

Renato Filjar

POGREŠKA SATELITSKOG ODREĐIVANJA POLOŽAJA ZBOG EKSTREMNIH IONOSFERNIH POREMEĆAJA

Doktorska disertacija mr. sc. Renata Filjara, dipl.ing., pod naslovom "POGREŠKA SATELITSKOG ODREĐIVANJA POLOŽAJA ZBOG EKSTREMNIH IONOSFERNIH POREMEĆAJA", izrađena pod mentorstvom prof. dr. sc. Tomislava Kosa, obranjena je 02. ožujka 2007. na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Povjerenstvo za obranu bilo je u sastavu: prof. dr. sc. Boris Kviz - predsjednik, prof. dr. sc. Tomislav Kos - mentor, prof. dr. sc. Ivan Markežić s Fakulteta prometnih znanosti u Zagrebu, prof. dr. sc. Borivoj Modlic i prof. dr. sc. Serđo Kos s Pomorskog fakulteta u Rijeci.

Doktorska disertacija sadrži 113 stranica teksta, s 80 slika i 5 tablica, popis literature od 139 referencija, popis internetskih adresa, popis oznaka, 83 lista priloga vremenskih dijagrama nizova, njihovih spektara i korelacijskih funkcija ionosfernih kašnjenja, te sažetak, ključne riječi i životopis autora, na hrvatskom i engleskom jeziku.

Rad je podijeljen na sljedeća poglavlja:

1. Uvodne naznake
2. Satelitsko određivanje položaja
3. Svemirsko vrijeme
4. Ionosferska pogreška satelitskog određivanja položaja
5. GPS ionosferno kašnjenje u uvjetima izraženih promjena svemirskog vremena
6. Prijedlog modela ionosferske pogreške satelitskog određivanja položaja u ovisnosti o stanju svemirskog vremena i
7. Zaključak.

U poglavlju Uvodne naznake ukazuje se na značaj pojava i procesa koji se zbivaju u ionosferi, kao posljedica složenijih i opsežnijih procesa u međuplanetarnom prostoru, izazvanih promjenjivom aktivnošću Sunca, a nazvanih svemirskim vremenom. Prikazan je njihov utjecaj na mnogobrojne tehničke sustave na Zemlji, satelitske radiokomunikacijske sustave, a osobito sustave satelitskog određivanja položaja. Naglašena je težnja uvažavanja lokalnih posebnosti ionosfere za područje Republike Hrvatske i regije Jugoistočne Europe, a na temelju eksperimentalnih rezultata, uzetih s internetskih baza podataka. Zbog multidisciplinarnosti problematike potrebno je uskladiti nazivlje i način označavanja.

U drugom poglavlju opisan je postupak satelitskog određivanja položaja na primjeru sustava GPS. Definiran je izraz za pseudoudaljenost, a na temelju poznatih vrijednosti pogrešaka mjerenja i jedna točka trajektorije gibanja satelita. Od pogrešaka u određivanju položaja s pomoću satelita razmotrene su one uslijed netočnih satelitskih efemerida, netočnosti satelitskog sata, zbog višestrukih putova vala, uslijed šuma korisničkog prijmnika, te uslijed ionosferskog i troposferskog kašnjenja. Analizirana je geometrijska degradacija točnosti određivanja položaja, a uz pomoć korisničke razdiobe pogrešaka i ukupna pogreška satelitskog određivanja položaja, sve u uvjetima mirnog svemirskog vremena. U ekstremnim uvjetima

svemirskog vremena navedeni modeli nisu uspješni. Od predloženih statističkih modela uzroka pogrešaka prikazan je onaj kombinacije Klobucharovog i Gauss-Markovljevog.

U trećem poglavlju o svemirskom vremenu analizira se prostor između Sunca i Zemlje pod utjecajem solarne aktivnosti, kao uzrok poremećaja magnetskog polja Zemlje i ionosfere. Ionosfera je detaljno razrađena, od stvaranja ionosferskih slojeva do transporta i difuzije plazme, te neutralnih vjetrova. Gustoća slobodnih elektrona po visini razmotrena je njenim dnevnim, sezonskim, solaro ovisnim i geografskim promjenama. Dani su izrazi za procjenu kritičnih frekvencija pojedinih slojeva (E,F1,F2) i ukupnog sadržaja elektrona pri mirnom svemirskom vremenu.

Četvrto poglavlje bavi se ionosferskom pogreškom pri satelitskom određivanju položaja, te je definira ekvivalentnim ionosferskim kašnjenjem. Opisana je korekcija dvofrekvencijskim mjerenjima, fizikalnim modelima, te iskustvenim modelima (standardni GPS ili Klobucharov).

Peto poglavlje obrađuje GPS ionosfersko kašnjenje pri izraženim promjenama svemirskog vremena, kao što je to bilo tijekom listopada i studenog 2003. godine. Analizira se solar na aktivnost, stanje geomagnetskog polja i ionosfere te dinamika GPS ionosferskog kašnjenja procesiranjem rezultata mjerenja pseudoudaljenosti dvofrekvencijskim GPS prijamnikom, na referentnoj postaji Osijek, s internetske arhive. Dobivene (stvarne) vrijednosti mogu se aproksimirati Klobucharovim modelom s emitiranim koeficijentima, ili modelom korekcija, praćenjem dinamike GPS ionosferskog kašnjenja. Pokazano je, kako tok Sunčevog zračenja najranije počinje ukazivati na pojačanu solarnu aktivnost i poremećaje svemirskog vremena. Podaci o vertikalnoj komponenti gustoće magnetskog toka i kritičnim frekvencijama ionosferskih slojeva prikupljeni su na referentnoj postaji Atena, Grčka. Podaci su uzimani svakih 15 minuta, a za analizu su korišteni programski paketi dostupni na Internetu, kao i vlastita programska podrška za poslove nepokrivene gotovim paketima. Određene su apsolutne vrijednosti stvarnog i modeliranog GPS ionosferskog kašnjenja, te srednje vrijednosti pogrešaka Klobucharovog modela u odnosu na stvarno kašnjenje. Analizirani su spektri vremenskog niza izmjerenih maksimalnih dnevnih vrijednosti ionosferskog kašnjenja, kao i autokorelacijske funkcije takvog vremenskog niza po Klobucharu. Pokazano je kako Klobucharov model u navedenom razdoblju na području Republike Hrvatske ne pruža zadovoljavajuću korekciju kašnjenja, uz obrazloženje uzroka. Prikazana je ovisnost maksimalnog izmjerenog kašnjenja o broju Sunčevih pjega, o toku Sunčevog zračenja i o planetarnom indeksu Ap. U cilju prognoze GPS ionosferskog kašnjenja razmatra se mogućnost modela, koji će uzeti u obzir samo dinamiku promjena kašnjenja, za razliku od statičkih modela do sada. Temeljem Gauss-Markovljevog procesa prvog reda pokazano je kako se prognoza bazira na prethodnoj dinamici sustava, a ne na njegovom trenutnom stanju. Za minimiziranje varijance pogrešaka estimacije predlaže se Kalmanov filtar. Naveden je temeljni algoritam za potrebe određivanja GPS ionosferskog kašnjenja. Ponašanje filtra definirano je na 4 različita načina, od kojih su prva dva uspješno reducirali ionosfersko kašnjenje, treći djelomično, a četvrti neuspješno. Analizirani dinamički filtri pokazali su malu osjetljivost na ekstremne ionosferske poremećaje, za razliku od Klobucharovog algoritma spore i neadekvatne reakcije.

Šesto poglavlje predlaže model kompenzacije ionosferskog kašnjenja za jednofrekvencijske prijarnike, ovisno o stanju svemirskog vremena. Za slučaj mirnog svemirskog vremena ili njegovih manjih poremećaja predlaže se Klobucharov model, dok se za ekstremne poreme-

ćaje svemirskog vremena predlaže dinamički kompozitni model. On može biti integriran i s DGPS-om ili poboljšanim Klobucharovim modelom, koji generira koeficijente s obzirom na lokalno stanje ionosfere, ako su takvi sustavi dostupni, i ako je korisnik za to opremljen.

U Zaključku se konstatira važnost ionosferskog kašnjenja kao glavnog uzroka pogreške određivanja položaja. Ponašanje toga kašnjenja u uvjetima ekstremnog svemirskog vremena nije dosad opisano odgovarajućim modelom. Definiranjem vertikalnog profila broja elektrona ukazuje se na teorijsku vezu sa stanjem svemirskog vremena. Temeljem prikupljenih eksperimentalnih podataka s referentne postaje Osijek analizirana je dinamika promjena parametara svemirskog vremena, a time i dinamika promjena GPS ionosferske pogreške. Predlaže se opći kompozitni model korekcije GPS ionosferskog kašnjenja.

U svome radu pristupnik je pokazao da postojeći teorijski i eksperimentalni modeli korekcije pogreške određivanja položaja uslijed ionosferskog kašnjenja zadovoljavaju samo u relativno mirnim uvjetima svemirskog vremena. Rezultatima opažanja razvoja ekstremnih uvjeta u razdoblju od 1. listopada - 23. studenoga 2003. godine pokazano je da GPS ionosfersko kašnjenje slijedi dinamiku geomagnetskih i ionosferskih oluja, uzrokujući pogreške udaljenosti 4 do 8 m. Usporedbom statističkih parametara vremenskih nizova definirani su linearni modeli ovisnosti parametara svemirskog vremena (broja Sunčevih pjega i toka Sunčevog zračenja) i vršnog dnevnog GPS ionosferskog kašnjenja za područje sjeverne Hrvatske u navedenom razdoblju.

Predložen je novi, kompozitni model GPS ionosferskog kašnjenja, kao poboljšanje postojećeg standardnog Klobucharovog modela. Vrednovanjem rezultata istraživanja kašnjenja u raznim uvjetima svemirskog vremena pokazano je, da skalarni Kalmanov filtar, kao komponenta kompozitnog modela, uspješno opisuje dinamiku GPS ionosferskog kašnjenja, uzrokujući pogrešku manju od 1 m u cijelom vremenskom intervalu promatranja.

Izvorni znanstveni doprinos sastoji se u:

- predloženom teorijskom modelu ionosferske pogreške satelitskog određivanja položaja u ovisnosti o parametrima svemirskog vremena;
- identifikaciji dinamike promjena ukupnog ionosferskog sadržaja elektrona i ionosferske pogreške satelitskog određivanja položaja tijekom ekstremnih uvjeta svemirskog vremena, a na temelju vremenskih nizova eksperimentalnih rezultata s područja sjeverne Hrvatske;
- prijedlogu novog modela ionosferske pogreške satelitskog određivanja položaja u ovisnosti o dinamici i karakteru promjena svemirskog vremena; te
- vrednovanju rezultata istraživanja utjecaja ekstremnih uvjeta svemirskog vremena na ionosfersku pogrešku satelitskog određivanja položaja i u utvrđivanju uvjeta odabira pojedinačnih korelacijskih modela za određivanje ionosferske pogreške ovisno o stanju i dinamici promjena svemirskog vremena.

Dugogodišnjim istraživačkim radom uz primjenu opsežne literature pristupnik je pokazao vlastiti znanstveni pristup u rješavanju složene problematike. Analizom eksperimentalnih rezultata i primjenom suvremenih računalnih algoritama pokazao je sposobnost za samostalni znanstvenoistraživački rad.