

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Geodezija,
smer Geodezija

Kandidatka:

Karmen Janet

**Analiza rezultatov obdelave GPS pravih, GPS
simuliranih in GALILEO simuliranih
opazovanj**

Diplomska naloga št.: 724

Mentor:

izr. prof. dr. Bojan Stopar

Somentor:

asist. mag. Oskar Sterle

Ljubljana, 4. 10. 2007

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **KARMEN JANET** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
**»OBDELAVA IN ANALIZA GPS PRAVIH, GPS SIMULIRANIH IN GALILEO
SIMULIRANIH OPAZOVANJ«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 7.9.2007

Karmen Janet

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.28(043.2)
Avtor:	Karmen Janet
Mentor:	izr. prof. dr. Bojan Stopar
Somentor:	Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.
Naslov:	Obdelava in analiza GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj
Obseg in oprema:	101 str., 26 pregl., 3 graf., 19 sl., 92 en.
Ključne besede:	GPS, GALILEO, simulator GSSF, bazni vektor, točnost

Izveček

Diplomska naloga obravnava točnost relativnega položaja, pridobljenega z GPS pravimi, GPS simuliranimi in GALILEO simuliranimi opazovanji. Simulacija podatkov opazovanj je bila opravljena s simulatorjem GSSF. Predstavljena sta sestava in delovanje simulatorja GSSF. Obdelava podatkov opazovanj je izvedena s programskim paketom NDA Professional, kjer so upoštevani predvideni optimalni modeli vplivov na opazovanja. Vplivi na opazovanja in uporabljeni modeli so podrobneje opisani. Na podlagi znanih apriori koordinat sprejemnikov so izračunane komponente baznih vektorjev, ki so privzete kot »točne« vrednosti. Odstopanja med pridobljenimi in »točnimi« vrednostmi komponent so obravnavana za vsak tip opazovanj in vsako dolžino serije opazovanj. Podana so tudi odstopanja komponent pri zapiranju trikotnika, ki ga tvorijo bazni vektorji. Na podlagi primerjave rezultatov lahko pridobimo podatek o dolžini trajanja opazovanj, ki je potrebna za določitev relativnega položaja z visoko natančnostjo.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.28(043.2)
Author: Karmen Janet
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bojan Stopar
Cosupervisor: Oskar Sterle, B. Sc. in Geodesy
Title: Processing and analysis of GPS real, GPS simulated and GALILEO simulated observations
Notes: 101 p., 26 tab., 3 graph., 19 fig., 92 eq.
Key words: GPS, GALILEO, simulator GSSF, baseline, accuracy

Abstract

The present work focuses on the accuracy of relative positioning, based on GPS real, GPS simulated and GALILEO simulated observations. Simulated observation data were generated by simulator GSSF. Represented are functional composition and capabilities of the simulator GSSF. Software named NDA Professional is used for processing observation data where the expected optimal models are chosen to handle the effects on observations. The effects on observations and used models are described in detail. Baseline components are computed from known apriori receiver coordinates, which are assumed as »true« values. The differences between »true« and estimated values of components are performed for every observation type and every observation session length. There are also represented differences of components by closing figure that is formed of baselines. Starting from the comparison of results it is possible to provide information of observation length which is necessary for high precision relative positioning.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Bojanu Stoparju ter somentorju Oskarju Sterletu.

Iz srca se zahvaljujem dragima staršema, ki sta mi skozi študentska leta nudila finančno in moralno podporo. Brez vaju diploma ne bi postala resničnost.

Zahvalila bi se tudi Gregorju za vso skrb, naklonjenost in razumevanje.

Hvala tudi vsem ostalim, ki ste mi stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	LASTNOSTI SISTEMOV GPS IN GALILEO.....	3
2.1	Sestava GPS.....	3
2.1.1	Vesoljski segment.....	3
2.1.2	Kontrolni segment.....	5
2.1.3	Uporabniški segment.....	6
2.2	Sestava sistema GALILEO.....	6
2.2.1	Globalna komponenta.....	7
2.2.1.1	Vesoljski segment.....	7
2.2.1.2	Kontrolni segment.....	8
2.2.2	Lokalna komponenta.....	9
2.2.3	Integracija s sistemom EGNOS.....	10
2.2.4	Uporabniški segment.....	10
2.2.5	Zunanje komponente.....	11
2.3	Uporaba GPS.....	11
2.4	Storitve sistema GALILEO.....	12
2.4.1	Storitve GALILEO satelitov – GSOS.....	13
2.4.2	Lokalno podprte storitve sistema GALILEO – GLAS.....	15
2.4.3	Storitve sistema EGNOS – ES.....	15
2.4.4	GALILEO kombinirane storitve – GCS.....	16
2.5	GPS signal.....	16
2.6	GALILEO signal.....	18
2.7	Tirnice satelitov.....	20
2.8	Tipi GPS opazovanj.....	22

2.8.1	Kodna opazovanja	22
2.8.2	Fazna opazovanja	24
2.8.3	Fazne razlike	25
2.8.4	Linearne kombinacije faznih opazovanj	27
3	VPLIVI NA OPAZOVANJA.....	29
3.1	Natančnost tirnic GPS satelitov.....	29
3.2	Vrste efemerid GPS satelitov.....	30
3.3	Ionosferska refrakcija	31
3.3.1	Klobučarjev model ionosfere.....	34
3.3.2	Model ionosfere NeQuick.....	35
3.3.3	»Iono-free« linearne kombinacije faznih opazovanj	36
3.4	Troposferska refrakcija	38
3.4.1	Hopfieldov model troposfere	40
3.4.2	Saastamoinenov model troposfere	41
3.4.3	Projekcijske komponente troposferske refrakcije.....	42
3.5	Odboj signala	45
3.6	Šum sprejemnika	46
4	SIMULATOR GSSF	47
4.1	Modeli in analize simulatorja GSSF	47
4.2	Sestava simulatorja GSSF	49
4.2.1	Simulator SVS.....	50
4.2.1.1	Modeli in algoritmi SVS vesoljskega segmenta	51
4.2.1.2	Modeli in algoritmi vplivov na opazovanja.....	52
4.2.1.3	Modeli in algoritmi SVS uporabniškega segmenta	53
4.2.1.4	Modeli in algoritmi SVS kontrolnega segmenta	54
4.2.2	Simulator RDG	55

4.2.2.1	Modeli in algoritmi RDG vesoljskega segmenta	55
4.2.2.2	Modeli in algoritmi vplivov na opazovanja	56
4.2.2.3	Modeli in algoritmi RDG kontrolnega segmenta	58
5	OBDELAVA GPS PRAVIH, GPS SIMULIRANIH IN GALILEO SIMULIRANIH OPAZOVANJ	59
5.1	Podatki opazovanj.....	59
5.2	Programski paket NDA Professional	61
5.3	Koraki obdelave opazovanj s programskim paketom NDA Professional	65
5.4	Izravnava baznih vektorjev.....	68
5.5	Rezultati obdelave opazovanj	70
5.5.1	Odstopanja pridobljenih komponent baznih vektorjev	70
5.5.2	Odstopanja pri zapiranju trikotnika.....	90
6	ZAKLJUČEK.....	96
7	VIRI.....	98

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1. Primerjava SPS in PPS – 95% verjetnost [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 53].	12
Preglednica 2.2. Primerjava storitev OS, SoL, CS in PRS [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 97-100].	14
Preglednica 2.3. Lastnosti storitve SAR [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 101].	15
Preglednica 2.4. Uporaba navigacijskih signalov v okviru storitev in njihove karakteristike [GALILEO Mission High Level Definition, 2002, str. 29].	20
Preglednica 3.1. Maksimalne vrednosti vertikalne ionosferske refrakcije na nosilni valovanji L1 in L2 [Su, 2000, str. 35].	34
Preglednica 3.2. Primerjava projekcijskih komponent [Niell, 1996, str. 22].	43
Preglednica 3.3. Vrednosti koeficientov Niellove suhe projekcijske komponente [Niell, 1996, str. 24].	44
Preglednica 3.4. Vrednosti koeficientov Niellove mokre projekcijske komponente [Niell, 1996, str. 24].	45
Preglednica 3.5. Podatki nosilnih valovanj GALILEO in moderniziranega GPS signala [GNSS NRT Data Analysis Algorithms, 2006, str. 14].	46
Preglednica 5.1. »Točne« vrednosti koordinat točk trikotnika CELJ-TREB-PPNM.	60
Preglednica 5.2. »Točne« vrednosti komponent baznih vektorjev in »točne« vrednosti dolžin baznih vektorjev.	60
Preglednica 5.3. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 1-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	70
Preglednica 5.4. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 1-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	78
Preglednica 5.5. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 3-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	79
Preglednica 5.6. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 3-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	82
Preglednica 5.7. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 6-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	82
Preglednica 5.8. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 6-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	84
Preglednica 5.9. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 12-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	84
Preglednica 5.10. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 12-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.	85

Preglednica 5.11. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 24-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.....	86
Preglednica 5.12. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 1-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.....	90
Preglednica 5.13. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 3-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.....	93
Preglednica 5.14. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 6-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.....	94
Preglednica 5.15. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 12-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.....	94
Preglednica 5.16. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 24-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.....	94
Preglednica 5.17. Povprečne vrednosti odstopanj po komponentah pri zapiranju trikotnika PPNM-CELJ-TREB.....	95

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 5.1. Odstopanja posamezne komponente baznega vektorja CELJ-TREB v odvisnosti od dolžine serije opazovanj.	87
Grafikon 5.2. Odstopanja posamezne komponente baznega vektorja PPNM-CELJ v odvisnosti od dolžine serije opazovanj.	88
Grafikon 5.3. Odstopanja posamezne komponente baznega vektorja PPNM-TREB v odvisnosti od dolžine serije opazovanj.	89

KAZALO SLIK

Slika 2.1. (a) Sistem GPS satelitov. (b) Satelit sistema GPS. [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 41]	4
Slika 2.2. Delovanje kontrolnega segmenta [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 43].	5
Slika 2.3. Povezava med komponentami in storitvami sistema GALILEO [GALILEO Mission High Level Definition, 2002, str. 27].....	7
Slika 2.4. (a) Sistem satelitov. (b) Satelit sistema GALILEO. [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 105]	8
Slika 2.5. Prikaz modulacije valovanj [Dach et al., 2006, str. 12].....	16
Slika 2.6. Sestava GALILEO signala [GALILEO Mission High Level Definition, 2002, str. 28].	18
Slika 2.7. Prikaz Keplerjevih elementov [Dach et al., 2006, str. 24].....	21
Slika 2.8. Osnovni princip kodnih opazovanj [Wells et al., 1999, str. 126].	23
Slika 2.9. Osnovni princip faznih opazovanj [Wells et al., 1999, str. 128].	25
Slika 3.1. Zenitna razdalja na srednji višini ionosfere [Su, 2000, str. 35].	33
Slika 4.1. Prikaz modelov in algoritmov simulatorja SVS [GSSF Team, 2005a, str. 19].	50
Slika 4.2. Prikaz modelov in algoritmov simulatorja RDG [GSSF Team, 2005a, str. 55].	55
Slika 5.1. Komponenta GNE v programskem paketu NDA Professional.	62
Slika 5.2. Komponenta MPE v programskem paketu NDA Professional.	63
Slika 5.3. Komponenta SPE v programskem paketu NDA Professional.....	64
Slika 5.4. Pogovorno okno, kjer urejamo nastavitve baznega vektorja (NDA Professional). .	65
Slika 5.5. Pogovorno okno, kjer urejamo nastavitve točke (NDA Professional).....	66
Slika 5.6. Pogovorno okno, kjer urejamo nastavitve baznega vektorja (NDA Professional). .	67
Slika 5.7. Prikaz funkcije spreminjanja simulirane tirnice satelita v prvi in zadnji uri [Chersich, 2007].....	78

OKRAJŠAVE

C/A	angl. Coarse/Acquisition slov. koda GPS signala
CODE	angl. Center for Orbit Determination in Europe slov. evropski center, ki pripravlja podatke o tirnicah satelitov
COSPAS-SARSAT	rus. Cosmicheskaya Sistyema Poiska Avariynich Sudov - angl. Search and Rescue Satellite-Aided Tracking slov. satelitski sistem, ki podpira storitev za iskanje in reševanje
CS	angl. Commercial Service
DGR	model ionosfere, ki sta ga definirala Di Giovanni in Radicella
DOP	angl. Dilution Of Precision slov. slabšanje natančnosti
EGNOS	angl. European Geostationary Navigation Overlay Service slov. evropski geostacionarni navigacijski sistem
ES	angl. EGNOS Services slov. storitve sistema EGNOS
ESA	angl. European Space Agency slov. Evropska vesoljska agencija
ESTEC	angl. European Space Research and Technology Centre slov. Evropski center za vesoljske raziskave in tehnologijo
GCS	angl. GALILEO Combined Services slov. GALILEO kombinirane storitve
GEO	angl. Geostationary Earth Orbit slov. tirnica geostacionarnega satelita
GIOVE	angl. GALILEO In-Orbit Validation Element slov. prva generacija GALILEO satelitov
GLAS	angl. GALILEO Locally Assisted Services slov. lokalno podprte storitve sistema GALILEO

GNE	angl. GNSS Networks Editor slov. komponenta programskega paketa NDA Professional, ki omogoča urejanje nastavitev GNSS mreže
GNSS	angl. Global Navigation Satellite Systems slov. globalni navigacijski satelitski sistem
GPS	angl. Global Positioning System slov. ameriški globalni navigacijski satelitski sistem za pozicioniranje
GSOS	angl. GALILEO Satellite-Only Services slov. storitve GALILEO satelitov
GSP	angl. Geodetic Scientific Package slov. glavna komponenta programskega paketa NDA Professional
GSSF	angl. GALILEO System Simulation Facility slov. simulator sistema GALILEO
IGS	angl. International GPS Service slov. mednarodna GPS služba
ITRF	angl. International Terrestrial Reference Frame slov. mednarodni terestrični referenčni sestav
MEO	angl. Medium Earth Orbit slov. tirnica satelita, ki kroži na srednjih višinah
MPE	angl. Messages and Processes Environment slov. komponenta programskega paketa NDA Professional, ki podaja sporočila o procesu obdelave
NDA	angl. Network Deformation Analysis slov. programski paket za analize deformacij mrež
OS	angl. Open Service slov. prosto dostopna storitev
OSL	angl. Scientific Open Source Library slov. glavna komponenta programskega paketa NDA Professional
P	angl. Precise slov. koda GPS signala
PPS	angl. Precise Positioning Service slov. natančna določitev položaja

PRS	angl. Public Regulated Service slov. javna storitev
RDG	angl. Raw Data Generator slov. komponenta GSSF simulatorja, ki generira podatke o opazovanjih, podatke o efemeridah ter podatke o času
SAR	angl. Search and Rescue slov. storitev za reševanje in iskanje
SoL	angl. Safety of Life slov. storitev za zagotovitev varnosti življenja
SOM	angl. System Options Manager slov. komponenta programskega paketa NDA Professional, ki omogoča urejanje nastavitev o paketu ter podatkov o licenci
SPE	angl. Statistical Post-processing Environment slov. komponenta programskega paketa NDA Professional, ki omogoča statistične analize rezultatov obdelave
SPS	angl. Standard Positioning Service slov. standardna določitev položaja
SVS	angl. Service Volume Simulator slov. komponenta GSSF simulatorja, ki omogoča razne analize storitev
TEC	angl. Total Electron Content slov. količina, ki podaja skupno število prostih elektronov v ionosferi na površini 1 m ² vzdolž poti satelit-sprejemnik
UTC	angl. Universal Time Coordinated slov. univerzalni koordinirani čas

1 UVOD

Začetki globalnih navigacijskih satelitskih sistemov (angl. Global Navigation Satellite Systems – GNSS) segajo v pozna 60-ta leta, ko se je pričela izgradnja ameriškega sistema GPS (angl. Global Positioning System). Sprva je bil namenjen samo vojaški uporabi, kasneje pa je vsebina satelitskega signala postala dostopna tudi civilnim uporabnikom, vendar še vedno ne v celoti. Zaradi omejevanja dostopa do vsebine satelitskega signala je natančnost določitve položaja slabša, zlasti za zahtevnejše civilne uporabnike. Višjo natančnost in boljše dostopnost bo omogočal evropski sistem GALILEO, ki bo prvi globalni navigacijski satelitski sistem, prvotno vzpostavljen za civilne uporabnike. Sistem GALILEO bo v celoti neodvisen, združljiv ter interoperabilen z moderniziranim GPS. Ker bo omogočal uporabo številnih storitev, ki bodo dostopne tudi v najbolj ekstremnih pogojih, predstavlja pomemben prispevek k politikam članic Evropske unije ter udeležanje evropskih ambicij pri tehnološki in inovacijski politiki. Sistem GALILEO je trenutno v fazi vzpostavitve in naj bi bil v celoti operabilen v letu 2012.

Z globalnimi navigacijskimi satelitskimi sistemi določamo položaj v prostoru. V geodeziji, kjer so potrebe po natančnosti določanja položaja višje, obravnavamo določitev absolutnega in relativnega položaja ločeno. V splošnem absolutni položaj ne more biti na istem nivoju kot relativni položaj, saj je nekaj stopenj nižje kakovosti. Zato je v geodeziji pridobivanje podatka o položaju še vedno omejeno na relativno določitev položaja. Osnova za relativno določanje položaja je tvorjenje faznih razlik. Z večanjem števila tvorjenih faznih razlik se večja natančnost določitve relativnega položaja. Ker bodo sateliti sistema GALILEO oddajali signal na treh nosilnih valovanjih, bo s tem zagotovljena višja natančnost kot v primeru določitve relativnega položaja na osnovi GPS signala z dvema nosilnima valovanjema.

Namen diplomske naloge je primerjava »točnega« relativnega položaja s položajem, pridobljenim z GPS in GALILEO opazovanji, ter primerjava pridobljenih relativnih položajev glede na tip opazovanj. Tovrstne primerjave omogočajo številne analize in izboljšave postopkov obdelave, s tem pa je dosežena vedno višja natančnost določitve položaja. Ker sistem GALILEO še ni operabilen, so bili podatki o opazovanjih pridobljeni s simulatorjem

GSSF (angl. GALILEO System Simulation Facility). Na osnovi simulacije opravljenih GPS pravih opazovanj so bila najprej pridobljena GPS simulirana opazovanja, nato na osnovi simulacije le-teh GALILEO simulirana opazovanja. Osnovni namen vzpostavitve simulatorja GSSF je preučevanje in realizacija sistema GALILEO. Zato je s primerjavo rezultatov obdelave GPS pravih in GPS simuliranih opazovanj omogočeno boljše poznavanje ter izboljšave algoritmov in modelov simulatorja GSSF.

2 LASTNOSTI SISTEMOV GPS IN GALILEO

NAVSTAR GPS (angl. Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System) ali krajše GPS je globalni navigacijski satelitski sistem, ki ga je leta 1973 razvilo ameriško Ministrstvo za obrambo (angl. U. S. Department of Defence). Sistem je postal operabilen leta 1994, ko je bil dograjen v celoti. Prvotno je bil vzpostavljen za vojaške namene in sicer za natančno določitev položaja, hitrosti in točnega časa v poljubnem trenutku kjerkoli na Zemlji. Kasneje je bil dostop do sistema omogočen tudi civilnim uporabnikom, vendar z določenimi omejitvami.

V letu 1998 se je Evropska unija odločila za vzpostavitev evropskega globalnega navigacijskega satelitskega sistema GALILEO, ki bo neodvisen od GPS ter namenjen civilnim uporabnikom. Uporabnikom bo ponujal številne neodvisne storitve, hkrati pa bo popolnoma operabilen s sistemoma GPS in GLONASS. Izvedba sistema je pod okriljem Evropske komisije (angl. European Commission) in Evropske vesoljske agencije (angl. European Space Agency – ESA). Prva je odgovorna za politično izvedljivost, druga pa je odgovorna za tehnično izvedljivost.

2.1 Sestava GPS

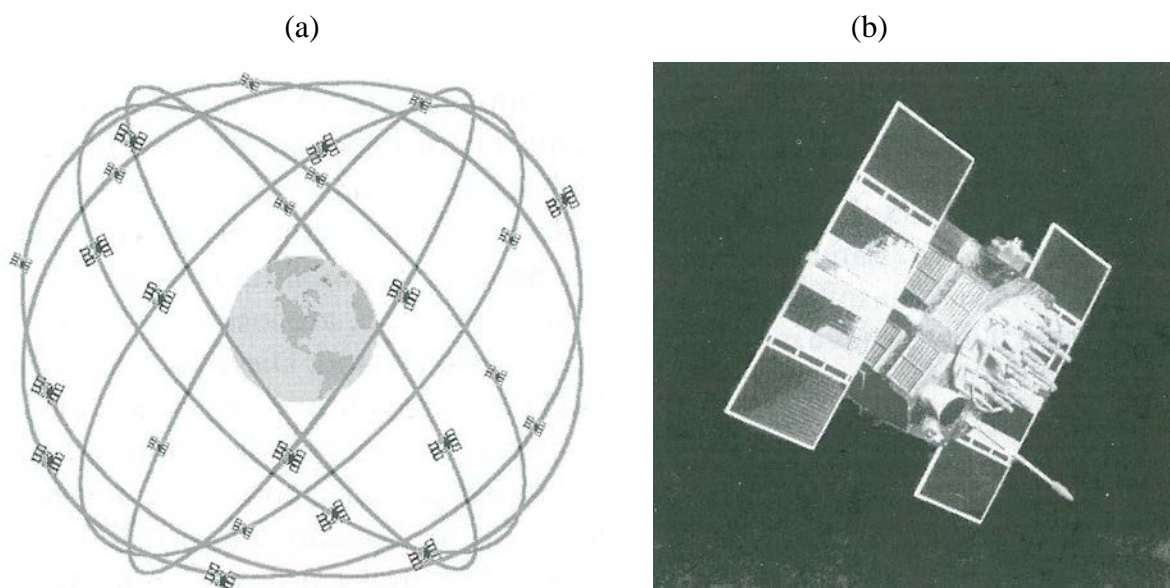
GPS je sestavljen iz treh segmentov: vesoljskega, kontrolnega in uporabniškega segmenta. Običajno delitev sistema dopolnjuje množica civilnih organizacij po svetu, ki sicer nima možnosti komunikacije s sateliti, lahko pa pripravlja podatke za doseganje najvišje možne natančnosti določitve položaja na osnovi GPS opazovanj.

2.1.1 Vesoljski segment

Vesoljski segment predstavlja sistem 24-ih satelitov v šestih ravninah kroženja. Sateliti krožijo na višini 20163 km nad zemeljskim površjem s hitrostjo 3.9 km/s. Osnovna perioda kroženja je 11 ur in 58 minut. Sateliti, ki krožijo na tej višini, se imenujejo MEO (angl.

Medium Earth Orbit) sateliti. Ravnine kroženja so enakomerno razporejene od smeri pomladišča proti vzhodu. Glede na ravnino ekvatorja so nagnjene za kot 55° in so zelo podobne krožnici (ekscentriciteta ravnine satelitove krožnice je okoli 0.01). V vsaki ravnini se nahajajo štirje sateliti, ki zaradi optimalne pokritosti celotne Zemlje z GPS signalom niso popolnoma enakomerno razporejeni po ravninah. GPS sateliti tehtajo okoli 930 kg, njihova življenjska doba je 7.5 let.

Posamezen satelit nosi dogovorjeno oznako, načinov označevanja satelitov je več. Možnosti sta označevanje na podlagi SVN (angl. Space Vehicle Number) števila ali označevanje na podlagi PRN (angl. Pseudo Random Number) števila. Tretja možnost je označevanje ravnin kroženja z oznakami od A do F ter satelitov v posamezni ravnini od 1 do 4.



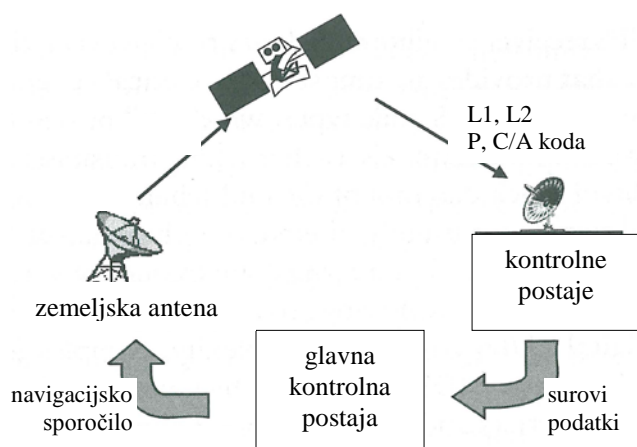
Slika 2.1. (a) Sistem GPS satelitov. (b) Satelit sistema GPS. [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 41]

Prvi satelit je bil izstreljen v začetku leta 1978. V tem času so razvili pet različnih skupin oziroma generacij satelitov: Block I, Block II, Block IIA, Block IIR in Block IIF. Satelitov Block I danes ni več, zadnji satelit iz te generacije je krožil nad Zemljo vse do leta 1995. Vesoljski segment GPS trenutno sestavljajo sateliti Block II, IIA in IIR. Sateliti Block IIR so sposobni medsebojno izmenjavati podatke in samostojno pripravljati navigacijska sporočila. Neodvisno od kontrolne postaje lahko delujejo do 180 dni.

Od leta 2005 poteka modernizacija zadnjih osmih satelitov generacije Block IIR. Ti sateliti lahko oddajajo signal z novo civilno kodo L2C ter novo vojaško kodo M, katera temelji na nosilnih valovanjih L1 in L2. Zadnji satelit iz te generacije, ki so jo poimenovali Block IIR-M, naj bi bil izstreljen konec leta 2007. Naslednja generacija bodo sateliti Block IIF, ki bodo imeli nalogo vzdrževanja sistema in bodo oddajali signal, sestavljen iz nosilnih valovanj L1, L2, L2C in L5 ter iz dveh vojaških M kod. Naslednja bo generacija satelitov GPS III. Karakteristike satelitov GPS III še niso definirane, njihova uporaba pa je predvidena po letu 2010 [Kaplan in Hegarty, 2006].

2.1.2 Kontrolni segment

Kontrolni segment, ki je začel delovati leta 1985, je bil prvotno sestavljen iz glavne kontrolne postaje (angl. master control station) v bližini Colorado Springsa ter štirih kontrolnih postaj (angl. monitor stations). Kontrolne postaje so enakomerno razporejene vzdolž ekvatorja in imajo koordinate določene z visoko natančnostjo. Na nekaterih kontrolnih postajah nameščene zemeljske antene (angl. ground antennas), ki so del kontrolnega segmenta in omogočajo prenos podatkov. V letu 2005 je kontrolni segment dopolnilo šest NGA (angl. National Geospatial-Intelligence Agency) kontrolnih postaj [GPS]. Tako je lahko vsak satelit viden z vsaj dveh kontrolnih postaj, kar zagotavlja višjo natančnost določitve efemerid ter s tem višjo položajno natančnost. V bližnji prihodnosti bo dodanih še pet NGA kontrolnih postaj, tako da bo lahko vsak satelit viden z vsaj treh kontrolnih postaj.



Slika 2.2. Delovanje kontrolnega segmenta [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 43].

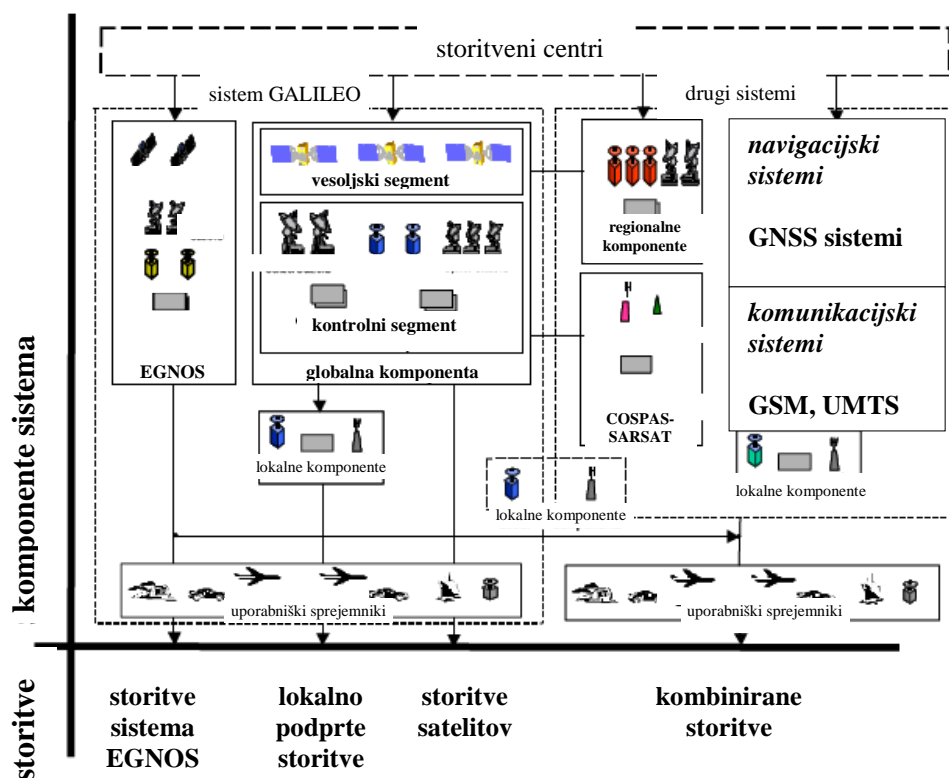
Sprejemniki na kontrolnih postajah opravljajo GPS opazovanja, zbirajo podatke o stanju satelitov ter lokalne meteorološke podatke. Kontrolne postaje posredujejo te surove podatke glavni kontrolni postaji, ki jih obdelajo in oblikujejo podatke navigacijskega sporočila. Zemeljske antene nato pošljejo periodično obdelano navigacijsko sporočilo satelitom, torej služijo kot vmesnik med vesoljskim in kontrolnim segmentom. Sateliti pridobljene podatke vključijo v signal, ki ga oddajajo GPS sprejemnikom. Pretok podatkov v kontrolnem segmentu je prikazan na sliki 2.2.

2.1.3 Uporabniški segment

Uporabniški segment predstavljajo množica aplikacij ter uporabniška strojna in programska oprema, ki s svojo uporabnostjo odločajo o tem ali sistem izpolnjuje uporabnikove potrebe in zahteve. Glede na področja uporabe lahko aplikacije razvrstimo v pet skupin: navigacija in sledenje na kopnem, na morju ali v zraku, opravljanje meritev in kartiranje, vojaške aplikacije, splošna uporaba ter ostale specializirane aplikacije. Uporabnikom prijazne aplikacije in cenovno ugodna uporabniška oprema so ključnega pomena za učinkovito in uspešno delovanje GPS sistema.

2.2 Sestava sistema GALILEO

Načrtovanje sestave sistema GALILEO je temeljilo na uporabniško orientiranem pristopu [Trautenberg et al., 2004]. Sestava sistema zagotavlja uporabo široke množice storitev, ki so opisane v poglavju 2.4. Komponente sistema GALILEO so: globalna komponenta, lokalna komponenta, sistem EGNOS (angl. European Geostationary Navigation Overlay Service), uporabniški segment in komponente zunanjih sistemov, ki skupaj s sistemom GALILEO zagotavljajo uporabo storitev.



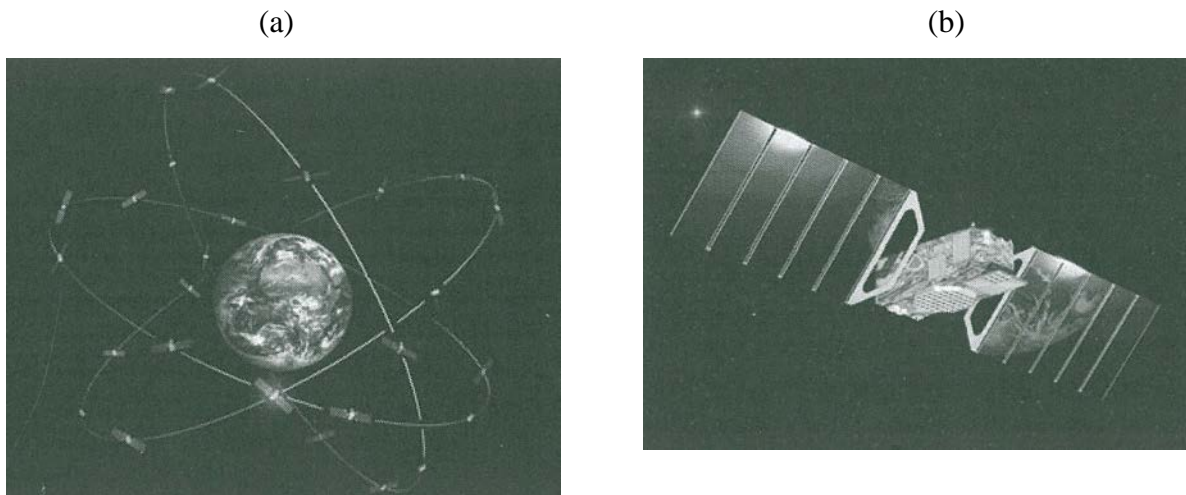
Slika 2.3. Povezava med komponentami in storitvami sistema GALILEO [GALILEO Mission High Level Definition, 2002, str. 27].

2.2.1 Globalna komponenta

Elementi globalne komponente zagotavljajo storitve GALILEO satelitov (angl. GALILEO Satellite-Only Services – GSOS). Sestavljena je iz vesoljskega in kontrolnega segmenta.

2.2.1.1 Vesoljski segment

Vesoljski segment sestavlja sistem 30 MEO satelitov v treh ravninah kroženja. Sateliti krožijo na višini 23616 km nad zemeljskim površjem z osnovno periodo 14 ur in 22 minut. Ravnine kroženja so glede na ravnino ekvatorja nagnjene za kot 56° . Sateliti tvorijo Walkerjev 27/3/1 sistem, kar pomeni da je v vsaki ravnini enakomerno razporejenih devet aktivnih satelitov in en rezervni satelit. Sateliti tehtajo okoli 625 kg, njihova pričakovana življenjska doba je 20 let. Sateliti so sestavljeni iz platforme, navigacijskega modula ter modula storitve SAR (angl. Search and Rescue Service).



Slika 2.4. (a) Sistem satelitov. (b) Satelit sistema GALILEO. [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 105]

V letu 2003 je Evropska vesoljske agencija začela z izgradnjo dveh GIOVE (angl. GALILEO In-Orbit Validation Element) satelitov [Falcone, 2006]. Prvi satelit GIOVE-A je bil izstreljen 28. decembra 2005 v ravnino kroženja na višini 23260 km. Satelit oddaja signale na dveh nosilnih valovanjih L1+E5 in L1+E6. Prvi oddan signal satelita je bil zabeležen dne 28. januarja 2006. Drugi satelit GIOVE-B bo izstreljen v letu 2007. Oddajal bo signale na treh nosilnih valovanjih E1, E5 in E6.

2.2.1.2 Kontrolni segment

Kontrolni segment nadzoruje sistem satelitov, določa parametre satelitove tirnice, ugotavlja urin tek satelitovih ur, obnavlja navigacijsko sporočilo ter določa podatke o integriteti (kvaliteti) signala. Možnost pridobivanja podatkov o integriteti signala je glavna razlika med sistemom GALILEO in ostalimi globalnimi navigacijskimi satelitskimi sistemi.

Glavni del kontrolnega segmenta predstavlja GALILEO kontrolni center (angl. GALILEO control center). Njegove naloge so določanje parametrov tirnic ravnin kroženja in sinhronizacija časa, obdelava podatkov o integriteti signala, vzdrževanje časa sistema ter upravljanje in nadzor nad sateliti in storitvami, ki jih sateliti zagotavljajo. Poleg kontrolnega centra kontrolni segment predstavljajo GALILEO senzorske postaje (angl. GALILEO sensor

stations), ki preko satelitov zbirajo navigacijske in meteorološke podatke ter druge pomembne informacije. Vse te podatke senzorske postaje posredujejo kontrolnemu centru preko globalnega komunikacijskega omrežja (angl. global area network), ki v splošnem skrbi za povezavo vseh elementov sistema. Prenos navigacijskih podatkov in podatkov o integriteti poteka preko globalnega omrežja GALILEO povezovalnih postaj (angl. GALILEO uplink stations). Za kontrolo nad sistemom satelitov ter posameznimi sateliti skrbijo TT&C postaje (angl. Telemetry, Telecommand & Tracking stations), ki so del omrežja GALILEO povezovalnih postaj.

GIOVE kontrolni segment je sestavljen iz globalnega omrežja GALILEO poskusnih senzorskih postaj, GIOVE glavnega centra ter dveh GIOVE kontrolnih centrov [Falcone, 2006]. Glavni center se nahaja v Evropskem centru za vesoljske raziskave in tehnologijo (angl. European Space Research and Technology Centre – ESTEC) na Nizozemskem. Naloge glavnega centra so določanje parametrov tirnic satelita, ugotavljanje urinega teka satelitovih ur ter periodično obnavljanje navigacijskega sporočila. Glavni center pošlje podatke navigacijskega sporočila satelitom preko kontrolnega centra. Kontrolni center satelita GIOVE-A se nahaja v Veliki Britaniji, kontrolni center satelita GIOVE-B se nahaja v Italiji.

2.2.2 Lokalna komponenta

Lokalni elementi kot sestavni deli GALILEO lokalne komponente bodo zagotavljali interoperabilnost sistema GALILEO z drugimi globalnimi navigacijskimi satelitskimi sistemi ter sistemi terestričnega določanja položaja na lokalni ravni. Ti lokalni elementi so [GALILEO Mission High Level Definition, 2002]:

- Lokalna natančnost navigacijskega sporočila, ki jo predstavljajo lokalni diferencialni popravki signala, s katerimi lahko sprejemniki odpravijo pogrešek tirnic satelitov, pogrešek satelitovih ur ter vpliv troposferske in ionosferske refrakcije. Natančnost določitve položaja je manjša od 1 m.
- Lokalna visoka natančnost navigacijskega sporočila, predstavljena z lokalnimi diferencialnimi popravki signala, s katerimi lahko sprejemniki odpravijo pogrešek tirnic satelitov, pogrešek satelitovih ur ter vpliv troposferske in ionosferske refrakcije.

Sprejemniki določajo neznano število celih valov na podlagi signala s tremi nosilnimi valovanji. Natančnost določitve položaja je okoli 10 cm.

- Lokalna podpora navigacije, kjer je za določitev položaja sprejemnika uporabljena eno- ali dvosmerna komunikacija. Uporabniško orientiran pristop temelji na enosmerni komunikaciji, ki omogoča najhitrejšo možno določitev položaja v realnem času. Storitveno orientiran pristop temelji na dvosmerni komunikaciji, kjer se podatki opazovanj najprej obdelajo v centru in nato pošljejo sprejemniku.
- Lokalna dostopnost navigacije, ki jo predstavljajo drugi satelitski sistemi. V primeru nevidnih GALILEO satelitov ali visokih zahtev glede dostopnosti satelitov lahko sprejemnik sprejme signal drugih satelitov.

2.2.3 Integracija s sistemom EGNOS

Sistem EGNOS je sestavljen iz štirih segmentov: vesoljskega, kontrolnega in uporabniškega segmenta ter komponente za podporo sistemu. Vesoljski segment predstavljajo GEO (angl. Geostationary Earth Orbit) sateliti, ki s signalom pokrivajo celotno Zemljo. Sateliti pošiljajo podatke postajam kontrolnega segmenta preko signala s kodno shemo podobno GPS signalu. Kontrolni segment upravlja s podatki o integriteti ter določa diferencialne popravke psevdo razdalje za vsak satelit, podatke o vplivu ionosferske refrakcije in efemeride satelitov. Elementi sistema EGNOS so neodvisni od globalne komponente sistema GALILEO. Kot predhodnik sistema GALILEO služi kot orodje za hitrejši prodor sistema na trg.

2.2.4 Uporabniški segment

Uporabniški segment je sestavljen iz sprejemnikov, ki ponujajo različne možnosti uporabe sistema GALILEO v okviru številnih vrst storitev. Poleg sprejema signala satelitov naj bi bili glavni funkciji sprejemnika tudi dostop do storitev regionalnih in lokalnih komponent ter interoperabilnost z drugimi sistemi. Nujnost teh dveh funkcij sprejemnika je odvisna od potreb in namena uporabe.

2.2.5 Zunanje komponente

Za uporabo sistema GALILEO tudi drugih območij izven Evrope se bodo vzpostavile regionalne komponente, ki jih bodo predstavljale kontrolne postaje. Za razvoj in delovanje regionalnih komponent bodo odgovorni ponudniki storitev na teh območjih.

Zunanjo komponento predstavlja tudi sistem COSPAS-SARSAT (rus. Cosmicheskaya Sistyema Poiska Avariynich Sudov – angl. Search and Rescue Satellite-Aided Tracking), ki podpira storitev SAR. Oddajniki uporabniškega segmenta sistema v primeru nevarnosti uporabnika oddajajo opozorilni signal, ki ga zaznajo sateliti in ga oddajo lokalnim uporabniškim terminalom in kontrolnim centrom. Uporabniški terminali in kontrolni centri so zasnovani tako, da sprejemajo signale LEO (angl. Low Earth Orbit), GEO ali MEO satelitov. Kontrolni centri sistema nato posredujejo informacije reševalnim koordinacijskim centrom.

2.3 Uporaba GPS

Do danes se je GPS razširil v vsa področja, ki so povezana s položajem v prostoru. Tako se sistem uporablja na področjih kot so: geodezija, geofizika, geodinamika, kartografija, geografski informacijski sistemi, navigacija. Sistem omogoča tudi prostoročne aktivnosti ter različne specializirane možnosti uporabe. Vendar je sistem v osnovi namenjen vojaški uporabi, zato je civilnim uporabnikom dostopen samo del celotne vsebine satelitskega signala. GPS torej omogoča dva načina določanja položaja [Kaplan in Hegarty, 2006]:

- standardna določitev položaja (angl. Standard Positioning Service – SPS), ki je namenjena civilnim uporabnikom, ter
- natančna določitev položaja (angl. Precise Positioning Service – PPS), ki je namenjena vojaškim uporabnikom.

PPS je omogočena samo pooblaščenim uporabnikom ameriške vojske ter določenih vladnih agencij. Civilni uporabniki lahko PPS uporabljajo samo z posebnim dovoljenjem ameriškega

obrambnega ministrstva. SPS je omogočena vsem uporabnikom po svetu in ni omejenega dostopa.

Omejevanje dostopa je izvedeno z dvema kriptografskima metodama. Z metodo onemogočanja dostopa do celotne vsebine signala (angl. Antispoofing – AS) je onemogočen dostop do neznanega dela P kode, ki se imenuje Y koda. S tem je dosežena slabša natančnost določanja absolutnega položaja v realnem času. Druga je metoda omejene dostopnosti (angl. Selective Availability – SA), ki predstavlja namerno povzročanje motenj s satelita oddanega navigacijskega sporočila. Te motnje so namerno spreminjanje podatkov o urinem teku satelitovih ur ali podatkov o parametrih tirnic satelitov in vplivajo predvsem na določitev absolutnega položaja. Vpliv SA je s sistema odstranjen od 1. maja 2000.

Preglednica 2.1. Primerjava SPS in PPS – 95% verjetnost [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 53].

Storitev	Horizontalna natančnost (m)	Vertikalna natančnost (m)	Natančnost prenosa časa (ns)
	pred 1.5.2000		
SPS	100	300	340
PPS	20	27.7	200
	po 1.5.2000		
SPS	≤ 13	≤ 22	≤ 40

2.4 Storitve sistema GALILEO

Storitve sistema GALILEO so definirane na podlagi pregleda številnih uporabnikovih potreb in opravljenih analiz trga. Storitve sistema so razdeljene v štiri skupine:

- storitve GALILEO satelitov (angl. GALILEO Satellite-Only Services – GSOS),
- lokalno podprte storitve sistema GALILEO (angl. GALILEO Locally Assisted Services – GLAS),
- storitve sistema EGNOS (angl. EGNOS Services – ES), ter
- GALILEO kombinirane storitve (angl. GALILEO Combined Services – GCS).

2.4.1 Storitve GALILEO satelitov – GSOS

Storitve GSOS bodo omogočene neodvisno od drugih sistemov. Delijo se v pet skupin [GALILEO Mission High Level Definition, 2002]:

- prosto dostopna storitev (angl. Open Service – OS),
- storitev za zagotovitev varnosti življenja (angl. Safety of Life – SoL),
- komercialna storitev (angl. Commercial Service – CS),
- javna storitev (angl. Public Regulated Service – PRS), ter
- podpora storitvi za iskanje in reševanje (angl. Search and Rescue Service – SRS).

Storitev OS ponuja storitve na osnovni ravni, ki so namenjene uporabniškim aplikacijam in splošni uporabi navigacije (npr. navigacija v avtomobilu, navigacija z uporabo mobilnikov). Storitev omogoča brezplačno pridobitev podatkov o položaju, hitrosti in času. Podatek o času je v primeru uporabe sprejemnikov z znanim položajem usklajen z UTC (angl. Universal Time Coordinated) časom. Storitev OS bo dosegala stopnjo natančnosti in dostopnosti, ki bo konkurenčna drugim globalnim navigacijskim satelitskim sistemom. V povezavi s storitvami GCS bo interoperabilna z ostalimi globalnimi navigacijskimi satelitskimi sistemi. Signali storitve OS so sestavljeni iz enega valovanja (E5a, E5b ali L1) in dveh merskih kod. Iz opazovanj je s tvorjenjem faznih razlik odstranjen vpliv ionosferske refrakcije.

Storitev SoL se bo uporabljala na področjih, kjer je potrebna višja stopnja varnostu (npr. v pomorskem, letalskem ali železniškem prometu). Zagotavljala bo potrebe uporabnikov na globalni ravni ter povečala varnost, še posebej na področjih, kjer običajne storitve niso dostopne. Storitev SoL bo prav tako dostopna vsem uporabnikom, vendar se od storitve OS razlikuje v tem, da bo omogočala pridobitev podatkov o integriteti na globalni ravni. Glede na stopnjo kritične situacije ločimo dve stopnji integritete. Kritična stopnja integritete je časovno krajša, zato je natančnost določitve položaja višja in čas sprožitve alarma krajši kot v primeru manj kritične stopnje. Storitev bo delovala na podlagi signalov storitve OS, ki bodo vključevali še podatke o integriteti.

Storitev CS je storitev omejenega dostopa za uporabo komercialnih in specifičnih aplikacij. Podjetje, ki skrbi za delovanje sistema GALILEO (angl. GALILEO Operating Company), bo

na podlagi zahtev industrije in potreb uporabnikov določilo stopnjo uporabe storitve. Dostop bo pod nadzorom ponudnikov storitve CS. Storitve bo delovala na podlagi signalov storitve OS ter dveh signalov na frekvenci valovanja E6, ki vključujeta podatke s t.i. dodanimi vrednostmi.

Storitve PRS se bo uporabljala za vladne aplikacije, saj omogoča višjo stopnjo zaščite pred možnimi motnjami signala kot storitve OS, SoL ali CS. Zaščita signala bo izvedena na trans-evropski ravni in na ravni posamezne države. Dostop do storitve bodo nadzorovale pooblaščenice organizacije, ki jih bo določila vlada posamezne države. Država bo imela nadzor tudi nad distribucijo sprejemnikov. Storitve PRS bo dostopna pooblaščenim uporabnikom držav Evropske unije ter ostalih sodelujočih držav.

Preglednica 2.2. Primerjava storitev OS, SoL, CS in PRS [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 97-100].

Storitev	OS	SoL	CS	PRS
Pokritost	Globalna	Globalna	Globalna*	Globalna*
Dostopnost	99.8 %	99.8 %	99.8 %	99-99.9 %
Natančnost določanja položaja (95%, ena frekvenca)	H: 15 m V: 35 m	/	/	/
Natančnost določanja položaja (95%, dve frekvenci)	H: 4 m V: 8 m	4-6 m	< 1 m	H: 6.5 m V: 12 m
Integriteta	Ne	Da	Storitev z dodanimi vrednostmi	Da
Natančnost določanja časa (tri frekvence)	30 ns	/	/	100 ns
Verodostojnost/zanesljivost	/	Da	/	/

* Predvidena je tudi lokalna pokritost (glej poglavje 2.4.2).

Storitve SAR bo omogočala natančno določitev lokacije oddaje alarmnega signala kjerkoli na Zemlji. Interoperabilnost storitve SAR s sistemom COSPAS-SARSAT bo omogočala hitrejši sprejem oddanega signala (trenutno je povprečen čas čakanja približno ena ura), višjo natančnost pri določitvi lokacije (trenutno je natančnost določitve 5 km), vidnost večjega števila satelitov ter povečan obseg vesoljskega segmenta. Modul GALILEO satelitov za storitve SAR sprejema signale oddajnikov sistema COSPAS-SARSAT, ki ga oddajajo na

frekvenci 406-406.1 MHz. Nato te podatke preko signala z nosilnim valovanjem L6 posredujejo kontrolnim postajam, ki določijo lokacijo oddaje alarmnega signala.

Preglednica 2.3. Lastnosti storitve SAR [Prasad in Ruggieri, 2005, str. 101].

Dostopnost	99.8 %
Kapaciteta (število oddajnikov)	150
Čas določitve lokacije	10 min
Kvaliteta storitve (število pogrešenih bitov pri povezavi)	$< 10^{-5}$
Hitrost prejetih podatkov (sporočil na minuto)	6 (dolgih 100 bitov)

2.4.2 Lokalno podprte storitve sistema GALILEO – GLAS

Nekatere specifične aplikacije zahtevajo visoko stopnjo omogočanja storitev, ki jih globalna komponenta sistema GALILEO ne more zagotavljati. Pogosto so te aplikacije lokalne narave in zahtevajo dostop do storitev na manjšem območju. Zato bodo te zahteve izpolnjene z uporabo lokalnih elementov, ki so opisani v poglavju 2.2.2. V ta namen so se razvile štiri skupine storitev [GALILEO Mission High Level Definition, 2002]:

- storitve lokalne natančnosti navigacijskih podatkov,
- storitve lokalne visoke natančnosti navigacijskih podatkov,
- storitve lokalne podpore navigacije,
- storitve lokalne dostopnosti navigacije.

2.4.3 Storitve sistema EGNOS – ES

Sistem EGNOS bo omogočal predhodne izkušnje in razvoj aplikacij sistema GALILEO. Storitve ES vključujejo izvajanje opazovanj, računanje širokopasovnih diferencialnih popravkov ter omogočajo integriteto. Uporabljale se bodo skupaj s storitvami GSOS, še posebej pomembna bo kombinacija uporabe storitve SoL in storitve ES.

2.4.4 GALILEO kombinirane storitve – GCS

Storitve sistema GALILEO se bodo uporabljale tudi v povezavi s storitvami ostalih globalnih navigacijskih satelitskih sistemov (GPS, GLONASS, SBAS) ali komunikacijskih sistemov (LORAN-C, GSM, UMTS, INMARSAT in drugih). S to možnostjo bo omogočen razvoj široke množice aplikacij, odpravljene bodo slabosti posameznega globalnega satelitskega navigacijskega sistema ter omogočena bo razširitev GNSS trga.

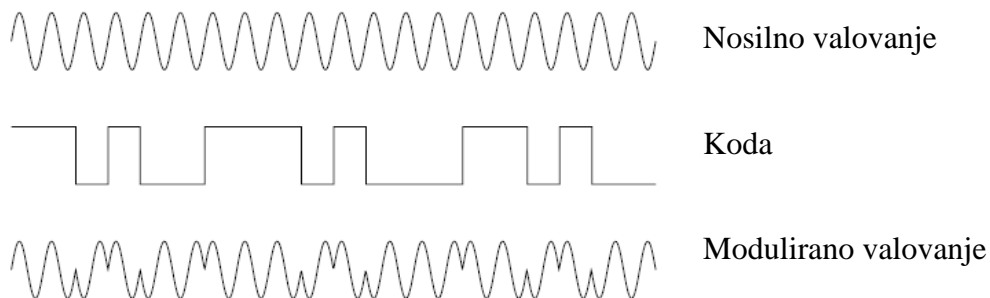
2.5 GPS signal

GPS sateliti oddajajo signal na dveh valovanjih L1 in L2, ki sta izpeljani iz osnovne frekvence $f_0 = 10.23$ MHz. Osnovna frekvenca f_0 je namerno zmanjšana za približno vrednost 0.005 MHz, saj naj bi s tem odstranili vpliv relativnosti na valovanje. Frekvenci valovanj L1 in L2 znašata:

$$f_{L1} = 154f_0 = 1575.42 \text{ MHz} \quad (2.1)$$

$$f_{L2} = 120f_0 = 1227.60 \text{ MHz} \quad (2.2)$$

Signal je kodiran z dvema PRN (angl. Pseudo Random Noise) kodama, ki sta nanešeni na valovanji L1 in L2 z modulacijo [Stopar, 2003]. Koda je sestavljena iz zaporedja elementov kode oziroma bitov, ki so predstavljeni s števili 0 in 1. Valovanje L1 je modulirano s C/A (angl. Coarse/Acquisition) kodo, P (angl. Precise) kodo in navigacijskim sporočilom. Valovanje L2 je modulirano s P kodo in navigacijskim sporočilom.



Slika 2.5. Prikaz modulacije valovanj [Dach et al., 2006, str. 12].

C/A koda je dostopna vsem civilnim uporabnikom in je osnova za SPS. Sestavljena je iz zaporedja 1023 bitov, ki se ponovi vsako milisekundo. To pomeni, da je frekvenca C/A kode $f_{C/A} = 1.023$ MHz. P koda nepooblaščenim uporabnikom ni v celoti dostopna (glej poglavje 2.3). Ponovi se vsakih 266 dni oziroma 38 tednov in je sestavljena iz zaporedja 2.35×10^{14} bitov. Frekvenca P kode znaša $f_P = 10.23$ MHz, kar pomeni da je enaka osnovni frekvenci f_0 .

Osnova GPS signala je navigacijsko sporočilo, ki je modulirano na obe valovanji L1 in L2. Osnovna enota navigacijskega sporočila je dolga 1500 bitov, njena frekvenca znaša 50 Hz. Razdeljena je na pet skupin sporočil. Ena skupina vključuje deset besed, kjer je vsaka beseda dolga 30 bitov in se ponovi vsakih 6 sekund. Vsaka skupina se začne s sporočilom za sinhronizacijo in testnimi sporočili. Oddajanje navigacijskega sporočila se ponovi vsakih 750 sekund.

Prva skupina vsebuje podatke o GPS tednu, predvideno natančnost določitve absolutnega položaja sprejemnika, podatke o stanju satelita, oceno lomnega količnika atmosfere ter podatek o točnem času satelitove ure (predstavljen je s tremi kvadratnimi členi polinoma, s katerim je moduliran urin tek). Druga in tretja skupina vsebujeta podatke o tirnicah satelitov (s satelita oddane efemeride). Četrta in peta skupina se razlikujeta v vsakem navigacijskem sporočilu in vsebujeta 25 vsebin. Namenjeni sta predvsem vojaški uporabi, vsebujeta pa tudi podatke o ionosferi, UTC času ter almanah podatkov o tirnicah satelitov z nizko natančnostjo [Stopar in Pavlovčič, 2001]. Oddani sta z vseh satelitov, kar pomeni, da sprejem podatkov enega satelita omogoča pridobitev almanaha za vse satelite. Četrta skupina vsebuje tudi s satelita oddane podatke, ki so nepooblaščenim uporabnikom nedostopni (metoda AS).

Na podlagi opisane sestave GPS signala se lahko enačbi signala $x_{L1,k}(t)$ in $x_{L2,k}(t)$, oddanega s k-tega GPS satelita za valovanji L1 in L2, zapišeta z izrazom:

$$x_{L1,k}(t) = \sqrt{2P_{C/A}} C_{C/A,k}(t) D_k(t) \cos(\omega_1 t + \varphi) + \sqrt{2P_P} C_{P,k}(t) D_k(t) \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (2.3)$$

$$x_{L2,k}(t) = \sqrt{2P_{L2}} C_{P,k}(t) D_k(t) \cos(\omega_2 t + \varphi) \quad (2.4)$$

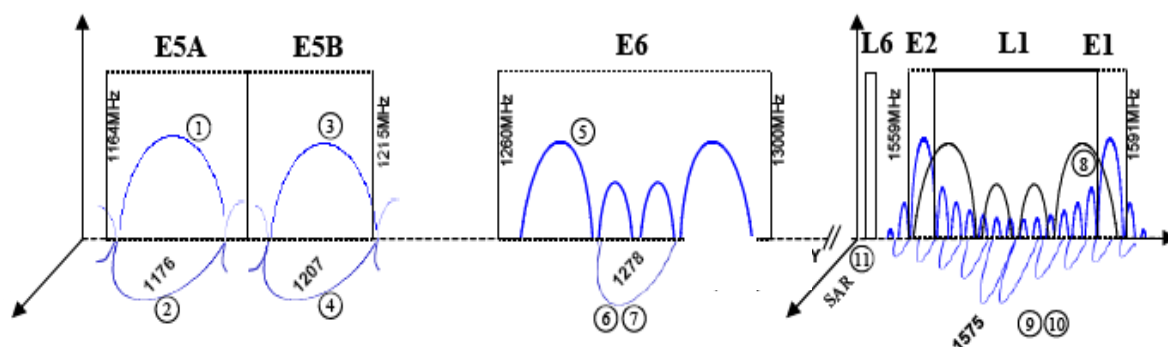
kjer so $P_{C/A}$, P_P in P_{L2} vrednosti moči posameznega dela signala – C/A kode, P kode ali L2 valovanja, $C_{C/A,k}(t)$ vrednost C/A kode signala k-tega satelita, $C_{P,k}(t)$ vrednost P kode signala k-tega satelita za obdobje enega tedna in $D_k(t)$ vrednost navigacijskega sporočila.

2.6 GALILEO signal

GALILEO signal sestavlja deset navigacijskih signalov in en SAR signal [Hein et al., 2002]. Sateliti oddajajo navigacijske signale na valovanjih E5a, E5b, E6, E2, L1 in E1 s frekvencami: $f_{E5a-E5b} = 1164-1215$ MHz, $f_{E6} = 1260-1300$ MHz in $f_{E2-L1-E1} = 1559-1591$ MHz. SAR signal oddajajo na valovanju L6 s frekvencami: $f_{SAR} = 1544-1545$ MHz.

Vsak navigacijski signal je sestavljen iz merskih kod in podatkov. Kodo sestavlja zaporedje števil -1 in +1. Nekatere so dostopne samo pooblaščenim uporabnikom, zato so se oblikovale tri skupine kod:

- prosto dostopna koda (neomejenega dostopa),
- kode, ki so dostopne komercialnim uporabnikom,
- kode, ki so dostopne vladnim uporabnikom.



Slika 2.6. Sestava GALILEO signala [GALILEO Mission High Level Definition, 2002, str. 28].

Podatki, ki so vsebovani v navigacijskih signalih, so razdeljeni v pet skupin: navigacijsko sporočilo, podatki o integriteti, komercialni podatki, PRS podatki in SAR podatki. Prosto dostopni so osnovni navigacijski podatki, podatki o integriteti in SAR podatki.

Na frekvencah $f_{E5a-E5b}$ sateliti oddajajo štiri signale. Prvi par signalov z osnovno frekvenco $f_{E5a} = 1176.45$ MHz je na sliki 2.6 označen s številkami 1 in 2. Signal 1 vsebuje navigacijsko sporočilo, ki se prenaša s hitrostjo 25 bitov na sekundo. Valovanje E5a se imenuje tudi L5 in bo del GPS moderniziranega signala. S tem bo omogočeno istočasno sprejemanje signalov satelitov sistemov GPS in GALILEO. Drugi par signalov z osnovno frekvenco $f_{E5b} = 1207.14$ MHz je na sliki 2.6 označen s številkami 3 in 4. Signal 3 vsebuje navigacijsko sporočilo, ki se prenaša s hitrostjo 125 bitov na sekundo. Vsebuje tudi podatke o integriteti in SAR podatke. Signala 2 in 4 ne vsebujeta podatkov in predstavljata t.i. pilotski signal.

Na frekvencah f_{E6} sateliti oddajajo tri signale. Signal 5 je dostopen uporabnikom, ki so pooblaščen s strani vlade. Par signalov, ki sta na sliki 2.6 označena s številkami 6 in 7, sta dostopna komercialnim uporabnikom. Signal 6 vsebuje navigacijsko sporočilo, ki se prenaša s hitrostjo 500 bitov na sekundo, ter podatke s t.i. dodanimi vrednostmi. Signal 7 ne vsebuje podatkov in predstavlja t.i. pilotski signal.

Na frekvencah $f_{E2-L1-E1}$ sateliti oddajajo tri signale: signal 8, ki je dostopen uporabnikom, pooblaščenim s strani vlade, ter par signalov, ki sta na sliki 2.6 označena s številkami 9 in 10. Signal 9 vsebuje navigacijsko sporočilo, ki se prenaša s hitrostjo 100 bitov na sekundo, ter podatke o integriteti in SAR podatke. Signal 10 ne vsebuje podatkov in predstavlja t.i. pilotski signal.

Navigacijski signali vsebujejo informacije, ki so potrebne za uporabo različnih storitev. Za storitvi OS in SoL se bo uporabljalo šest navigacijskih signalov (na sliki 2.6 so označeni s številkami 1, 2, 3, 4, 9 in 10), za storitev CS dva navigacijska signala (6 in 7) ter za storitev PRS dva navigacijska signala (5 in 8).

Preglednica 2.4. Uporaba navigacijskih signalov v okviru storitev in njihove karakteristike [GALILEO Mission High Level Definition, 2002, str. 29].

Št. signal a	Nosilno valovanje	Storitve				Karakteristike	
		OS	CS	SoL	PRS	Tip kode	Tip podatkov
1 2 3 4 9 10	E5a E5b L1	x	x	x		prosto dostopna	navigacijski podatki podatki o integriteti SAR podatki komercialni podatki
6 7	E6		x			za komercialne uporabnike	komercialni podatki
5 8	E6 L1				x	za vladne uporabnike	PRS podatki

2.7 Tirnice satelitov

Satelit se giblje po tirnici kot rezultat delovanja privlačne sile Zemlje kot najpomembnejše sile ter ostalih sil, ki vplivajo na gibanje satelita v manjši meri. Matematično gledano je določevanje položaja satelita v določenem trenutku numerično reševanje diferencialne enačbe z numerično integracijo po času. Integriranje poteka ob danih začetnih pogojih, kot sta začetni položaj in začetna hitrost v začetnem trenutku. Položaj satelita določimo vnaprej in ga primerjamo z dejanskimi položaji v času. S tem lahko izboljšamo definiranje začetnih pogojev.

V prvem približku ob upoštevanju prisotnosti samo privlačne sile Zemlje se satelit giblje po t.i. normalni tirnici. Za normalno tirnico predpostavljamo, da ima obliko elipse in da je ravnina tirnice v konstantnem položaju v prostoru. V enem izmed gorišč se nahaja težišče Zemlje.

Pogoji, ki jih uporabljamo za poenostavljeno gibanje satelita po tirnici, so:

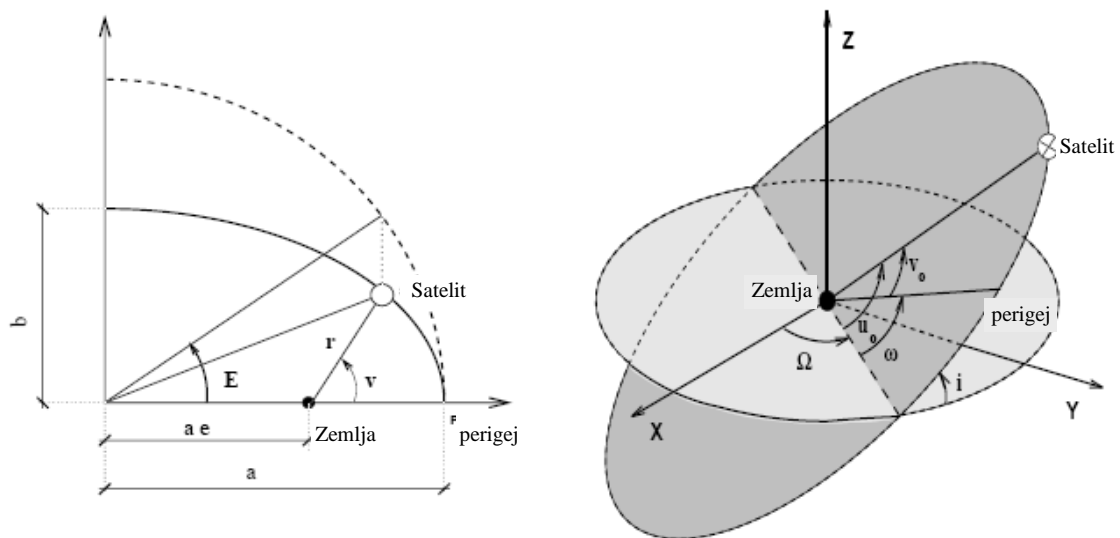
- Zemljo obravnavamo kot masno točko ali kot homogeno kroglo (težnostno polje takšnega telesa je radialno simetrično).

- Masa satelita je zanemarljivo majhna glede na maso Zemlje.
- Satelit se giblje v vakuumu.
- Na tirnico satelita ne deluje nobena druga privlačna sila.

Oblika in velikost tirnice sta podani z veliko polosjo a in ekscentriciteto e . Položaj satelita v ravnini tirnice je podan z eno izmed treh anomalij: s pravo anomalijo v , z ekscentrično anomalijo E ali s srednjo anomalijo M [Wells et al., 1999]. Običajno uporabljamo pravo anomalijo v , ki predstavlja geocentrični kot med satelitom in perigejem.

V prostoru obravnavamo položaj tirnice v sistemu rektascenzije. Premica, ki nastane s presečiščem ravnine tirnice z ravnino ekvatorja, se imenuje nožiščnica. Dvižni vozlel je točka, kjer satelit preide ravnino ekvatorja. Rektascenzija dvižnega vozla Ω predstavlja geocentrični kot v ravnini ekvatorja, ki ga nožiščnica oklepa s smerjo pomladišča. Argument perigeja ω predstavlja kot v ravnini tirnice, ki ga oklepa nožiščnica in smer perigeja. Inklinacija tirnice i je kot med ravnino tirnice in ravnino ekvatorja.

Vseh šest količin (a , e , v , Ω , ω , i) imenujemo Keplerjevi elementi tirnice satelita in podajajo položaj satelita v prostoru.



Slika 2.7. Prikaz Keplerjevih elementov [Dach et al., 2006, str. 24].

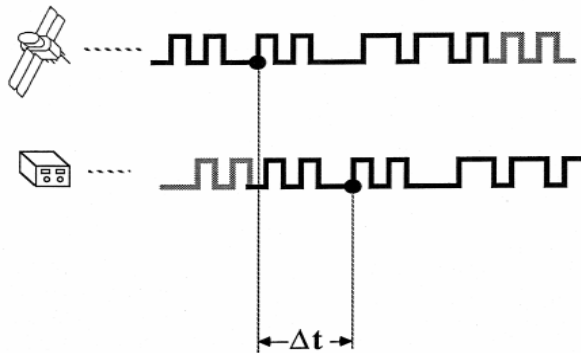
V primeru normalne tirnice je prava anomalija edini element, ki je funkcija časa, ostali elementi pa so konstante. Za dejanske tirnice, ki ne izpolnjujejo zahtev za normalno tirnico, je vseh šest Keplerjevih elementov funkcija časa [Stopar, 2003]. Odstopanju dejanske tirnice, ki jo opiše satelit, od normalne tirnice pravimo moteno Keplerjevo gibanje.

2.8 Tipi GPS opazovanj

Z GPS določamo neznan položaj sprejemnika preko časovnega intervala, ki je definiran z razliko trenutka oddaje signala z GPS satelita (z znanim položajem v vsakem trenutku) ter trenutka sprejema signala z GPS sprejemnikom. Signal je med drugim sestavljen iz elektromagnetnega valovanja, ki se razširja s svetlobno hitrostjo. Na podlagi izmerjenega časovnega intervala in znane hitrosti signala lahko izračunamo razdaljo med sprejemnikom, postavljenim na katerikoli točki na Zemlji ter satelitom. Določitev položaja v prostoru z GPS torej temelji na konceptu trilateracije, kjer so opazovane razdalje med satelitom in sprejemnikom. Časovni interval potovanja GPS signala se lahko določi na podlagi kode ali na podlagi nosilnih valovanj, zato ločimo kodna in fazna opazovanja.

2.8.1 Kodna opazovanja

Izmera časovnega intervala temelji na korelaciji s satelita oddane in s sprejemnikom sprejete kode ter kode, generirane v sprejemniku. Ko sprejemnik sprejme s satelita oddano kodo, sta kodi sicer enaki, nista pa časovno usklajeni. Uri satelita in sprejemnika nista popolnoma usklajeni, saj se stanje ur ves čas spreminja. Izmerjeni časovni interval torej vključuje napake satelitove in sprejemnikove ure, kar se neposredno odraža v geometrijski razdalji med satelitom in sprejemnikom [Stopar in Pavlovčič, 2001].



Slika 2.8. Osnovni princip kodnih opazovanj [Wells et al., 1999, str. 126].

Merjena razdalja med GPS satelitom in anteno GPS sprejemnika se imenuje psevdo razdalja.

Pridobimo jo lahko na osnovi opazovanj P in C/A kode. Psevdo razdalja P_k^p med sprejemnikom k in satelitom p je dana z izrazom:

$$P_k^p(t_k) = (t_k - t^p)c = \rho_k^p + (dt^p - dt_k)c + I_k^p + T_k^p + \varepsilon_p \quad (2.5)$$

kjer je:

ρ_k^p – prava geometrijska razdalja med satelitom in sprejemnikom v trenutku oddaje signala,

dt^p – pogrešek urinega stanja ure satelita,

dt_k – pogrešek urinega stanja ure sprejemnika,

c – svetlobna hitrost (konstanta),

I_k^p – vpliv ionosfere na izmerjeno razdaljo,

T_k^p – vpliv troposfere na izmerjeno razdaljo,

ε_p – vpliv odboja signala in šum sprejemnika.

Prava geometrijska razdalja ρ_k^p med sprejemnikom k in satelitom p je dana z izrazom:

$$\rho_k^p = \sqrt{(x^p - x_k)^2 + (y^p - y_k)^2 + (z^p - z_k)^2} \quad (2.6)$$

kjer so (x_k, y_k, z_k) in (x^p, y^p, z^p) pravokotne koordinate sprejemnika in satelita v referenčnem koordinatnem sistemu.

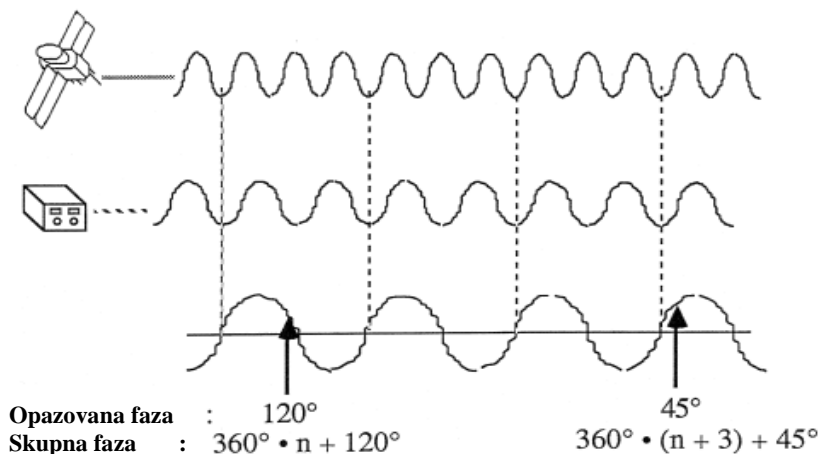
Iz enačb (2.5) in (2.6) je razvidno, da nastopa osem neznank: položaj sprejemnika, pogreška satelitove in sprejemnikove ure, vpliv ionosfere, vpliv troposfere ter vpliv odboja signala in šum sprejemnika. Pri tem predpostavimo, da poznamo položaj satelita v trenutku oddaje signala.

Stanje ur satelitov nadzira kontrolni segment GPS sistema in usklajuje z GPS časom, zato lahko predpostavimo, da je stanje satelitovih ur pravilno. Vrednosti vplivov ionosfere in troposfere modeliramo z uporabo modelov. Vrednosti vpliva odboja signala in šuma sprejemnika lahko zanemarimo. Tako ostanejo štiri neznanke: koordinate sprejemnika in pogrešek urinega stanja sprejemnikove ure. Neznanke lahko torej določimo na podlagi štirih merjenih psevdo razdalj v nekem trenutku.

2.8.2 Fazna opazovanja

Pri faznih opazovanjih se meri razlika faze valovanja oddanega s satelita in sprejetega s sprejemnikom ter fazo valovanja vzpostavljenega v sprejemniku. Sprejeto valovanje in v sprejemniku generirano valovanje nimata enake frekvence zaradi nenehnega gibanja satelita glede na sprejemnik. Zato je sprememba frekvence s sprejemnikom sprejetega valovanja glede na oddano valovanje enaka vrednosti vpliva Dopplerjevega efekta.

V primeru GPS se opazovanje faze nosilnega valovanja izvede samo na sestavljenem valovanju, ki je vzpostavljeno na osnovi sprejetega valovanja in valovanja generiranega v sprejemniku [Stopar in Pavlovčič, 2001]. Ko sprejemnik vzpostavi sestavljeno valovanje, začne izvajati opazovanja faze sestavljenega valovanja v predvidenih časovnih intervalih. Vrednosti števila celih valov N v začetnem trenutku opazovanj sprejemnik ne more zaznati. Če predpostavimo, da v času izvajanja opazovanj ni prišlo do prekinitve spremljanja valovanja, ostane vrednost neznanega števila celih valov N več čas izmere nespremenjena.



Slika 2.9. Osnovni princip faznih opazovanj [Wells et al., 1999, str. 128].

Vrednost faze valovanja v poljubnem trenutku t je dana z izrazom:

$$\varphi_k^p(t) = \Delta\varphi_k^p \Big|_{t_0}^t + N \quad (2.7)$$

kjer $\Delta\varphi_k^p$ predstavlja vrednost seštete faze valovanja od začetka izvajanja opazovanj t_0 do trenutka izvedbe izmere faze t .

Opazovano fazo obravnavamo kot nedoločeno psevdo razdaljo, ki je obremenjena s pogreški ure satelita in ure sprejemnika ter s neznanim številom celih valov v začetnem trenutku opazovanj.

Osnovna enačba opazovane faze je dana z izrazom:

$$\Phi_k^p(t) = \frac{f}{c} \rho_k^p(t) + f(dt^p(t) - dt_k(t)) + N_k^p(1) \quad (2.8)$$

2.8.3 Fazne razlike

Fazne razlike predstavljajo osnovo za določitev relativnega položaja med dvema ali več sprejemniki, s katerimi istočasno sprejemamo signal oddan s štirih ali več satelitov [Stopar in Pavlovčič, 2001].

Enojna fazna razlika predstavlja razliko faz valovanja oddanega z enega satelita j in sprejetega istočasno z dvema sprejemnikoma A in B . Za vsak sprejemnik pridobimo dve enačbi opazovanih faz, ki sta izpeljani iz osnovne enačbe opazovane faze. Njuna razlika je enačba enojne fazne razlike, ki je dana z izrazom:

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{f}{c}(\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)) - f(dt_B(t) - dt_A(t)) + N_B^j(1) - N_A^j(1) \quad (2.9)$$

Enačbo (2.9) lahko v krajši obliki zapišemo z izrazom:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{f}{c}\rho_{AB}^j(t) - fdt_{AB}(t) + N_{AB}^j(1) \quad (2.10)$$

Iz enačbe (2.9) je razvidno, da odpade pogrešek ure satelita $dt^j(t)$.

Dvojna fazna razlika predstavlja razliko enojnih faznih razlik opazovanj faz valovanj oddanih z dveh satelitov j in k . Dana je z izrazom:

$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{f}{c}(\rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t)) + N_{AB}^k(1) - N_{AB}^j(1) \quad (2.11)$$

Enačbo (2.11) lahko v krajši obliki zapišemo z izrazom:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{f}{c}\rho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk}(1) \quad (2.12)$$

Iz enačbe (2.11) je razvidno, da odpadeta pogreška ur sprejemnikov $dt_A(t)$ in $dt_B(t)$.

Trojna fazna razlika predstavlja razliko dvojnih faznih razlik za trenutka opazovanj faz valovanj t_1 in t_2 . Dana je z izrazom:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) - \Phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{f}{c}(\rho_{AB}^{jk}(t_2) - \rho_{AB}^{jk}(t_1)) \quad (2.13)$$

Enačbo (2.13) lahko v krajši obliki zapišemo z izrazom:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{f}{c}\rho_{AB}^{jk}(t_{12}) \quad (2.14)$$

Iz enačbe (2.13) je razvidno, da odpadeta neznani števili celih valov na začetku opazovanj

$N_{AB}^j(1)$ in $N_{AB}^k(1)$, saj sta namreč konstantni v času.

2.8.4 Linearne kombinacije faznih opazovanj

Nekatere vplive na opazovanja lahko zmanjšamo ali celo odstranimo s kombinacijami istega tipa opazovanj. Med te vplive pa ne spada vpliv ionosfere, katerega lahko ocenimo samo na podlagi linearnih kombinacij faznih opazovanj.

Linearna kombinacija faznih opazovanj je v splošnem podana z zvezo:

$$\varphi = n_1\varphi_1 + n_2\varphi_2 \quad (2.15)$$

kjer sta n_1 in n_2 poljubni števili.

Linearno kombinacijo faznih opazovanj φ_{L1} in φ_{L2} za $n_1 = 1$ in $n_2 = -\frac{f_{L1}}{f_{L2}}$ imenujemo »iono-free« in jo označimo z L3:

$$\varphi_{L3} = \varphi_{L1} - \frac{f_{L1}}{f_{L2}}\varphi_{L2} \quad (2.16)$$

Valovanje L3 je neobčutljivo za vpliv ionosfere in se uporablja za izračun vektorjev dolžin 10-15 km.

Linearno kombinacijo faznih opazovanj φ_{L1} in φ_{L2} za $n_1 = 1$ in $n_2 = 1$ imenujemo ozek pas (angl. narrow lane) in jo označimo z L4:

$$\varphi_{L4} = \varphi_{L1} + \varphi_{L2} = \varphi_{L1+L2} \quad (2.17)$$

Valovanje L4 je neodvisno od sprejemnikove in satelitove ure ter geometrije. Vsebuje vpliv ionosfere in neznano začetno vrednost neznanega števila celih valov. Frekvenca valovanja L4 znaša $f_{L4} = 2803.02$ MHz.

Linearno kombinacijo faznih opazovanj φ_{L1} in φ_{L2} za $n_1 = 1$ in $n_2 = -1$ imenujemo širok pas (angl. wide lane) in jo označimo z L5:

$$\varphi_{L5} = \varphi_{L1} - \varphi_{L2} = \varphi_{L1-L2} \quad (2.18)$$

Valovanje L5 uporabljamo za določitev neznanega začetnega števila celih valov za vektorje srednjih dolžin. Frekvenca valovanja L5 znaša $f_{L5} = 347.82$ MHz.

Vsaka matematična operacija povzroči povečanje pogreška na opazovani količini. Pogrešek na L3 je približno za faktor 3 večji od pogreška na L1 in L2. Pogrešek na L4 je približno za faktor 1.4 večji od pogreška na L1 in L2. Pogrešek na L5 je za faktor 6.4 (5) večji od pogreška na L1 (L2) [Stopar in Pavlovčič, 2001].

3 VPLIVI NA OPAZOVANJA

Osnova za določanje položaja je opazovana razdalja med satelitom in sprejemnikom, ki pa se od prave geometrijske razdalje razlikuje zaradi vplivov na opazovanja. Glede na njihov izvor jih razdelimo v tri skupine:

- vplivi z izvorom v satelitu, ki vključujejo pogrešek urinega stanja satelitove ure in pogreške tirnice satelita,
- vplivi z izvorom v mediju, v katerem signal potuje, ki vključujejo ionosfersko, troposfersko refrakcijo in odboj signala (angl. multipath),
- vplivi z izvorom v sprejemniku, ki vključujejo pogrešek urinega stanja sprejemnikove ure in šum sprejemnika.

3.1 Natančnost tirnic GPS satelitov

Pogreške položaja GPS satelita predstavljamo v koordinatnem sistemu z izhodiščem v točki trenutnega položaja satelita. Komponente koordinatnega sistema so višina h , prečna komponenta c ter vzdolžna komponenta l . Os h sovpada s smerjo radij vektorja satelita, os c je pravokotna na ravnino tirnice, os l leži v ravnini tirnice in je pravokotna na ostali dve osi.

Višinska komponenta je običajno določena najnatančneje. Pogrešek višinske komponente znaša približno 1-5 m, z občasnimi skoki do 80 m. Prečni pogrešek je približno 2-krat ter vzdolžni pogrešek približno 4-krat večji od pogreška višinske komponente. Prečni pogrešek znaša 10-15 m, vzdolžni pogrešek pa znaša 10-20 m, z občasnimi skoki do 150 m.

Pogreški položaja satelita imajo različen vpliv na določitev baznega vektorja:

- pogrešek višinske komponente ima največji vpliv na merilo baznega vektorja,
- prečni in vzdolžni pogrešek imata največji vpliv na orientacijo baznega vektorja.

Pri določanju tirnic GPS satelita se poleg parametrov tirnic določa tudi urin tek in urino stanje ure satelita. Vsi ti podatki so podani v okviru GPS efemerid.

3.2 Vrste efemerid GPS satelitov

Vrste efemerid razlikujemo glede načina in hitrosti pridobitve kot tudi glede oblike podatkov, ki jih vsebujejo. S hitrostjo pridobitve efemerid je povezana natančnost določitve položaja satelita na tirnici. Oddane (angl. broadcast) efemeride pripravijo vnaprej na osnovi nekaterih predpostavk o gibanju satelita. Zato je začetna natančnost določitve položaja slabša kot pri uporabi preciznih (angl. precise) efemerid, ki so določene naknadno. Oddane efemeride, ki so del navigacijskega sporočila, se uporabljajo za določitev položaja sprejemnika v času opazovanj. Določitev položaja, kjer so zahteve natančnosti položaja večje, pa temelji na uporabi preciznih efemerid, ki jih uporabnik lahko pridobi preko spleta s časovnim zamikom od 14 pa do nekaj dni, od novembra 2001 pa tudi za dva dneva vnaprej.

Oddane efemeride vsebujejo podatke o Keplerjevih elementih tirnice satelita s pripadajočimi popravki [Pavlovčič in Stopar, 2004]. Ti popravki so v bistvu odstopanja dejanske tirnice od normalne in so predstavljeni z amplitudami sprememb v elementih, ki so najbolj občutljivi na zunanje vplive. Ti elementi so dolžina radij vektorja satelita, inklinacija in argument širine, ki je vsota argumenta perigeja in prave anomalije.

Precizne efemeride pripravljajo GPS službe, ki delujejo samostojno oziroma pod okriljem službe IGS (angl. International GPS Service). Efemeride določijo z naknadno obdelavo faznih opazovanj, ki jih izvajajo z visoko kvalitetnimi sprejemniki na globalni mreži opazovalnih točk. Služba IGS nudi poleg podatkov preciznih efemerid tudi parametre orientacije Zemlje, natančne podatke o globalnih deformacijah površja Zemlje ter podatke o stanju atmosfere.

Glede hitrosti pridobitve in s tem povezano natančnost podatkov delimo precizne efemeride v skupine [Pavlovčič in Stopar, 2005]:

- Končne precizne efemeride (angl. final precise ephemerides), med katere spadajo:
 - Končne efemeride službe IGS so na voljo od junija 1992, in sicer z zamikom od 8 do 12 dni.
 - Končne efemeride centra CODE (angl. Center for Orbit Determination in Europe) so na voljo od 7 do 13 dni po končani izmeri.

- Končne efemeride službe NGS (angl. U.S. National Geodetic Survey) od leta 2001 niso več dostopne.
- Hitre efemeride (angl. rapid ephemerides), med katere spadajo:
 - Hitre efemeride službe IGS z oznako IGR, ki so na voljo od junija 1996 s časovnim zamikom 2 dni.
 - Hitre efemeride službe NIMA (angl. National Imagery and Mapping Agency) ki so na voljo s časovnim zamikom od 3 do 4 dni.
- Najhitrejše efemeride (angl. ultra-rapid ephemerides), ki jih določijo s predvidevanjem. Služba IGS jih nudi pod kratico IGU, na voljo pa so za 2 dneva nazaj in dan vnaprej. Kasneje jih nadomestijo z efemeridami IGR.

Natančnost določitve položaja satelita se s staranjem podatkov oddanih efemerid slabša. Razlog za to izhaja iz načina določitve in uporabe oddanih efemerid. V primeru uporabe podatkov preciznih efemerid pa je natančnost določitve položaja neodvisna od izbranega trenutka. Najbolj natančne so končne precizne efemeride službe IGS, sledijo efemeride CODE. Tem sledijo hitre efemeride IGR, natančnost katerih je sorodna efemeridam službe NIMA, sledijo pa jim efemeride IGU.

Oblika podatkov preciznih efemerid je enotna ne glede na to, katera GPS služba nam podatke posreduje. Podatke podajajo tabelarično v datotekah ASCII formata za posamezen dan.

3.3 Ionosferska refrakcija

Ionosfera je del Zemljine atmosfere med približno 70 km in 1000 km višine. Zaradi vpliva Sončevega ultravijoličnega sevanja, ki izbija elektrone iz atomov in molekul atmosferskih plinov, poteka v tem delu ionizacija. Tu se nahajajo pozitivno ionizirani atomi in molekule ter izbiti prosti elektroni, ki skušajo reagirati z drugimi plini. Za obravnavo vpliva ionosfere na razširjanje elektromagnetnega valovanja je posebej pomembna prisotnost prostih elektronov. Razširjanje elektromagnetnega valovanja v ionosferi je odvisno od frekvence valovanja. Ionosfero prehajajo samo valovanja frekvenc višjih od 30 MHz, valovanja nižjih frekvenc pa

se od ionosfere odbijejo. Valovanja višjih frekvenc so manj podvržena vplivu ionosfere kot valovanja nižjih frekvenc.

Vpliv ionosfere se izraža s prehitevanjem faze nosilnega valovanja in z zakasnitvijo kode valovanja, kar obravnavamo ločeno [Stopar in Pavlovčič, 2001]. V nadaljnji obravnavi je podan vpliv ionosfere na fazna opazovanja.

Razliko med psevdo razdaljo in pravo geometrijsko razdaljo med satelitom in sprejemnikom imenujemo ionosferska refrakcija, ki je dana z izrazom:

$$\Delta^{ion} = \int n dl - \int dl_0 \quad (3.1)$$

Količino n imenujemo ionosferski refrakcijski koeficient, ki je dan z izrazom:

$$n = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (3.2)$$

Če zanemarimo člene 2. stopnje in višjih stopenj, pridobimo izraz:

$$n = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (3.3)$$

Vrednost koeficienta c_2 je odvisna od števila prostih elektronov na m^3 vzdolž poti razširjanja valovanja. Ocenjena vrednost koeficienta c znaša:

$$c_2 = 40.28 N_e \quad (3.4)$$

Vpliv ionosfere na razširjanje valovanja je torej sorazmeren z gostoto prostih elektronov na poti razširjanja valovanja ter obratno sorazmeren s frekvenco valovanja.

Če integriramo vzdolž geometrijske poti, lahko enačbo (3.1) zapišemo z izrazom:

$$\Delta^{ion} = \frac{40.28}{f^2} \int N_e dl \quad (3.5)$$

Skupno število prostih elektronov na površini 1 m^2 vzdolž poti med satelitom in sprejemnikom je definirano s količino TEC (angl. Total Electron Content), ki je dana z izrazom:

$$TEC = \int N_e dl \quad (3.6)$$

TEC je odvisna od Sončeve aktivnosti, letnih in dnevnih sprememb, azimuta in višine satelita ter od položaja sprejemnika. Običajno je podana v enotah 10^{16} elektronov/ m^2 .

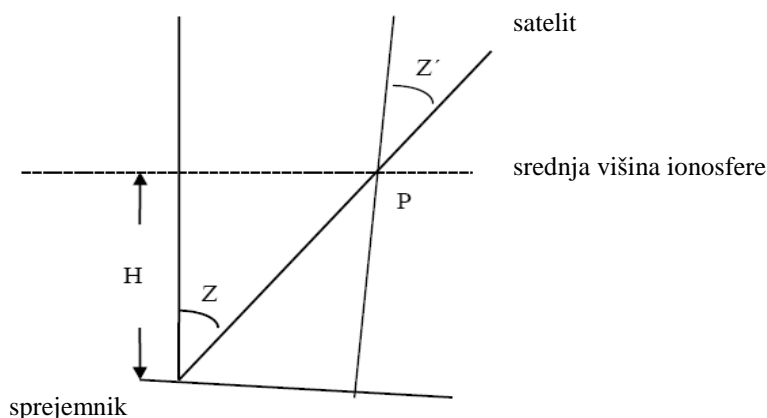
Uporablja pa se tudi količina TVEC (angl. Total Vertical Electron Content), ki predstavlja skupno število prostih elektronov na površini 1 m^2 v točki srednje višine ionosfere P, kjer je satelit na zenitni razdalji z' . Količina TVEC je dana z izrazom:

$$TVEC = \cos z' \int N_e dl \quad (3.7)$$

Zenitna razdalja z' je različna od dejanske zenitne razdalje z na opazovališču in je dana z zvezo:

$$\sin z' = \frac{R}{R + H} \sin z \quad (3.8)$$

kjer sta R radij Zemlje krogle ter H srednja višina ionosfere, ki znaša od 300 do 400 km.



Slika 3.1. Zenitna razdalja na srednji višini ionosfere [Su, 2000, str. 35].

Enačbo ionosferske refrakcije lahko torej zapišemo z izrazom:

$$\Delta^{ion} = \frac{40.28}{f^2} TEC = \frac{1}{\cos z'} \frac{40.28}{f^2} TVEC \quad (3.9)$$

V preglednici 3.1 so prikazane maksimalne vrednosti vpliva ionosfere na nosilni valovanji L1 in L2 vzdolž poti med satelitom in sprejemnikom v točki srednje višine ionosfere P (zenitna razdalja $z' = 0$).

Preglednica 3.1. Maksimalne vrednosti vertikalne ionosferske refrakcije na nosilni valovanji L1 in L2 [Su, 2000, str. 35].

Nosilno valovanje	Vpliv člena 1. stopnje ($1/f^2$)	Vpliv člena 2. stopnje ($1/f^3$)	Vpliv člena 3. stopnje ($1/f^4$)
L1	32.5 m	0.036 m	0.002 m
L2	53.5 m	0.076 m	0.007 m
L1/L2	0.0 m	0.026 m	0.006 m

Ker ionosferska refrakcija neposredno vpliva na psevdo razdaljo, ima tudi neposredni vpliv na merilo baznega vektorja in tudi na merilo mreže. Pri relativnem določanju položaja imamo opravka samo z opazovanji faze, zato bo merilo mreže zaradi vpliva ionosfere manjše od dejanskega.

Za krajše razdalje (do 5 km) lahko vpliv ionosfere eliminiramo s tvorjenjem dvojnih faznih razlik. Vrednosti popravkov dvojnih faznih razlik zaradi vpliva ionosfere (brez uporabe modela ionosfere ali »iono-free« linearne kombinacije faznih opazovanj) znašajo 2-8 ppm [Alves, 2001]. Na večjih razdaljah pa zmanjšamo vpliv ionosfere z uporabo primerne modela ionosfere ali z uporabo »iono-free« linearne kombinacije faznih opazovanj. V uporabi je več modelov ionosfere, v nadaljevanju pa sta zaradi kasnejše uporabe v praktičnem delu diplomske naloge opisana Klobučarjev model ter model NeQuick.

3.3.1 Klobučarjev model ionosfere

Najpreprostejši model ionosfere temelji na aproksimaciji Zemlje kot ravne plošče z enako debelino in s homogeno gostoto prostih elektronov. Torej ukrivljenost Zemlje v točki opazovališča ni upoštevana. Kasnejše izboljšave algoritmov preprostega modela ionosfere sicer že vključujejo rotacijo Zemlje in dnevno gibanje Sonca, vendar so še vedno obravnavane v točki opazovališča. Zato je dejstvo, da se ionosfera prične približno 50 km nad zemeljskim površjem, privedlo do novih algoritmov modela ionosfere. Pri teh je običajno uporabljena

srednja višina ionosfere, ki znaša 350 km. Na teh hipotezah in algoritmih temelji Klobučarjev model ionosfere. Testi algoritmov modela so pokazali, da je s tem modelom zajeta le 50% vrednost dejanskega vpliva ionosfere [Klobuchar, 1987].

Podatke o vplivu ionosfere na opazovanja lahko pridobimo tudi z uporabo Klobučarjevih parametrov ionosfere, ki jih pripravi center CODE in jih posreduje uporabnikom preko spletne strani <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>.

3.3.2 Model ionosfere NeQuick

Model NeQuick je izpeljan iz osnovnega modela DGR, ki sta ga definirala Di Giovanni in Radicella. Podatek o gostoti prostih elektronov ionosfere pridobimo kot vsoto gostote prostih elektronov v t.i. Epsteinovih slojih. Sloji ionosfere so določeni s t.i. sidrnimi točkami, ki se nanašajo na lastnosti slojev, pridobljenih na podlagi ionogramov: foF2, M(3000)F2, foF1 in foE [Radicella in Leitinger, 2001].

Gostota prostih elektronov v ionosferi je funkcija višine, geografske širine in geografske dolžine sprejemnika, Sončeve aktivnosti, meseca v letu (letnega časa) in UTC časa. Dana je z izrazom:

$$N(h) = NF2(h) + NF1(h) + NE(h) \quad (3.10)$$

kjer velja:

$$NF2(h) = \frac{4Nm * F2}{\left[1 + e^{\left(\frac{h-hmF2}{B_2}\right)}\right]^2} e^{\left(\frac{h-hmF2}{B_2}\right)} \quad (3.11)$$

$$NF1(h) = \frac{4Nm * F1}{\left[1 + e^{\left(\frac{h-hmF1}{B_1}\right)}\right]^2} e^{\left(\frac{h-hmF1}{B_1}\right)} \quad (3.12)$$

$$NE(h) = \frac{4Nm * E}{\left[1 + e^{\left(\frac{h-hmE}{B_E}\right)}\right]^2} e^{\left(\frac{h-hmE}{B_E}\right)} \quad (3.13)$$

ter

$$Nm * F2 = NmF2 - 0.1NmF1 \quad (3.14)$$

$$Nm * F1 = NmF1 - NF1(hmF1) \quad (3.15)$$

$$Nm * E = NmE - NF1(hmE = 120km) - NF2(hmE = 120km) \quad (3.16)$$

Vrednosti količine Nm so pridobljene iz ionogramov. Maksimalna višina F2 sloja $hmF2$ je izračunana iz M(3000)F2. Maksimalna višina F1 sloja $hmF1$ je izračunana iz razmerja $foF2/foE$. Višina E sloja hmE je konstantna in znaša 120 km. Parameter B_2 predstavlja debelino F2 sloja in je izračunan na podlagi sidrnih točk F2 sloja. Parametra B_1 in B_E slojev F1 in E sta določena numerično.

Izboljšave modela DGR izražajo debelino F2 sloja s konstantnim faktorjem k , ki je dan z izrazoma:

$$k = -7.77 + 0.097 \left(\frac{hmF2}{B_2}\right)^2 + 0.153NmF2 \text{ od oktobra do marca} \quad (3.17)$$

$$k = 6.705 - 0.014R12 - 0.008hmF2 \text{ od aprila do septembra} \quad (3.18)$$

3.3.3 »Iono-free« linearne kombinacije faznih opazovanj

Vpliv ionosfere lahko zmanjšamo ali odstranimo z linearno kombinacijo faznih opazovanj. V poglavju 2.8.4 je opisana »iono-free« linearna kombinacija faznih opazovanj L1 in L2.

Modernizirani globalni satelitski navigacijski sistemi pa omogočajo fazna opazovanja, ki temeljijo na treh nosilnih valovanjih. Na podlagi treh nosilnih valovanj faznih opazovanj lahko sestavimo mnogo »iono-free« linearnih kombinacij, s katerimi lahko odpravimo vpliv ionosfere.

»Iono-free« linearna kombinacija faznih GNSS opazovanj je v splošnem podana z zvezo:

$$\varphi_{IF} = \alpha\varphi_1 + \beta\varphi_2 + \gamma\varphi_3 \quad (3.19)$$

Koeficienti α , β , γ morajo izpolnjevati dva pogoja:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (3.20)$$

$$\alpha + \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2} \beta + \frac{f_{L1}^2}{f_{L3}^2} \gamma = 0 \quad (3.21)$$

Če izrazimo iz enačbe (3.20) koeficient α :

$$\alpha = 1 - \beta - \gamma \quad (3.22)$$

in ga vstavimo v enačbo (3.21), pridobimo za koeficient β izraz:

$$\beta = \frac{1 - \left(1 - \frac{f_{L1}^2}{f_{L3}^2}\right) \gamma}{1 - \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2}} \quad (3.23)$$

Enačbi (3.22) in (3.23) se lahko zapišeta tudi z izrazom:

$$\alpha = 1 - A + (B - 1)\gamma \quad (3.24)$$

$$\beta = A - B\gamma \quad (3.25)$$

kjer sta količini A in B dani z izrazom:

$$A = \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \quad (3.26)$$

$$B = \frac{f_{L2}^2 (f_{L3}^2 - f_{L1}^2)}{f_{L2}^2 (f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} \quad (3.27)$$

Za obdelavo opazovanj v praktičnem delu diplomske naloge je uporabljena »iono-free« linearna kombinacija z minimalnim vplivom šuma [GNSS NRT Data Analysis Algorithms, 2006]. To pomeni, da mora veljati zveza:

$$f(\gamma) = [1 - A + (B - 1)\gamma]^2 + [A - B\gamma]^2 + \gamma^2 \rightarrow \min. \quad (3.28)$$

Za rešitev enačbe (3.28), mora biti prvi odvod enačbe enak 0. S tem pridobimo minimum koeficienta γ , ki je dan z izrazom:

$$\bar{\gamma} = \frac{A + B - 2AB - 1}{2(B^2 - B + 1)} \quad (3.29)$$

Če vstavimo v enačbe (3.24), (3.25) in (3.29) vrednosti frekvenc nosilnih valovanj E1, E5a+E5b, E6, s katerimi bo omogočena uporaba storitve CS, dobimo minimalne vrednosti koeficientov α, β, γ : $\bar{\alpha} \cong 2.380$, $\bar{\beta} \cong -0.134$, $\bar{\gamma} \cong -1.246$.

Če vstavimo v enačbe (3.24), (3.25), (3.29) vrednosti frekvenc nosilnih valovanj E1, E5b, E5a, s katerimi bo omogočena uporaba storitve OS, dobimo minimalne vrednosti koeficientov α, β, γ : $\bar{\alpha} \cong 2.315$, $\bar{\beta} \cong -0.479$, $\bar{\gamma} \cong -0.836$.

Če upoštevamo, da je vrednost šuma faznih opazovanj enaka $\sigma_0 \cong 0.0030m$, je šum »iono-free« linearne kombinacije enak: $\sigma_{IF} \cong 0.0081m$ za frekvence storitve CS, ter $\sigma_{IF} \cong 0.0075m$ za frekvence storitve OS.

3.4 Troposferska refrakcija

Troposfera predstavlja spodnji del nevtralne (neionizirane) atmosfere. Nad ekvatorjem znaša višina troposfere 16-18 km, na srednjih geografskih širinah 9-11 km, na polih 8-9 km. V tem delu se nahaja približno 75% celotne mase atmosfere in skoraj vsa vodna para v atmosferi. V troposferi nastaja vreme z oblaki in padavinami. Najmočnejše je gibanje zraka v navpični smeri, zato tu temperatura močno pada z višino (od -5 do -10°C na 1 km višine). Nad troposfero se nahaja tropopavza, kjer z višino hitro upada količina vodne pare. Zgornji del nevtralne atmosfere predstavlja stratosfera, ki sega do višine 50 km.

Vpliv nevtralne atmosfere na opazovanja imenujemo troposferska refrakcija, saj največji delež atmosferske refrakcije predstavlja ravno vpliv troposfere. Razširjanje valovanja v

nevtralni atmosferi je neodvisno od frekvence valovanja, zato v tem primeru ni potrebno razlikovati vpliv troposfere na kodna in fazna opazovanja [Stopar in Pavlovčič, 2001]. To pa pomeni, da vpliv troposfere ne moremo oceniti ali odstraniti z opazovanji dveh različnih frekvenc. Zaradi vpliva troposfere valovanje potuje po krivulji, kar pomeni, da opravi daljšo pot kot bi ga opravilo v vakuumu.

Troposferska refrakcija je definirana z izrazom:

$$\Delta^{trop} = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N^{trop} ds \quad (3.30)$$

Troposferski refrakcijski koeficient n in refraktivnost troposfere N^{trop} sta povezana z izrazom:

$$N^{trop} = 10^6 (n - 1) \quad (3.31)$$

Refraktivnost v splošnem razstavimo na suho (angl. dry – d) in mokro (angl. wet – w) komponento:

$$N^{trop} = N_d^{trop} + N_w^{trop} \quad (3.32)$$

kjer se suha komponenta nanaša na suho atmosfero in mokra komponenta na vodno paro v atmosferi.

Troposfersko refrakcijo lahko torej razstavimo na suho in mokro komponento troposferske refrakcije:

$$\Delta^{trop} = \Delta_d^{trop} + \Delta_w^{trop} = 10^{-6} \int N_d^{trop} ds + 10^{-6} \int N_w^{trop} ds \quad (3.33)$$

Približno 90% troposferske refrakcije izhaja iz suhe in približno 10% iz mokre komponente troposferske refrakcije.

Vpliv troposfere na določitev baznega vektorja lahko razstavimo na [Stopar in Pavlovčič, 2001]:

- relativno troposfersko refrakcijo, ki predstavlja razliko troposferske refrakcije med krajiščema baznega vektorja, ter

- absolutno troposfersko refrakcijo, ki predstavlja skupno troposfersko refrakcijo na krajiščih baznega vektorja.

Relativna troposferska refrakcija ima največji vpliv na višinsko razliko med točkama. Relativni pogrešek v zenitni troposferski refrakciji za 1 mm povzroči pogrešek višinske razlike med točkama za 3-4 mm. Absolutna troposferska refrakcija ima največji vpliv na merilo mreže. Absolutni pogrešek v zenitni troposferski refrakciji za 1 m povzroči pogrešek v merilu mreže za 0.4 ppm in je nasprotno od relativne troposferske refrakcije proporcionalen dolžini baznega vektorja.

Vrednost skupne troposferske refrakcije v zenitni smeri znaša približno 2.5 m in zelo hitro narašča z manjšanjem višinskega kota satelita [Posfay et al., 2003]. Običajno je vpliv troposfere odstranjen z uporabo primerne modela troposfere. Z uporabo modela znašajo vrednosti popravkov dvojnih faznih razlik zaradi vpliva troposfere 0.2-0.5 ppm. V uporabi je več modelov troposfere, v nadaljevanju pa sta zaradi svoje široke uporabe opisana Hopfieldov in Saastamoinenov model troposfere.

3.4.1 Hopfieldov model troposfere

Leta 1969 je Hopfield razvil model troposfere, ki predstavlja suho in mokro komponento refraktivnosti kot funkcijo višine točke nad zemeljskim površjem h [Su, 2000]. Komponenti refraktivnosti sta dani z izrazom:

$$N_d^{trop}(h) = N_{d,0} \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^4 \quad \text{za } h \leq h_d = 43km \quad (3.34)$$

$$N_w^{trop}(h) = N_{w,0} \left[\frac{h_w - h}{h_w} \right]^4 \quad \text{za } h \leq h_w = 12km \quad (3.35)$$

kjer je $N_{d,0}$ suha komponenta refraktivnosti za točko na površju Zemlje, ki je funkcija temperature in zračnega tlaka, ter $N_{w,0}$ mokra komponenta refraktivnosti za točko na površju Zemlje, ki je funkcija delnega tlaka zračne vlage, temperature in zračnega tlaka.

Za suho in mokro komponento refraktivnosti veljata izraza:

$$N_{d,0} = c_1 \frac{P}{T} \quad (3.36)$$

$$N_{w,0} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad (3.37)$$

kjer so c_1 , c_2 , c_3 konstante refraktivnosti.

Suho in mokro komponento troposferske refrakcije lahko sedaj zapišemo z izrazoma:

$$\Delta_d^{trop} = 10^{-6} N_{d,0} \int \left[\frac{h_d - h}{h_d} \right]^4 dh \quad (3.38)$$

$$\Delta_w^{trop} = 10^{-6} N_{w,0} \int \left[\frac{h_w - h}{h_w} \right]^4 dh \quad (3.39)$$

Za točke na površju Zemlje, kjer je $h = 0$, lahko zapišemo enačbo troposferske refrakcije z izrazom:

$$\Delta^{trop} = \frac{10^{-6}}{5} (N_{d,0} h_d + N_{w,0} h_w) \quad (3.40)$$

3.4.2 Saastamoinenov model troposfere

Leta 1971 je Saastamoinen razvil model troposfere na podlagi dveh predpostavk. Prva predpostavka obravnava suho komponento troposferske refrakcije od površja Zemlje do zgornje plasti stratosfere kot funkcijo zračnega tlaka, merjenega na površini Zemlje. Druga predpostavka obravnava zrak kot mešanico dveh idealnih plinov, suhega zraka in vlage. Enačbe modela je nato izpeljal iz enačb plinskih zakonov [Su, 2000].

Končna enačba troposferske refrakcije je dana z izrazom:

$$\Delta^{trop} = \frac{0.002277}{\cos z} (1 + 0.0026 \cos 2\varphi + 0.00028h) \left[P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 - B \tan^2 z \right] + \delta_R m \quad (3.41)$$

kjer je φ geografska širina opazovališča, P_0 zračni tlak na nivoju morske gladine v mbar, e_0 delni tlak zračne vlage na nivoju morske gladine v mbar, T_0 temperatura na nivoju morske gladine v K ter z zenitna razdalja satelita v točki opazovališča.

Količina B je odvisna od ortometrične višine opazovališča h . Količina $\delta_R m$ je odvisna od ortometrične višine opazovališča h in zenitne razdalje satelita z . Obe količini lahko pridobimo z interpoliranjem vrednosti iz tabel.

S Saastamoinenovim modelom troposfere zavzamejo vrednosti suhe komponente troposferske refrakcije do približno 0.2 mm v zenitni smeri ter vrednosti mokre komponente do približno 30 mm v zenitni smeri [Cove, 2005].

3.4.3 Projekcijske komponente troposferske refrakcije

Troposferska refrakcija zavzame najmanjše vrednosti v zenitni smeri in narašča z večanjem višinskega kota satelita. Delimo jo lahko na zenitno Δ_{zen}^{trop} in projekcijsko $m_{proj}^{trop}(z, \alpha)$

komponento. Troposferska refrakcija je tako dana z izrazom:

$$\Delta^{trop} = \Delta_{zen}^{trop} \cdot m_{proj}^{trop}(z, \alpha) \quad (3.42)$$

Zenitno troposfersko refrakcijo običajno razdelimo na suho in mokro komponento. Vrednost suhe komponente zenitne troposferske refrakcije znaša 2.2-2.3 m in jo lahko modeliramo z relativno natančnostjo 2-5%. Pri tem uporabljamo na površini Zemlje izmerjene vrednosti temperature in zračnega tlaka. Mokra komponenta zenitne troposferske refrakcije je velikosti 10-30 cm. Zaradi velikega časovnega in prostorskega spreminjanja vodne pare je težavna za modeliranje.

Projekcijska komponenta troposferske refrakcije je odvisna od zenitne razdalje z in azimuta α radij vektorja satelit-sprejemnik. Kompleksnost projekcijske komponente je odvisna od potrebne natančnosti modeliranja troposferske refrakcije in od maksimalne zenitne razdalje opazovanega satelita [Ifadis, 2000].

V uporabi so enačbe projekcijskih komponent različnih avtorjev. Primerjava projekcijskih komponent nekaterih avtorjev je podana v preglednici 3.2. V nadaljevanju je zaradi kasnejše uporabe v praktičnem delu diplomske naloge opisana Niellova projekcijska komponenta.

Preglednica 3.2. Primerjava projekcijskih komponent [Niell, 1996, str. 22].

(P – skupni zračni tlak, e – delni tlak vodne pare, T – temperatura površja, β – vertikalni temperaturni gradient, h_t – višina tropopavze, h_i – višina izotermalne plasti, φ – geografska širina, H – ortometrična višina, DOY – čas v UTC dnevih od januarja 0.0)

Projekcijska komponenta	Avtor	Minimalni višinski kot	Koeficienti	
			Suha komponenta	Mokra komponenta
CfA2.2	Davis et al. (1985)	5°	P, e, T, β , h_t	--
Ifadis	Ifadis (1986)	2°	P, T, $e^{1/2}$	P, T, $e^{1/2}$
MTT	Herring (1992)	3°	T, φ , H	T, φ , H
NMF	Niell (1996)	3°	DOY, φ , H	φ , H
Lanyi	Lanyi (1984)	6°	T, h_i , h_t , β (skupni)	

Niell je definiriral projekcijsko komponento na podlagi primerjav podatkov Herringove projekcijske komponente in podatkov pridobljenih z radiosondami. Herringova projekcijska komponenta je dana z izrazom:

$$m(E) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin E + \frac{a}{\sin E + \frac{b}{\sin E + c}}} \quad (3.43)$$

kjer so koeficienti a , b in c linearno odvisni od temperature, kosinusa geografske širine opazovališča in ortometrične višine opazovališča.

Opazovanja z radiosondami so bila izvedena na točkah s severnimi geografskimi širinami 15°, 30°, 45°, 60° in 75° in sicer za vsako točko devet profilov z višinskimi koti od 3° do 90°. Na vsaki točki sta znani temperatura in relativna vlažnost. Koeficienti so bili izračunani z metodo najmanjših kvadratov za vsak profil posebej. Ob upoštevanju, da so podatki ekvatorialnih območij enaki podatkom na točki z geografsko širino 15°, da so podatki polarnih območij

enaki podatkom na točki z geografsko širino 75° ter, da se podatki ne razlikujejo glede na letni čas, definira teh devet skupin parametrov projekcijsko komponento.

Za suho projekcijsko komponento pridobimo koeficient a za točko na geografski širini φ v času t z izrazom:

$$a(\varphi, t) = a_{povp}(\varphi) - a_{amp}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (3.44)$$

kjer je T_0 referenčna časovna epoha, vrednosti členov a_{povp} in a_{amp} pa so podane v preglednici 3.3.

Za koeficienta b in c velja podobna enačba. Z interpolacijo med dvema znanima sosednjima vrednostnima koeficientov lahko pridobimo vrednost projekcijske komponente na katerikoli geografski širini in v kateremkoli dnevu v letu.

Preglednica 3.3. Vrednosti koeficientov Niellove suhe projekcijske komponente [Niell, 1996, str. 24].

Koeficient	Geografska širina				
	15°	30°	45°	60°	75°
	Povprečje				
a_{povp}	1.2769934e-3	1.2683230e-3	1.2465397e-3	1.2196049e-3	1.2045996e-3
b_{povp}	2.9153695e-3	2.9152299e-3	2.9288445e-3	2.9022565e-3	2.9024912e-3
c_{povp}	62.610505e-3	62.837393e-3	63.721774e-3	63.824265e-3	64.258455e-3
	Amplituda				
a_{amp}	0.0	1.2709626e-5	2.6523662e-5	3.4000452e-5	4.1202191e-5
b_{amp}	0.0	2.1414979e-5	3.0160779e-5	7.2562722e-5	11.723375e-5
c_{amp}	0.0	9.0128400e-5	4.3497037e-5	84.795348e-5	170.37206e-5
	Popravki po višini				
a_{ht}	2.53e-5				
b_{ht}	5.49e-3				
c_{ht}	1.14e-3				

Suha projekcijska komponenta je odvisna tudi od ortometrične višine opazovališča. Zato je potrebno upoštevati popravke po višini, ki so neodvisni od geografske širine opazovališča in izračunani z metodo najmanjših kvadratov za vseh devet višinskih kotov. Vrednosti koeficientov popravkov po višini a_{ht} , b_{ht} , c_{ht} so podane v preglednici 3.3.

Popravek suhe projekcijske komponente po višini je podan preko diferenciala funkcije z izrazom:

$$\Delta m(E) = \frac{dm(E)}{dh} H = \left(\frac{1}{\sin E} - f(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right) H \quad (3.45)$$

Mokra projekcijska komponenta je časovno neodvisna, zato pridobimo vrednosti projekcijske komponente z interpolacijo glede na geografsko širino.

Preglednica 3.4. Vrednosti koeficientov Niellove mokre projekcijske komponente [Niell, 1996, str. 24].

Koeficient	Geografska širina				
	15°	30°	45°	60°	75°
a	5.8021897e-4	5.6794847e-4	5.8118019e-4	5.9727542e-4	6.1641693e-4
b	1.4275268e-3	1.5138625e-3	1.4572752e-3	1.5007428e-3	1.7599082e-3
c	4.3472961e-2	4.6729510e-2	4.3908931e-2	4.4626982e-2	5.4736038e-2

3.5 Odboj signala

Odboj signala je posledica interference neposredno sprejetega in odbitega signala. Najvišjo vrednost doseže, ko je odbiti signal enako močan kot neposredno sprejeti signal. Pri kratkih baznih vektorjih lahko vpliv odboja signala predstavlja največji pogrešek pri določitvi relativnega položaja. V splošnem pa lahko velika vrednost vpliva odboja signala povzroči težave pri določitvi neznanega začetnega števila celih valov. V primeru faznih opazovanj je za dve stopnji manjši kot v primeru kodnih opazovanj.

Vpliv odboja signala je odvisen od jakosti signala, višinskega kota, lastnosti antene in sprejemnika ter načina obdelave GPS signala. Odboj signala se izraža kot periodičen vpliv s periodo, ki je odvisna od frekvenca valovanja in je načeloma enaka periodi signala.

Zmanjšamo ga lahko s previdno izbiro položajev točk ter s primerno oblikovano anteno sprejemnika.

3.6 Šum sprejemnika

Šum sprejemnika je odvisen od frekvence nosilnega valovanja signala. Glede na tip opazovanj ločimo šum kode in šum faze valovanja. Šum faze valovanja predstavlja 1% valovne dolžine. Vrednosti šuma posameznih nosilnih valovanj GALILEO in moderniziranega GPS signala so prikazane v preglednici 3.5.

Preglednica 3.5. Podatki nosilnih valovanj GALILEO in moderniziranega GPS signala [GNSS NRT Data Analysis Algorithms, 2006, str. 14].

Nosilno valovanje	Frekvenca (MHz)	Valovna dolžina (m)	Šum faze valovanja (cm)	Šum kode valovanja (m)
E1	1575.420	0.190	0.190	0.150
E5b	1207.140	0.248	0.248	0.100
E5a	1176.450	0.254	0.254	0.100
E5a+E5b	1191.795	0.251	0.251	0.100
E6	1278.750	0.234	0.234	0.100
L1	1575.420	0.190	0.190	0.300
L2	1227.600	0.244	0.244	0.300
L5	1176.450	0.254	0.254	0.100

4 SIMULATOR GSSF

Simulator GSSF je programski paket, ki omogoča simulacijo posamezne faze razvoja sistema GALILEO: zasnovo, realizacijo in delovanje sistema. Razvil ga je mednarodni konzorcij pod vodstvom nemške skupine VEGA in sicer v korist ESA/ESTEC. Simulator GSSF omogoča uporabnikom nastavitve in konfiguracije scenarijev simulacij, zagon simulacij, analizo podatkov, vizualizacijo podatkov ter uvoz in izvoz podatkov [GSSF]. Temelji na uporabi različnih modelov in omogoča analize pridobljenih podatkov.

4.1 Modeli in analize simulatorja GSSF

Simulator GSSF omogoča modeliranje vseh segmentov sistema GALILEO ter modeliranje vesoljskega in uporabniškega segmenta sistemov GPS in EGNOS. Modeli se v splošnem delijo na štiri skupine:

- modeli GPS, GALILEO in EGNOS satelitov,
- modeli v okviru analiz storitev navigacije na uporabniški ravni,
- modeli GALILEO kontrolnega segmenta,
- modeli vplivov na opazovanja: vpliv atmosfere, vpliv odboja signala, šum sprejemnika.

Izbira modela je odvisna od vrste analize, ki jo želi uporabnik izvesti. Zato je simulator GSSF bolj prilagodljiv in bolj uporaben v primerjavi z ostalimi simulatorji globalnih navigacijskih satelitskih sistemov. Uporabnik lahko v okviru simulacije doda ali odstrani element sistema, izbira med modeli z različnimi stopnjami točnosti ter izbira med različnimi algoritmi.

Analize simulatorja GSSF so razdeljene v deset skupin [GSSF Team, 2005b]:

- Analize vidnosti:
 - analiza globalne ali lokalne vidnosti,
 - analiza globalne ali lokalne vidnosti (za daljše obdobje),
 - analiza vidnosti glede na razdaljo sprejemnik-satelit,

- analiza vidnosti kontrolnega segmenta.
- Analize pokritosti:
 - analiza intenzivnosti pokritosti,
 - analiza intenzivnosti globalne ali lokalne pokritosti,
 - analiza intenzivnosti pokritosti vesoljskega segmenta s kontrolnimi postajami,
 - analiza intenzivnosti pokritosti kontrolnega segmenta s sateliti,
 - analiza pokritosti neodvisnih poti signala.
- Analiza geometrije:
 - analiza geometrije, ki jo tvorijo razdalje sprejemnik-sateliti.
- Analize DOP (angl. Dilution of Precision) faktorjev:
 - analiza globalnih ali lokalnih DOP faktorjev,
 - analiza globalne ali lokalne razpoložljivosti, pridobljene z DOP faktorji,
 - analiza DOP faktorjev sprejemnika,
 - analiza razpoložljivosti sprejemnika, pridobljene z DOP faktorji.
- Analize uporabe navigacije:
 - analiza globalne ali lokalne natančnosti navigacijskega sistema,
 - analiza globalne ali lokalne natančnosti navigacijskega sistema brez prekinitev signala,
 - analiza globalne ali lokalne natančnosti navigacijskega sistema s prekinitvami signala,
 - analiza globalne ali lokalne natančnosti navigacijskega sistema a posteriori brez prekinitev signala.
- Analize integritete:
 - analiza globalne ali lokalne integritete signala (stopnje zaščite),
 - analiza globalne ali lokalne integritete signala brez prekinitev,
 - analiza globalne ali lokalne integritete signala a posteriori brez prekinitev,
 - analiza globalne ali lokalne integritete signala s prekinitvami.
- Analizi storitev:
 - analiza globalne ali lokalne razpoložljivosti storitev,
 - analiza globalno ali lokalno kritičnih satelitov.
- Analiza interference:
 - analiza globalne ali lokalne interference.

- Analiza povezave (v povezavi z modeli simulatorja RDG).
- Analiza motenj (v povezavi z modeli simulatorja RDG).

Z analizo povezave in analizo motenj pridobimo za vsak par satelit-sprejemnik in za vsako serijo opazovanj sledeče parametre: moč signala, temperaturo antene, izgube signala, pogrešek sprejemnikove antene ter pogrešek satelitove antene.

Simulator GSSF temelji na notranjih in zunanjih vmesnikih, ki omogočajo obdelavo podatkov formatov IGS SP3, TLES, YUMA, RINEX, TROPEX, IONEX, IGS ERP, JGM3 in JPL DE405 [Zimmermann et al., 2005]. Vmesniki omogočajo nadomeščanje modelov s podatki o ionosferi ali troposferi, ki jih uvozimo v programski paket. Podatke, ki so formatov RINEX ali SP3 lahko izvozimo v druga programska orodja za nadaljnje analize. V prihodnje naj bi GSSF omogočal tudi izvoz podatkov v formatu ASCII oziroma formatu CSV (angl. Comma Separated Values), ki ga podpira program Microsoft Excel.

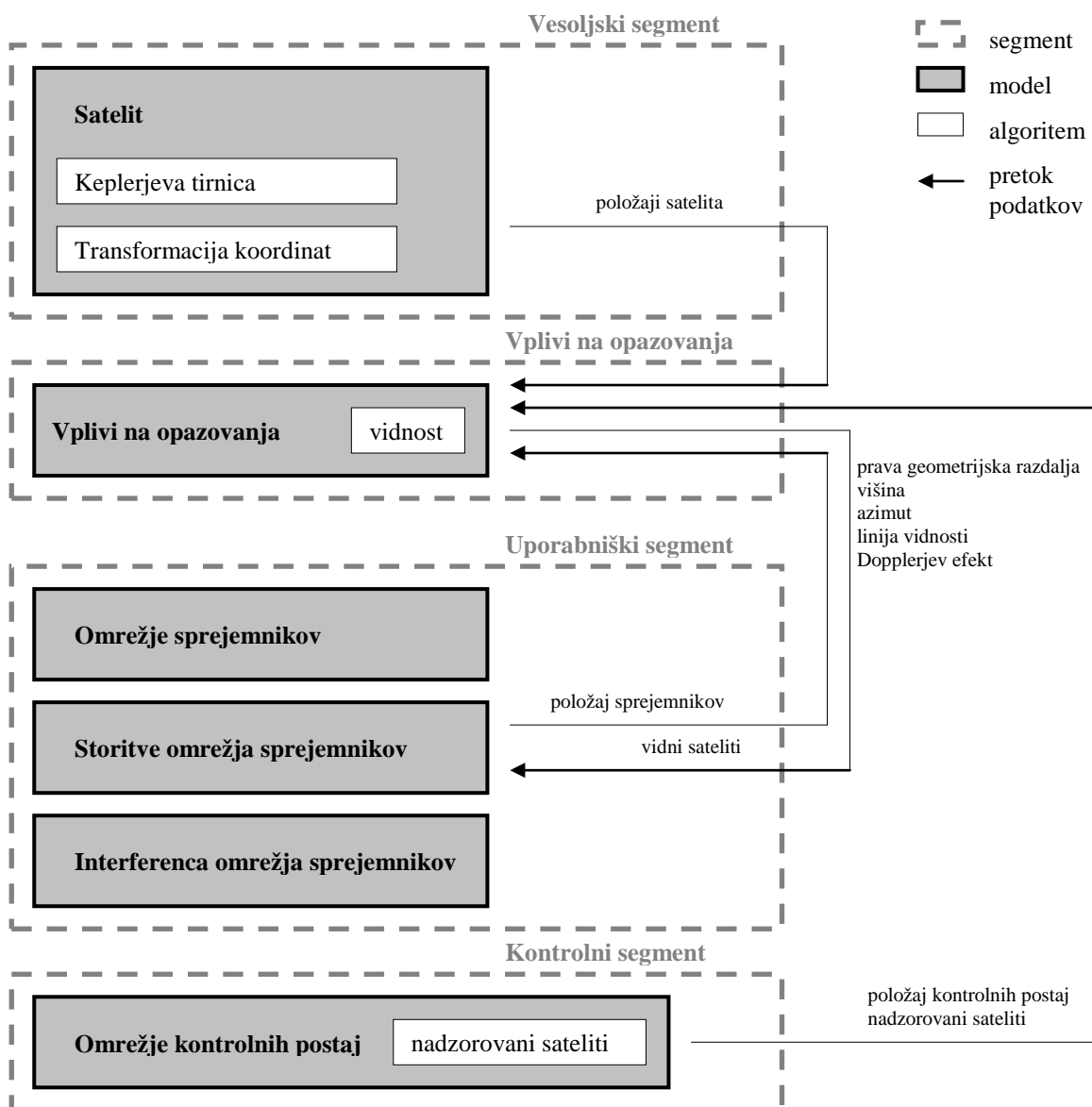
4.2 Sestava simulatorja GSSF

Simulator GSSF predstavljata dva simulatorja, ki sta združena v en programski paket [Zimmermann et al., 2005]:

- GSSF SVS (angl. Service Volume Simulator) podpira analize storitev navigacije in integritete sistema v okviru daljših obdobj in večjih geografskih območij. Omogoča analize globalnih ali lokalnih mrež ali analize položajev posameznih točk. V okviru modelov simulatorja SVS opravljamo analize vidnosti, pokritosti, geometrije, DOP faktorjev, uporabe navigacije, integritete, storitev in motenj.
- GSSF RDG (angl. Raw Data Generator) podpira analize povezave in analize motenj. Z RDG lahko pridobimo podatke o opazovanjih, podatke o efemeridah ter podatke o času. Opazovanja izvajajo GALILEO senzorske postaje.

4.2.1 Simulator SVS

SVS modeli so definirani znotraj vesoljskega segmenta, uporabniškega segmenta, vplivov na opazovanja ter kontrolnega segmenta.



Slika 4.1. Prikaz modelov in algoritmov simulatorja SVS [GSSF Team, 2005a, str. 19].

4.2.1.1 Modeli in algoritmi SVS vesoljskega segmenta

Modeli vesoljskega segmenta so model rotacije Zemlje, model tirnice satelitov in model satelita.

Model rotacije Zemlje je definiran z rotacijo Zemlje okoli z-osi terestričnega koordinatnega sistema ITRF2000 (angl. International Terrestrial Reference Frame). Algoritem modela temelji na transformaciji koordinat iz geocentričnega nebesnega koordinatnega sistema v terestrični koordinatni sestav ITRF2000 [GSSF Team, 2005a]. Rezultat algoritma je transformacijska matrika, ki je dana z izrazom:

$$ERM = R^T = (R_z(-GMST))^T \quad (4.1)$$

kjer je $GMST$ Greenwiški srednji zvezdni čas.

Model tirnice satelita je definiran s Keplerjevimi elementi dejanske tirnice satelita, s katerimi so definirana odstopanja od normalne tirnice. Keplerjevi elementi dejanske tirnice so funkcija časovnega intervala, ki je definiran z izrazom:

$$\Delta t = t - t_0 \quad (4.2)$$

kjer je t trenutni čas, ki ga opiše satelit na dejanski tirnici, ter t_0 referenčni čas, ki ga opiše satelit na normalni tirnici.

Srednje gibanje satelita na dejanski tirnici opisuje izraz:

$$n = \sqrt{\frac{GM}{a^3}} \quad (4.3)$$

kjer je GM gravitacijska konstanta in a velika polos dejanske tirnice.

Srednja anomalija dejanske tirnice je dana z izrazom:

$$M = M_0 + n\Delta t \quad (4.4)$$

Ekscentrična anomalija dejanske tirnice je dana z izrazom:

$$E - e \sin E = M \quad (4.5)$$

Ekscentrična anomalija se določa z iterativnim postopkom, kjer je iteracija dana z izrazom:

$$E_{i+1} = E_i - \frac{(E_i - e \sin E_i - M)}{1 - e \cos E_i} \quad (4.6)$$

Začetna vrednost ekscentrične anomalije je enaka vrednosti srednje anomalije: $E_0 = M$.

Iteracije se ponavljajo, dokler razlika med sosednjima iteracijama ni manjša od 10^{-8} oziroma dokler ni izračunanih 25 iteracij [GSSF Team, 2005a].

Prava anomalija je dana z izrazom:

$$v = \arctan \left(\frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{(1-e)\cos E}, \frac{\cos E - e}{(1-e)\cos E} \right) \quad (4.7)$$

Ostali Keplerjevi elementi dejanske tirnice satelita (rektascenzija dvižnega vozla Ω , argument perigeja ω in inklinacija i) so enaki Keplerjevim elementom normalne tirnice.

Model satelita se določi s parametri, ki jih definira uporabnik. Ti parametri so: elementi tirnice satelita, podatki o stanju satelita in PRN število.

4.2.1.2 Modeli in algoritmi vplivov na opazovanja

Modeli vplivov na opazovanja vključujejo izračun frekvence in hitrosti Dopplerjevega efekta, podatke o vidnosti ter skupne vplive na opazovanja.

Vrednost frekvence in hitrosti Dopplerjevega efekta sta izračunana iz radij vektorja satelita, hitrosti satelita, pospeška satelita, radij vektorja sprejemnika, hitrosti sprejemnika, pospeška sprejemnika ter frekvence nosilnega valovanja oddanega signala.

Vidnost je definirana z geometrično razdaljo satelit-sprejemnik, z višinskim kotom satelita ter z azimutom sprejemnika. Podatke o vidnosti torej pridobimo na podlagi radij vektorja satelita, hitrosti satelita, pospeška satelita, radij vektorja sprejemnika, hitrosti sprejemnika, pospeška sprejemnika ter azimuta sprejemnika.

Skupni vplivi na opazovanja vključujejo troposfersko refrakcijo, ionosfersko refrakcijo, šum sprejemnika, pogrešek položaja satelita, pogrešek satelitove ure, pogrešek sprejemnikove ure ter odboj signala. Algoritem je določen s parametri, ki jih definira uporabnik. Ti parametri so: vrednosti srednjih in standardnih deviacij vplivov na opazovanja in storitev sprejemnika ter tip sprejemnika. Skupni vplivi na opazovanja so dani z izrazom:

$$UERE = \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} \quad (4.8)$$

kjer se vrednosti σ_i nanašajo na vse zgoraj naštetih vplive na opazovanja.

4.2.1.3 Modeli in algoritmi SVS uporabniškega segmenta

Med modele uporabniškega segmenta spadajo model omrežja sprejemnikov, model storitev omrežja sprejemnikov in model interference omrežja sprejemnikov.

Model omrežja sprejemnikov sestavljajo statični uporabniški sprejemniki s podobnimi karakteristikami. Algoritem modela je določen s parametri, ki jih definira uporabnik. Ti parametri so: lastnosti omrežja sprejemnikov, integriteta, izbira satelitov in skupni vplivi na opazovanja. Z algoritmom modela pridobimo:

- DOP faktorje: geometrijski DOP faktor, pozicijski DOP faktor, horizontalni DOP faktor, vertikalni DOP faktor in časovni DOP faktor;
- natančnost navigacijskega sistema (angl. Navigation System Precision – NSP): pozicijska NSP, horizontalna NSP, vertikalna NSP in časovna NSP;
- podatek o integriteti.

Model storitev omrežja sprejemnikov sestavljajo statični sprejemniki uporabnikov s podobnimi karakteristikami in omogoča analize storitev. Algoritem modela je določen s parametri, ki jih definira uporabnik. Ti parametri so: lastnosti storitev omrežja sprejemnikov, integriteta, izbira satelitov in skupni vplivi na opazovanja. Z algoritmom pridobimo podatek o razpoložljivosti storitev.

Model interference omrežja sprejemnikov sestavljajo statični sprejemniki uporabnikov s podobnimi karakteristikami in omogoča analize interference. Algoritem modela je določen s

parametri, ki jih definira uporabnik. Ti parametri so: lastnosti omrežja sprejemnikov, karakteristike signala in vrednosti koeficientov interference. Z algoritmom pridobimo podatek o moči sprejetega signala, podatek o termičnem šumu ter podatek o interferenci.

Moč sprejetega signala je dana z izrazom:

$$P_R = P_T - P_{FSL} + P_{TG} + P_{RG} - P_{ML} \quad (4.9)$$

kjer je P_T moč oddanega signala, P_{FSL} moč izgube signala v prostem prostoru, P_{TG} moč izgube oddanega signala, P_{RG} moč izgube sprejetega signala in P_{ML} moč ostalih izgub signala.

Termični šum je definiran z izrazom:

$$N_0 = 10 \log \left(\frac{kT}{a} \right) \quad (4.10)$$

kjer je k Boltzmannova konstanta, T temperatura antene ter a konstanta termičnega šuma.

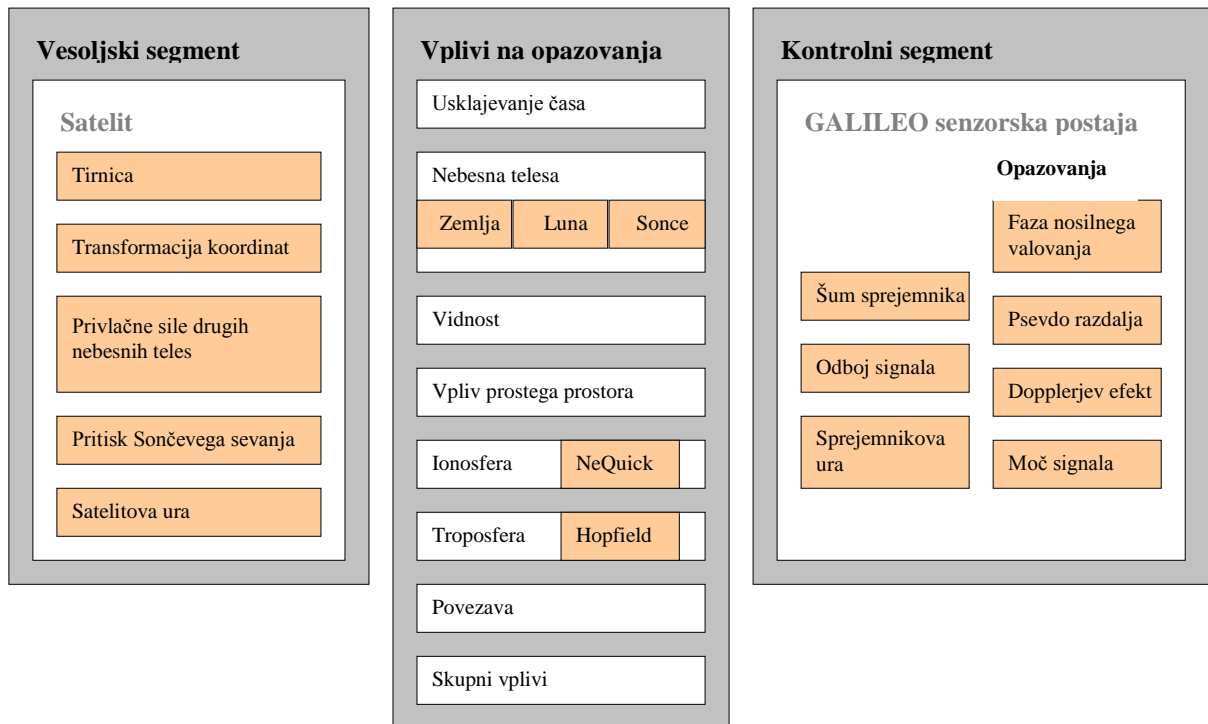
Podatek o interferenci se nanaša na globalno ali lokalno interferenco med GALILEO sateliti, interferenco med GPS sateliti ter interferenco med GALILEO in GPS sateliti [GSSF Team, 2005a].

4.2.1.4 Modeli in algoritmi SVS kontrolnega segmenta

Kontrolni segment sestavlja omrežje GALILEO senzorskih postaj, GALILEO povezovalnih postaj in TT&C postaj. Model omrežja kontrolnih postaj je namenjen za analize pokritosti in je določen s parametri, ki jih definira uporabnik. Ti parametri so: seznam postaj, izbira satelitov na podlagi vidnosti ali vrednosti DOP faktorjev, izbira modela skupnih vplivov na opazovanja ter minimalni višinski kot. Za vsako kontrolno postajo se na podlagi opazovanih razdalj satelit-sprejemnik določijo vsi vidni sateliti, ki se evidentirajo v tabelah.

4.2.2 Simulator RDG

RDG modeli so definirani znotraj vesoljskega segmenta, vplivov na opazovanja ter kontrolnega segmenta.



Slika 4.2. Prikaz modelov in algoritmov simulatorja RDG [GSSF Team, 2005a, str. 55].

4.2.2.1 Modeli in algoritmi RDG vesoljskega segmenta

Modeli vesoljskega segmenta so model sistema satelitov, model satelita in model možnih motenj v vesoljskem segmentu.

Vesoljski segment je sestavljen iz enega ali več sistemov satelitov, ki so definirani na tri različne načine: s predoločenim sistemom GPS ali GALILEO satelitov, z uporabniško definiranimi parametri ali z Walkerjevimi parametri [GSSF Team, 2005a]. Walkerjev sistem satelitov temelji na določitvi položajev satelitov glede na položaj enega satelita, ki je definiran s Keplerjevimi elementi tirnice. Položaj ostalih satelitov določimo s štirimi parametri: število

ravnin kroženja, fazna razlika, vrednost rektascenzije dvižnega vozla ter število satelitov v ravnini kroženja.

Model satelita vključuje model vplivov na tirnico, model vplivov na položaj satelita in model satelitove ure. Določen je z uporabniško definiranimi parametri, ki so: elementi tirnice satelita (prava anomalija v , rektascenzija dvižnega vozla Ω , ekscentriciteta e , epoha satelitove tirnice v UTC času, inklinacija i , argument perigeja ω , velika polos a), tip tirnice satelita, identifikacijska parametra (PRN število, tip satelita), podatki o anteni ter podatki o napakah. Model tirnice satelita je definiran z uporabniško definiranimi parametri ali s podatki iz efemerid. V algoritmu modela tirnice je upoštevan vpliv privlačne sile Zemlje, vpliv privlačne sile Sonca in Lune, pritisk Sončevega sevanja, vpliv plimovanja Zemlje, relativistični popravki ter vpliv sile gibanja satelita.

Model možnih motenj v vesoljskem segmentu vključuje pogrešek položaja satelita na tirnici, zunanje motnje ter pogrešek satelitove ure.

4.2.2.2 Modeli in algoritmi vplivov na opazovanja

Modeli vplivov na opazovanja so model vpliva prostega prostora, model ionosfere, model troposfere in model skupnih vplivov. Med modele vplivov na opazovanja uvrščamo tudi model geometrije in model vidnosti.

Vpliv prostega prostora je definiran na podlagi poti signala od satelita do sprejemnika v prostem prostoru, ki je pogrešena s pogreškom ekscentricitete tirnice satelita in Sagnacovim pogreškom [GSSF Team, 2005a]. Vpliv prostega prostora je dan z izrazom:

$$\Delta t_{FreeSpace} = \Delta t_{FreeSpace, Ideal} + \Delta t_{OrbitEcc} + \Delta t_{Sagnac} \quad (4.11)$$

kjer je $\Delta t_{FreeSpace, Ideal}$ vpliv idealnega prostega prostora, $\Delta t_{OrbitEcc}$ pogrešek ekscentricitete tirnice satelita, ter Δt_{Sagnac} Sagnacov pogrešek.

Vpliv idealnega prostega prostora je dan z izrazom:

$$\Delta t_{FreeSpace, Ideal} = \frac{\rho_{prava}}{c} \quad (4.12)$$

kjer je ρ_{prava} prava geometrijska pot satelit-sprejemnik ter c hitrost svetlobe v vakuumu.

Pogrešek ekscentricitete tirnice satelita ima relativistični vpliv in je dan z izrazom:

$$\Delta t_{OrbitEcc} = \frac{2(\vec{r} \cdot \vec{v})}{c^2} \quad (4.13)$$

kjer je \vec{r} prostorski vektor položaja satelita ter \vec{v} vektor hitrosti satelita.

Sagnacov pogrešek ima relativistični vpliv in je dan z izrazom:

$$\Delta t_{Sagnac} = \frac{2\vec{\Omega}_e \cdot \vec{r}_A \times \vec{r}_B}{c^2} \quad (4.14)$$

kjer je \vec{r}_A prostorski vektor položaja satelita, \vec{r}_B prostorski vektor položaja sprejemnika ter $\vec{\Omega}_e$ vektor kotne hitrosti Zemlje, kjer je rotacija Zemlje upoštevana samo v smeri z-osi.

Vpliv prostega prostora odpravimo s preračunom opazovanj na isti trenutek sprejema signala.

Popravljen vrednost zaradi vpliva prostega prostora je dana z izrazom:

$$\Delta t_{FreeSpace, Corr} = \Delta t_{FreeSpace} + \left(\Delta t_{FreeSpace} + \Delta t_{ClockDrift} \right) \frac{\vec{v}_r \cdot \vec{a}}{c} \quad (4.15)$$

kjer je $\Delta t_{ClockDrift}$ pogrešek sprejemnikove ure, \vec{v}_r razlika med hitrostjo satelita in hitrostjo sprejemnika ter \vec{a} enotski vektor položaja v smeri razdalje satelit-sprejemnik.

Vpliv ionosfere je modeliran z modelom NeQuick, ki je opisan v poglavju 3.3.2. Vpliv troposfere je modeliran s Hopfieldovim modelom, ki je opisan v poglavju 3.4.1.

Model skupnih vplivov ne upošteva zakasnitev kode v sprejemniku in v satelitu. Zakasnitev kode je upoštevana v okviru modela satelita in modela sprejemnika. Model skupnih vplivov je dan z izrazom:

$$\Delta t_{Total} = \Delta t_{FreeSpace} + \Delta t_{Iono} + \Delta t_{TotalTropo} \quad (4.16)$$

Model geometrije je definiran z rotacijo Zemlje, kjer je gibanje Zemlje obravnavano v inercialnem nebesnem koordinatnem sistemu. Z algoritmom modela rotacije Zemlje pridobimo transformacijsko matriko, ki je dana z izrazom:

$$ERM = PN \cdot R \cdot W \quad (4.17)$$

kjer je PN matrika precesije in nutacije, R matrika rotacije, ter W matrika gibanja polov.

Matrike PN , R in W so dane z izrazi:

$$PN = R_1(-\varepsilon_0)R_3(\psi_A)R_1(\omega_A)R_3(-\chi_A)R_3(\Delta\psi)R_1(\varepsilon_A + \Delta\varepsilon) \quad (4.18)$$

$$R = R_3(-GST) \quad (4.19)$$

$$W = R_3(-s')R_1(y_p)R_2(x_p) \quad (4.20)$$

4.2.2.3 Modeli in algoritmi RDG kontrolnega segmenta

Kontrolni segment sestavlja omrežje GALILEO senzorskih postaj. Model senzorske postaje je sestavljen iz modela sprejemnika in modela sprejemnikove ure. Algoritem modela senzorske postaje je določen s parametri, ki jih definira uporabnik. Ti parametri so: položaj postaje (geografska širina, geografska dolžina, višina), identifikacijski parametri (dosegljivost postaje, ime postaje, identifikacijska številka sprejemnika, tip sprejemnika), karakteristike signala (neprekinjenost, faktor popravka frekvence valovanja, šum signala), podatki o interferenci (izgube signala, šum signala, termična konstanta, popravek termičnega šuma) ter podatki o anteni (minimalni višinski kot, temperatura).

5 OBDELAVA GPS PRAVIH, GPS SIMULIRANIH IN GALILEO SIMULIRANIH OPAZOVANJ

Obdelavo GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj sem izvedla s programskim paketom NDA (angl. Network Deformation Analysis) Professional, ki omogoča obdelavo GPS in GALILEO opazovanj ter analizo rezultatov obdelave. Za en dan (20.5.2006) sem ob uporabi predvidenih optimalnih modelov vplivov na opazovanja obdelala opazovanja s treh točk, ki tvorijo trikotnik Celje-Trebnje-Novo mesto (v nadaljevanju: CELJ-TREB-PPNM). Pri tem sem uporabila različne dolžine serij opazovanj in sicer 1-, 3-, 6-, 12- in 24-urna opazovanja.

5.1 Podatki opazovanj

Podatke GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj ter efemeride za obdelavo GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj sem pridobila v okviru projekta GEOLOCALNET.

GPS izmero so opravili zaposleni na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo ter njihovi zunanji sodelavci. Opazovanja so pridobili s statično metodo izmere, ki je osnovna metoda za določanje relativnega položaja točk in temelji na spremembi geometrijske razporeditve satelitov v času opazovanj. Položaj točk se določa na osnovi istočasnih opazovanj z večjim številom GPS sprejemnikov, ki sprejemajo GPS signale najmanj štirih satelitov.

Kot sem že omenila sem si izbrala opazovanja za dan 20.5.2006 z dolžino trajanja opazovanj 24 ur. Interval registracije GPS signala znaša 15 sekund. Uporabljeni so različni tipi sprejemnikov in anten. Višina anten je na vseh treh točkah enaka in znaša 6.5 cm.

Z GSSF simulatorjem so generirana GPS simulirana in GALILEO simulirana opazovanja. Simulacija je bila opravljena za primer idealnih pogojev, kar pomeni brez upoštevanja vplivov na opazovanja [Chersich et al., 2006]. Podatki GPS pravih in GPS simuliranih opazovanj so

podani v obliki RINEX datotek verzije 2.10. Podatki GALILEO simuliranih opazovanj so podani v obliki RINEX datotek verzije 3.00 za vsako uro opazovanj posebej.

Vrednosti koordinat točk v trikotniku sem privzela kot »točne«. Koordinate točk so podane v ITRF2000 koordinatnem sestavu.

Preglednica 5.1. »Točne« vrednosti koordinat točk trikotnika CELJ-TREB-PPNM.

Točka	X (m)	Y (m)	Z (m)
CELJ	4263712.8112	1161749.3008	4584088.9900
TREB	4294299.0738	1151308.5454	4558324.1354
PPNM	4298305.8716	1167686.5506	4550309.5679

Vrednosti dolžin baznih vektorjev in vrednosti komponent baznih vektorjev, ki so izračunane iz »točnih« vrednosti koordinat točk, so podane v preglednici 5.2.

Preglednica 5.2. »Točne« vrednosti komponent baznih vektorjev in »točne« vrednosti dolžin baznih vektorjev.

Vektor	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	L (m)
CELJ-TREB	30586.2626	-10440.7554	-25764.8546	41332.2703
PPNM-CELJ	-34593.0604	-5937.2498	33779.4221	48713.2438
PPNM-TREB	-4006.7978	-16378.0052	8014.5675	18668.8718

V primeru obdelave enega baznega vektorja bi za en tip opazovanj ob upoštevanju različnih dolžin serij opazovanj pridobila:

- 24 vektorjev na podlagi 1-urnih opazovanj,
- 8 vektorjev na podlagi 3-urnih opazovanj,
- 4 vektorje na podlagi 6-urnih opazovanj,
- 2 vektorja na podlagi 12-urnih opazovanj,
- 1 vektor na podlagi 24-urnih opazovanj,

kar pomeni skupaj 39 vektorjev. Tako sem za tri bazne vektorje in tri različne tipe opazovanj pridobila skupno 351 baznih vektorjev.

5.2 Programski paket NDA Professional

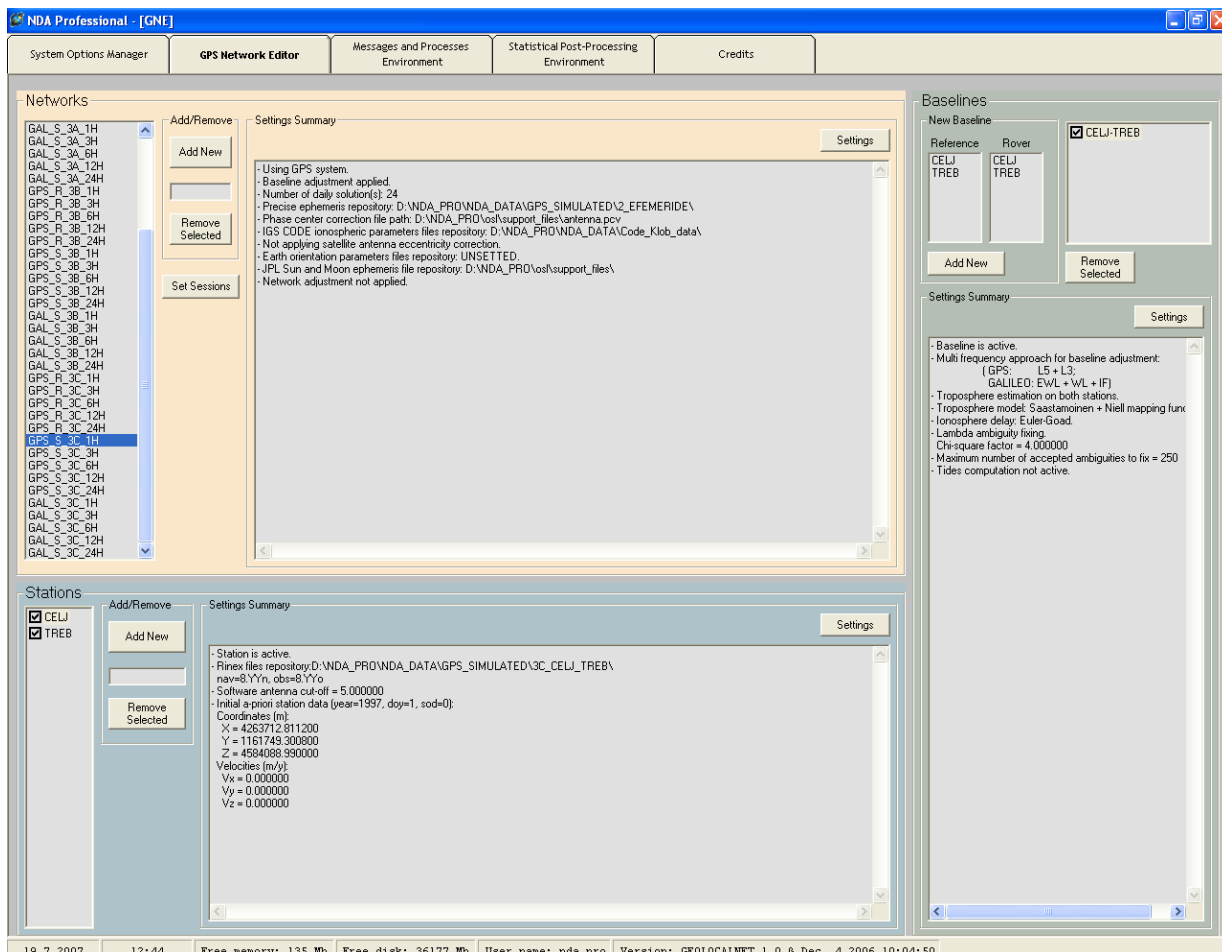
Programski paket NDA Professional je razvilo italijansko podjetje Galileian Plus v okviru projekta GEOLOCALNET. Osnovno idejo projekta je predstavljal razvoj prototipa programske opreme, ki bi omogočala določanje relativnega položaja na podlagi GPS in GALILEO opazovanj. Trenutna verzija NDA Professional omogoča obdelavo in analizo le posameznih vektorjev, pridobljenih z GNSS opazovanji.

Programski paket NDA Professional sestavljata ga dve komponenti [GNSS NRT Data Analysis Prototype User Manual, 2005]:

- komponenta OSL (angl. Scientific Open Source Library), ki vključuje podatke in opravila za analize GNSS opazovanj, ter
- komponenta GSP (angl. Geodetic Scientific Package), ki temelji na OSL in je sestavljena iz štirih komponent:
 - SOM (angl. System Options Manager),
 - GNE (angl. GPS Networks Editor),
 - MPE (angl. Messages and Processes Environment), ter
 - SPE (angl. Statistical Post-processing Environment).

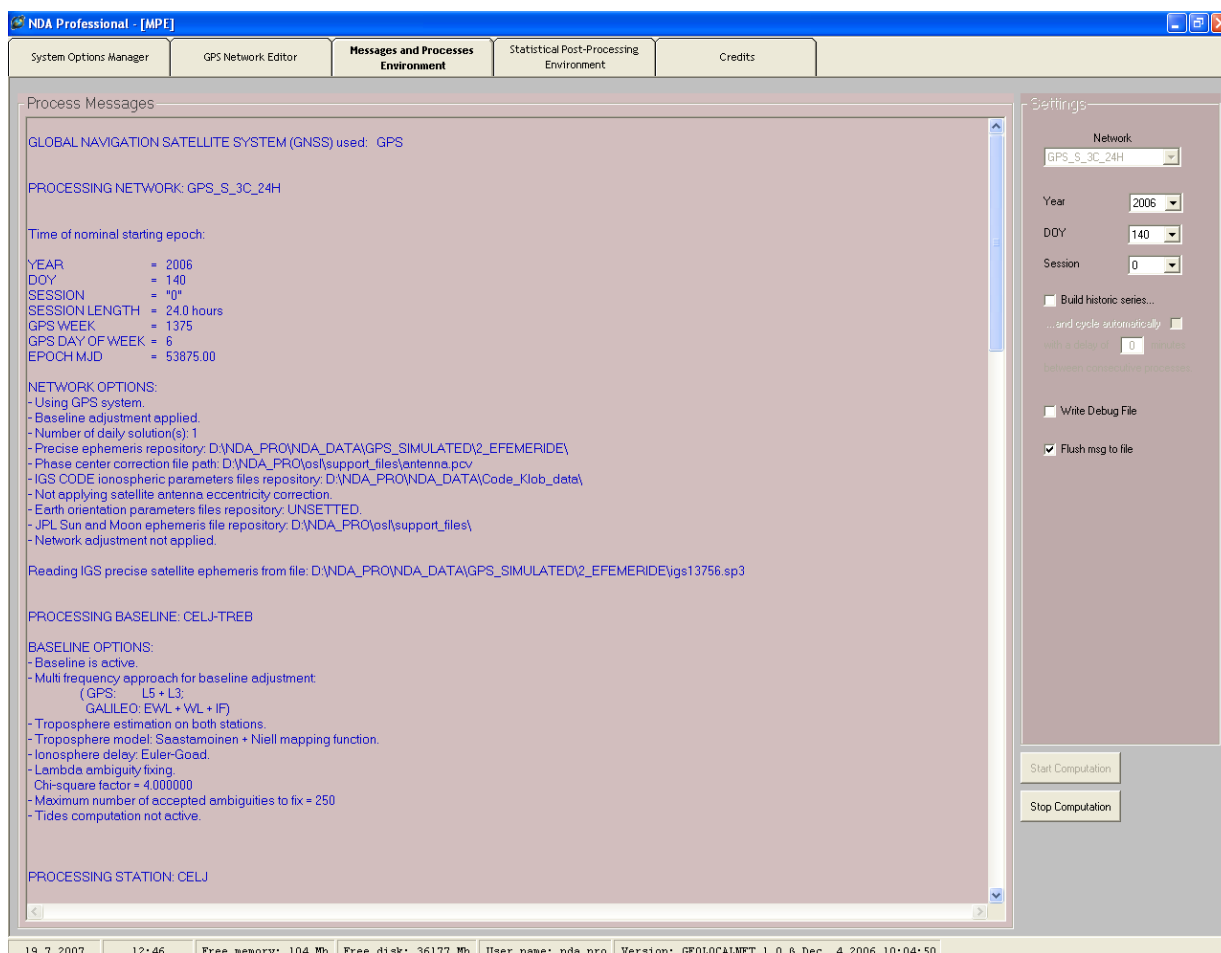
SOM je grafični uporabniški vmesnik, ki omogoča urejanje nastavitvev komponente GSP ter podatkov o licenci.

GNE je grafični uporabniški vmesnik, ki omogoča dodajanje ali brisanje GNSS mreže, točk in baznih vektorjev v GNSS mreži ter urejanje nastavitev le-te. V tem modulu lahko tudi nastavljamo dolžine posameznih serij opazovanj.



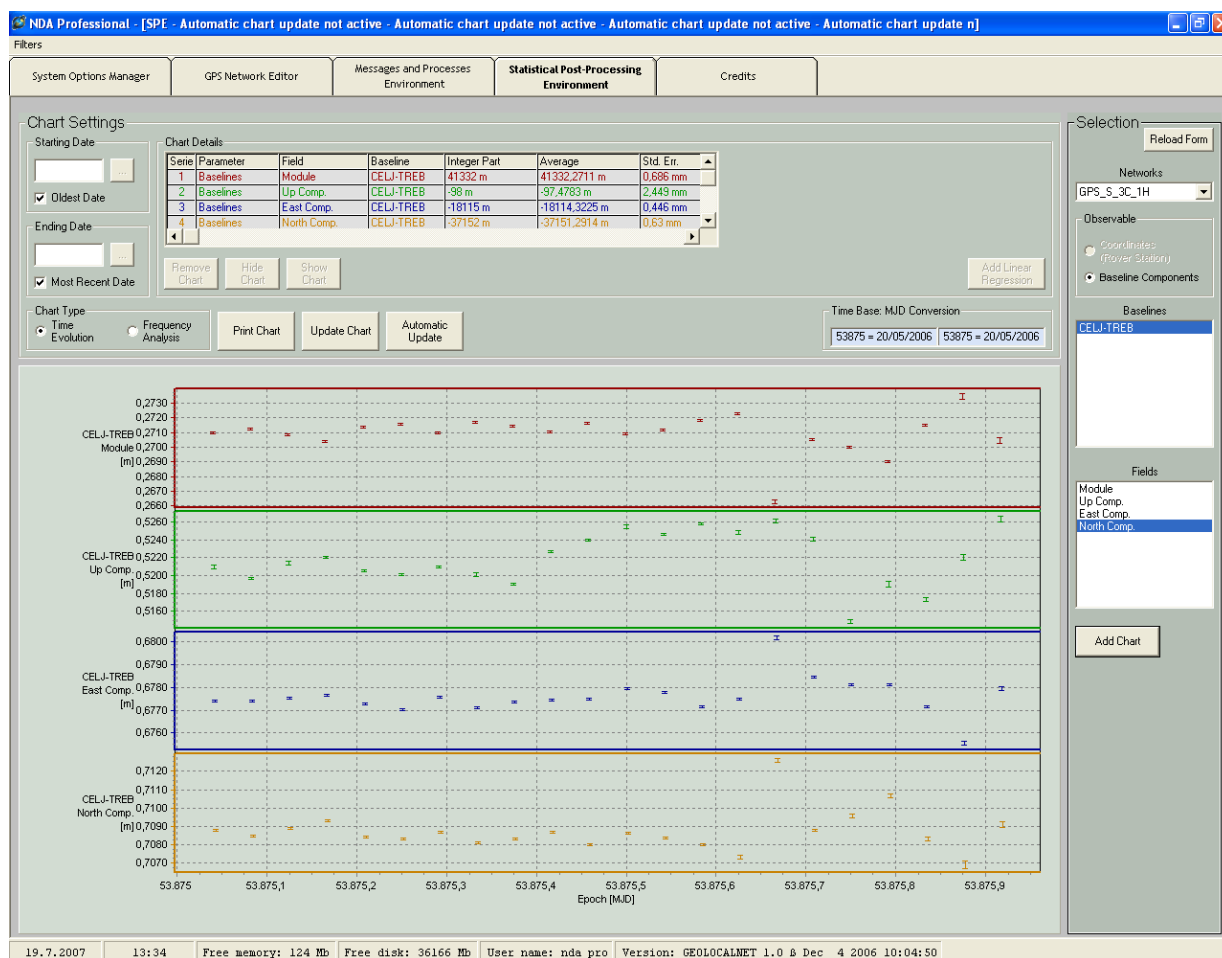
Slika 5.1. Komponenta GNE v programskem paketu NDA Professional.

MPE je grafični uporabniški vmesnik, ki je osnova GSP komponente. V tem modulu lahko izberemo GNSS mrežo, ki jo želimo obdelati in analizirati, poganjamo nove obdelave in kontroliramo obdelave med samim procesom preko sporočil in opozoril.



Slika 5.2. Komponenta MPE v programskem paketu NDA Professional.

SPE je grafični uporabniški vmesnik za analizo obdelanih opazovanj. Izbiramo lahko GNSS mrežo, ki jo želimo analizirati ter urejamo nastavitve tabelarnih in grafičnih prikazov rezultatov.



Slika 5.3. Komponenta SPE v programskem paketu NDA Professional.

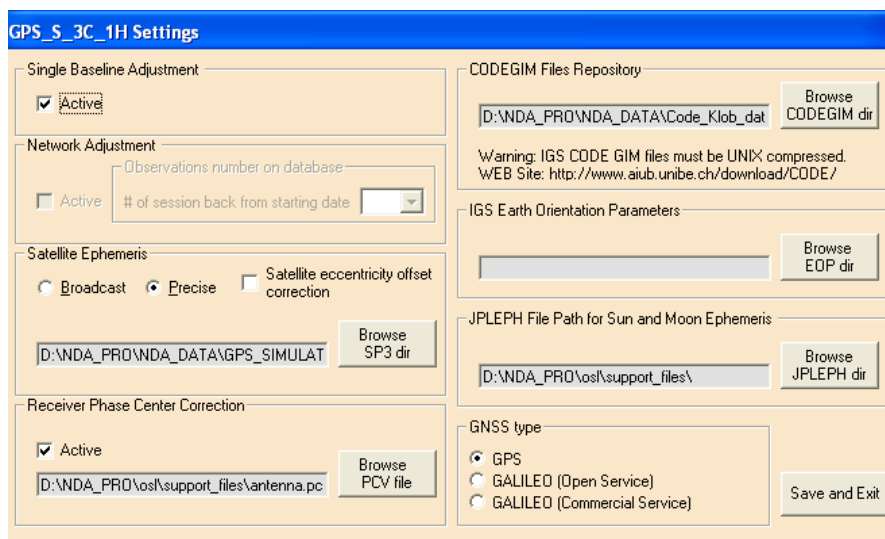
Obdelava baznega vektorja v programskem paketu NDA Professional je sestavljena iz dveh algoritmov [Chersich, 2007]:

- Predhodna obdelava in priprava podatkov vključuje določitev popravkov zaradi vpliva ionosfere, predhodno oceno določitve neznanega števila celih valov, odstranitev nenadnih skokov signala (angl. cycle slips) ter sinhronizacijo sprejemnikove ure.
- Glavna obdelava podatkov vključuje tvorjenje dvojnih faznih razlik in odstranitev nenadnih skokov signala iz dvojnih faznih razlik, določitev neznanega števila celih valov in »iono-free« linearnih kombinacij ter določitev komponent baznega vektorja.

5.3 Koraki obdelave opazovanj s programskim paketom NDA Professional

Pred začetkom obdelave opazovanj moramo najprej urediti nastavitve baznega vektorja:

- tip efemerid in pot do SP3 datoteke, v kateri so podatki o efemeridah,
- pot do PCV datoteke, v kateri so podatki o popravku faznega centra antene sprejemnika,
- pot do CODEGIM datoteke, v kateri so podatki o navigacijskem sporočilu in parametri Klobučarjevega modela ionosfere,
- pot do JPLEPH datoteke, v kateri so podatki o Sončevih in Luninih efemeridah,
- tip GNSS opazovanj.

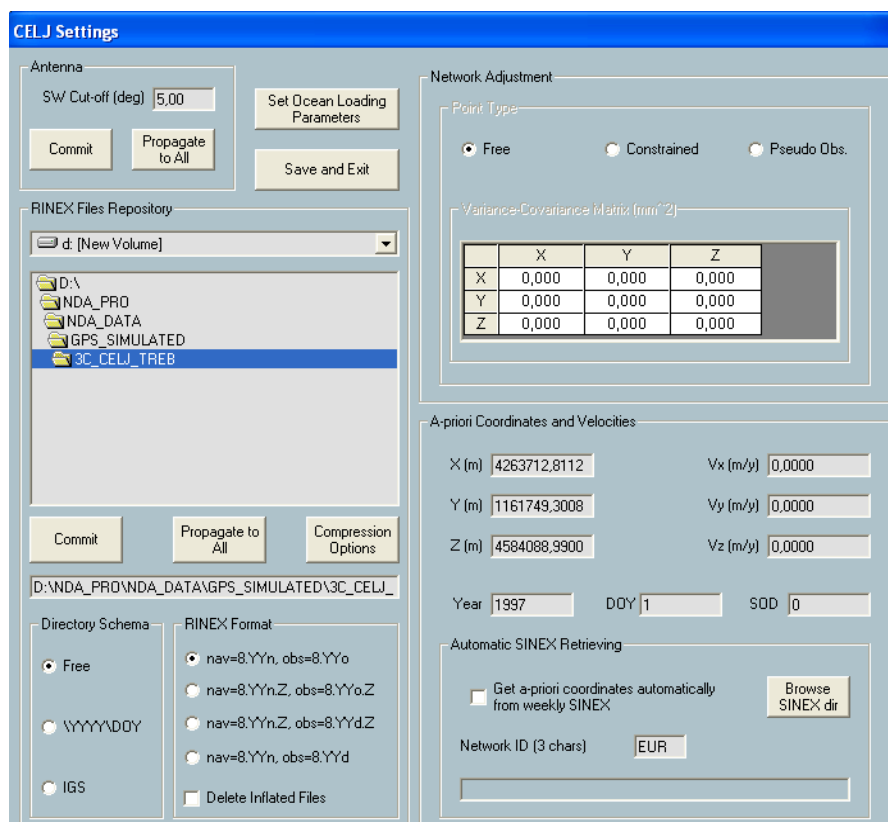


Slika 5.4. Pogovorno okno, kjer urejamo nastavitve baznega vektorja (NDA Professional).

Za obdelavo GPS opazovanj sem uporabila precizne efemeride IGS centra, za obdelavo GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj pa sem uporabila simulirane efemeride.

Ko imamo shranjene nastavitve baznega vektorja, uredimo nastavitve za vsako točko:

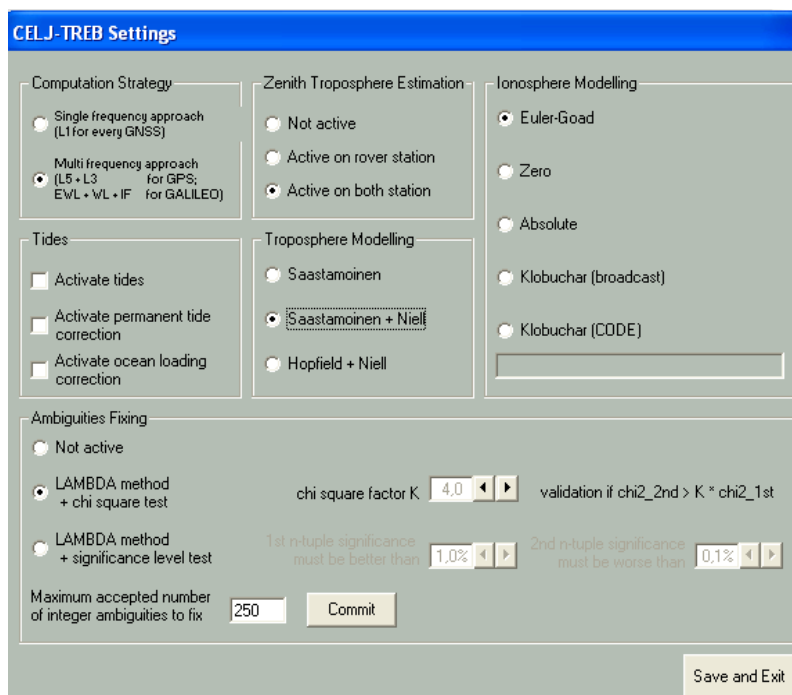
- višinski kot antene sprejemnika na točki,
- pot do RINEX datotek, kjer so podatki o opazovanjih,
- a-priori koordinate točke.



Slika 5.5. Pogovorno okno, kjer urejamo nastavitve točke (NDA Professional).

Po vnosu točk sledi tvorjenje baznega vektorja in urejanje različnih možnosti nastavitvev:

- metoda obdelave dvojnih faznih razlik,
- vplivi plimovanja,
- ocena popravkov zenitne troposferske refrakcije;
- model troposferske refrakcije,
- model ionosferske refrakcije,
- način določitve neznanega števila celih valov,
- maksimalno število določitve neznanih začetnih vrednosti celih valov v okviru množice naravnih števil.



Slika 5.6. Pogovorno okno, kjer urejamo nastavitve baznega vektorja (NDA Professional).

Za obdelavo baznih vektorjev sem privzela predvidene optimalne modele. Ker so vsi trije vektorji daljši od 5 km, sem uporabila način izračuna z »iono-free« linearno kombinacijo opazovanj. Ocena popravkov zenitne troposferske refrakcije je obravnavana na obeh točkah baznega vektorja. Optimalen model troposfere je Saastamoinenov model z Niellovo projekcijsko komponento. Za obdelavo GPS pravih opazovanj je privzet model ionosfere Klobučarjev model s parametri centra CODE, za obdelavo GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj je privzet model ionosfere Euler-Goadov model.

Z obdelavo podatkov opazovanj pridobimo več izhodnih datotek. Podatki o posamezni točki so shranjeni v datoteki z imenom *TOCKA*, ki vsebuje za vsako serijo opazovanj naslednje podatke:

- apriori koordinate točke,
- izračunane koordinate točke,
- variančno-kovariančno matriko položaja točke (Σ_{xyz}),
- standardne deviacije položaja točke ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$).

Podatki o baznem vektorju se nahajajo v datoteki z imenom *TOCKA1_TOCKA2*, ki vsebuje za vsako serijo opazovanj naslednje podatke:

- apriori koordinate obeh točk baznega vektorja,
- izračunane komponente vektorja (ΔX , ΔY , ΔZ) in pripadajoče standardne deviacije ($\sigma_{\Delta x}$, $\sigma_{\Delta y}$, $\sigma_{\Delta z}$),
- dolžino vektorja,
- pogrešek dolžine vektorja,
- vrednosti odstopanj izračunanih komponent vektorja od »točnih« ($d_{\Delta X}$, $d_{\Delta Y}$, $d_{\Delta Z}$),
- izračunane komponente vektorja ($\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh) in pripadajoče standardne deviacije ($\sigma_{\Delta\phi}$, $\sigma_{\Delta\lambda}$, $\sigma_{\Delta h}$),
- izračunane komponente vektorja (ΔU , ΔE , ΔN) in pripadajoče standardne deviacije ($\sigma_{\Delta U}$, $\sigma_{\Delta E}$, $\sigma_{\Delta N}$),
- variančno-kovariančno matriko komponent vektorja ($\Sigma_{\Delta x \Delta y \Delta z}$).

5.4 Izravnava baznih vektorjev

Z obdelavo opazovanj sem za trikotnik CELJ-TREB-PPNM pridobila podatke vseh treh baznih vektorjev. Ker za enolično določitev trikotnika potrebujemo le dva bazna vektorja, je po obdelavi sledila še pogojna izravnava baznih vektorjev za vsako serijo in tip opazovanj. Neznanke v trikotniku predstavljajo komponente treh baznih vektorjev, kar pomeni da jih je 9. Minimalno število neznank izravnave je enako 6 in število nadštevilnih opazovanj je enako 3.

Pogoj je, da mora biti v trikotniku vsota vektorjev enaka 0. Za vsako komponento baznega vektorja sem sestavila tri pogojne enačbe, ki so dane z izrazi:

$$F_1 \equiv -\Delta\hat{X}_{PPNM-TREB} + \Delta\hat{X}_{PPNM-CELJ} + \Delta\hat{X}_{CELJ-TREB} = 0 \quad (5.1)$$

$$F_2 \equiv -\Delta\hat{Y}_{PPNM-TREB} + \Delta\hat{Y}_{PPNM-CELJ} + \Delta\hat{Y}_{CELJ-TREB} = 0 \quad (5.2)$$

$$F_3 \equiv -\Delta\hat{Z}_{PPNM-TREB} + \Delta\hat{Z}_{PPNM-CELJ} + \Delta\hat{Z}_{CELJ-TREB} = 0 \quad (5.3)$$

Enačba pogojne izravnave je dana z izrazom:

$$A \cdot v = f \quad (5.4)$$

kjer je A matrika koeficientov odvodov pogojnih enačb po komponentah, v je vektor popravkov komponent in f je vektor odstopanj pogojnih enačb.

Za trikotnik CELJ-TREB-PPNM je enačba pogojne izravnave dana z izrazom:

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{\Delta X_{PPNM-TREB}} \\ v_{\Delta Y_{PPNM-TREB}} \\ v_{\Delta Z_{PPNM-TREB}} \\ v_{\Delta X_{PPNM-CELJ}} \\ v_{\Delta Y_{PPNM-CELJ}} \\ v_{\Delta Z_{PPNM-CELJ}} \\ v_{\Delta X_{CELJ-TREB}} \\ v_{\Delta Y_{CELJ-TREB}} \\ v_{\Delta Z_{CELJ-TREB}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{PPNM-TREB} - \Delta X_{PPNM-CELJ} - \Delta X_{CELJ-TREB} \\ \Delta Y_{PPNM-TREB} - \Delta Y_{PPNM-CELJ} - \Delta Y_{CELJ-TREB} \\ \Delta Z_{PPNM-TREB} - \Delta Z_{PPNM-CELJ} - \Delta Z_{CELJ-TREB} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Poleg komponent baznih vektorjev je vhodni podatek za izravnavo variančno-kovariančna matrika komponent vektorjev $\Sigma_{\Delta x \Delta y \Delta z}$. Ker sem za vrednost referenčne variance apriori izbrala vrednost 1, je matrika kofaktorjev komponent baznih vektorjev Q enaka matriki $\Sigma_{\Delta x \Delta y \Delta z}$.

Enačbe pogojne izravnave so dane z izrazi:

$$Q_e = A \cdot Q \cdot A^T \quad (5.6)$$

$$P_e = Q_e^{-1} \quad (5.7)$$

$$k = P_e \cdot f \quad (5.8)$$

$$v = Q \cdot A^T \cdot k \quad (5.9)$$

Rezultat izravnave so izravnane vrednosti komponent baznih vektorjev, ki ustrezajo pogoju za vsoto baznih vektorjev v trikotniku.

5.5 Rezultati obdelave opazovanj

Pri obravnavanju rezultatov obdelave opazovanj osredotočila predvsem na točnost pridobljenih komponent baznih vektorjev ter kakovost zapiranja trikotnika CELJ-TREB-PPNM za vse tri tipe opazovanj in vse dolžine serij opazovanj. Točnost pridobljenih komponent baznih vektorjev je predstavljena z odstopanji od »točnih« komponent baznih vektorjev. Kakovost zapiranja trikotnika je predstavljena z odstopanji pri zapiranju trikotnika.

5.5.1 Odstopanja pridobljenih komponent baznih vektorjev

V preglednicah 5.3-5.11 so prikazana odstopanja komponent baznih vektorjev za vse tri tipe in dolžine serij opazovanj. Za posamezen vektor so v stolpcu podana odstopanja po X, Y in Z komponenti. V stranskih stolpcih preglednic 5.3, 5.5., 5.7, 5.9 in 5.11 so podana tudi odstopanja X, Y in Z komponente pri zapiranju trikotnika, ki so posebej obravnavana v poglavju 5.5.2. Vrstni red podajanja je sledeč: GPS prava opazovanja, GPS simulirana opazovanja in GALILEO simulirana opazovanja.

Preglednica 5.3 Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 1-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja	
1	CELJ-TREB			
	-421.3258 mm	--	-0.1431 mm	<i>225.4800 mm</i>
	-133.9064 mm	--	0.0802 mm	<i>63.7806 mm</i>
	-255.1124 mm	--	0.0432 mm	<i>151.5477 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	311.0520 mm	--	0.1047 mm	--
	-34.0472 mm	--	0.0822 mm	--
	127.1482 mm	--	1.0034 mm	--
	PPNM-TREB			
	115.2062 mm	--	0.0823 mm	<i>0.1208 mm</i>
	-104.1731 mm	--	0.1107 mm	<i>-0.0517 mm</i>
	23.5835 mm	--	0.8904 mm	<i>-0.1562 mm</i>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

2	CELJ-TREB			
	20.8421 mm	-0.5667 mm	0.4342 mm	-4.7438 mm
	-30.7267 mm	-0.4850 mm	0.0739 mm	-30.8442 mm
	33.6472 mm	-1.6646 mm	0.2499 mm	-20.4722 mm
	PPNM-CELJ			
	8.4512 mm	0.0162 mm	0.0297 mm	0.6250 mm
	85.5217 mm	0.0316 mm	-0.0674 mm	0.1071 mm
	-7.8403 mm	2.1574 mm	1.0289 mm	0.5747 mm
	PPNM-TREB			
	24.5498 mm	0.0745 mm	0.3328 mm	-0.1311 mm
	23.9508 mm	-0.3464 mm	0.0454 mm	0.0388 mm
	5.3347 mm	1.0675 mm	1.0763 mm	-0.2025 mm
3	CELJ-TREB			
	18.4276 mm	-1.2274 mm	0.4257 mm	-45.2211 mm
	-0.3722 mm	-0.6436 mm	-0.1596 mm	-41.4721 mm
	5.5918 mm	-2.8048 mm	-1.1099 mm	-33.9185 mm
	PPNM-CELJ			
	30.7589 mm	0.6257 mm	-1.3753 mm	0.4402 mm
	55.8246 mm	0.2055 mm	-0.5212 mm	-0.0008 mm
	20.1416 mm	2.9061 mm	1.1283 mm	0.8601 mm
	PPNM-TREB			
	3.9654 mm	-0.1615 mm	-0.2401 mm	0.7095 mm
	13.9803 mm	-0.4389 mm	-0.3367 mm	0.3441 mm
	-8.1851 mm	0.9614 mm	0.7901 mm	0.7717 mm
4	CELJ-TREB			
	2.1762 mm	-0.3834 mm	0.7650 mm	22.7824 mm
	3.3244 mm	-0.3011 mm	0.0805 mm	5.7642 mm
	12.4163 mm	-1.2719 mm	0.2744 mm	14.3225 mm
	PPNM-CELJ			
	-56.2867 mm	0.4302 mm	-0.9856 mm	-0.2317 mm
	-5.4618 mm	0.0157 mm	-0.3148 mm	-0.0185 mm
	-64.2425 mm	2.4857 mm	0.4902 mm	-0.2820 mm
	PPNM-TREB			
	-31.3281 mm	-0.1849 mm	-0.2528 mm	-0.0323 mm
	3.6268 mm	-0.3040 mm	-0.2742 mm	-0.0398 mm
	-37.5037 mm	0.9317 mm	0.7399 mm	-0.0247 mm
5	CELJ-TREB			
	6.8726 mm	-0.2951 mm	1.4517 mm	-26.1017 mm
	7.4832 mm	-0.1121 mm	0.1155 mm	-2.0273 mm
	14.0784 mm	-0.5441 mm	-0.0075 mm	-21.2083 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

PPNM-CELJ			
3.2106 mm	-0.1408 mm	-1.4185 mm	<i>0.4413 mm</i>
12.5529 mm	-0.1166 mm	-0.5163 mm	<i>-0.1260 mm</i>
-8.6671 mm	1.9594 mm	3.1645 mm	<i>-0.3231 mm</i>
PPNM-TREB			
-16.0185 mm	0.0053 mm	-0.3188 mm	<i>-0.3519 mm</i>
18.0087 mm	-0.3547 mm	-0.4151 mm	<i>-0.0142 mm</i>
-15.7970 mm	1.0922 mm	0.7487 mm	<i>-2.4083 mm</i>
CELJ-TREB			
-14.5641 mm	-0.6447 mm	1.3372 mm	<i>-1.9501 mm</i>
-2.6418 mm	-0.6080 mm	-0.1227 mm	<i>0.3780 mm</i>
-15.4660 mm	-2.2568 mm	-0.8206 mm	<i>2.2885 mm</i>
PPNM-CELJ			
1.0568 mm	0.4239 mm	-0.6995 mm	<i>-0.3813 mm</i>
13.4007 mm	0.2810 mm	-0.1277 mm	<i>-0.2749 mm</i>
-12.7607 mm	3.1726 mm	2.0683 mm	<i>-0.3636 mm</i>
PPNM-TREB			
-15.4575 mm	-0.6021 mm	-0.0107 mm	<i>-0.6484 mm</i>
11.1369 mm	-0.6019 mm	-0.1325 mm	<i>0.1179 mm</i>
-25.9382 mm	0.5522 mm	0.8826 mm	<i>-0.3651 mm</i>
CELJ-TREB			
-18.7830 mm	-0.7480 mm	-0.1749 mm	<i>15.0151 mm</i>
-4.4815 mm	-0.9197 mm	-0.4073 mm	<i>6.7370 mm</i>
-16.0841 mm	-2.6079 mm	-1.3875 mm	<i>9.5592 mm</i>
PPNM-CELJ			
5.3738 mm	0.2283 mm	-2.1804 mm	<i>0.7947 mm</i>
16.8175 mm	0.1852 mm	-0.2883 mm	<i>0.4350 mm</i>
-5.2791 mm	3.3774 mm	1.5789 mm	<i>0.5439 mm</i>
PPNM-TREB			
1.6058 mm	0.2750 mm	-0.7158 mm	<i>1.6395 mm</i>
19.0730 mm	-0.2995 mm	-0.1936 mm	<i>0.5020 mm</i>
-11.8040 mm	1.3134 mm	0.3102 mm	<i>0.1188 mm</i>
CELJ-TREB			
7.5734 mm	-0.5912 mm	-1.0042 mm	<i>-37.1450 mm</i>
4.4012 mm	-0.2965 mm	-0.5264 mm	<i>37.2637 mm</i>
8.8852 mm	-1.7303 mm	-1.7230 mm	<i>-0.6935 mm</i>
PPNM-CELJ			
35.0715 mm	0.9387 mm	1.6462 mm	<i>-0.3320 mm</i>
-24.9426 mm	0.1811 mm	0.9074 mm	<i>-0.4013 mm</i>
-15.2679 mm	3.0994 mm	3.5980 mm	<i>-0.0460 mm</i>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

PPNM-TREB			
5.5000 mm	0.0155 mm	0.6191 mm	-0.0229 mm
16.7223 mm	-0.5167 mm	0.1858 mm	-0.1952 mm
-7.0762 mm	1.3232 mm	1.7196 mm	-0.1554 mm
CELJ-TREB			
-57.9594 mm	-0.6353 mm	-0.8744 mm	50.8970 mm
37.5874 mm	-0.7745 mm	-0.1205 mm	-36.4034 mm
2.9743 mm	-2.7897 mm	-1.0103 mm	-2.2642 mm
PPNM-CELJ			
12.2338 mm	0.6194 mm	-0.0141 mm	-0.1361 mm
16.4358 mm	0.1413 mm	-0.0952 mm	0.0695 mm
-7.4453 mm	3.8272 mm	1.0646 mm	0.0594 mm
PPNM-TREB			
5.1714 mm	-0.1521 mm	-0.5981 mm	0.2905 mm
17.6298 mm	-0.5637 mm	-0.0782 mm	0.1375 mm
-6.7352 mm	1.0969 mm	0.2811 mm	0.2268 mm
CELJ-TREB			
6.5644 mm	-1.5728 mm	-0.7671 mm	-2.6388 mm
3.6052 mm	-0.7926 mm	-0.5915 mm	-3.1433 mm
9.7766 mm	-3.4165 mm	-2.5220 mm	-12.4328 mm
PPNM-CELJ			
-8.7909 mm	1.7924 mm	2.1289 mm	0.1471 mm
13.9073 mm	0.3127 mm	0.8624 mm	0.2288 mm
-14.8685 mm	4.6975 mm	3.7020 mm	0.0590 mm
PPNM-TREB			
-4.8652 mm	0.3667 mm	-0.2539 mm	-1.6157 mm
14.3692 mm	-0.2511 mm	-0.2292 mm	-0.5001 mm
-17.5247 mm	1.3399 mm	0.8367 mm	-0.3432 mm
CELJ-TREB			
4.5333 mm	0.6269 mm	0.3843 mm	-4.1241 mm
-1.3516 mm	-0.1181 mm	0.0110 mm	1.5308 mm
8.3788 mm	-0.4765 mm	-0.8273 mm	-2.7157 mm
PPNM-CELJ			
0.0733 mm	-0.8976 mm	-1.2478 mm	0.1167 mm
13.5651 mm	-0.3466 mm	-0.5721 mm	-0.0189 mm
-17.8581 mm	1.3975 mm	1.5185 mm	0.0960 mm
PPNM-TREB			
0.4825 mm	-0.1540 mm	-0.6703 mm	0.1932 mm
13.7443 mm	-0.4836 mm	-0.4320 mm	0.1291 mm
-12.1950 mm	1.0170 mm	0.6125 mm	-0.0788 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

12	CELJ-TREB			
	-4.9214 mm	1.9123 mm	1.8702 mm	24.1750 mm
	0.2239 mm	0.3039 mm	-0.3313 mm	34.2335 mm
	-1.9371 mm	-0.0312 mm	-0.4469 mm	37.8536 mm
	PPNM-CELJ			
	-21.8949 mm	-2.9192 mm	-3.9196 mm	0.5389 mm
	11.3269 mm	-0.9907 mm	-1.2004 mm	0.2978 mm
	-37.2746 mm	0.9706 mm	0.3976 mm	-0.2414 mm
	PPNM-TREB			
	-2.6413 mm	-0.4680 mm	-1.2217 mm	0.8277 mm
	45.7843 mm	-0.3890 mm	-0.9917 mm	0.5400 mm
	-1.3581 mm	0.6980 mm	0.2558 mm	0.3051 mm
13	CELJ-TREB			
	-0.9832 mm	2.4111 mm	0.6404 mm	-0.5767 mm
	0.0721 mm	0.8952 mm	0.0589 mm	-4.2619 mm
	3.8244 mm	1.5000 mm	-0.7781 mm	-0.3414 mm
	PPNM-CELJ			
	-4.7977 mm	-3.1869 mm	-1.1775 mm	-0.1759 mm
	18.1797 mm	-1.4776 mm	-0.5856 mm	-0.0198 mm
	-20.5311 mm	-1.3261 mm	0.7275 mm	0.1195 mm
	PPNM-TREB			
	-6.3576 mm	-0.9517 mm	-0.6516 mm	-0.1144 mm
	13.9899 mm	-0.6022 mm	-0.4017 mm	0.1249 mm
	-17.0482 mm	0.2933 mm	0.3096 mm	0.3601 mm
14	CELJ-TREB			
	5.9691 mm	2.0374 mm	0.6346 mm	3.1580 mm
	-3.6380 mm	0.6460 mm	-0.1874 mm	-1.2866 mm
	4.5290 mm	0.6883 mm	-1.2262 mm	0.5246 mm
	PPNM-CELJ			
	-6.4410 mm	-3.2742 mm	-1.4456 mm	0.5327 mm
	22.8575 mm	-1.3543 mm	-0.4947 mm	-0.0570 mm
	-16.6961 mm	-0.0895 mm	1.6642 mm	0.0790 mm
	PPNM-TREB			
	2.6861 mm	-0.7041 mm	-0.4751 mm	0.3359 mm
	17.9329 mm	-0.7653 mm	-0.6955 mm	-0.0135 mm
	-11.6425 mm	0.6778 mm	0.5757 mm	0.1378 mm
15	CELJ-TREB			
	18.5558 mm	3.2537 mm	-2.3382 mm	-13.3601 mm
	-7.2385 mm	0.2989 mm	-1.5322 mm	38.8813 mm
	17.3526 mm	1.2619 mm	-4.3903 mm	5.4373 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

PPNM-CELJ			
67.8812 mm	-4.1621 mm	2.0914 mm	-0.2850 mm
22.5156 mm	-1.0806 mm	0.7595 mm	-0.0769 mm
8.3458 mm	0.1612 mm	4.7187 mm	-1.0838 mm
PPNM-TREB			
73.0769 mm	-1.1934 mm	-0.0578 mm	0.1890 mm
54.1583 mm	-0.8586 mm	-0.6879 mm	0.0848 mm
31.1357 mm	0.3393 mm	1.3580 mm	1.0296 mm
CELJ-TREB			
-3.0280 mm	2.9610 mm	-7.5962 mm	-1.6614 mm
-3.8450 mm	0.5582 mm	-2.3089 mm	83.8689 mm
-5.0751 mm	0.0798 mm	-11.1256 mm	34.2735 mm
PPNM-CELJ			
-26.1693 mm	-4.8542 mm	9.5605 mm	0.7726 mm
-79.3389 mm	-1.9493 mm	1.6765 mm	0.3802 mm
-74.8561 mm	0.0330 mm	14.6598 mm	0.4498 mm
PPNM-TREB			
-30.8587 mm	-1.1207 mm	1.5089 mm	-0.4554 mm
0.6850 mm	-1.0109 mm	-0.6319 mm	0.0006 mm
-45.6577 mm	0.5626 mm	3.0074 mm	-0.5267 mm
CELJ-TREB			
16.3480 mm	-0.5406 mm	1.3603 mm	31.2379 mm
8.2087 mm	2.4131 mm	0.0881 mm	58.3258 mm
30.1120 mm	4.7396 mm	-2.6259 mm	-1.8363 mm
PPNM-CELJ			
-36.0375 mm	-2.5512 mm	-2.2879 mm	2.7975 mm
-0.7004 mm	-2.1308 mm	-1.2718 mm	-1.0525 mm
-14.4918 mm	0.4983 mm	1.9774 mm	-4.1706 mm
PPNM-TREB			
11.5484 mm	-0.2943 mm	-0.7000 mm	0.2276 mm
65.8341 mm	-0.7701 mm	-0.7607 mm	0.4230 mm
13.7839 mm	1.0673 mm	0.7562 mm	1.4047 mm
CELJ-TREB			
20.8259 mm	1.1957 mm	2.6244 mm	3.8898 mm
-0.8285 mm	1.0947 mm	-1.1842 mm	-17.7660 mm
13.0255 mm	0.5339 mm	4.0027 mm	-18.5421 mm
PPNM-CELJ			
-18.1981 mm	-2.9995 mm	15.8635 mm	0.4133 mm
29.9634 mm	-2.0588 mm	0.8466 mm	-0.3152 mm
9.8010 mm	0.1523 mm	15.2563 mm	-0.4724 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

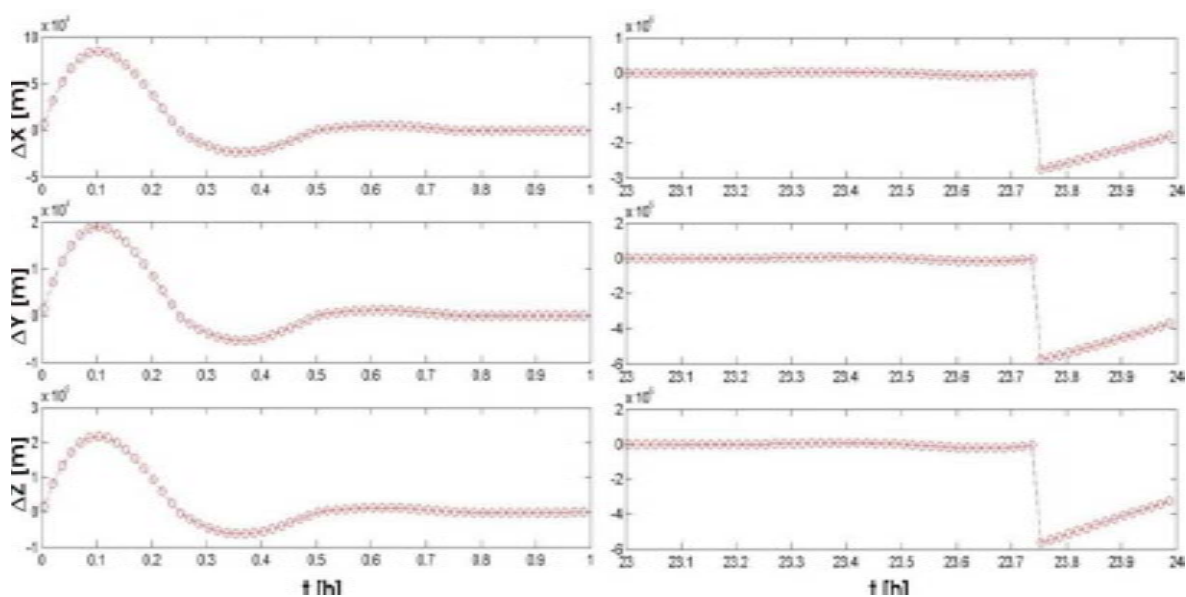
PPNM-TREB			
6.5177 mm	-1.3905 mm	1.1711 mm	<i>-17.3168 mm</i>
11.3689 mm	-1.2793 mm	-1.0985 mm	<i>-0.7608 mm</i>
4.2844 mm	0.2137 mm	2.7110 mm	<i>-16.5480 mm</i>
CELJ-TREB			
12.9341 mm	-5.4240 mm	4.9731 mm	<i>0.5678 mm</i>
1.6326 mm	-1.0348 mm	1.4547 mm	<i>3.2060 mm</i>
13.7048 mm	-5.5708 mm	4.9295 mm	<i>-4.0200 mm</i>
PPNM-CELJ			
-33.8251 mm	6.9700 mm	-7.0600 mm	<i>-0.4340 mm</i>
5.7785 mm	1.3232 mm	-2.5901 mm	<i>-0.5320 mm</i>
-42.7416 mm	7.7700 mm	-5.8465 mm	<i>0.0922 mm</i>
PPNM-TREB			
-20.3232 mm	1.1119 mm	-0.8162 mm	<i>1.2706 mm</i>
10.6171 mm	-0.2436 mm	-0.7132 mm	<i>0.4222 mm</i>
-33.0568 mm	2.2914 mm	0.5993 mm	<i>1.5163 mm</i>
CELJ-TREB			
8.9560 mm	-3.3675 mm	4.6376 mm	<i>6.7244 mm</i>
-1.3880 mm	-0.5030 mm	2.0039 mm	<i>8.8550 mm</i>
1.4707 mm	-1.7653 mm	6.3938 mm	<i>25.9642 mm</i>
PPNM-CELJ			
-19.3026 mm	3.9970 mm	-4.7853 mm	<i>-0.1275 mm</i>
11.1153 mm	0.4622 mm	-1.6006 mm	<i>-0.7203 mm</i>
-36.8788 mm	3.6018 mm	-7.3657 mm	<i>-0.3495 mm</i>
PPNM-TREB			
-3.6222 mm	0.5020 mm	-0.8307 mm	<i>-0.6830 mm</i>
18.5823 mm	-0.7612 mm	-0.4327 mm	<i>-0.8359 mm</i>
-9.4439 mm	1.4870 mm	0.1551 mm	<i>1.1270 mm</i>
CELJ-TREB			
1.8313 mm	-2.6459 mm	9.3455 mm	<i>17.0232 mm</i>
-1.2079 mm	-1.3133 mm	3.1858 mm	<i>-3.0114 mm</i>
-16.4635 mm	-4.6360 mm	8.4955 mm	<i>9.8630 mm</i>
PPNM-CELJ			
-23.8212 mm	5.1148 mm	-4.8054 mm	<i>-0.9677 mm</i>
41.8708 mm	0.9617 mm	-1.9483 mm	<i>0.1536 mm</i>
35.7482 mm	6.5315 mm	-1.1425 mm	<i>0.6402 mm</i>
PPNM-TREB			
-4.9666 mm	1.5012 mm	1.2645 mm	<i>-3.2757 mm</i>
37.6515 mm	-0.1981 mm	-0.0198 mm	<i>-1.2573 mm</i>
29.1478 mm	2.5358 mm	2.0553 mm	<i>-5.2977 mm</i>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

22	CELJ-TREB			
	17.3648 mm	1.9364 mm	1.0540 mm	5.2750 mm
	3.6646 mm	-1.7158 mm	0.0412 mm	-2.1271 mm
	9.6369 mm	-2.1700 mm	-2.1034 mm	4.8347 mm
	PPNM-CELJ			
	-11.4932 mm	-3.5089 mm	3.3680 mm	3.4217 mm
	12.2942 mm	-2.0108 mm	0.8018 mm	4.0890 mm
	-14.4433 mm	5.6441 mm	6.2881 mm	-1.2901 mm
	PPNM-TREB			
	11.1466 mm	1.8492 mm	1.4422 mm	-2.9798 mm
	13.8316 mm	0.3624 mm	-0.0707 mm	-0.9137 mm
	0.0283 mm	2.1839 mm	2.0126 mm	-2.1722 mm
23	CELJ-TREB			
	12.3490 mm	2.6399 mm	-7.7608 mm	-50.2916 mm
	-2.9927 mm	0.9865 mm	-1.8938 mm	-16.8047 mm
	1.9753 mm	2.4268 mm	-8.3868 mm	-7.3521 mm
	PPNM-CELJ			
	-16.4811 mm	-1.0404 mm	8.4142 mm	-0.0808 mm
	12.8156 mm	-1.2104 mm	1.7904 mm	0.0660 mm
	-25.8577 mm	-1.7311 mm	-11.4449 mm	1.5204 mm
	PPNM-TREB			
	-54.4238 mm	1.5187 mm	2.4878 mm	1.8344 mm
	-6.9818 mm	-0.1579 mm	-0.3635 mm	-0.2601 mm
	-31.2346 mm	2.2161 mm	4.3061 mm	1.2479 mm
24	CELJ-TREB			
	-23.8065 mm	--	-5.4585 mm	17.2540 mm
	-7.9640 mm	--	-2.4004 mm	12.4639 mm
	-35.0444 mm	--	-10.0921 mm	19.7259 mm
	PPNM-CELJ			
	8.8046 mm	--	5.6778 mm	--
	19.1783 mm	--	1.2032 mm	--
	4.9336 mm	--	12.7737 mm	--
	PPNM-TREB			
	2.2521 mm	--	1.2441 mm	1.0248 mm
	23.6782 mm	--	-0.8320 mm	0.3652 mm
	-10.3849 mm	--	3.2666 mm	0.5851 mm

Pri obdelavi 1-urnih GPS simuliranih opazovanj sta prva in zadnja ura opazovanj izpuščeni zaradi napačne interpretacije simuliranih tirnic satelitov. Funkcija spreminjanja položaja satelita namreč ni konstantna v času, kar je razvidno iz slike 5.7.



Slika 5.7. Prikaz funkcije spreminjanja simulirane tirnice satelita v prvi in zadnji uri [Chersich, 2007].

V nadaljnji obravnavi odstopanj komponent baznih vektorjev, ki so pridobljeni z GPS pravimi opazovanji, prva ura opazovanj ni upoštevana, saj v tem primeru zavzamejo vrednosti odstopanj komponent tudi do nekaj dm.

Preglednica 5.4. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 1-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
CELJ-TREB		
12.8347 mm	1.7099 mm	2.4190 mm
5.9507 mm	0.7643 mm	0.7900 mm
11.2002 mm	2.0439 mm	3.1238 mm
PPNM-CELJ		
20.3477 mm	2.3042 mm	3.4286 mm
23.9630 mm	0.8558 mm	0.8802 mm
23.2744 mm	2.6177 mm	4.3587 mm
PPNM-TREB		
14.7550 mm	0.6635 mm	0.7486 mm
20.5795 mm	0.5254 mm	0.4222 mm
16.7957 mm	1.1483 mm	1.2607 mm

Pri 1-urnih opazovanjih, zavzamejo odstopanja komponent, ki so pridobljena z GPS simuliranimi opazovanji, manjše vrednosti kot odstopanja komponent, ki so pridobljena z GALILEO simuliranimi opazovanji. Razlike so bolj očitne pri daljših vektorjih CELJ-TREB in PPNM-CELJ, predvsem pri X in Z komponenti. Pri krajšem vektorju PPNM-TREB so vrednosti odstopanj komponent primerljive, v povprečju zavzamejo vrednosti približno 1 mm ali manj.

Preglednica 5.5. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 3-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja	
1	CELJ-TREB			
	17.7991 mm	-1.1815 mm	0.1220 mm	-7.6848 mm
	4.1178 mm	-0.5464 mm	-0.0087 mm	-26.6250 mm
	12.3357 mm	-2.3080 mm	-0.1926 mm	-7.2946 mm
	PPNM-CELJ			
	3.1284 mm	0.4996 mm	-0.2381 mm	0.5307 mm
	42.6643 mm	0.1417 mm	-0.0725 mm	0.0158 mm
	-5.5926 mm	2.5507 mm	0.9726 mm	0.7160 mm
	PPNM-TREB			
	13.2426 mm	-0.1511 mm	-0.0407 mm	0.0754 mm
	20.1571 mm	-0.3889 mm	-0.1231 mm	-0.0419 mm
	-0.5516 mm	0.9587 mm	0.8722 mm	0.0922 mm
	2	CELJ-TREB		
-4.8849 mm		-0.4064 mm	0.6335 mm	3.4494 mm
1.6486 mm		-0.3660 mm	-0.0050 mm	2.6816 mm
0.3833 mm		-1.4084 mm	-0.3331 mm	2.0320 mm
PPNM-CELJ				
-13.6330 mm		0.2378 mm	-0.7637 mm	-0.1257 mm
7.3503 mm		0.0213 mm	-0.2731 mm	-0.0447 mm
-31.2784 mm		2.5284 mm	1.1109 mm	-0.3256 mm
PPNM-TREB				
-15.0685 mm		-0.2942 mm	-0.2323 mm	-0.1022 mm
11.6805 mm		-0.3895 mm	-0.3123 mm	-0.0341 mm
-28.8631 mm		0.7944 mm	0.7337 mm	-0.0441 mm
3		CELJ-TREB		
	-4.6735 mm	-0.9005 mm	-0.0988 mm	0.5512 mm
	1.1982 mm	-0.7631 mm	-0.3169 mm	0.5935 mm
	-1.7271 mm	-2.7446 mm	-1.0803 mm	2.9724 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

PPNM-CELJ			
2.5238 mm	0.8664 mm	-0.4676 mm	-0.0762 mm
14.7619 mm	0.2284 mm	-0.0603 mm	-0.0155 mm
-12.2255 mm	3.5108 mm	2.0720 mm	0.3118 mm
PPNM-TREB			
-1.5985 mm	-0.1103 mm	-0.6500 mm	-0.0836 mm
16.5536 mm	-0.5502 mm	-0.2537 mm	0.1235 mm
-10.9802 mm	1.0780 mm	0.3339 mm	-0.6578 mm
CELJ-TREB			
2.4396 mm	0.5803 mm	1.3421 mm	-0.4403 mm
1.0962 mm	-0.1153 mm	-0.0903 mm	-1.6878 mm
6.1074 mm	-0.9322 mm	-0.3285 mm	-1.2296 mm
PPNM-CELJ			
-11.1989 mm	-0.8168 mm	-2.7308 mm	0.2526 mm
11.9729 mm	-0.3926 mm	-0.7798 mm	0.1921 mm
-25.3790 mm	2.0355 mm	0.5102 mm	0.0004 mm
PPNM-TREB			
-9.2095 mm	0.0160 mm	-0.6821 mm	0.7066 mm
11.3813 mm	-0.3158 mm	-0.4711 mm	0.3990 mm
-20.5011 mm	1.1037 mm	0.5498 mm	0.3681 mm
CELJ-TREB			
0.8959 mm	2.1968 mm	0.0750 mm	-13.6770 mm
-1.4847 mm	0.6017 mm	-0.2747 mm	-23.6886 mm
2.1853 mm	0.8571 mm	-1.7005 mm	-7.5640 mm
PPNM-CELJ			
4.2019 mm	-3.0800 mm	0.2313 mm	-0.1637 mm
36.6527 mm	-1.1888 mm	-0.1218 mm	-0.1107 mm
-12.6901 mm	-0.1696 mm	2.6180 mm	-0.3842 mm
PPNM-TREB			
-8.5792 mm	-1.0468 mm	-0.4842 mm	-0.7906 mm
11.4794 mm	-0.6978 mm	-0.7144 mm	-0.3179 mm
-18.0688 mm	0.3033 mm	0.6993 mm	-0.2182 mm
CELJ-TREB			
11.9919 mm	0.8763 mm	-2.5633 mm	-7.5096 mm
-0.0254 mm	0.6209 mm	0.1789 mm	0.2901 mm
5.0796 mm	-0.0067 mm	-3.3256 mm	-4.0351 mm
PPNM-CELJ			
-22.9821 mm	-3.9374 mm	3.0073 mm	2.0137 mm
3.0195 mm	-2.1685 mm	-0.2105 mm	0.4864 mm
-28.1077 mm	-0.0275 mm	2.5306 mm	0.5643 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

PPNM-TREB				
-18.4997 mm	-1.0474 mm	0.3036 mm	<i>-0.1405 mm</i>	
3.2842 mm	-1.0612 mm	-0.7109 mm	<i>-0.6793 mm</i>	
-27.0632 mm	0.5301 mm	1.6174 mm	<i>2.4124 mm</i>	
CELJ-TREB				
13.0592 mm	-4.4965 mm	5.7728 mm	<i>-6.6969 mm</i>	
-21.3292 mm	-1.0156 mm	2.1202 mm	<i>24.1952 mm</i>	
-1.7553 mm	-4.7869 mm	6.4472 mm	<i>2.2462 mm</i>	
PPNM-CELJ				
-13.7142 mm	6.0522 mm	-6.0201 mm	<i>-0.4921 mm</i>	
12.2098 mm	1.0524 mm	-2.1647 mm	<i>-0.4853 mm</i>	
-20.7784 mm	6.4312 mm	-6.1874 mm	<i>0.5907 mm</i>	
PPNM-TREB				
-7.3518 mm	1.0637 mm	-0.3430 mm	<i>-0.0956 mm</i>	
15.0758 mm	-0.4485 mm	-0.3717 mm	<i>-0.3272 mm</i>	
-20.2875 mm	2.2350 mm	0.7050 mm	<i>0.4452 mm</i>	
7	CELJ-TREB			
	8.6581 mm	3.5963 mm	-4.7599 mm	<i>-6.0025 mm</i>
	-0.9787 mm	0.8812 mm	-1.5984 mm	<i>-0.6504 mm</i>
	-0.2178 mm	-1.8359 mm	-7.1070 mm	<i>-1.2567 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	-13.1203 mm	-3.3384 mm	5.6478 mm	<i>-28.1074 mm</i>
	13.1034 mm	-1.9892 mm	1.4207 mm	<i>-15.1125 mm</i>
	-18.8081 mm	4.4658 mm	10.2272 mm	<i>-24.7184 mm</i>
	PPNM-TREB			
	-10.4646 mm	-27.8494 mm	1.7991 mm	<i>0.9112 mm</i>
	11.4744 mm	-16.2206 mm	-0.3393 mm	<i>-0.1616 mm</i>
	-20.2826 mm	-22.0885 mm	3.3263 mm	<i>0.2062 mm</i>

V preglednici 5.6 pri izračunu povprečnih odstopanj komponent baznih vektorjev, ki so pridobljeni z GPS simuliranimi opazovanji, zadnja serija opazovanj ni upoštevana, saj v tem primeru zavzamejo vrednosti odstopanj komponent tudi do nekaj cm. V ostalih serijah GPS simuliranih opazovanj zavzamejo vrednosti odstopanj komponent do največ 2 mm.

Preglednica 5.6. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 3-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
CELJ-TREB		
8.0490 mm	1.7793 mm	1.9209 mm
3.9849 mm	0.6138 mm	0.5741 mm
3.7239 mm	1.8600 mm	2.5644 mm
PPNM-CELJ		
10.5628 mm	2.3536 mm	2.3883 mm
17.7168 mm	0.8979 mm	0.6379 mm
19.3575 mm	2.7149 mm	3.2786 mm
PPNM-TREB		
10.5018 mm	0.5328 mm	0.5669 mm
12.6358 mm	0.5503 mm	0.4121 mm
18.3248 mm	1.0004 mm	1.1047 mm

V primeru daljših baznih vektorjev CELJ-TREB in PPNM-CELJ, so pri 3-urnih opazovanjih vrednosti odstopanj komponent, pridobljenih z GPS simuliranimi opazovanji, primerljive vrednostim odstopanj komponent, pridobljenih z GALILEO simuliranimi opazovanji.

Preglednica 5.7. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 6-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja	
1	CELJ-TREB			
	2.2867 mm	-0.6733 mm	0.3428 mm	<i>2.0777 mm</i>
	1.8441 mm	-0.4491 mm	-0.0187 mm	<i>-10.9868 mm</i>
	3.6831 mm	-1.7373 mm	-0.3017 mm	<i>-0.0138 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	-10.8319 mm	0.2622 mm	-0.5694 mm	<i>0.2535 mm</i>
	23.0915 mm	0.0723 mm	-0.2071 mm	<i>0.0310 mm</i>
	-21.9420 mm	2.4433 mm	0.8718 mm	<i>0.1998 mm</i>
	PPNM-TREB			
	-6.4675 mm	-0.1576 mm	-0.1107 mm	<i>0.1159 mm</i>
	13.9488 mm	-0.3457 mm	-0.2652 mm	<i>-0.0393 mm</i>
	-18.2727 mm	0.9058 mm	0.8667 mm	<i>0.2966 mm</i>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

2	CELJ-TREB			
	-2.9009 mm	-0.0643 mm	0.4422 mm	<i>0.4822 mm</i>
	0.7739 mm	-0.3168 mm	-0.2323 mm	<i>-0.5507 mm</i>
	0.5987 mm	-1.5819 mm	-0.6834 mm	<i>1.2176 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	-4.1424 mm	-0.1042 mm	-0.9237 mm	<i>0.1334 mm</i>
	12.9623 mm	-0.1660 mm	-0.2110 mm	<i>0.0534 mm</i>
	-18.7933 mm	2.6067 mm	1.5630 mm	<i>0.0884 mm</i>
	PPNM-TREB			
	-6.5610 mm	-0.0352 mm	-0.7944 mm	<i>-0.3129 mm</i>
	13.1856 mm	-0.4295 mm	-0.5113 mm	<i>-0.0681 mm</i>
	-16.9770 mm	1.1132 mm	0.3711 mm	<i>-0.5085 mm</i>
3	CELJ-TREB			
	4.4518 mm	1.5751 mm	-0.9962 mm	<i>-6.9694 mm</i>
	-1.0093 mm	0.6029 mm	-0.3279 mm	<i>-4.9432 mm</i>
	2.4588 mm	0.3475 mm	-2.5603 mm	<i>-2.2189 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	-14.7014 mm	-3.2419 mm	0.4257 mm	<i>0.6299 mm</i>
	10.6878 mm	-1.6179 mm	-0.2643 mm	<i>0.1002 mm</i>
	-23.4526 mm	0.0558 mm	3.4260 mm	<i>0.0486 mm</i>
	PPNM-TREB			
	-17.2191 mm	-1.0369 mm	-0.2654 mm	<i>0.3051 mm</i>
	4.7353 mm	-0.9148 mm	-0.7012 mm	<i>-0.1091 mm</i>
	-23.2127 mm	0.4520 mm	0.9683 mm	<i>0.1025 mm</i>
4	CELJ-TREB			
	6.7696 mm	-2.9422 mm	1.1345 mm	<i>-0.9001 mm</i>
	-1.6533 mm	-0.8977 mm	0.6436 mm	<i>2.7185 mm</i>
	-3.6039 mm	-3.3491 mm	-0.3108 mm	<i>3.4076 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	-13.9168 mm	4.8147 mm	-0.2116 mm	<i>-1.1643 mm</i>
	12.5476 mm	0.8851 mm	-0.9943 mm	<i>-1.3340 mm</i>
	-19.9858 mm	5.0603 mm	2.4190 mm	<i>0.3272 mm</i>
	PPNM-TREB			
	-8.0473 mm	0.7082 mm	0.9098 mm	<i>-0.0131 mm</i>
	13.6128 mm	-1.3467 mm	-0.4031 mm	<i>-0.0524 mm</i>
	-20.1822 mm	2.0385 mm	2.2089 mm	<i>0.1007 mm</i>

Preglednica 5.8. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 6-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
CELJ-TREB		
4.1022 mm	1.3137 mm	0.7289 mm
1.3202 mm	0.5666 mm	0.3056 mm
2.5861 mm	1.7540 mm	0.9640 mm
PPNM-CELJ		
10.8981 mm	2.1058 mm	0.5326 mm
14.8223 mm	0.6853 mm	0.4192 mm
21.0435 mm	2.5415 mm	2.0700 mm
PPNM-TREB		
9.5737 mm	0.4845 mm	0.5201 mm
11.3706 mm	0.7592 mm	0.4702 mm
19.6612 mm	1.1273 mm	1.1038 mm

Pri 6-urnih GALILEO simuliranih opazovanjih, zavzamejo odstopanja X komponente daljših baznih vektorjev CELJ-TREB in PPNM-TREB vrednosti pod 1 mm. Vrednosti odstopanj X in Z komponente baznih vektorjev, ki pridobljeni z GPS simuliranimi opazovanji, so približno 2 mm.

Preglednica 5.9. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 12-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja	
1	CELJ-TREB			
	-2.7719 mm	-0.3287 mm	0.3899 mm	<i>4.9386 mm</i>
	0.9752 mm	-0.3688 mm	-0.1743 mm	<i>1.5426 mm</i>
	1.3639 mm	-1.5935 mm	-0.6849 mm	<i>5.2897 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	-9.1217 mm	-0.0036 mm	-0.8476 mm	<i>0.2734 mm</i>
	10.6855 mm	-0.0858 mm	-0.2427 mm	<i>0.0828 mm</i>
	-24.0045 mm	2.4231 mm	1.4945 mm	<i>0.2108 mm</i>
	PPNM-TREB			
	-6.9550 mm	-0.0589 mm	-0.3957 mm	<i>0.0620 mm</i>
	13.2033 mm	-0.3718 mm	-0.4553 mm	<i>-0.0382 mm</i>
	-17.3509 mm	1.0404 mm	0.7171 mm	<i>-0.0925 mm</i>

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

CELJ-TREB					
2	5.8711 mm	-0.4233 mm	-0.2734 mm	-2.4738 mm	
	-0.9275 mm	-0.0485 mm	0.2953 mm	-0.4179 mm	
	0.3566 mm	-1.2016 mm	-1.2661 mm	1.7043 mm	
	PPNM-CELJ				
	-14.0574 mm	0.5430 mm	0.3996 mm	-0.3933 mm	
	11.5404 mm	-0.3872 mm	-0.7255 mm	-0.5082 mm	
	-22.3519 mm	2.3454 mm	2.4880 mm	-0.0263 mm	
	PPNM-TREB				
	-10.6600 mm	-0.2737 mm	0.3288 mm	0.2027 mm	
	10.1950 mm	-0.9439 mm	-0.5427 mm	-0.1125 mm	
	-20.2909 mm	1.1175 mm	1.6027 mm	0.3809 mm	

Preglednica 5.10. Povprečne vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 12-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
CELJ-TREB		
4.3215 mm	0.3760 mm	0.3317 mm
0.9514 mm	0.2086 mm	0.2348 mm
0.8603 mm	1.3976 mm	0.9755 mm
PPNM-CELJ		
11.5895 mm	0.2733 mm	0.6236 mm
11.1129 mm	0.2365 mm	0.4841 mm
23.1782 mm	2.3843 mm	1.9912 mm
PPNM-TREB		
8.8075 mm	0.1663 mm	0.3623 mm
11.6991 mm	0.6579 mm	0.4990 mm
18.8209 mm	1.0790 mm	1.1599 mm

Pri 12-urnih GPS simuliranih opazovanjih, zavzamejo odstopanja X in Y komponente baznih vektorjev vrednosti pod 1 mm. Vrednosti odstopanj komponent so pri 12-urnih sicer manjša kot pri 6-urnih GALILEO simuliranih opazovanjih, vendar se bistveno ne spremenijo.

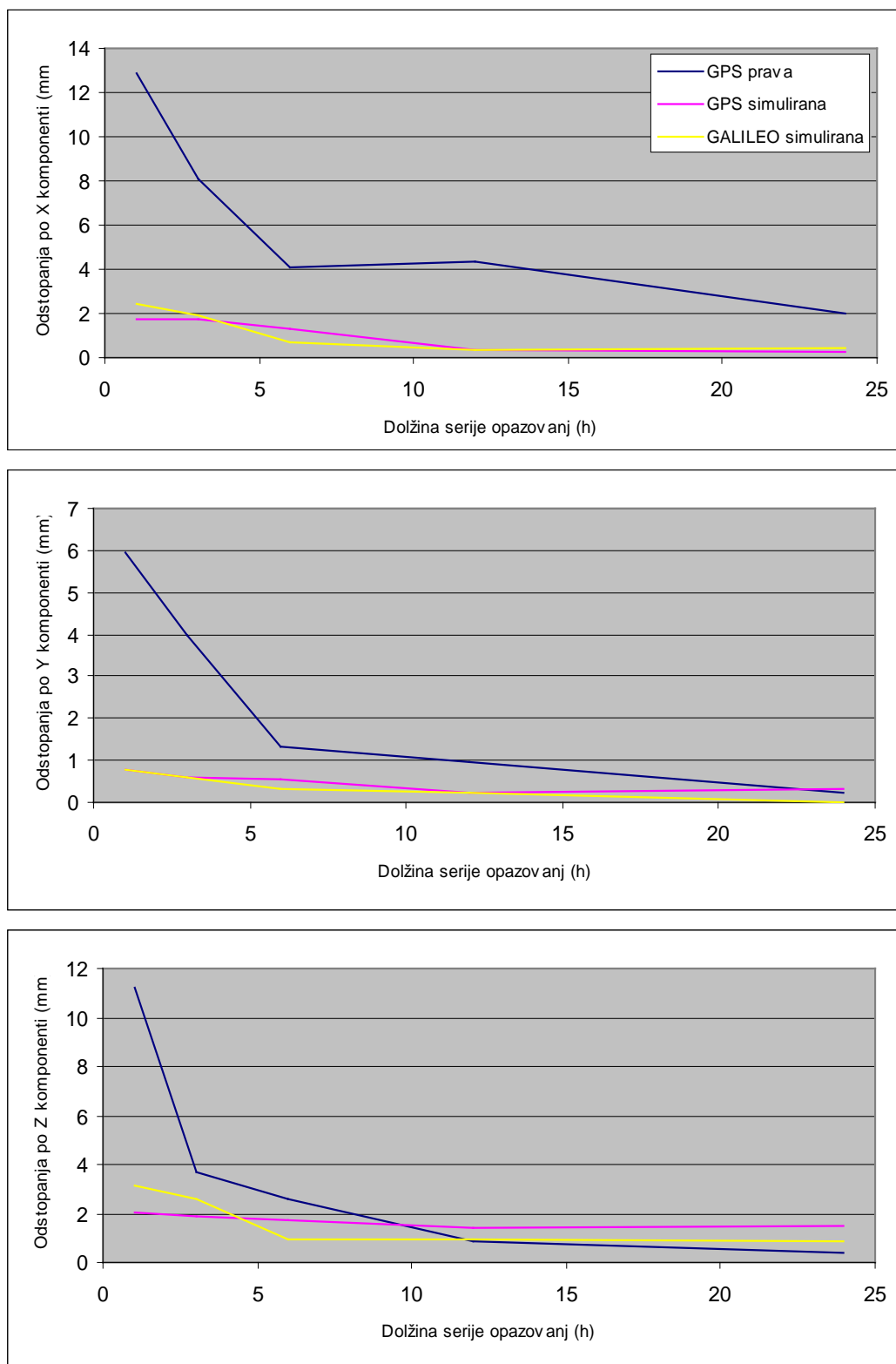
Preglednica 5.11. Vrednosti odstopanj komponent baznih vektorjev, pridobljenih na podlagi 24-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja	
1	CELJ-TREB			
	2.0375 mm	0.2839 mm	0.4210 mm	<i>1.2277 mm</i>
	0.2314 mm	0.3377 mm	0.0008 mm	<i>0.9653 mm</i>
	0.4080 mm	1.4765 mm	0.8614 mm	<i>4.1437 mm</i>
	PPNM-CELJ			
	11.9681 mm	0.0414 mm	0.5180 mm	<i>-0.0877 mm</i>
	11.0848 mm	0.1026 mm	0.3741 mm	<i>-0.3158 mm</i>
	23.3402 mm	2.3130 mm	2.0024 mm	<i>0.2750 mm</i>
	PPNM-TREB			
	8.7029 mm	0.3301 mm	0.2194 mm	<i>-0.1224 mm</i>
	11.8188 mm	0.7561 mm	0.5089 mm	<i>-0.1340 mm</i>
	18.7885 mm	1.1114 mm	0.9634 mm	<i>-0.1776 mm</i>

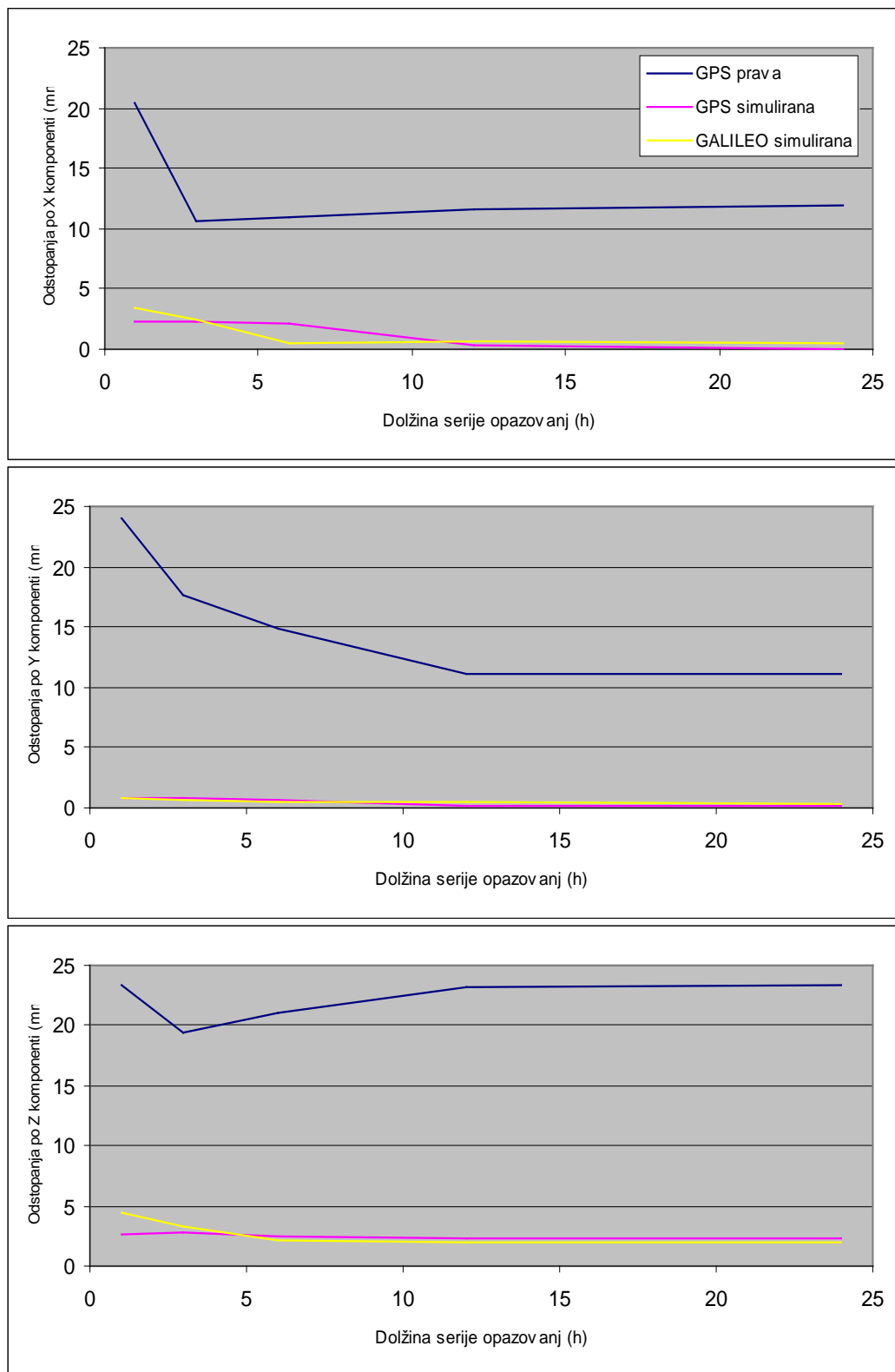
Vrednosti odstopanj komponent so pri 24-urnih manjša kot pri 12-urnih GPS simuliranih opazovanjih, vendar se bistveno ne spremenijo.

Za lažjo ponazoritev odvisnosti natančnosti določitve relativnega položaja od dolžine serije opazovanj so na grafikonih 5.1, 5.2 in 5.3 za vse tri tipe opazovanj prikazana odstopanja posameznih komponent baznih vektorjev. Za 1-, 3-, 6- in 12-urna opazovanja so upoštene povprečne vrednosti odstopanj komponent, ki so podane v preglednicah 5.4, 5.6, 5.8 in 5.10.

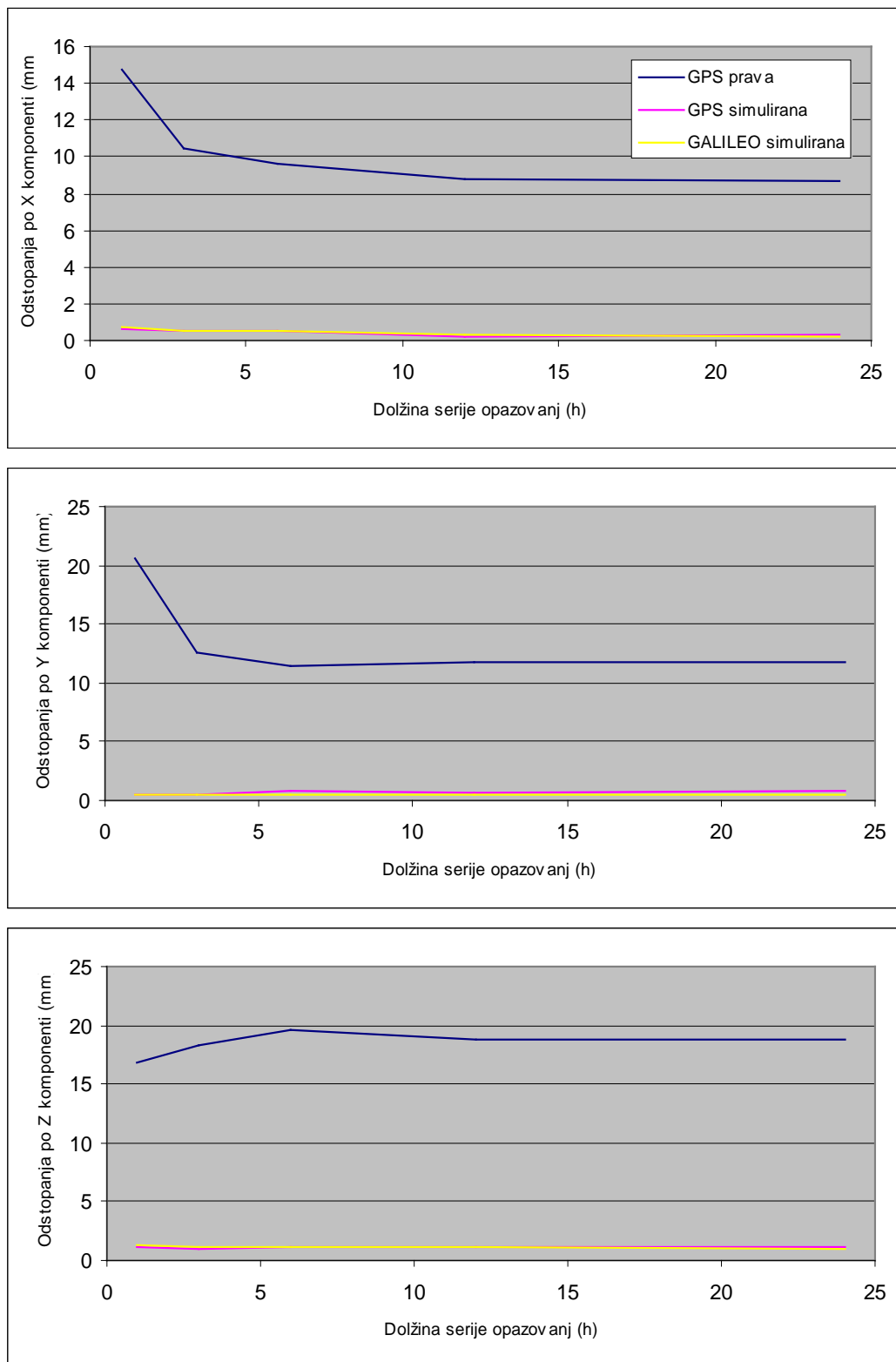
Grafikon 5.1. Odstopanja posamezne komponente baznega vektorja CELJ-TREB v odvisnosti od dolžine serije opazovanj.



Grafikon 5.2. Odstopanja posamezne komponente baznega vektorja PPNM-CELJ v odvisnosti od dolžine serije opazovanj.



Grafikon 5.3. Odstopanja posamezne komponente baznega vektorja PPNM-TREB v odvisnosti od dolžine serije opazovanj.



Iz rezultatov je razvidno, da so največja odstopanja pri komponentah baznih vektorjev, ki so pridobljeni z GPS pravimi opazovanji. Odstopanja komponent baznega vektorja CELJ-TREB, pridobljenih na podlagi GPS pravih opazovanj, so sicer manjša kot odstopanja komponent baznih vektorjev PPNM-CELJ in PPNM-TREB. Rezultati so namreč pokazali, da lahko bazni vektor CELJ-TREB določimo s približno 2 mm natančnostjo na podlagi 12-urnih opazovanj. Z isto dolžino serije opazovanj lahko bazni vektor PPNM-CELJ določimo s 15 mm natančnostjo ter bazni vektor PPNM-TREB s 13 mm natančnostjo. Razlog za višje vrednosti odstopanj je verjetno v tem, da so koordinate točke PPNM slabše določene kot koordinate točk CELJ in TREB.

V primeru GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj je natančnost določitve relativnega položaja dosti višja. Pri 1-urnih GALILEO simuliranih opazovanjih so odstopanja komponent baznih vektorjev večja kot pri 1-urnih GPS simuliranih opazovanjih, vendar pa pri 3-urnih opazovanjih že dosežejo primerljive vrednosti. Bazna vektorja CELJ-TREB in PPNM-CELJ, ki sta daljša od 40 km, lahko določimo z 1 mm natančnostjo v okviru GPS simuliranih opazovanj z dolžino serije približno 8 ur ter v okviru GALILEO simuliranih opazovanj z dolžino serije približno 6 ur. Pri določitvi baznega vektorja PPNM-TREB (z dolžino 18 km) dosežemo natančnost pod 1 mm že z manj kot 1-urnimi opazovanji, tako z GPS simuliranimi kot z GALILEO simuliranimi opazovanji.

5.5.2 Odstopanja pri zapiranju trikotnika

V preglednicah 5.12-5.16 so za vsako serijo in tip opazovanj v stolpcih podana odstopanja pri zapiranju trikotnika po X, Y in Z komponenti.

Preglednica 5.12. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 1-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
1	225.4800 mm	--	0.1208 mm
	63.7806 mm	--	-0.0517 mm
	151.5477 mm	--	-0.1562 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

2	-4.7438 mm	0.6250 mm	-0.1311 mm
	-30.8442 mm	0.1071 mm	0.0388 mm
	-20.4722 mm	0.5747 mm	-0.2025 mm
3	-45.2211 mm	0.4402 mm	0.7095 mm
	-41.4721 mm	-0.0008 mm	0.3441 mm
	-33.9185 mm	0.8601 mm	0.7717 mm
4	22.7824 mm	-0.2317 mm	-0.0323 mm
	5.7642 mm	-0.0185 mm	-0.0398 mm
	14.3225 mm	-0.2820 mm	-0.0247 mm
5	-26.1017 mm	0.4413 mm	-0.3519 mm
	-2.0273 mm	-0.1260 mm	-0.0142 mm
	-21.2083 mm	-0.3231 mm	-2.4083 mm
6	-1.9501 mm	-0.3813 mm	-0.6484 mm
	0.3780 mm	-0.2749 mm	0.1179 mm
	2.2885 mm	-0.3636 mm	-0.3651 mm
7	15.0151 mm	0.7947 mm	1.6395 mm
	6.7370 mm	0.4350 mm	0.5020 mm
	9.5592 mm	0.5439 mm	0.1188 mm
8	-37.1450 mm	-0.3320 mm	-0.0229 mm
	37.2637 mm	-0.4013 mm	-0.1952 mm
	-0.6935 mm	-0.0460 mm	-0.1554 mm
9	50.8970 mm	-0.1361 mm	0.2905 mm
	-36.4034 mm	0.0695 mm	0.1375 mm
	-2.2642 mm	0.0594 mm	0.2268 mm
10	-2.6388 mm	0.1471 mm	-1.6157 mm
	-3.1433 mm	0.2288 mm	-0.5001 mm
	-12.4328 mm	0.0590 mm	-0.3432 mm
11	-4.1241 mm	0.1167 mm	0.1932 mm
	1.5308 mm	-0.0189 mm	0.1291 mm
	-2.7157 mm	0.0960 mm	-0.0788 mm
12	24.1750 mm	0.5389 mm	0.8277 mm
	34.2335 mm	0.2978 mm	0.5400 mm
	37.8536 mm	-0.2414 mm	0.3051 mm
13	-0.5767 mm	-0.1759 mm	-0.1144 mm
	-4.2619 mm	-0.0198 mm	0.1249 mm
	-0.3414 mm	0.1195 mm	0.3601 mm
14	3.1580 mm	0.5327 mm	0.3359 mm
	-1.2866 mm	-0.0570 mm	-0.0135 mm
	0.5246 mm	0.0790 mm	0.1378 mm

se nadaljuje ...

... nadaljevanje

15	-13.3601 mm	-0.2850 mm	0.1890 mm
	38.8813 mm	-0.0769 mm	0.0848 mm
	5.4373 mm	-1.0838 mm	1.0296 mm
16	-1.6614 mm	0.7726 mm	-0.4554 mm
	83.8689 mm	0.3802 mm	0.0006 mm
	34.2735 mm	0.4498 mm	-0.5267 mm
17	31.2379 mm	2.7975 mm	0.2276 mm
	58.3258 mm	-1.0525 mm	0.4230 mm
	-1.8363 mm	-4.1706 mm	1.4047 mm
18	3.8898 mm	0.4133 mm	-17.3168 mm
	-17.7660 mm	-0.3152 mm	-0.7608 mm
	-18.5421 mm	-0.4724 mm	-16.5480 mm
19	0.5678 mm	-0.4340 mm	1.2706 mm
	3.2060 mm	-0.5320 mm	0.4222 mm
	-4.0200 mm	0.0922 mm	1.5163 mm
20	6.7244 mm	-0.1275 mm	-0.6830 mm
	8.8550 mm	-0.7203 mm	-0.8359 mm
	25.9642 mm	-0.3495 mm	1.1270 mm
21	17.0232 mm	-0.9677 mm	-3.2757 mm
	-3.0114 mm	0.1536 mm	-1.2573 mm
	9.8630 mm	0.6402 mm	-5.2977 mm
22	5.2750 mm	3.4217 mm	-2.9798 mm
	-2.1271 mm	4.0890 mm	-0.9137 mm
	4.8347 mm	-1.2901 mm	-2.1722 mm
23	-50.2916 mm	-0.0808 mm	1.8344 mm
	-16.8047 mm	0.0660 mm	-0.2601 mm
	-7.3521 mm	1.5204 mm	1.2479 mm
24	17.2540 mm	--	1.0248 mm
	12.4639 mm	--	0.3652 mm
	19.7259 mm	--	0.5851 mm

Iz preglednice 5.12 je razvidno, da so pri 1-urnih GPS pravih opazovanjih v povprečju odstopanja pri zapiranju trikotnika manjša od 2 cm (če iz obravnave izvzamem prvo uro opazovanj). Pri 1-urnih GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanjih so odstopanja pri zapiranju trikotnika v povprečju manjša od 1 mm.

Preglednica 5.13. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 3-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
1	-7.6848 mm	0.5307 mm	0.0754 mm
	-26.6250 mm	0.0158 mm	-0.0419 mm
	-7.2946 mm	0.7160 mm	0.0922 mm
2	3.4494 mm	-0.1257 mm	-0.1022 mm
	2.6816 mm	-0.0447 mm	-0.0341 mm
	2.0320 mm	-0.3256 mm	-0.0441 mm
3	0.5512 mm	-0.0762 mm	-0.0836 mm
	0.5935 mm	-0.0155 mm	0.1235 mm
	2.9724 mm	0.3118 mm	-0.6578 mm
4	-0.4403 mm	0.2526 mm	0.7066 mm
	-1.6878 mm	0.1921 mm	0.3990 mm
	-1.2296 mm	0.0004 mm	0.3681 mm
5	-13.6770 mm	-0.1637 mm	-0.7906 mm
	-23.6886 mm	-0.1107 mm	-0.3179 mm
	-7.5640 mm	-0.3842 mm	-0.2182 mm
6	-7.5096 mm	2.0137 mm	-0.1405 mm
	0.2901 mm	0.4864 mm	-0.6793 mm
	-4.0351 mm	0.5643 mm	2.4124 mm
7	-6.6969 mm	-0.4921 mm	-0.0956 mm
	24.1952 mm	-0.4853 mm	-0.3272 mm
	2.2462 mm	0.5907 mm	0.4452 mm
8	-6.0025 mm	-28.1074 mm	0.9112 mm
	-0.6504 mm	-15.1125 mm	-0.1616 mm
	-1.2567 mm	-24.7184 mm	0.2062 mm

Iz preglednice 5.13 je razvidno, da so pri 3-urnih GPS pravih opazovanjih v povprečju odstopanja pri zapiranju trikotnika manjša od 1 cm. Pri 3-urnih GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanjih so odstopanja pri zapiranju trikotnika v povprečju manjša od pol mm (če pri GPS simuliranih opazovanjih iz obravnave izvezem zadnjo uro opazovanj).

Preglednica 5.14. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 6-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
1	2.0777 mm	0.2535 mm	0.1159 mm
	-10.9868 mm	0.0310 mm	-0.0393 mm
	-0.0138 mm	0.1998 mm	0.2966 mm
2	0.4822 mm	0.1334 mm	-0.3129 mm
	-0.5507 mm	0.0534 mm	-0.0681 mm
	1.2176 mm	0.0884 mm	-0.5085 mm
3	-6.9694 mm	0.6299 mm	0.3051 mm
	-4.9432 mm	0.1002 mm	-0.1091 mm
	-2.2189 mm	0.0486 mm	0.1025 mm
4	-0.9001 mm	-1.1643 mm	-0.0131 mm
	2.7185 mm	-1.3340 mm	-0.0524 mm
	3.4076 mm	0.3272 mm	0.1007 mm

Iz preglednice 5.14 je razvidno, da so pri 6-urnih GPS pravih opazovanjih v povprečju odstopanja pri zapiranju trikotnika manjša od pol cm.

Preglednica 5.15. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 12-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
1	4.9386 mm	0.2734 mm	0.0620 mm
	1.5426 mm	0.0828 mm	-0.0382 mm
	5.2897 mm	0.2108 mm	-0.0925 mm
2	-2.4738 mm	-0.3933 mm	0.2027 mm
	-0.4179 mm	-0.5082 mm	-0.1125 mm
	1.7043 mm	-0.0263 mm	0.3809 mm

Preglednica 5.16. Vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika, pridobljenih na podlagi 24-urnih GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj.

Serijska	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
1	1.2277 mm	-0.0877 mm	-0.1224 mm
	0.9653 mm	-0.3158 mm	-0.1340 mm
	4.1437 mm	0.2750 mm	-0.1776 mm

Pri izračunu povprečnih vrednosti v preglednici 5.17 niso upoštevana odstopanja komponent baznih vektorjev, ki so pridobljeni s prvo serijo 1-urnih GPS pravih opazovanj, saj je doseže vrednost odstopanje po X komponenti pri zapiranju trikotnika celo približno 20 cm. Prav tako niso upoštevana odstopanja komponent baznih vektorjev, ki so pridobljeni z zadnjo serijo 3-urnih GPS pravih opazovanj. V tem primeru zavzamejo vrednosti odstopanj pri zapiranju trikotnika do približno 3 cm. Pri nekaterih serijah opazovanj se še pojavijo občasni skoki vrednosti odstopanj, ki pa niso tako očitni. Ti skoki so posledica manjšega števila razpoložljivih satelitov in njihove geometrijske razporeditve.

Preglednica 5.17. Povprečne vrednosti odstopanj po komponentah pri zapiranju trikotnika PPNM-CELJ-TREB.

Dolžina opazovanj	GPS prava opazovanja	GPS simulirana opazovanja	GALILEO simulirana opazovanja
1 h	16.7745 mm	0.6452 mm	0.8250 mm
	19.5938 mm	0.4291 mm	0.3179 mm
	12.6280 mm	0.6235 mm	0.8940 mm
3 h	5.7514 mm	0.5221 mm	0.3632 mm
	10.0515 mm	0.1929 mm	0.2606 mm
	3.5788 mm	0.4133 mm	0.5555 mm
6 h	2.6074 mm	0.5452 mm	0.1868 mm
	4.7998 mm	0.3797 mm	0.0672 mm
	1.7145 mm	0.1660 mm	0.2521 mm
12 h	3.7062 mm	0.3334 mm	0.1324 mm
	0.9803 mm	0.2955 mm	0.0753 mm
	3.4970 mm	0.1186 mm	0.2367 mm
24 h	1.2277 mm	0.0877 mm	0.1224 mm
	0.9653 mm	0.3158 mm	0.1340 mm
	4.1437 mm	0.2750 mm	0.1776 mm

Iz rezultatov je razvidno, da so največja odstopanja pri zapiranju trikotnika, ki je določen z baznimi vektorji, pridobljenimi z GPS pravimi opazovanji. Pri GPS simuliranih opazovanjih je dosežena 0.5 mm natančnost zapiranja trikotnika po X komponenti pri 8-urnih opazovanjih ter po Y in Z komponenti pri približno 1-urnih opazovanjih. Pri GALILEO simuliranih opazovanjih je dosežena 0.5 mm natančnost zapiranja trikotnika po X in Y komponenti pri približno 1-urnih opazovanjih ter po Z komponenti pri približno 4-urnih opazovanjih.

6 ZAKLJUČEK

V teoretičnem delu diplomske naloge so opisane lastnosti sistemov GPS in GALILEO, ki bosta v prihodnosti predvidoma najbolj uporabljana globalna navigacijska satelitska sistema. Interoperabilnost obeh sistemov bo omogočala dobro pokritost s satelitskim signalom ter s tem visoko natančnost določitve položaja in možnost uporabe številnih storitev. Želena natančnost določitve položaja na osnovi globalnih navigacijskih satelitskih sistemov je seveda odvisna od uporabnikovih potreb. Vendar je za pridobitev kvalitetnih in visoko natančnih podatkov o položaju potrebno poznati nekatera osnovna dejstva o sestavi, principu delovanja in uporabnosti sistemov.

Praktični del diplomske naloge vključuje obdelavo GPS pravih, GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj. Obdelava je potekala v programskem paketu NDA Professional, za katerega velja omeniti, da je prvi programski paket za določanje relativnega položaja z visoko natančnostjo na podlagi GALILEO opazovanj. Ker sistem GALILEO še ni operabilen, so podatki o opazovanjih ter podatki o tirnicah satelitov pridobljeni s simulatorjem GSSF.

Pri obdelavi opazovanj so privzeti optimalni modeli vplivov na opazovanja. V največji meri vpliva na natančnost relativno določenega položaja natančnosti tirnic satelitov, ionosferska refrakcija, troposferska refrakcija ter sprejemnik, s katerim opravljamo opazovanja. Določitev položaja v okviru statične izmere, kjer so zahteve o natančnosti položaja večje, temelji na uporabi preciznih efemerid, ki predstavljajo edino možnost odstranitve predvidljivih in nepredvidljivih pogreškov nenatančnosti položajev satelitov na tirnici. Na večjih razdaljah obravnavamo vpliv ionosfere z uporabo primerne modela ali/in z uporabo »iono-free« linearne kombinacije faznih opazovanj, s katerimi je šum sprejemnika že zmanjšan v največjem možnem obsegu. Vpliv troposfere se zmanjša z uporabo ustreznega modela.

Za vsak tip opazovanj so podana odstopanja z obdelavo pridobljenega položaja glede na »točen« položaj, kateri je določen z danimi točkami. Primerjave rezultatov obdelave GPS pravih in GPS simuliranih opazovanj omogočajo ovrednotenje modelov in algoritmov

simulatorja GSSF ter s tem posledično izboljšanje delovanja in sestave bodočega sistema GALILEO. Pri simulaciji tirnic satelitov je bila pri prvi in zadnji uri opazovanj napačno obravnavana sprememba položaja satelita v odvisnosti od časa, zato v tem primeru rezultati niso obravnavani. Primerjava rezultatov obdelave GPS simuliranih in GALILEO simuliranih opazovanj je pokazala višjo natančnost določitve relativnega položaja v primeru GALILEO simuliranih opazovanj. Signal GALILEO satelitov temelji na treh nosilnih valovanjih, kar omogoča več možnosti tvorjenja faznih razlik ter linearnih kombinacij faznih opazovanj.

Iz rezultatov lahko povzamem, da z GPS pravimi opazovanji pridobimo najslabše določen relativni položaj. Pri GALILEO simuliranih opazovanjih je ista natančnost določitve položaja dosežena v krajšem času kot pri GPS simuliranih opazovanjih. To pomeni, da se bodo z vzpostavitvijo sistema GALILEO zaradi krajšega časa opazovanj zmanjšali stroški izmere.

7 VIRI

Alves, P. 2001. The Effect of GALILEO on Carrier Phase Ambiguity Resolution. Proceedings of IONGPS 2001, Session C4. Salt Lake City, Utah, 11.-14. september 2001.

<http://www.sciencedirect.com> (5.2.2007)

Cove, K. 2005. Improvements in GPS Tropospheric Delay Estimation with Numerical Weather Prediction. M. Sc. Thesis. Fredericton, New Brunswick, University of New Brunswick, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 230: 98 str.

<http://gge.unb.ca/Pubs/TR230.pdf> (21.6.2007)

Chersich, M. 2007. New Perspectives in Seismic Risk Mitigation Using GNSS Networks: The GEOLOCALNET Project – Final Review. European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, PowerPoint Presentation. Pavia, 22. marec 2007.

<http://tlclab.unipv.it/downloads/IIT/20070327/geolocalnet.pdf> (7.8.2007)

Chersich, M., Fermi, M., Osmo, M. 2006. GALILEO Data Processing in Geophysical Monitoring: The GEOLOCALNET Project. The Italian Institute of Navigation. Navigation: Theory of Research: 10-24.

http://www.istitutoitalianonavigazione.org/immagini/catalogo_file/185_Chersich.pdf

(7.8.2007)

Falcone, M., Navarro-Reyes, D., Hahn, J., Otten, M., Piriz, R., Pearlman, M. 2006. Satellite Laser-Ranging Campaigns – GIOVE's Track. GPS World, 18 (5): 34-37.

http://www.giove.esa.int/images/userpage/Satellite_Laser_Ranging_GIOVE_Track_GPS_World_November_2006.pdf (3.7.2007)

GALILEO Mission High Level Definition. 2002. European Commission, European Space Agency: 51 str.

http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/doc/galileo_hld_v3_23_09_02.pdf (5.2.2007)

GSSF Team. 2005a. GALILEO System Simulation Facility – Algorithms and Models.
GSSFP2.OM.002, Issue 5: 234 str.

<http://www.gssf.info/GSSF%20subpage%20Publications%20and%20documents.htm>

(7.5.2007)

GSSF Team. 2005b. GALILEO System Simulation Facility – Operations Manual.

GSSFP2.OM.001, Issue 5, Revision 2: 187 str.

<http://www.gssf.info/GSSF%20subpage%20Publications%20and%20documents.htm>

(7.5.2007)

GEOLOCALNET. 2006. GNSS NRT Data Analysis Algorithms. Description Document

C0001-ASD-001-1.1: 48 str.

GEOLOCALNET. 2005. GNSS NRT Data Analysis Prototype User Manual. C0001-SUM-

001-1.0: 29 str..

Hein, G. W., Godet, J., Issler, J.-L., Martin, J.-C., Erhard, P., Lucas-Rodriguez, R., Pratt, T.
2002. Status of GALILEO Frequency and Signal Design. European Commission Signal Task
Force: 13 str.

http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/doc/galileo_stf_ion2002.pdf (5.2.2007)

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M. 2006. Bernese GPS Software Version 5.0.
Bern, University of Bern, Astronomical Institute: 516 str.

<http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU50.pdf> (12.7.2007)

Ifadis, I. M. 2000. A New Approach to Mapping the Atmospheric Effect for GPS
observations. Earth Planets Space, 52: 703-708.

<http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/5210/52100703.pdf> (21.6.2007)

Kaplan, E. D., Hegarty, C. J. 2006. Understanding GPS: Principles and Applications. Boston,
London, Artech House: 703 str.

Klobuchar, J. A. 1987. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23 (3): 325-331.

<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7/4104338/04104345.pdf> (21.6.2007)

Niell, A. E. 1996. Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research, 101 (B2): 3227-3246.

http://www.haystack.edu/geo/pubs/NMF_JGR.pdf (28.6.2007)

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2004. Izračun položaja GPS-satelita iz podatkov oddanih efemerid = GPS-Orbit Computation from Broadcast Ephemeris Data. Geodetski vestnik, 48 (2): 151-166.

Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. 2005. Izračun položaja GPS-satelita iz podatkov preciznih efemerid = GPS-Orbit Computation from Precise Ephemeris Data. Geodetski vestnik, 49 (2): 177-190.

Posfay, A., Krueger, E., Schueler, T., Hein, G. W. 2003. Tropospheric Delay Modelling for the European Space Agency's GALILEO Testbed: Methods of Improvement and First Results. National Technical Meeting. Disneyland, 22.-24. januar 2003.

<http://forschung.unibw-muenchen.de/papers/fbr0ksdfpayc2ljekhri1mj2oybpx1.pdf>
(21.6.2007)

Prasad, R., Ruggieri, M. 2005. Applied Satellite Navigation Using GPS, GALILEO, and Augmentation Systems. Boston, London, Artech House: 290 str.

Radicella, S. M., Leitinger, R. 2001. The Evolution of the DGR Approach to Model Electron Density Profiles. Advanced Space Research, 27 (1): 35-40.

<http://www.springerlink.com> (25.1.2007)

Stopar, B. 2003. Predavanja pri predmetu Višja geodezija II. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo.

Stopar, B., Pavlovčič, P. 2001. GPS v geodetski praksi. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 115 str.

Su, H. 2000. Precise Orbit Determination of Global Navigation Satellite System of Second Generation (GNSS-2). Dr.-Ing. Dissertation. University of Federal Armed Forces Munich: 153 str.

<http://137.193.200.177/ediss/su-hua/inhalt.pdf> (21.6.2007)

Trautenberg, H. L., Weber, T., Schäfer, C. 2004. GALILEO System Overview. Acta Astronautica, 55: 643-647.

<http://www.sciencedirect.com> (25.1.2007)

Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., Langley, R. B., Nakiboglu, M., Schwarz, K.-P., Tranquilla, J. M., Vanicek, P. 1999. Guide to GPS Positioning. Fredricton, New Brunswick, University of New Brunswick, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Lecture Note No. 58: 291 str.

<http://gge.unb.ca/Pubs/LN58.pdf> (21.6.2007)

Zimmermann, F., Haak, T., Steindl, E., Vardarajulu, S., Kalden, O. 2005. Generating GALILEO Raw Data – Approach and Application. Data Systems in Aerospace (DASIA) 2005. Edinburgh, 30. maj-2. junij 2005.

<http://www.gssf.info/Documents%5CDASIA%202005%20-%20GSSF%20RDG%20-%20Issue%201.pdf> (6.5.2007)

URL naslovi:

[GPS] Spletna stran z informacijami o sistemu GPS:

<http://www.kowoma.de/en/gps/> (7.5.2007)

[GSSF] Spletna stran z informacijami o GSSF simulatorju:

<http://www.gssf.info/> (7.5.2007)