogreškama. Kako bi se izbjegle značajne netočnosti koje bi se dogodile na ekstremno visokim geografskim širinama, gdje je aproksimacija manje prikladna, implementirano je praktično rješenje.

Kada izračunata ionosferska širina premašuje 75 stupnjeva, definira se kao 75 stupnjeva ( $75^0$  u notaciji). Ova se aproksimacija smatra razumnom jer se očekuje ograničena jednofrekvencijska aktivnost korisnika iznad 75 stupnjeva geografske širine, a TEC vrijednosti su općenito niske u regijama s visokom geografskom širinom [3].



Slika 5.7: Aproximacija ionosferskih koordinata [3]

#### 5.4.6. Pretvorba geodetske širine u geomagnetsku širinu

Za pravilno rukovanje vremenskim kašnjenjem u ionosferi, bitno ga je organizirati na temelju geomagnetske širine, a ne geodetske. To zahtijeva transformaciju iz geodetske u geomagnetsku širinu. Transformacija, pretpostavljajući da je Zemljino magnetsko polje približno dipolno sa središtem na Zemlji, izražava se prema (5.1):

$$\sin \Phi = \sin \phi \cdot \sin \phi_p + \cos \phi \cdot \cos \phi_p \cdot \cos(\lambda - \lambda_p), \quad (5.1)$$

gdje je:

$$\sin \phi_p = 78,3^\circ \text{ N},$$

$$\lambda_p = 291,0^\circ \text{ E}.$$

Aproximacija (5.2) se podudara s egzaktnim izrazom, odstupajući za najviše  $1^\circ$  na svim geomagnetskim širinama ispod  $40$  stupnjeva. Ostaje unutar  $2^\circ$  točnosti unutar raspona od  $65^\circ$  s obje strane geomagnetskog ekvatora. U cijeloj regiji kontinentalnih Sjedinjenih Država (CONUS), pogreška u približnom izračunu ostaje ispod  $1^\circ$ , osiguravajući pouzdane izračune geomagnetske širine za ispravke vremenskog kašnjenja ionosfere [3].

$$\Phi = \phi + 11,6^\circ \cdot \cos(\lambda - 291), \quad (5.2)$$

gdje je:

$\Phi$ : Geomagnetska širina, izražena u stupnjevima. To je širina na koju se transformira geodetska širina kako bi se pravilno rukovalo vremenskim kašnjenjem u ionosferi;

$\phi$ : Geodetska širina promatrača ili lokacije na Zemlji, također izražena u stupnjevima;

$\lambda$ : Geodetska dužina promatrača ili lokacije na Zemlji, izražena u stupnjevima istočno (pozitivna vrijednost) ili zapadno (negativna vrijednost) od Greenwicha;

$11,6^0$  : Konstanta koja se koristi u formuli za transformaciju geodetske širine u geomagnetsku širinu;

$\cos(\lambda-291)$ : Kosinus razlike između geodetske dužine promatrača i geodetske dužine referentne točke (u ovom slučaju  $291^\circ$  istočno od Greenwicha). Ova razlika pomaže u određivanju kutne udaljenosti između geodetske lokacije i referentne dužine.

#### 5.4.7. Izračun lokalnog vremena

Izračunavanje lokalnog vremena na ionosferskoj točki je jednostavno uz približno univerzalno (Greenwich) vrijeme (UT) i približnu zemljopisnu dužinu ionosferske točke, što se određuje izrazom 5.3. U slučajevima kada  $t$  prelazi 24 sata, izvodi se jednostavno oduzimanje 24 sata kako bi se osiguralo da dobiveno vrijeme ostane unutar raspona od 0 do 24 sata [3].

$$t = \frac{\lambda t}{15} + UT, \quad (5.3)$$

gdje je:

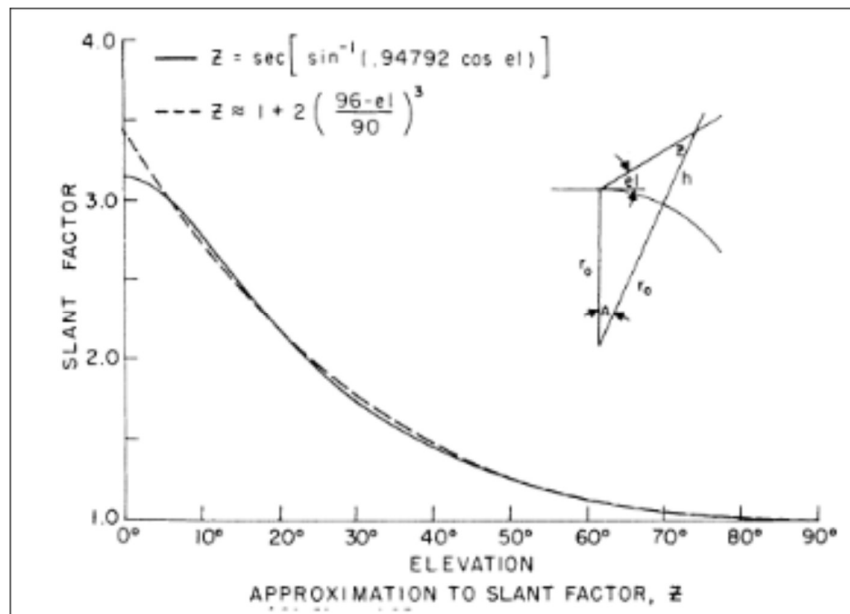
$t$  - lokalno vrijeme na ionosferskoj točki,

$\lambda t$  - zemljopisna dužina ionosferske točke,

UT - približno univerzalno (Greenwich) vrijeme.

#### 5.4.8. Faktor nagnutosti

Faktor nagnutosti značajno utječe na preciznost određivanja vertikalnog vremenskog kašnjenja u subionosferskoj točki. Ovaj faktor definiran je kao sekans zenitnog kuta na srednjoj visini ionosfere, uz pretpostavku prosječne visine od 350 km. Na slici 5.8 prikazan je točan izračun faktora nagnutosti te približna verzija korištena u algoritmu. Aproksimacija je vrlo precizna, ostaje unutar 2% točnosti za sve kutove elevacije veće od 5 stupnjeva. Ta razina preciznosti osigurava pouzdane prilagodbe za vertikalno vremensko kašnjenje u algoritmu [3].



Slika 5.8: Aproksimacija faktora nagnutosti [3]

#### 5.4.9. Sažetak jednadžbi algoritma

U nastavku je opisan postupak provođenja algoritma. Pretpostavka je da su poznate geodetska širina  $\Phi_u$ , duljina  $\lambda_u$ , elevacija E i azimut A. Također su poznati i koeficijenti  $\alpha_n$  i  $\beta_n$  koji su dobiveni iz navigacijske poruke. Svi kutevi su izraženi u jedinicama polukruga, dok se vrijeme mjeri u sekundama.

1. Izračun središnjeg kuta Zemlje:

$$\psi = \frac{0.0137}{E + 0.11} - 0.22 \quad (5.4)$$

2. Izračun subionosferske širine:

$$\Phi_l = \Phi_u + \psi \cos A \quad (5.5)$$

Ako je  $\Phi_l > +0,416$  onda je  $\Phi_l = +0,416$ . Ako je  $\Phi_l < -0,416$  onda je  $\Phi_l = -0,416$ .

3. Izračun subionosferske duljine:

$$\lambda_l = \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \Phi_l} \quad (5.6)$$

4. Izračun geomagnetske širine:

$$\Phi_m = \Phi_l + 0.064 \cos(\lambda_l - 1.617) \quad (5.7)$$

5. Izračun lokalnog vremena:

$$t = 4.32 \times 10^4 \lambda_l + \text{GPS time (sek.)} \quad (5.8)$$

Ako je  $t > 86400$ ,  $t = t - 86400$ . Ako je  $t < 0$ ,  $t = t + 86400$ .

6. Izračun faktora nagnutosti:

$$F = 1.0 + 16.0 \times (0.53 - E)^3 \quad (5.9)$$

7. Izračun ionosferskog kašnjenja:

$$T_{\text{IONO}} = F \times \left[ 5 \times 10^{-9} + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \Phi_m^n \times \left( 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right] \quad (5.10)$$

gdje je:

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n \Phi_m^n}. \quad (5.11)$$

Primjer izračuna:

Postaja se nalazi na  $40^\circ$  N i  $100^\circ$  W gledajući sateliti pod kutem  $20^\circ$  i azimutom  $210^\circ$ .

$$\alpha_n = 3,82 \times 10^{-8}, 1,49 \times 10^{-8}, -1,79 \times 10^{-7}, 0$$

$$\beta_n = 1.43 \times 10^5, 0, -3.28 \times 10^5, 1.13 \times 10^5$$

Vrijeme je 2045 UT.

1)  $\psi = 0.03996$  polukruga

2)  $\Phi_l = 0.215$  polukruga

3)  $\lambda_l = -0.6399$  polukruga

4)  $\Phi_m = 0.2509$  polukruga

5)  $t = 50700$  s

6)  $F = 2.176$

7)  $T_{\text{IONO}} = 77.6$  ns (23.3 m)

Slika 5.9 prikazuje kod za cijelu funkciju koja računa ispravak za zadani elevacijski kut, azimut, zemljopisnu dužinu i širinu, vrijeme od početka dana izraženo u sekundama, te alfa i beta koeficijente.

```

klobuchar <- function(elevation_angle, azimuth, lat, lon, seconds, alphas,
betas) {
  deg2semi <- 1./180
  semi2rad <- pi
  deg2rad <- pi/180

  azimuth_rad <- azimuth * deg2rad
  azimuth_semi <- azimuth * deg2semi
  lat_semi <- lat * deg2semi
  lon_semi <- lon * deg2semi

  # Earth-centered angle
  psi <- (0.0137 / (elevation_angle + 0.11)) - 0.022

  # Latitude of the IPP
  phi_l <- lat_semi + psi*cos(azimuth_semi)
  if (phi_l > 0.416) phi_l = 0.416
  if (phi_l < -0.416) phi_l = -0.416

  # Longitude of the IPP
  lambda_l <- lon_semi + (psi*sin(azimuth_semi))/(cos(phi_l))

  # Geomagnetic latitude of the IPP
  phi_m <- phi_l + 0.064 * cos((lambda_l - 1.617))

  # Local time at the IPP
  t <- 43200 * lambda_l + seconds
  if (t >= 86400) t = t - 86400
  if (t < 0) t = t + 86400

  # Amplitude of ionospheric delay
  a1 <- alphas[1]
  a2 <- alphas[2]
  a3 <- alphas[3]
  a4 <- alphas[4]

  b1 <- betas[1]
  b2 <- betas[2]
  b3 <- betas[3]
  b4 <- betas[4]

```

```

amplitude <- a1 + a2*phi_m + a3*phi_m**2 + a4*phi_m**3
if (amplitude < 0) {
  amplitude = 0
}
# Period of ionospheric delay
period <- b1 + b2*phi_m + b3*phi_m**2 + b4*phi_m**3
if (period < 72000) {
  period <- 72000
}

# Phase of ionospheric delay
X <- 2.*pi*(t-50400)/period

# Compute the slant factor
elevation_semi <- elevation_angle * deg2semi
slant_factor <- 1 + 16*(0.53-elevation_semi)**3

# Ionospheric time delay
if(abs(X) > 1.57) {
  ITD <- slant_factor * (5.e-9)
} else {
  ITD <- slant_factor * (5.e-9 + (1 - X*X/2 + X*X*X*X/24) * amplitude)
}
return(ITD)
}

```

*Slika 5.9: Programski kod „Funkcija ispravka korištenjem Klobucharevog modela“*

## 6. REZULTATI

U ovom će poglavlju biti opisani rezultati obrade podataka s GPS satelita nakon primjene Klobucharevog algoritma ispravka ionosferskog kašnjenja.

### 6.1. IONEX format

Rezultati su pohranjeni u IONEX formatu. IONEX format je standardizirana struktura podataka koja se koristi za razmjenu i pohranjivanje globalnih parametara ionosfere, što ga čini vitalnom komponentom preciznih sustava za određivanje položaja i navigaciju [3, 5].

IONEX format je tekstualni format koji sažima kritične informacije povezane s parametrima ionosfere. Podijeljen je u dijelove, od kojih svaki služi različitoj svrsi. Svaka IONEX datoteka se sastoji od dva glavna dijela: zaglavlje i podaci. U zaglavlju se pohranjuju globalne informacije koje se odnose na cijelu datoteku (Slika 6.1) i nalazi se na početku datoteke. Zaglavlje je strukturirano tako da se oznake zaglavlja nalaze u stupcima 61-80 za svaki red zaglavlja [3]. Važno je napomenuti da su ove oznake obavezne i moraju točno odgovarati specifikacijama navedenim u IONEX dokumentaciji [5].

Također je vrijedno spomenuti da je najveća dopuštena duljina zapisa ograničena na 80 bajtova, čime se osigurava dosljednost i kompatibilnost među različitim sustavima koji koriste ovaj format [3].

1.0	IONOSPHERE MAPS				GNSS	IONEX VERSION / TYPE
IONINX V5.3	AIUB				10-APR-22 08:50	PGM / RUN BY / DATE
CODE'S 1-DAY PREDICTED IONOSPHERE MAPS FOR DAY 100, 2022						COMMENT
2022 4 10 0 0 0						EPOCH OF FIRST MAP
2022 4 11 0 0 0						EPOCH OF LAST MAP
3600						INTERVAL
25						# OF MAPS IN FILE
NONE						MAPPING FUNCTION
10.0						ELEVATION CUTOFF
One-way carrier phase leveled to code						OBSERVABLES USED
6371.0						BASE RADIUS
2						MAP DIMENSION
450.0 450.0 0.0						HGT1 / HGT2 / DHGT
87.5 -87.5 -2.5						LAT1 / LAT2 / DLAT
-180.0 180.0 5.0						LON1 / LON2 / DLON
-1						EXPONENT
TEC/RMS values in 0.1 TECU; 9999, if no value available						COMMENT
						END OF HEADER

Slika 6.1: Zaglavlje IONEX datoteke



Postoji još nekoliko dodatnih pravila vezanih uz pohranjivanje podataka u IONEX formatu. Sam redoslijed podataka u zaglavlju nije bitan, osim IONEX VERSION / TYPE zapisa koji se mora nalaziti na prvom mjestu [3]. Još neka od pravila su [3, 5]:

1. Postojanost vrijednosti: Svaka vrijednost u zaglavlju vrijedi sve dok se ne promijeni sljedećim zapisom zaglavlja. Drugim riječima, promjene u vrijednostima su važeće samo kada su uvedene novim zapisom zaglavlja.
2. Obavezna nula: Redovi koji sadrže formatirane numeričke vrijednosti trebaju uključivati barem 0 (ne smiju biti prazne) kako bi se osigurala kompatibilnost s funkcijama jezika C za čitanje datoteka.
3. Izbjegavanje praznih redaka: Iako je preporučljivo minimizirati uključivanje praznih redaka unutar IONEX datoteke, kao dobra praksa, preporučuje se predvidjeti i postupati s mogućnošću susreta s praznim redovima prilikom razvijanja funkcija čitanja za te datoteke.

Što se tiče imenovanja datoteke, koristi se sljedeća konvencija [3]: cccedddh.yyI,

gdje je:

- ccc: troznamenkasta oznaka centra za analizu (AC),
- e: ekstenzija ili kod regije („G“ za mape globalne ionosfere),
- ddd: dan u godini prvog zapisa,
- h: redni broj datoteke (1, 2, ...) ili sat (A, B, ...) u danu,
- 0: datoteka sadrži sve postojeće podatke trenutnog dana,
- yy: dvoznamenkasta godina,
- I: vrsta datoteke („I“ za ionosferske mape).

## 6.2. Prikaz rezultata algoritma

Sljedeća slika prikazuje izgled samih podataka (rezultata algoritma) IONEX formata (Slika 6.2):

```

14
2015 01 20 13 00
-2
-90.0-180.0 180.0 5.0 450.0
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 514 529 542 554 566 576 586 594 601 607 612 616 618 619 619
617 615 611 606 601 500 500 500 500
-85.0-180.0 180.0 5.0 450.0
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 514 529 542 554 566 576 586 594 601 607 612 616 618 619 619
617 615 611 606 601 500 500 500 500
-80.0-180.0 180.0 5.0 450.0
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500 500
500 514 529 542 554 566 576 586 594 601 607 612 616 618 619 619
617 615 611 606 601 500 500 500 500

```

*Slika 6.2: Prikaz podataka u IONEX formatu (c1pg1000.22i)*

Na slici se može vidjeti dio zapisa za epohu 20.01.2015 13:00:00. Vrijednosti na slici se nalaze u rasponu od -90 do -80 po geografskoj širini i -180 do 180 po geografskoj duljini na visini od 450 km.

Pokazalo se da su kod i funkcija izračuna ispravaka uspješni u rješavanju problema određivanja ispravaka kašnjenja GPS signala u ionosferi na prostornoj mreži u razdoblju od 24 sata proizvoljno odabranog dana. Sveukupno, navedeni kod i postupak rješavaju zadani problem i daju čvrstu osnovu za njegovu primjenu, daljnja istraživanja i razvoj u ovom području.

### **6.3. Pregled implementacije i programskog koda korištenog u razvoju programske podrške**

Čitanje i analiziranje navigacijske datoteke: kod čita navigacijsku datoteku i izdvaja potrebne informacije, kao što su parametri ispravka kašnjenja u ionosferi (alfa i beta) i TEC karte. Kod također definira funkcije za izračunavanje faktora ispravka kašnjenja u ionosferi korištenjem Klobucharevog modela.

Izračunavanje faktora ispravka kašnjenja u ionosferi za danu prostornu mrežu i doba dana: Kod koristi gore definirane funkcije za izračunavanje faktora ispravka kašnjenja u ionosferi za danu

prostornu mrežu tijekom razdoblja od 24 sata proizvoljno odabranog dana. Rezultati se pohranjuju u posebnu datoteku u zapisu IONEX.

Općenito, ovaj kod pokazuje kako se razvijena programska podrška može koristiti za određivanje ispravaka kašnjenja u ionosferi i procjenu njihove točnosti pomoću postojećih programskih alata. Također pokazuje kako se različiti R paketi mogu koristiti za obavljanje potrebnih operacija na modularan i strukturiran način.

Kod je strukturiran na modularan način kako bi se osigurala jednostavnost održavanja, ponovne upotrebe i testiranja. Također uključuje komentare i dokumentaciju koja pomaže u čitljivosti i razumijevanju.

#### **6.4. Rasprava o ograničenjima programske podrške i potencijalnim područjima za poboljšanje**

Razvijena programska podrška za određivanje GPS ionosferskih ispravaka kašnjenja pomoću Klobucharevog modela u programskom jeziku R ima neka ograničenja i potencijalna područja za poboljšanje.

Prvo, Klobucharev model korišten u programskoj podršci je pojednostavljeni model koji pretpostavlja sferno simetričnu ionosferu. Međutim, stvarna ionosfera nije sferno simetrična i varira s lokacijom, vremenom i nadmorskom visinom. To može dovesti do pogrešaka u izračunatim ispravcima kašnjenja u ionosferi. Kako bi se poboljšala točnost programske podrške, može se koristiti složeniji ionosferski model, kao što je Globalni ionosferski model (GIM), koji uzima u obzir prostorne i vremenske varijacije ionosfere.

Drugo, programska podrška ograničena je na zadanu prostornu mrežu s razmakom  $5^\circ$  i razdoblje od 24 sata proizvoljno odabranog dana. Ovo možda neće biti dovoljno za određene primjene koje zahtijevaju preciznije i kontinuirane ispravke kašnjenja u ionosferi. Kako bi se proširile mogućnosti programske potpore, ona se može proširiti na širi prostorni i vremenski raspon ili čak raditi u stvarnom vremenu.

Istraživanje opisano u ovom diplomskom radu "Priprema nezavisnih ispravaka ionosferskog kašnjenja satelitskog signala u IONEX zapisu" ima nekoliko implikacija za praksu u području satelitskog određivanja položaja.

Prvo, razvoj programske potpore za određivanje GPS ionosferskih ispravaka kašnjenja na zadanoj prostornoj mreži u razdoblju od 24 sata ima praktične implikacije za one koji rade u području satelitskog određivanja položaja. Ova programska podrška može pomoći u poboljšanju točnosti

satelitskog određivanja položaja, te ima različite primjene, uključujući navigaciju i geodetska istraživanja.

Drugo, ispravci su izraženi u nanosekundama, te ih je potrebno pretvoriti u TECU prije učitavanja u programsku podršku koja za ispravke koristi TEC. Ove informacije mogu se koristiti za usmjeravanje budućih istraživačkih i razvojnih napora usmjerenih na daljnje poboljšanje točnosti satelitskog određivanja položaja.

Zaključno, razvijena programska podrška za određivanje GPS ionosferskih ispravaka kašnjenja korištenjem Klobucharevog modela u programskom jeziku R je koristan alat za mnoge primjene, ali ima ograničenja i potencijalna područja za poboljšanje. Uključivanjem složenijih ionosferskih modela, poboljšanjem točnosti TEC karte i proširenjem prostornog i vremenskog raspona programske podrške, može pružiti još točnije i pouzdanije ispravke ionosferskog kašnjenja za različite GNSS aplikacije.

## 7. ZAKLJUČAK

Ionosfersko kašnjenje u GNSS sustavima, uključujući GPS, uzrokuje pogreške u procjeni položaja. Klobucharev model, jedan od najčešće korištenih modela za ispravak ionosferskog kašnjenja, koristi empirijske koeficijente koji se ažuriraju prema sezonskim i solarnim uvjetima. Ovaj model koristi podatke kao što su geografska širina i dužina, te lokalno vrijeme za procjenu i ispravak kašnjenja signala uzrokovanog ionosferskim uvjetima. Iako je Klobucharev model uspješno primijenjen u raznim scenarijima za GPS i druge GNSS sustave, njegova upotreba je često bila ograničena na specifične prostorne mreže i vremenske intervale. U ovom radu je korišten Klobucharev model za izračun ispravaka na prostornoj mreži za razdoblje od 24 sata, što omogućuje preciznije i kontinuirano ispravljanje u različitim uvjetima.

Razvijena je programska podrška u programskom okruženju R za izračun ispravaka ionosferskog kašnjenja GPS signala koristeći Klobucharev model. Programska podrška omogućuje:

1. Izračun ionosferskog kašnjenja na prostornoj prividnoj prostornoj rešetki s razmacima  $5^\circ \times 5^\circ$  za proizvoljno odabrani dan.
2. Zapis rezultata u IONEX formatu za standardiziranu razmjenu i pohranu podataka.

Ulazni podaci korišteni u programu uključivali su zadani datum, dimenzije prostorne mreže i navigacijske datoteke u RINEX formatu. Razvijena funkcija za učitavanje i obradu opservacijskih datoteka omogućava analizu podataka potrebnih za izračun ionosferskog kašnjenja. Rezultati su prikazani u IONEX formatu za određenu epohu. Razvoj neovisnih ispravaka ionosferskog kašnjenja doprinosi poboljšanju točnosti satelitskog određivanja položaja i smanjuje ovisnost o modelima ispravka koje pružaju proizvođači GPS-a. Ove neovisni ispravci omogućuju prilagodbu specifičnim potrebama korisnika i mogu potencijalno postići veću točnost.

## LITERATURA

- [1] Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E.: „GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more“, Springer-Verlag Vienna, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
- [2] Blewitt, G.; Hammond, W.; Kreemer, C.: „Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science“, *Eos*, 99, 2018. doi: 10.1029/2018EO104623, s Interneta: <https://eos.org/science-updates/harnessing-the-gps-data-explosion-for-interdisciplinary-science> (9.04.2023.)
- [3] Klobuchar, J.: „Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users“. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES 23(3): 325-331, 1987. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>
- [4] Misra, P.; Enge, P.: „Satellite Navigation Systems: Transit, GPS, and GNSS“. U: Misra, P., Enge, P. (ur.) *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, (19-25), Ganga-Jamuna Press, 2011., s Interneta: <https://www.gpstextbook.com/Files/chap1.pdf> (9.04.2023.)
- [5] Schaer, S.; Habrich, A.: „IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1.0“. *International GNSS Service (IGS) Documentation*, 2(1), 1-10, 1996., s Interneta <https://gssc.esa.int/wp-content/uploads/2018/07/ionex11.pdf> (9.04.2023.)
- [6] Subirana, J.S.; Juan Zornoza, J.M.; M. Hernández-Pajares, M.: „GNSS Data Processing: Fundamentals and Algorithms“, European Space Agency, Netherlands, 2013., s Interneta: [https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS\\_Book/ESA\\_GNSS-Book\\_TM-23\\_Vol\\_I.pdf](https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf) (10.06.2024.)
- [7] Roma-Dollase, D.; Hernández-Pajares, M.; Krankowski, A.; Orús-Pérez, R.; Ghoddousi-Fard, R.; Zhang, H. i sur.: „Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle“, *Journal of Geodesy*, 92, 691-706, 2018., <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1088-9>
- [8] Dyrud, L.; Jovancevic, A.; Brown, A.; Wilson, D.; Ganguly, S.: „Ionospheric measurement with GPS: Receiver techniques and methods“, *Radio Science*, 43, RS6002, 2008. doi:10.1029/2007RS003770, s Interneta: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2007RS003770> (9.04.2023.)

- [9] Montenbruck, O.; Gill, E.: „Satellite orbits: models, methods and applications“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58351-3>.
- [10] Yasyukevich, Y.; Zhang, B.; Ratnam, V.: „Advances in GNSS Positioning and GNSS Remote Sensing“, *Sensors*. 24. 1200, 2024. 10.3390/s24041200.
- [11] Aragon-Angel, A.; Rovira-Garcia, A.; Arcediano-Garrido, E.; Ibáñez-Segura, D.: „Galileo Ionospheric Correction Algorithm Integration into the Open-Source GNSS Laboratory Tool Suite (gLAB)“, *Remote Sens.* 2021, 13, 191. <https://doi.org/10.3390/rs13020191>
- [12] Hoque, M.M.; Jakowski, N.: „An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems“, *J Geod* 89, 391–406, 2015., <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0783-z>
- [13] Farah, A.: „Single-Frequency Ionospheric-Delay Correction from BeiDou & GPS Systems for Northern Hemisphere“, *Artificial Satellites*. 54. 1-15, 2019. 10.2478/arsa-2019-0002.
- [14] Ren, X.; Chen, J.; Li, X.; Zhang, X.; Freeshah, M.: „Performance evaluation of real-time global ionospheric maps provided by different IGS analysis centers“, *GPS Solutions*, 23: 113, 2019., s Interneta: <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0904-5> (9.04.2023.)
- [15] Klobuchar, J. A.: „Ionospheric effects on GPS. U: *Global Positioning System: Theory and Applications*“, str. 513-514, American Institute of Aeronautics and Astronautics,1996. <https://doi.org/10.2514/5.9781600866388.0485.0515>
- [16] Hernández-Pajares, M.; Juan, J.M.; Sanz, J.; Orus, R.; Garcia-Rigo, A. i sur.: „The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998“. *Journal of Geodesy*, 83, 263–275, 2009 <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1> (22.04.2023.)
- [17] Zhao, J.; Hernández-Pajares, M.; Li, Z.; Wang, N.; Yuan, H.: „Integrity investigation of global ionospheric TEC maps for high-precision positioning“, *Journal of Geodesy* 95: 35, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01487-8>.
- [18] Weng, J.; Liu, Y.; Wang, J.: „A Model-Assisted Combined Machine Learning Method for Ionospheric TEC Prediction“, *Remote Sens.* 2023, 15, 2953. <https://doi.org/10.3390/rs15122953>
- [19] Guoyan, L., Wang, G., Zhengxie, Z., Qing, Z.: „Prediction of Ionospheric TEC Based on the NARX Neural Network“, *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. 7188771, <https://doi.org/10.1155/2021/7188771> (9.04.2023.)

- [20] Chen, Z., Liao, W., Li, H., Wang, J., Deng, X., Hong, S. : „Prediction of global ionospheric TEC based on deep learning“. *Space Weather*, 20, e2021SW002854., 2022., <https://doi.org/10.1029/2021SW002854>
- [21] Ge, M.; Gendt, G.; Rothacher, M. i sur.: „Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations“, *Journal of Geodesy* 82: 401, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0208-3>
- [22] Takasu, T.; Yasuda, A.: „Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open-source program package RTKLIB“, *International Symposium on GPS/GNSS*, 4-6, 2009.
- [23] King, R.W.; Bock, Y.: „Documentation for the GAMIT GPS analysis software“, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2003.
- [24] Dach, R.; Lutz, S., Walser, P.; Fridez, P.: „Bernese GNSS Software Version 5.2“, AIUB, Bern, Switzerland, 2015. doi: 10.7892/boris.72297, s Interneta: <http://www.bernese.unibe.ch> (9.04.2023.)
- [25] Wu, D.; Yan, H.; Shen, Y.: „TSAalyzer, a GNSS time series analysis software“. *GPS Solut* 21, 1389–1394, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0637-2>
- [26] European Space Agency; Sentinel Online: “ ESA releases new and improved version of SNAP“, s Interneta: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/-/esa-releases-new-and-improved-version-of-snap> (21.06.2024.)
- [27] Applied Research Laboratories, The University of Texas at Austin, Space and Geophysics Laboratory (SGL): „Open Source Software, The GPS Toolkit“, 2020, s Interneta: <https://github.com/SGL-UT/GPSTk/> (22.04.2023.)
- [28] Natural Resources Canada: „Geodetic tools and data“, s Interneta: <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/geodetic-reference-systems/data/10923> (15.06.2024.)
- [29] Linty, N.; Dovis, F.; Alfonsi, L.: „Software-defined radio technology for GNSS scintillation analysis: bring Antarctica to the lab“, *GPS Solut* 22, 96, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0761-7>
- [30] Borre, K.; Akos, D. M.; Bertelsen, N.; Rinder, P.; Jensen, S. H.: „A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach“, Springer Science & Business Media, 2007. S Interneta: <https://www.ocf.berkeley.edu/~marsy/resources/gnss/A%20Software-Defined%20GPS%20and%20Galileo%20Receiver.pdf> (22.04.2023.)



- [31] Lu, L.; Hu, W.; Wu, T.: „GDPS: an open-source python-based software package for multi-GNSS data preprocessing“, *GPS Solut* 28, 138, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01678-8>
- [32] Trimble Geospatial: „Trimble Business Center (TBC) software“, s Interneta: <https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-business-center> (15.06.2024.)
- [33] Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC): „GNSS-SDR Project: An open-source Global Navigation Satellite Systems software-defined receiver“, s Interneta: <https://gnss-sdr.org/> (22.04.2023.)
- [34] Kaplan, E.; Hegarty, C.: „Understanding GPS: Principles and Applications“, Second Edition, Artech house, 2017.
- [35] Banachowicz, A.; Wolski, A.: „A Comparison of the Least Squares with Kalman Filter Methods Used in Algorithms of Fusion with Dead Reckoning Navigation Data“, *TransNav the International Journal of Marine Navigation and Safety Sea Transportation*, 11(4), 2017. doi: 10.12716/1001.11.04.16. S Interneta: <https://pdfs.semanticscholar.org/e01f/d709113219ead83fff3b41a7d11a10ed1d31.pdf> (22.04.2023.)
- [36] Gibbs, B.P.: „Least-Squares Estimation: Model Errors and Model Order, Kalman Filtering“. U: *Advanced Kalman Filtering, Least-Squares and Modeling*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2011.
- [37] Tanir Kayıkçı, E.: „Comparison of Least Squares and Kalman Filter Solutions From Different IVS Analysis Centers“, U: Zbornik radova s konferencije: *23th EVGA Working Group Meeting*. Gothenburg/Sweden, 2017. S Interneta: [https://www.researchgate.net/publication/317345386\\_COMPARISON\\_OF\\_LEAST\\_SQUARES\\_AND\\_KALMAN\\_FILTER\\_SOLUTIONS\\_FROM\\_DIFFERENT\\_IVS\\_ANALYSIS\\_CENTERS#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/317345386_COMPARISON_OF_LEAST_SQUARES_AND_KALMAN_FILTER_SOLUTIONS_FROM_DIFFERENT_IVS_ANALYSIS_CENTERS#fullTextFileContent) (22.04.2023.)
- [38] Van Sickle, j.; Dutton, J.A.: „The Ionospheric Effect“, s Interneta: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1715#:~:text=Through%20both%20refraction%20and%20diffraction%2C%20the%20atmosphere%20alters,signal%27s%20transit%20from%20the%20satellite%20to%20the%20receiver> (21.06.2024.)
- [39] Xu, C.; Zhu, Y.; Xu, X.; Kong, J.; Yao, Y.; Shi, J.; Li, X.: „Regional Tropospheric Correction Model from GNSS–Saastamoinen–GPT2w Data for Zhejiang Province“, *Atmosphere*. 14. 815, 2023. 10.3390/atmos14050815.

- [40] Li, Z.; Wang, N.; Hernández-Pajares, M.; Yuan, Y.; Krankowski, A.; Liu, A. i sur.: „IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling“, *Journal of Geodesy*, 94:32, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01360-0> (23.04.2023).
- [41] Boisits, J.; Glaner, M.; Weber, R.: Regiomontan: „A Regional High Precision Ionosphere Delay Model and Its Application in Precise Point Positioning“. *Sensors*, 20, 2845, 20202. <https://doi.org/10.3390/s20102845>., s Interneta: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2845> (23.04.2023).
- [42] Mehmood, M.; Saleem, S.; Filjar, R.: „Eyjafjallajökull Volcanic Ash 2010 Effects on GPS Positioning Performance in the Adriatic Sea Region“, *Atmosphere*, 13(1):47, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010047> s Interneta: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/1/47> (24.04.2023.)
- [43] Dardanelli, G.; Maltese, A.; Pipitone, C.; Pisciotta, A.; Lo Brutto, M.: „NRTK, PPP or Static, That Is the Question. Testing Different Positioning Solutions for GNSS Survey“, *Remote Sensing*, 13(7): 1406, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13071406>., s Interneta: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/7/1406> (23.04.2023).
- [44] Steigenberger, P.; Thielert, S.; Montenbruck, O.: „GPS and GLONASS Satellite Transmit Power: Update for IGS repro3“, 2019., s Interneta: [https://www.researchgate.net/publication/334442881\\_GPS\\_and\\_GLONASS\\_Satellite\\_Transmit\\_Power\\_Update\\_for\\_IGS\\_repro3](https://www.researchgate.net/publication/334442881_GPS_and_GLONASS_Satellite_Transmit_Power_Update_for_IGS_repro3) (23.04.2023.)
- [45] Angrisano, A.; Dardanelli, G.; Innac, A.; Pisciotta, A.; Pipitone, C.; Gaglione, S.: „Performance Assessment of PPP Surveys with Open Source Software Using the GNSS GPS–GLONASS–Galileo Constellations“, *Applied Sciences*. 10(16):5420, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10165420>., s Interneta: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5420> (23.04.2023).
- [46] Zhang, Q.; Zhao, Q.: „Global Ionosphere Mapping and Differential Code Bias Estimation during Low and High Solar Activity Periods with GIMAS Software“, *Remote Sensing*, 10, 705, doi:10.3390/rs10050705, s Interneta: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/5/705> (14.05.2024)
- [47] Mikesell, T.D.; Rolland, L.M.; Lee, R.F.; Zedek, F.; Coisson, P.; Dessa, J.-X.: „IonoSeis: A Package to Model Coseismic Ionospheric Disturbances“, *Atmosphere*, 10(8):443, 2019. <https://doi.org/10.3390/atmos10080443>., s Interneta: <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/8/443> (23.04.2023).

- [48] EarthData.: „Crustal Dynamics Data Information System“, s Interneta: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/2023/001/igsg0010.23i.Z> (23.04.2023)
- [49] Schaer, S.; Gurtner, W.; Feltens, J.: „Ionex: The ionosphere map exchange format version 1“. U: *Proceedings of the IGS AC workshop*, Darmstadt, Germany, volume 9, 1998.
- [50] Wikipedia. „Global positioning system — wikipedia, the free encyclopedia“, s Interneta: [https://hr.wikipedia.org/wiki/global\\_positioning\\_system](https://hr.wikipedia.org/wiki/global_positioning_system) (23.05.2024).
- [51] Subirana, J.S.; Juan Zornoza, J.M.; M. Hernández-Pajares, M.: „Ionospheric Delay“, Technical University of Catalonia, Spain, 2011.

## POPIS OZNAKA I KRATICA

BA	Berkeley Analysis
BDS	Beidou Navigation Satellite System
BIC	Broadcast Ionospheric Correction
CSRS-PPP	Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
DC	Dependence Constant
DCB	Differential Code Bias
E	East
EC	European Commission
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESA	European Space Agency
GAMIT	GNSS at MIT
GDPS	GNSS Data Preprocessing Software
GIM	Global Ionosphere Map
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ICA	Ionospheric Correction Algorithm
IGP	Ionospheric Grid Point
IGS	International GNSS Service
IMPS	Ionospheric Monitoring and Prediction System
IONEX	IONosphere Map Exchange Format
IRI	International Reference Ionosphere
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LOS	Line-of-sight
MODIP	Modified Dip Latitude
N	North
NRTK	Network Real Time Kinematics
PPP	Precise Point Positioning
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RIM	Regional Ionosphere Maps
RINEX	Receiver Independent Exchange (format)
RMSE	Root Mean Square Error
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime (Services)
RTK	Real-Time Kinematic
RTKLIB	Real-Time Kinematic Library
SBAS	Satellite-Based Augmentation Systems
SDR	Software Defined Radio
SNAP-IGS	Sentinel Application Platform - InSAR Geocoding System

TEC	Total Electron Content
TOMION	Tomographic Ionosphere model software
UT	Universal Time (Greenwich)
VTEC	Vertical Total Electron Content
WAAS	Wide Area Augmentation System

## POPIS SLIKA

Slika 2.1: Klobucharev model: prikaz algoritma. [6].....	6
Slika 4.1: Zaglavlje IONEX datoteke [5] .....	22
Slika 4.2: Podaci u IONEX datoteci [5] .....	23
Slika 5.1: Zaglavlje i tijelo navigacijske datoteke .....	27
Slika 5.2: Programski kod „Učitavanje navigacijske datoteke“ .....	28
Slika 5.3: Konture prosječnog mjesečnog ionosferskog kašnjenja [3].....	30
Slika 5.4: Odnos stvarnog kašnjenja i kosinusne krivulje [3] .....	31
Slika 5.5: Programski kod „Zemljin kut“ .....	32
Slika 5.6: Procjena kuta [3].....	33
Slika 5.7: Aproksimacija ionosferskih koordinata [3] .....	34
Slika 5.8: Aproksimacija faktora nagnutosti [3].....	36
Slika 5.9: Programski kod „Funkcija ispravka korištenjem Klobucharevog modela“ .....	39
Slika 6.1: Zaglavlje IONEX datoteke .....	40
Slika 6.2: Prikaz podataka u IONEX formatu (c1pg1000.22i).....	42

## SAŽETAK

### **Priprema neovisnih ispravaka ionosferskog kašnjenja satelitskog signala za potrebe satelitskog određivanja položaja u IONEX zapisu**

Ovaj diplomski rad se fokusira na ublažavanje ionosferskog kašnjenja, koje je najznačajniji pojedinačni uzrok pogrešaka satelitskog određivanja položaja. Rad obuhvaća pregled satelitskog određivanja položaja, izvora pogrešaka te učinka ionosferskog kašnjenja na satelitsko određivanje položaja. Istražene su različite tehnike ispravka ionosferskog kašnjenja, poput jednofrekventnih i dvofrekventnih mjerenja, globalnih ionosferskih modela (GIM-ova) i korištenja lokalnih ionosferskih modela, te je dan pregled postojećih programskih alata za obradu GPS podataka i ispravke ionosferskog kašnjenja.

Rad se posebno bavi Klobucharevim algoritmom ispravka implementiranim u programskom jeziku R. Ovaj algoritam značajno smanjuje pogreške u satelitskom određivanju položaja ispravljanjem ionosferskog kašnjenja. Rezultati primjene algoritma predstavljeni su u IONEX formatu.

Uz analizu i implementaciju Klobucharevog algoritma, rad obuhvaća i prikaz formata ulaznih opservacijskih i navigacijskih datoteka u RINEX formatu, te izlazne datoteke u IONEX formatu. Zaključno, istaknuta je važnost ispravaka ionosferskog kašnjenja za postizanje visoke preciznosti satelitskog određivanja položaja.

**Ključne riječi:** Klobucharev algoritam, Ionosfersko kašnjenje, programski jezik R, IONEX zapis.

## **ABSTRACT**

### **Preparation of independent corrections of the ionospheric delay of the satellite signal for the needs of satellite positioning in the IONEX record**

This thesis focuses on mitigating ionospheric delay, which is the most significant single source of errors in satellite positioning. The thesis includes an overview of satellite positioning, sources of errors, and the effect of ionospheric delay on satellite positioning. Various techniques for correcting ionospheric delay are explored, such as single-frequency and dual-frequency measurements, global ionospheric models (GIMs), and the use of local ionospheric models. Additionally, a review of existing software tools for processing GPS data and correcting ionospheric delay is provided.

The thesis specifically addresses the Klobuchar correction algorithm implemented in the R programming language. This algorithm significantly reduces errors in satellite positioning by correcting ionospheric delay. The results of the algorithm's application are presented in the IONEX format.

In addition to the analysis and implementation of Klobuchar's algorithm, the paper also includes a presentation of the format of input observation and navigation files in RINEX format, and output files in IONEX format. In conclusion, the importance of ionospheric delay correction for achieving high precision of satellite positioning is emphasized.

**Keywords:** Klobuchar algorithm, Ionospheric delay, R programming language, IONEX format.



## **PRILOG: PROGRAMSKI KOD**

Kod razvijene programske podrške je dostupan u otvorenom pristupu na:

<https://gitlab.com/tinsk/klobuchar-ispravci-ionex>