

Dragan Blagojević

**Satelitska geodezija
(Uvod u NAVSTAR GPS)**

Pisana predavanja

Beograd, 2007. godine

Sadržaj

1 Opšte osnove.....	1
1.1 Definicija, zadaci i razvoj satelitske geodezije	1
1.2 Osnovni koncept satelitske geodezije	2
1.3 Referentni koordinatni sistemi	4
1.4 Referentni sistemi vremena.....	8
2 Osnovna teorija satelitskih orbita	13
2.1 Keplerovi i Njutnovi zakoni	13
2.2 Neporemećeno kretanje satelita	14
2.3 Keplerovi orbitalni elementi	16
2.4 Poremećeno kretanje satelita.....	18
3 Arhitektura sistema NAVSTAR GPS	21
3.1 Razvoj programa NAVSTAR.....	21
3.2 Kosmički segment sistema.....	24
3.3 Kontrolni segment sistema.....	25
3.4 Korisnički segment sistema	27
4 GPS merenja i izvori grešaka	29
4.1 Princip kodnih i faznih merenja.....	29
4.2 Greške satelitskog porekla	33
4.3 Greške sredine prostiranja signala	34
4.4 Greške prijemnika.....	36
5 Matematički modeli GPS merenja	37
5.1 Funkcionalni model pseudodužina	37
5.2 Proste, dvostruke i trostruke razlike.....	39
5.3 Frekvencijske kombinacije	45
5.4 Stohastički model GPS merenja.....	47
6 GPS pozicioniranje, primene i modernizacija.....	49
6.1 Autonomno GPS pozicioniranje	49
6.2 Diferencijalno GPS pozicioniranje	50
6.3 Višestanični DGPS sistemi	54
6.4 GPS primene i modernizacija	56

1 Opšte osnove

1.1 Definicija, zadaci i razvoj satelitske geodezije

Satelitska geodezija je oblast geodezije koja obuhvata postupke i obradu preciznih merenja ka satelitima, od satelita i između satelita, u cilju rešavanja različitih geodetskih zadataka. Sam pojam podrazumeva pre svega korišćenje posebno konstruisanih i lansiranih veštačkih Zemljinih satelita, ali isto tako i opažanja prema prirodnom Zemljinom satelitu Mesecu i udaljenim svemirskim objektima kao što su kvazari. Zbog toga se satelitska geodezija ponekad naziva i kosmičkom ili globalnom geodezijom.

Imajući u vidu da savremena definicija geodezija obuhvata kako određivanje oblika, veličine i spoljašnjeg gravitacionog polja Zemlje, tako i njihovih promena tokom vremena, satelitska geodezija za svoje najvažnije ciljeve ima:

- Određivanje preciznih globalnih, regionalnih i lokalnih trodimenzionalnih geodetskih mreža,
- Određivanje spoljašnjeg gravitacionog polja Zemlje i njegovih linearnih funkcija kao što su na primer undulacije geoida,
- Merenje i modeliranje geodinamičkih fenomena (kretanje polova, promene u brzini rotacije Zemlje, savremena pomeranja Zemljine kore i slično).

Neophodan uslov za ostvarenje ovih ciljeva predstavlja, s jedne strane, poznavanje kretanja satelita pod dejstvom svih uticajnih sila, i sa druge, jasna definicija položaja satelita i opažачkih stanica na Zemlji u odgovarajućem koordinatnom sistemu. U tom smislu možemo govoriti o naučnom karakteru satelitske geodezije. Ali njene metode isto tako nalaze veliku primenu u rešavanju brojnih praktičnih geodetskih problema, o čemu naročito svedoči komercijalna ekspanzija američkog satelitskog sistema NAVSTAR GPS. Zbog toga je pravilnije reći da je satelitska geodezija naučno-tehnička disciplina.

Satelitska geodezija je relativno mlada disciplina. Njeni počeci praktično se vezuju za 04.10.1957. godine, kada je SSSR lansirao prvi veštački Zemljin satelit, SPUTNIK 1. Sa današnje tačke gledišta, dalji razvoj satelitske geodezije prolazio je kroz sledeće faze:

1958-1970: Ovaj period karakteriše nagli razvoj metoda satelitskih opažanja i teorije kretanja satelita. Naročito je bila usavršena metoda fotografskog određivanja pravaca ka satelitima. Važni rezultati postignuti u to doba bili su globalni geopotencijalni modeli Zemlje (SAO SE I, II i III, GEM), kao i svetska satelitska mreža koja je određena opažanjima satelita PAGEOS balističkom kamerom BC4.

1970-1980: Ova decenija razvoja satelitske geodezije predstavlja fazu mnogobrojnih naučnih projekata u okviru kojih su razvijeni i usavršeni novi merni postupci, kao što su lasersko merenje rastojanja do satelita i Meseca, Doplersko pozicioniranje i satelitska altimetrija. Paralelno su određeni i novi geopotencijalni modeli Zemlje (GEM 10, GRIM). U međuvremenu je tačnost merenja dostigla takav nivo da je postalo moguće praćenje geodinamičkih pojava i kontrola postojećih osnovnih državnih mreža (merne kampanje EDOC, DOEDOC itd.).

1980-: Od 1980. godine nastupa period operacionalizacije satelitskih metoda u geodeziji i geodinamici. Naročito su značajna dva aspekta razvoja koji i danas traje. Prvi se sastoji u činjenici da su pojedini sistemi, a naročito GPS, doživeli takva poboljšanja u performansama i tačnosti da su praktično u potpunosti zamenili klasične terestričke metode državnog premera. Drugi aspekt odnosi se na nivo tačnosti metode laserskog merenja rastojanja i VLBI, koji omogućuje precizno određivanje parametara Zemljine rotacije zamenjujući na taj način klasične astrometrijske metode. Poslednje dve decenije su, osim toga, karakteristične i po širokoj upotrebi satelitskih metoda za globalna određivanja savremenih pomeranja Zemljine kore.

1.2 Osnovni koncept satelitske geodezije

Kada je u pitanju geodetska primena, veštački Zemljini sateliti mogu se koristiti na dva osnovna načina:

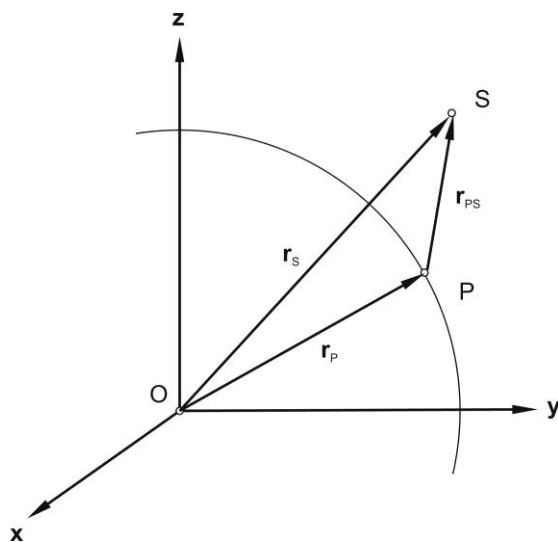
- Sateliti se mogu smatrati visokim signalima prema kojima se vrše opažanja. Kada se sa više Zemaljskih stanica simultano izvode merenja, tada nema značaja što su sateliti pokretna tela, već se prilikom obrade koriste kao poznate, fiksne tačke po analogiji sa klasičnim geodetskim mrežama. Ovakav način korišćenja satelita naziva se geometrijskom ili direktnom metodom satelitske geodezije. Njena prednost u odnosu na terestričke metode merenja je u tome što je moguće ostvarivanje velikih rastojanja, međusobno povezivanje kontinenata, kao i povezivanje kopnenih delova sa usamljenim ostrvima.
- Satelit predstavlja svojevrstni senzor Zemljinog gravitacionog polja. Pošto je privlačno dejstvo Zemlje glavna sila koja upravlja kretanjem satelita, promene i nepravilnosti u njegovoj putanji biće prvenstveno rezultat anomalija u Zemljinom gravitacionom polju. Ta činjenica omogućuje da se na osnovu opažanja ka satelitima odrede istovremeno i koordinate tačaka na Zemlji, i parametri satelitske putanje i Zemljino gravitaciono polje. Ovakav način korišćenja satelita naziva se dinamičkom ili indirektnom metodom satelitske geodezije. Prvi značajni rezultat primene dinamičke metode bilo je otkriće da Zemlja nije simetrična u odnosu na ekvator, odnosno da nema jednaku spljoštenost na polovima.

Međutim, podela metoda satelitske geodezije na geometrijske i dinamičke nema danas većeg značaja, jer savremeni postupci obično podrazumevaju kombinovano i simultano određivanje i koordinata tačaka i orbitalnih elemenata.

Druga konceptualna razlika između metoda satelitske geodezije odnosi se na smer merenja. U tom pogledu razlikuju se:

- Postupci Zemlja-kosmos koji su vezani za Zemlju na čijoj površini se nalazi oprema za merenje, dok su opažanja usmerena ka satelitima u kosmičkom prostoru. U ove postupke spadaju fotografsko određivanje pravaca, lasersko merenje rastojanja do satelita, Doplersko pozicioniranje i geodetsko korišćenje GPS.
- Postupci kosmos-Zemlja koji su vezani za kosmički prostor, dok su merenja usmerena od satelita prema uređajima na Zemljinoj površi. U njih spadaju radarska altimetrija, lasersko merenje rastojanja sa satelita i satelitska gradiometrija.
- Postupci kosmos-kosmos koji su čisto kosmički jer se merenja izvode sa jednog, a usmerena su prema drugom satelitu (na primer satelitsko praćenje satelita).

Iako je tehnološki napredak svih navedenih metoda na visokom nivou, za sada su još uvek najrazvijeniji i najtačniji sistemi Zemlja-kosmos zbog toga što je kontrola mernog procesa bolja i pouzdanija kada se uređaji nalaze na Zemljinoj površi.



Slika 1.1. Fundamentalna jednačina satelitske geodezije.

Geodetsko korišćenje veštačkih Zemljinih satelita inače je principijelno vrlo jednostavno. Osnovna ideja prikazana je na slici 1.1. U pravouglom koordinatnom sistemu, čiji je početak u centru mase Zemlje, položaj tačke P na fizičkoj površi Zemlje određen je geocentričnim vektorom položaja \mathbf{r}_P , a satelita S geocentričnim vektorom položaja \mathbf{r}_S . Ako se sa \mathbf{r}_{PS} označi topocentrični vektor položaja satelita S u odnosu na tačku P, tada za proizvoljni trenutak vremena t važi:

$$\mathbf{r}_S(t) = \mathbf{r}_P(t) + \mathbf{r}_{PS}(t) . \quad (1.1)$$

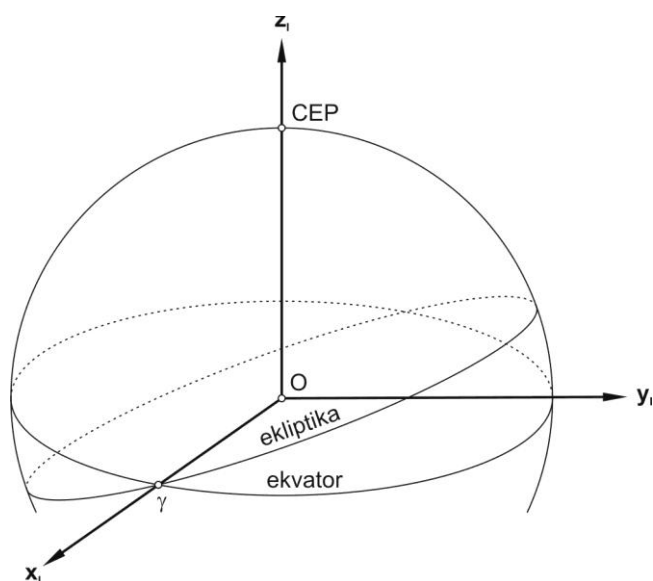
Ova jednakost predstavlja takozvanu fundamentalnu jednačinu satelitske geodezije. Komponente topocentričnog vektora \mathbf{r}_{PS} mere se nekom od metoda satelitske geodezije. Ako je poznat položaj satelita, tada se iz fundamentalne jednačine može odrediti vektor položaja tačke na površi Zemlje. Obrnuto, ako je poznat položaj tačke na površi Zemlje, lako se određuje vektor položaja satelita. A pošto je vektor položaja satelita inače funkcija vremena, orbitalnih elemenata i parametara Zemljinog gravitacionog polja, sve ove veličine se takođe mogu na neki način oceniti. Konačno, poznati položaji i tačke na površi Zemlje i satelita pružaju priliku da se izvršena merenja kontrolišu i da se oceni njihov kvalitet.

1.3 Referentni koordinatni sistemi

Iz fundamentalne jednačine satelitske geodezije očigledno je da koordinatni sistemi predstavljaju centralni matematički element korišćenja veštačkih Zemljinih satelita. Da bi se koordinatni sistem definisao u trodimenzionalnom prostoru, neophodno je propisati koordinatni početak (tri elementa), orijentaciju koordinatnih osa (tri elementa) i razmeru (obično jedan element). Usvojeni koordinatni sistem zajedno sa neophodnim konstantama, parametrima, konvencijama i teorijama naziva se referentnim koordinatnim sistemom ili kratko referentnim sistemom. Kada je u pitanju korišćenje veštačkih Zemljinih satelita, od interesa su pre svega dva referentna sistema: inercijalni, u kojem se opisuje kretanje satelita, i terestrički, koji služi za predstavljanje položaja tačaka na površi Zemlje.

Inercijalni referentni sistem. Ovaj referentni sistem definiše se kao koordinatni sistem koji je nepomičan u prostoru ili se translatorno kreće konstantnom brzinom. U njemu se izražavaju vektori sile, ubrzanja, brzine i položaja, u skladu sa jednačinama Njutnove mehanike. U odnosu na inercijalni referentni sistem, položaji udaljenih zvezda i kosmičkih objekata ostaju u principu nepromenjeni. Imajući to u vidu, inercijalni referentni sistem definiše se na sledeći način:

- koordinatni početak je u centru mase Zemlje (geocentrična definicija),
- osa z_I poklapa se sa osom rotacije Zemlje,
- osa x_I usmerena je u pravcu tačke prolećne ravnodnevnicе (γ tačka),
- osa y_I kompletira pravougli sistem desne orijentacije.

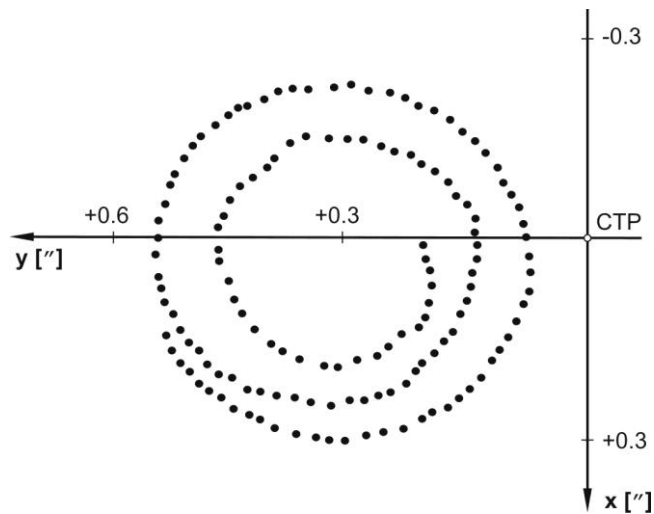


Slika 1.2. Definicija inercijalnog referentnog koordinatnog sistema.

Slika 1.2 ilustruje navedenu definiciju. Koordinatni početak je u centru mase Zemlje O . Osa z_I poklapa se sa trenutnom osom rotacije Zemlje i prodire kroz zamišljenu nebesku sferu u severnom nebeskom polu (CEP). Osa x_I usmerena je u pravcu takozvane γ tačke, odnosno tačke prolećne ravnodnevnice, koji se definiše kao presek ravni Zemljinog ekvatora sa ravni putanje Zemlje oko Sunca (ekliptike). Osa y_I kompletira pravougli koordinatni sistem desne orijentacije.

Interesantniji deo definicije inercijalnog sistema odnosi se na činjenicu da osa Zemljine rotacije ustvari ne zauzima fiksni pravac u inercijalnom prostoru. Gravitacioni uticaj Sunca i Meseca na nehomogenu i blago spljoštenu Zemlju uzrokuje složeno periodično kretanje njene ose rotacije u odnosu na zvezde i ekstragalaktičke objekte. Ono se može razložiti na dve komponente. Prva se naziva precesijom, i označava konstantnu rotaciju γ tačke u ravni ekliptike, sa periodom od oko 25800 godina, odnosno 50.3" godišnje. Precesiono kretanje kombinovano je sa nutacijom, koja predstavlja periodičnu promenu nagiba ravni ekvatora u odnosu na ravan ekliptike, sa osnovnim periodom od 18.6 godina i amplitudom od 9.2". Da je Zemlja savršeno homogena sfera, ne bi bilo ni precesije ni nutacije.

Terestrički referentni sistem. Inercijalni sistem nije pogodan za predstavljanje položaja tačaka na fizičkoj površi Zemlje, jer bi se u tom slučaju njihove koordinate neprekidno menjale usled Zemljine rotacije. Za te svrhe neophodan je referentni sistem koji je na unapred definisani način čvrsto vezan za Zemljinu koru,



Slika 1.3. Kretanje pola za period od 1990. do 1993. godine u odnosu na konvencionalni terestrički pol (CTP).

tako da su u odnosu na njega koordinate stacionarnih tačaka u principu konstantne. Takav sistem poznat je kao terestrički referentni sistem.

Terestrički referentni sistem može se inače definisati sasvim proizvoljno ako je zadovoljen osnovni uslov da bude čvrsto fiksiran u odnosu na Zemljino telo. Logično je, međutim, da koordinatni početak bude smešten u centru mase Zemlje, a da se z osa podudara sa Zemljinom osom rotacije. Osa x može se izabrati tako da prolazi kroz tačku preseka ekvatora i početnog Griničkog meridijana, čime se obezbeđuje da sistem rotira zajedno sa Zemljom. Konačno, y osa se bira na taj način da kompletira sistem desne orijentacije.

Ovakva definicija terestričkog referentnog sistema bila bi sasvim dovoljna da nema jedan krupan nedostatak: osa Zemljine rotacije ne zauzima fiksni položaj u telu Zemlje. Pol rotacije pomera se tokom vremena u odnosu na okolnu Zemljinu koru po približno spiralnoj putanji čiji poluprečnik ne prelazi 15 m. Ovaj fenomen naziva se kretanjem pola. Problem je prevaziđen tako što je dogovorno definisan srednji položaj pola za period od 1900. do 1905. godine, pod nazivom konvencionalni terestrički pol (CTP). Slika 2.3 ilustruje kretanje pola u periodu od 1990. do 1993. godine u odnosu na CTP.

Sada se terestrički referentni sistem može definisati na sledeći način:

- koordinatni početak je u centru mase Zemlje (uključujući mase okeana i atmosfere),
- osa z_T poklapa se sa srednjom osom rotacije Zemlje za period od 1900. do 1905. godine, odnosno prolazi kroz CTP,

najčešće prikazuje u obliku proizvoda tri matrice uzastopnih elementarnih rotacija za uglove α , β i γ oko svake koordinatne ose (1, 2 i 3):

$$\mathbf{R}_A^B = \mathbf{R}_1(\alpha)\mathbf{R}_2(\beta)\mathbf{R}_3(\gamma). \quad (1.3)$$

Redosled množenja u izrazu za matricu ukupne rotacije zavisi od prirode problema, i u opštem slučaju nije komutativan. Matrice elementarnih rotacija imaju sledeću strukturu:

$$\begin{matrix} & \mathbf{R}_1(\alpha) & & \mathbf{R}_2(\beta) & & \mathbf{R}_3(\gamma) \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} & & \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{matrix} \quad (1.4)$$

Matrica ukupne rotacije iz konvencionalnog inercijalnog u konvencionalni terestrički referentni sistem, \mathbf{R}_I^T , takođe je u principu funkcija tri ugla rotacije jer su u pitanju sistemi sa zajedničkim koordinatnim početkom u centru mase Zemlje. Međutim, iz fenomenoloških razloga ova se matrica prikazuje u funkciji čak devet argumenata, i razdvaja se na sledeće četiri komponente:

- matrica precesije \mathbf{P} ,
- matrica nutacije \mathbf{N} ,
- matrica Zemljine rotacije \mathbf{S} ,
- matrica kretanja pola \mathbf{W} ,

Shodno tome, transformacija vektora položaja iz inercijalnog u terestrički sistem ima oblik:

$$\mathbf{x}_T = \mathbf{R}_I^T \mathbf{x}_I = \mathbf{W}\mathbf{S}\mathbf{N}\mathbf{P}\mathbf{x}_I. \quad (1.5)$$

1.4 Referentni sistemi vremena

Metode satelitske geodezije suštinski zavise od sposobnosti mernog sistema da generiše precizno sinhronizovane signale i meri njihovo vreme puta. Da bi se, na primer, ostvarila metarska tačnost pozicioniranja, časovnici satelita moraju biti sinhronizovani na nivou od nekoliko nanosekundi. Definisavanje i održavanje precizne vremenske skale ima prema tome fundamentalni značaj za funkcionisanje satelitskih sistema kao što je GPS.

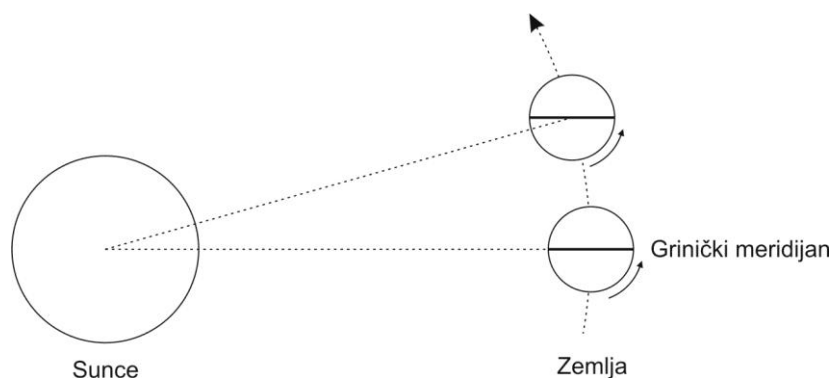
Astronomske vremenske skale. Zemlja načini jedan pun obrt oko svoje ose u odnosu na udaljene zvezde za period koji se zove zvezdani dan. Zvezdani dan se

dakle definiše kao interval vremena između dva uzastopna prolaza neke udaljene zvezde, ili ekvivalentno γ tačke, kroz meridijan opažača. Ako se posmatra prolaz γ tačke kroz Grinički meridijan, ova vremenska skala naziva se prividnim Griničkim zvezdanim vremenom (GAST). Prividni zvezdani dan nije konstantne dužine zbog precesije i nutacije Zemljine ose rotacije. Kada se obračuna efekat nutacije, dobija se vremenska skala koja se zove srednje Griničko zvezdano vreme (GMST).

Zvezdano vreme nije pogodno kao praktična vremenska skala jer je celokupna ljudska aktivnost vezana za ritam smenjivanja dana i noći. Druga skala vremena koja je zasnovana na Zemljinoj rotaciji naziva se solarnim vremenom. Solarni dan se definiše kao interval vremena između dva uzastopna prolaza središta Sunca kroz Grinički meridijan. Međutim, ni solarni dan nije konstantne dužine zbog toga što Zemlja obilazi oko Sunca promenljivom brzinom. Osim toga, ni njena osa rotacije nije upravna na ravan ekliptike. Uniformnija vremenska skala, pod nazivom srednje solarno vreme ili univerzalno vreme (UT), definiše se pomoću hipotetičke Zemlje čija je osa rotacije upravna na ravan ekliptike, i koja ima kružnu orbitu oko Sunca sa periodom obilaska kao realna Zemlja. Univerzalno vreme popravljeno za efekat kretanja pola označava se kao UT1.

Solarno i zvezdano vreme nemaju jednaku razmeru. Slika 1.5 ilustruje zašto je to tako. Za vreme dok načini pun obrt u odnosu na inercijalni prostor, Zemlja istovremeno pređe deo puta na svojoj orbiti oko Sunca. Da bi Sunce ponovo prošlo kroz Grinički meridijan, neophodno je da se Zemlja dodatno obrne za ugao koji je približno jednak $1/365.25$ od punog ugla. Srednji solarni dan je prema tome duži od zvezdanog za nešto manje od 4 minuta.

Iako su još u prvoj polovini dvadesetog veka otkrivene fluktuacije u brzini Zemljine rotacije, sekunda je sve do 1960. godine bila definisana kao $1/86400$ deo srednjeg solarnog dana. Kada su rastući zahtevi za preciznošću nametnuli potrebu za redefinicijom osnovnog intervala vremena, uvedeno je takozvano efemeridsko vreme. Ova vremenska skala bazirala se na periodu obilaska Zemlje oko Sunca, što znači da je bila oslobođena uticaja kretanja Zemljine ose i brzine njene rotacije.



Slika 1.5. Razlika između srednjeg solarnog i srednjeg zvezdanog vremena.

Efemeridska sekunda definisana je kao $1/31556925.9747$ deo godine 1900. Efemeridsko vreme predstavljalo je realizaciju teorijske skale pod nazivom terestričko dinamičko vreme (TDT), koje figuriše u relativističkim jednačinama planetarnog kretanja kao nezavisan parametar. Ispostavilo se, međutim, da je efemeridsko vreme isuviše nepraktično, tako da se nije dugo zadržalo u upotrebi. Zamenilo ga je mnogo tačnije i pogodnije atomsko vreme.

Kada je potrebno izraziti trenutak ili epohu vremena, neophodno je da bude definisan referentni početak. Međutim, ne postoji nikakav prirodni događaj koji bi sugerisao početak vremena, tako da se on mora dogovorno usvojiti. Tako se epoha u svakodnevnom životu obično izražava godinom, mesecom, danom, časom, minutom i sekundom, u okviru strukture brojanja koja se naziva kalendarom. Za naučne primene pogodniji je oblik izražavanja epohe u vidu celog broja dana i njegovog decimalnog dela, jer se na taj način izbegava kompleksnost kalendara sa mesecima i godinama nejednake dužine. Struktura koja se u te svrhe koristi je Julijanski datum (JD), čiji vek po definiciji sadrži 36525 dana. JD se definiše kao neprekidni broj srednjih solarnih dana i decimalnog dela, počev od 12 časova UT, 01. januara 4713. godine pre nove ere. Ovakav početak izabran je zato što seže u prošlost daleko pre pisane istorije. Za razliku od civilnog dana koji počinje u ponoć, Julijanski datum se računa od podneva do podneva. Tako je na primer:

$$01.01.2000\ 12:00:00\ UT = JD2451545.0 \quad (1.6)$$

Da bi se izbeglo računanje velikim brojevima i početak smestio u ponoć umesto u podne, uveden je pedesetih godina modifikovani Julijanski datum (MJD). Njegov početak smešten je po definiciji u ponoć 17. novembra 1858. godine, što odgovara Julijanskom datumu JD2400000.5.

Atomska skala vremena. Savremena definicija osnovnog vremenskog intervala od jedne sekunde zasnovana je na rezonantnoj frekvenciji atoma cezijuma. Međunarodnim sporazumom iz 1967. godine, sekunda je definisana kao vreme trajanja 9192631770 perioda zračenja koje odgovara prelazu između dva hiperfina nivoa stanja atoma cezijuma Cs-133. Broj perioda odabran je tako da je ukupno trajanje jednako jednoj efemeridskoj sekundi. Kontinualna vremenska skala bazirana na ovoj definiciji zove se atomsko vreme (TAI). Atomsko vreme predstavlja realizaciju terestričkog dinamičkog vremena, ali se od njega po definiciji razlikuje za konstantni iznos od 32.184 s, tako da je:

$$TAI = TDT - 32.184\ s \quad (1.7)$$

TAI je veoma precizna i uniformna skala vremena koja je potpuno nezavisna od Zemljine rotacije i njenog kretanja oko Sunca. Međutim, ta nezavisnost je istovremeno i nedostatak, jer se atomsko vreme sve više razilazi sa UT vremenom prema kome se upravlja sva ljudska aktivnost. Procenjeno je, na primer, da bi kroz 4000 godina razlika između TAI i UT dostigla čitavih 12 časova, tako da bi

časovnici atomskog vremena pokazivali ponoć u trenutku kada je Sunce visoko na nebu.

Kompromis je pronađen u vidu koordiniranog univerzalnog vremena (UTC). UTC sekunda definisana je na potpuno isti način kao kod atomskog vremena, ali je zato UTC skala postavljena tako da se podudara sa skalom UT1 vremena za epohu 01. januara 1958. godine u 00 časova. Od 1972. godine, UTC se sinhronizuje sa UT1 pomoću takozvane prestupne sekunde. Kad god apsolutna vrednost razlike između UTC i UT1 dostigne 0.9 s, UTC skala se popravlja za 1 s. Prestupna sekunda može u principu biti pozitivna ili negativna. Do sada je u praksi uvek imala pozitivan znak, što znači da minut koji sadrži prestupnu sekundu traje ustvari 61 s. Tako je, na primer, 31. decembra 1998. godine, kada je dodata prestupna sekunda, redosled sekundnih markera izgledao na sledeći način:

31. decembar 1998. godine	23:59:59
31. decembar 1998. godine	23:59:60
01. januar 1999. godine	00:00:00

UTC je prema tome atomska vremenska skala, ali nije uniformna jer se povremenim uvođenjem prestupne sekunde održava bliskom UT vremenu. Veza između TAI i UTC glasi:

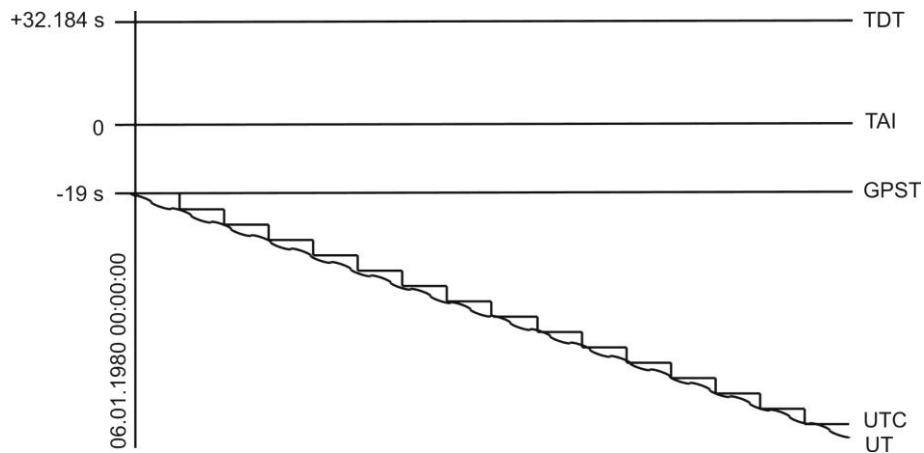
$$\text{TAI} = \text{UTC} + n \cdot 1 \text{ s}, \quad (1.8)$$

gde n označava celi broj. Prestupna sekunda se po međunarodnom sporazumu primenjuje u junu ili decembru, a ako to nije moguće onda u martu ili septembru. Opažanja iz poslednjih 100 godina sugerišu opšti trend usporavanja Zemljine rotacije u iznosu od 1 s godišnje, ali to ne znači da se prestupna sekunda uvodi svake godine pošto nepravilnosti u brzini rotacije nisu kratkoročno predvidive. Do 2006. godine ukupan broj dodatih prestupnih sekundi iznosio je $n = 33$.

UTC je rezultat međunarodne saradnje jer se naknadno generiše na osnovu vremena koje održava preko 250 cezijumskih časovnika i vodoničnih mazera u 65 laboratorija širom sveta. Prikupljanje podataka, njihovu obradu i generisanje TAI i UTC vremena vrši Međunarodni biro za tegove i mere (BIPM). Za određivanje prestupne sekunde zadužena je Međunarodna služba Zemljine rotacije (IERS).

GPS skala vremena. GPS vremenska skala (GPST) takođe predstavlja vreme zasnovano na atomskoj skali vremena kao i UTC. Međutim, u odnosu na UTC postoje dve važne razlike. Prvo, UTC vreme se generiše naknadno, dok se kod GPS vremena obrada i ocenjivanje vrše u realnom vremenu. Drugo, GPST je uniformna vremenska skala koja ne sadrži prestupne sekunde.

GPS vreme je definisano na osnovu merenja skupa cezijumskih i rubidijumskih časovnika na stanicama za praćenje i u samim GPS satelitima. Skala je izjednačena sa UTC vremenom u standardnoj GPS epohi koja predstavlja ponoć između 05. i



Slika 1.6. Odnos između GPS vremena i vremenskih skala TDT, TAI, UTC i UT.

06. januara 1980. godine (JD2444244.5). U tom trenutku je broj prestupnih sekundi iznosio $n = 19$, tako da veza između GPST i TAI glasi:

$$\text{TAI} = \text{GPST} + 19 \text{ s} . \quad (1.9)$$

Kontrolni GPS segment neprekidno održava GPST u granicama od $1 \mu\text{s}$ u odnosu na UTC (modulo 1 s). Shodno tome postoji sledeća relacija između GPST i UTC:

$$\text{GPST} = \text{UTC} + n \cdot 1 \text{ s} + \delta , \quad (1.10)$$

pri čemu je n ponovo ceo broj sekundi, dok δ označava kvalitet sa kojim se GPST održava u okviru UTC, a koji je poslednjih godina na nivou od oko 10 ns. Broj celih sekundi na početku 2006. godine iznosio je $n = 14$.

Odnos skale GPS vremena i ostalih vremenskih skala prikazan je na slici 1.6.

2 Osnovna teorija satelitskih orbita

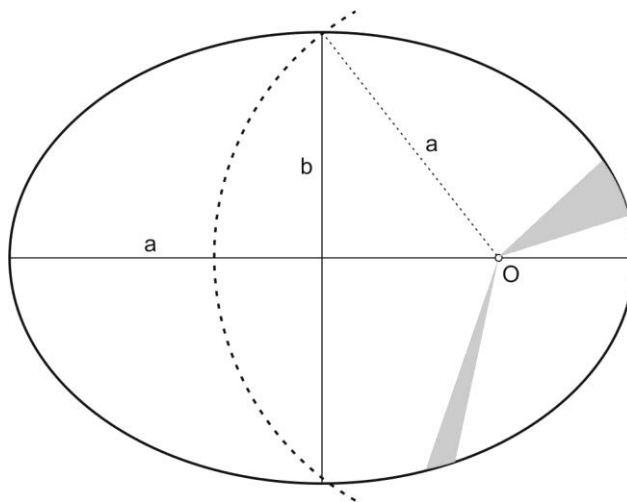
2.1 Keplerovi i Njutnovi zakoni

Naučni pogled na kosmos i mesto Zemlje u njemu sastojao se sve do Kopernika u geocentričnom učenju po kome se sva nebeska tela kreću oko Zemlje koja je u središtu vasiona. Odlučujuća promena ovog shvatanja dogodila se u šesnaestom i sedamnaestom veku, zahvaljujući pre svega naučnicima kao što su Brahe, Kepler i Njutn. Brahe je zaslužan za ogroman opažački materijal koji je prikupio strpljivim dugogodišnjim merenjima u doba kada još nije postojao teleskop niti časovnici sa klatnom. Na osnovu njegovih merenja Kepler je bio u stanju da opiše kretanje planeta oko Sunca. Krunski doprinos dao je Njutn, koji je objasnio uzroke.

Analizirajući Braheova opažanja Marsa i drugih planeta, Kepler je formulisao sledeća tri zakona koji nose njegovo ime:

- Sve planete kreću se po orbitama koje su oblika elipse, pri čemu je Sunce u jednoj od žiža.
- Linija koja spaja središta Sunca i planete opisuje jednake površine za isti vremenski interval.
- Kvadrati perioda obilaska planeta proporcionalni su kubovima njihovih srednjih odstojanja od Sunca.

Do potpuno istih zaključaka Kepler je došao i kada je u pitanju kretanje Meseca i Jupiterovih satelita. Njegovi zakoni se sa prilično dobrom aproksimacijom mogu primeniti čak i na kretanje veštačkih satelita oko Zemlje.



Slika 2.1. Ilustracija Keplerovih zakona planetarnog kretanja.

Keplerovi zakoni planetarnog kretanja ilustrovani su na slici 2.1. Otkriće da se planeta kreće po elipsi velike poluose a i male poluose b sa Suncem u žiži O , iznenadilo je Keplera i njegove savremenike koji su očekivali da putanje planeta budu kružnice ili krive linije zasnovane na kružnicama. Galilej, koji je živio u vreme kad i Kepler, nikad, na primer, nije prestao da veruje u kružni oblik orbita. Shodno drugom Keplerovom zakonu, planeta se kreće oko Sunca promenljivom linearnom brzinom koja zavisi od njenog položaja na putanji. Što je planeta udaljenija od Sunca, to se sporije kreće. Međutim, površinska brzina planete, ilustrovana na slici 2.1 osenčenim isečcima, ostaje konstantna. Iz trećeg zakona sledi da dve planete imaju isti period obilaska bez obzira na oblik njihovih orbita, pod uslovom da im je isto srednje odstojanje od Sunca. Planeta koja se kreće eliptičnom putanjom sa slike 2.1 imala bi, prema tome, isti period obilaska oko Sunca kao planeta kružne putanje označene isprekidanom linijom na istoj slici, jer je u oba slučaja srednje odstojanje od Sunca jednako velikoj poluosi a . Međutim, iako su izvanredno elegantni i jednostavni, drugi i treći Keplerov zakon bili su suviše daleko van domašaja kapaciteta nauke tog doba da bi bili prihvaćeni.

Tek je pedeset godina nakon Keplerove smrti Njutn ponudio teorijsku osnovu Keplerovih zakona, pokazavši da se svaki od njih može izvesti iz njegove teorije univerzalnog privlačenja. Njutn je takođe osnovao oblast diferencijalnog računa da bi dokazao da se planete kreću oko Sunca po eliptičnim orbitama, i formulisao svoja čuvena tri zakona mehanike:

- Telo ostaje u stanju mirovanja ili uniformnog kretanja ako na njega ne deluje nikakva sila.
- Ubrzanje centra mase tela proporcionalno je sili koja na njega deluje.
- Sili akcije odgovara sila reakcije istog intenziteta i pravca, ali suprotnog smera.

2.2 Neporemećeno kretanje satelita

Kretanje GPS satelita u potpunosti se povinuje Njutnovim zakonima. U svom najjednostavnijem slučaju, koji se naziva problemom dva tela u centralnom polju, Zemlja i satelit se mogu posmatrati kao tačkaste mase koje se kreću samo pod dejstvom međusobne gravitacije. Ako se mase Zemlje i satelita označe sa M i m , a njihovi vektori položaja u inercijalnom referentnom sistemu sa \mathbf{r}_E i \mathbf{r}_s , tada je po Njutnovom zakonu univerzalnog privlačenja sila kojom Zemlja privlači satelit jednaka:

$$\mathbf{F} = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}, \quad (2.1)$$

pri čemu $G = 6.673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ predstavlja univerzalnu gravitacionu konstantu, $\mathbf{r} = \mathbf{r}_E - \mathbf{r}_s$ je vektor položaja satelita u odnosu na Zemlju, a r je njegov intenzitet. Negativan predznak u gornjem izrazu potiče od činjenice da je sila privlačenja \mathbf{F} suprotno orijentisana od vektora \mathbf{r} . Satelit sa svoje strane takođe privlači Zemlju silom koja shodno zakonu akcije i reakcije iznosi $-\mathbf{F}$. Po drugom Njutnovom zakonu, sila je jednaka proizvodu iz mase i ubrzanja, tako da su sile kojima se Zemlja i satelit međusobno privlače:

$$m\ddot{\mathbf{r}}_s = -G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}, \quad M\ddot{\mathbf{r}}_E = G \frac{Mm}{r^3} \mathbf{r}. \quad (2.2)$$

Iz ovog para jednačina dobija se sledeći izraz za vektor ubrzanja satelita u odnosu na Zemlju:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -G \frac{M+m}{r^3} \mathbf{r}. \quad (2.3)$$

Kada se uzme u obzir da je masa satelita ($\sim 10^3$ kg) beznačajna u poređenju sa masom Zemlje ($\sim 10^{24}$ kg), sledi da je sa odličnom aproksimacijom:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{r}, \quad (2.4)$$

gde proizvod $GM = 3986004.418 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ označava geocentričnu gravitacionu konstantu.

Izraz (2.4) predstavlja vektorsku diferencijalnu jednačinu drugog reda. Njena prva integracija uvodi tri konstante, odnosno tri komponente vektora brzine u datom trenutku. Druga integracija donosi još tri konstante koje su komponente vektora položaja u istom trenutku. Orbita se dakle potpuno može opisati pomoću šest elemenata u formi početnih uslova zadatih za epohu t_0 :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0 &= (x_0, y_0, z_0) \\ \dot{\mathbf{r}}_0 &= (\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Sada se uz pomoć početnih uslova diferencijalna jednačina kretanja satelita može integraliti u oba vremenska smera da bi se odredio položaj satelita za proizvoljni trenutak vremena. Treba napomenuti da se jednačina (2.4) odnosi na idealizovanu situaciju u kojoj se Zemlja i satelit smatraju tačkastim masama na koje osim međusobnog privlačenja ne deluje nikakva druga sila. U takvom slučaju orbitalna ravan je fiksna u inercijalnom prostoru, orbita je fiksna u okviru orbitalne ravni, a položaj satelita u nekom trenutku može se odrediti ako su mu poznati položaj i brzina u drugom trenutku.

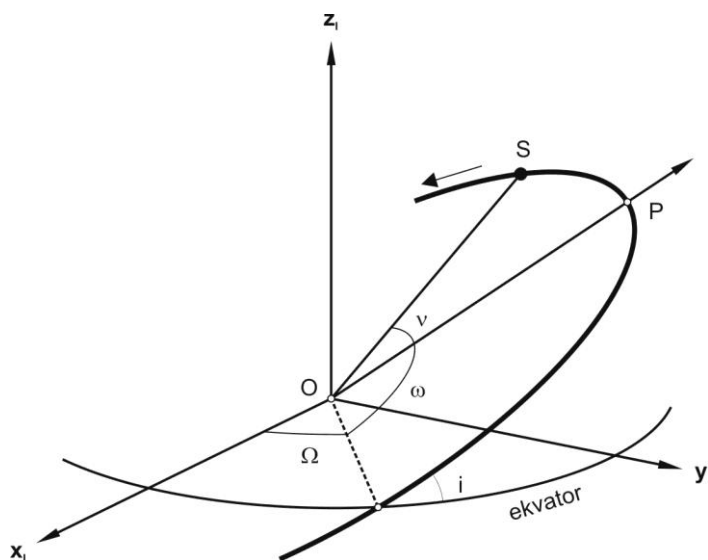
2.3 Keplerovi orbitalni elementi

Početni uslovi u vidu šest elemenata vektora položaja i brzine satelita nisu jedini izbor za konstante integracije. Alternativni i geometrijski mnogo očigledniji skup parametara predstavljaju Keplerovi elementi. Pet Keplerovih elemenata definiše veličinu, oblik i orijentaciju satelitske orbite, dok šesti određuje mesto satelita na putanji. Na taj način je fiksirano svih šest stepeni slobode kretanja, tako da se uz pomoć Keplerovih elemenata mogu odrediti koordinate satelita za bilo koji trenutak vremena.

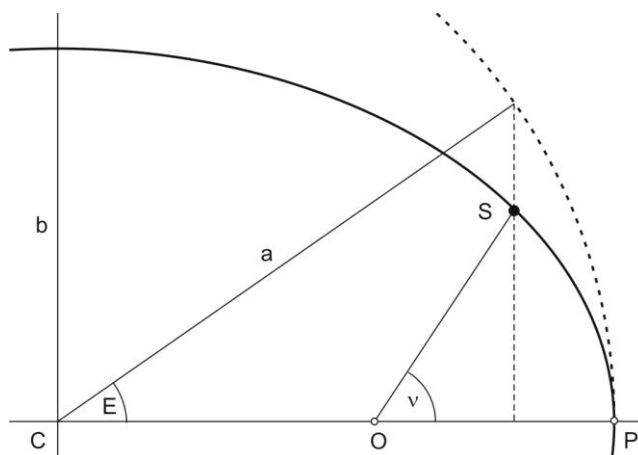
Slika 2.2 prikazuje orbitu satelita S u inercijalnom referentnom sistemu sa početkom u centru mase Zemlje, i ilustruje geometrijski karakter Keplerovih elemenata.

Prva dva elementa određuju oblik i veličinu eliptične putanje. To su velika poluosa elipse a i ekscentricitet e . Sledeća tri elementa, inklinacija i , rektascenzija uzlaznog čvora Ω i argument perigeuma ω , definišu orijentaciju orbitalne ravni u inercijalnom prostoru, odnosno orijentaciju eliptične putanje u orbitalnoj ravni. Ove veličine imaju sledeće značenje:

- Inklinacija i je ugao pod kojim je orbitalna ravan nagnuta u odnosu na ravan ekvatora.
- Rektascenzija uzlaznog čvora Ω predstavlja ugao u ravni ekvatora između pravca ka γ tački (x osa inercijalnog sistema) i pravca ka uzlaznom čvoru satelitske orbite. Uzlazni čvor je tačka u kojoj satelit prolazi kroz ekvatorsku ravan pri svom kretanju prema severu. Odgovarajuća tačka na



Slika 2.2. Ilustracija geometrijskog karaktera Keplerovih parametara.



Slika 2.3. Definicija ekscentrične anomalije.

suprotnoj strani zove se silazni čvor. Uzlazni i silazni čvor definišu takozvanu nodalnu liniju.

- Argument perigeuma ω je ugao u orbitalnoj ravni između pravca ka uzlaznom čvoru i pravca ka perigeumu P . Perigeum je tačka orbite u kojoj je satelit najbliži Zemlji. Tačka u kojoj je satelit najudaljeniji od Zemlje zove se apogeum.

Poslednji od šest Keplerovih elemenata određuje položaj satelita na putanji. To je prava ili istinita anomalija v , koja se definiše kao ugao u orbitalnoj ravni između pravca ka perigeumu P i pravca ka satelitu S . Potrebno je primetiti da perigeum kod kružnih orbite nije definisan, pa samim tim nije ni prava anomalija. Položaj satelita je u tom slučaju određen uglom $u = \omega + v$ koji se naziva argumentom širine.

Prava anomalija ne menja se linearno sa proteklim vremenom jer se satelit kreće promenljivom brzinom u skladu sa drugim Keplerovim zakonom. Zbog toga se alternativno koriste i dve druge veličine kojima se takođe može utvrditi položaj satelita u orbiti: ekscentrična anomalija E i srednja anomalija M .

Definicija ekscentrične anomalije E prikazana je na slici 2.3. To je ugao u ravni orbite koga grade pravci iz geometrijskog centra elipse C prema perigeumu P i prema projekciji položaja satelita S na kružnicu s centrom u C i poluprečnika jednakog velikoj poluosi elipse a . Sa slike 2.3 mogu se izvesti sledeće dve relacije između prave i ekscentrične anomalije:

$$\tan v = \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{\cos E - e}, \quad (2.6)$$

$$\tan \frac{E}{2} = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}} \tan \frac{v}{2}$$

gde e označava prvi numerički ekscentricitet elipse. Prava i ekscentrična anomalija imaju iste vrednosti kada je satelit u perigeumu ili apogeumu, a potpuno se podudaraju jedino kod kružnih orbita.

Srednja anomalija M je negeometrijska veličina koja se definiše kao prava anomalija fiktivnog satelita koji se kreće konstantnom uglovnom brzinom n po kružnoj putanji čiji je centar u žiži elipse, i osim toga ima period obilaska T identičan realnom satelitu. Pošto se fiktivni satelit kreće konstantnom brzinom, srednja anomalija se menja linearno sa vremenom:

$$M = n(t - t_p), \quad (2.7)$$

pri čemu t_p označava referentni trenutak vremena, kao što je na primer trenutak prolaska satelita kroz perigeum. Za srednje kretanje satelita n može se na osnovu trećeg Keplerovog zakona napisati:

$$n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{GM}{a^3}}. \quad (2.8)$$

Srednja i ekscentrična anomalija povezane su Keplerovom jednačinom:

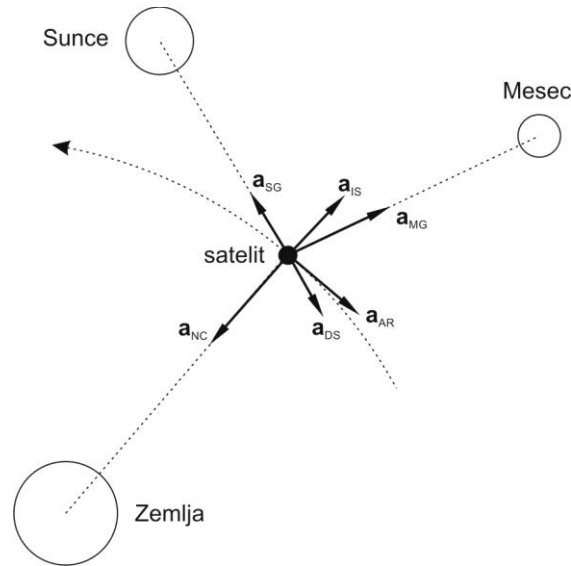
$$M = E - e \sin E, \quad (2.9)$$

iz koje se srednja anomalija može direktno sračunati na osnovu zadate ekscentrične anomalije. Obrnuti problem nema rešenje u zatvorenom obliku jer se ekscentrična anomalija pojavljuje istovremeno i kao argument trigonometrijske funkcije. Keplerova jednačina se u tom slučaju mora rešavati iterativno, ili se ekscentrična anomalija izražava u obliku reda.

2.4 Poremećeno kretanje satelita

Da je Zemlja savršeno homogena sfera, satelit bi se u njenom gravitacionom polju zaista kretao u potpunom skladu sa Keplerovim zakonima. Realna Zemlja je međutim nepravilnog oblika, nehomogene unutrašnje građe, a postoje još i druge uticajne sile osim sile njenog privlačenja. Orbita GPS satelita menja se tokom vremena pod ukupnim dejstvom poremećajnih faktora, i stoga se mora opisivati odgovarajućim skupom vremenski promenljivih parametara. Uticaji najvažnijih izvora poremećaja na kretanje satelita ilustrovani su na slici 2.4 na primeru GPS satelita.

Najveći poremećajni efekat na satelitsko kretanje ima spljoštenost Zemlje. Odgovarajuće poremećajno ubrzanje označeno je na slici 2.4 sa \mathbf{a}_{NC} . Uticaj spljoštenosti Zemlje može se sagledati ako se u razvoju potencijala sile Zemljine teže zadrži samo član stepena 2 i reda 0, a zatim nađe razlika T_{20} u odnosu na geopotencijal savršeno homogene sferne Zemlje $V = GM/r$:



Slika 2.4. Ilustracija najvažnijih poremećajnih ubrzanja GPS satelita.

$$T_{20} = V_{20} - \frac{GM}{r} = -\frac{\sqrt{5}}{2} \frac{GMa^2}{r^3} C_{20} (1 - 3 \sin^2 \varphi'). \quad (2.10)$$

Prostorni gradijent poremećajnog potencijala T_{20} predstavlja komponente vektora poremećajnog ubrzanja, čiji intenzitet za GPS satelite iznosi oko $5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$.

Spljoštenost Zemlje dvostruko deluje na orbite GPS satelita. Prvo, kada se satelit nađe u blizini ekvatorske ravni, sila privlačenja Zemlje postaje jača i ubrzava njegovo kretanje. Kako se satelit udaljava od ekvatora brzina mu se smanjuje. Rezultat ovakvog ponašanja je spora i postepena promena argumenta perigeuma, odnosno rotacija eliptične putanje u orbitalnoj ravni. Druga posledica spljoštenosti Zemlje ogleda se u tome što vektor sile privlačenja nije usmeren prema njenom središtu zbog viška masa oko ekvatora. Rezultujući spreg sila nastoji da dovede do poklapanja orbitalnu i ekvatorsku ravan, što kod GPS satelita ima za posledicu promenu rektascencije uzlaznog čvora odnosno rotaciju nodalne linije brzinom od oko 1.2° mesečno.

Sledeći važan poremećajni faktor predstavljaju gravitaciona privlačenja Sunca i Meseca, \mathbf{a}_{SG} i \mathbf{a}_{MG} . Iako ima mnogo manju masu od Sunca, Mesec je bliži Zemlji, tako da je njegov uticaj na kretanje GPS satelita veći. Rezultujuće poremećajno ubrzanje iznosi:

$$\mathbf{a}_{MG} = Gm_M \left(\frac{\mathbf{r}_M - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|^3} - \frac{\mathbf{r}_M}{|\mathbf{r}_M|^3} \right), \quad (2.11)$$

Tabela 2.1. Najznačajnije poremećajne sile i rezultujuća ubrzanja GPS satelita.

Izvor poremećaja	Poremećajno ubrzanje	Uticaj na orbitu za 1h
Spljoštenost Zemlje	$5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$	250 m
Lunisolarno privlačenje	$5 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$	25 m
Pritisak Sunčevog zračenja	$1 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-2}$	0.5 m
Albedo	$1 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-2}$	0.01 m

gde m_M označava masu Meseca, a \mathbf{r}_M njegov geocentrični vektor položaja. Sličan izraz važi i za uticaj Sunca ili drugih kosmičkih tela. Gravitaciono privlačenje Sunca i Meseca takođe dovodi do plime okeana i čvrste Zemljine kore. Ovako veliko premeštanje masa menja gravitaciono polje Zemlje, a samim tim i satelitske orbite. Kod GPS satelita je međutim ovaj indirektni efekat praktično beznačajan.

Poslednja grupa poremećajnih faktora odnosi se na nekoliko uticaja koji nisu gravitacionog porekla. Najznačajniji je direktni pritisak Sunčevog zračenja (\mathbf{a}_{DS}), koji nastaje kada se fotoni emitovani sa Sunca sudaraju sa satelitom. Rezultujuće poremećajno ubrzanje zavisi od efektivne površine satelita i njene reflektivnosti, ali je potpuno odsutno kada se GPS satelit nađe u Zemljinoj senci. Sunčevo zračenje se jednim delom odbija od površi Zemlje i na taj način takođe utiče na satelitsko kretanje (\mathbf{a}_{IS}). Ova pojava zove se albedo. S obzirom na to da se zbog Zemljine rotacije stalno menja površ odbijanja, modeliranje albeda veoma je teško. Najmanji efekat pokazuje sila trenja usled otpora vazduha (\mathbf{a}_{AR}), jer je na visinama leta GPS satelita atmosfera veoma razređena.

Sada se realno kretanje veštačkih satelita može adekvatnije opisati proširenom vektorskom diferencijalnom jednačinom:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GM}{r^3} \mathbf{r} + \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t), \quad (2.12)$$

u kojoj $\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ označava rezultantu svih poremećajnih sila, koja u opštem slučaju zavisi od položaja satelita i njegove brzine. Imajući u vidu da je ukupni intenzitet poremećajnih sila, $|\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)|$, veoma mali u poređenju sa centralnim gravitacionim članom GM/r^2 , Keplerova putanja može poslužiti kao dobra približna vrednost u blizini početnih uslova, ali se greška znatno nagomilava tokom vremena. Iz tabele 2.1 vidi se da su najznačajnija poremećajna ubrzanja GPS satelita mala u odnosu na vrednost centralnog ubrzanja koje iznosi 0.56 ms^{-2} . Kontrolni GPS segment ih, međutim, mora uzeti u obzir jer uticaji na orbitu mogu postati značajni već posle jednog časa.

3 Arhitektura sistema NAVSTAR GPS

3.1 Razvoj programa NAVSTAR

Veliki uspeh sistema satelitskog navigacionog sistema TRANSIT inicirao je već krajem šezdesetih godina prošlog veka značajne programe američkog Ministarstva odbrane (DoD), usmerene ka istraživanjima mogućnosti poboljšane navigacije iz kosmičkog prostora. Do 1972. godine već su realizovana dva projekta u okviru kojih su testirane tehnologije od suštinskog značaja za arhitekturu budućeg sistema NAVSTAR GPS. Tako je u projektu ratne mornarice TIMATION po prvi put ispitano ponašanje satelitskih atomskih časovnika u uslovima otvorenog kosmosa, a u paralelnom projektu ratnog vazduhoplovstva, pod nazivom 621B, satelitski signali modulirani su posebnom vrstom kodova čija su pseudoslučajna svojstva omogućavala merenje dužina.

Sistem NAVSTAR GPS nastao je objedinjavanjem programa TIMATION i 621B, motivisanim potrebama američke vojske za preciznim pozicioniranjem, navigacijom i transferom vremena. Ključni momenat predstavljala je odluka DoD da se finansijska sredstva usmere na razvoj novog satelitskog navigacionog sistema umesto u modernizaciju sistema TRANSIT. Osnovna arhitektura odobrena je 1973. godine, a već 1978. godine lansirani su prvi GPS sateliti. Sistem je proglašen potpuno operativnim 1995. godine.

Kvantitativno izraženo, osnovni cilj programa NAVSTAR sastojao se u tome da omogući američkoj vojsci određivanje položaja, brzina i vremena sa formalnom tačnošću od 10 m, 0.1 m/s i 100 ns respektivno. Imajući u vidu planirane vojne primene, od sistema se dodatno zahtevala funkcionalnost na brzim pokretnim platformama, neograničen broj korisnika, globalna geografska dostupnost, nezavisnost od vremenskih uslova, visok stepen zaštite od ometanja i interferencije i mogućnost selektivnog korišćenja. Postavljeni zahtevi i stanje tehnologije ranih sedamdesetih godina prošlog veka usloveli su sledeći izbor dizajnera arhitekture sistema:

- *Tip sistema.* Kod aktivnih satelitskih sistema korisnici imaju mogućnost dvosmerne komunikacije. GPS je pasivni sistem, što znači da korisnici primaju satelitske signale bez mogućnosti da povratno komuniciraju sa GPS satelitima.
- *Tip signala.* GPS koristi takozvanu tehniku signala širokog spektra (CDMA), koja omogućuje da sateliti emituju signale simultano na jednoj radio frekvenciji bez njihove međusobne interferencije.
- *Metod pozicioniranja.* U vreme kada je razmatrana osnovna arhitektura GPS sistema, tehnologija atomskih časovnika bila je već na stepenu koji je omogućavao precizno vremenski sinhronizovane signale. Stoga se izbor trilateracione metode pozicioniranja nametnuo kao logičan.

- *Noseća frekvencija.* L-opseg frekvencija (1 GHz – 2 GHz) izabran je kao kompromis, jer GPS zahteva nekih 20 MHz frekvencijskog spektra, a ovaj opseg je tada bio relativno nezauzet. Osim toga, na višim frekvencijama se greška merenja dužina usled jonosferske refrakcije smanjuje, ali su zato prisutni mnogo veći gubici snage signala pri prostiranju kroz slobodni prostor i prolasku kroz atmosferu.
- *Satelitska konstelacija.* S obzirom na zahtev globalne dostupnosti, izbor GPS satelitskih orbita morao je biti ekonomičan. Na primer, sateliti sa orbitama nižim od 2000 km (LEO) ne iziskuju velike troškove lansiranja, ali ih je za globalnu pokrivenost potrebno 100 – 200. Pored toga, ovaj tip orbita zahteva česte manevarske intervencije, jer su na manjim visinama izraženi uticaji atmosferskog trenja i nepravilne strukture Zemljinog gravitacionog polja. S druge strane, globalna pokrivenost lako se postiže sa svega nekoliko geostacionarnih satelita (GEO), ali je njihovo lansiranje skupo, i uprkos visinama leta od 36000 km ne pokrivaju dovoljno dobro područja većih geografskih širina. Konstelacija GPS satelita zasnovana je na srednjim orbitama (MEO), odnosno visinama od 5000 km do 20000 km. Kod ovog tipa orbita troškovi lansiranja su umereno visoki, a kriterijum globalne pokrivenosti ispunjava konstelacija od 24 – 36 satelita.

GPS je, prema tome, pasivni satelitski sistem zasnovan na trilateracionoj metodi pozicioniranja i merenju dužina principom određivanja vremena puta radio signala. Da bi se, međutim, izmerilo vreme puta radio signala, časovnici u satelitima i prijemnicima moraju biti sinhronizovani sa visokom tačnošću. Pošto se u GPS prijemnike iz razloga ekonomičnosti ugrađuju kvarcni oscilatori znatno manje tačnosti od atomskih oscilatora u satelitima, svi vremenski intervali u trenutku merenja biće opterećeni sistematskom greškom. To znači da su u tom trenutku rastojanja prema svim satelitima podjednako duža ili podjednako kraća od istinitih vrednosti, zbog čega se nazivaju pseudodužinama.

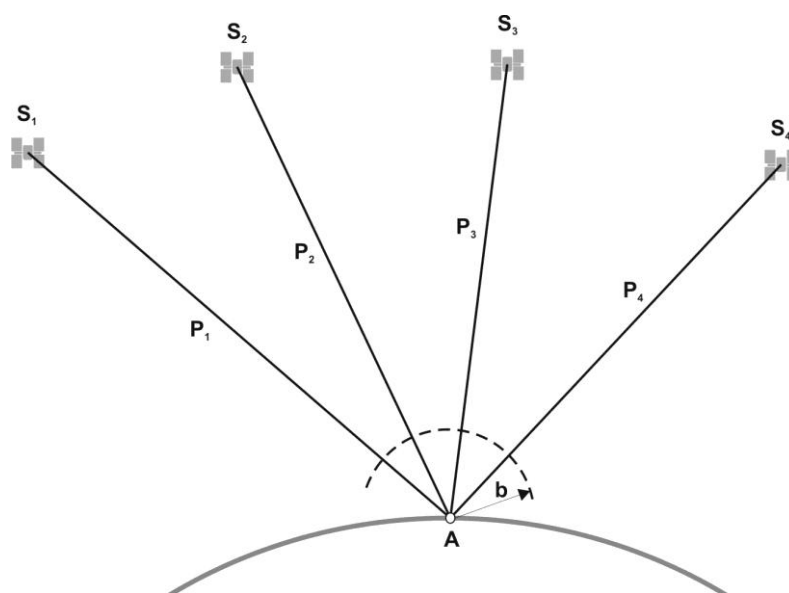
Činjenica da se GPS prijemnicima ne mere dužine već pseudodužine, neznatno menja trilateracioni princip GPS pozicioniranja. Slika 3.1 ilustruje osnovnu ideju. Prijemnik sa tačke A simultano meri pseudodužine P_i prema satelitima S_i , čiji su položaji u trenutku merenja poznati zahvaljujući navigacionim porukama koje emituju. Svaka izmerena pseudodužina definiše po jednu sferu čiji je centar u odgovarajućem satelitu. Trodimenzionalni položaj nepoznate tačke A određen je u principu presekom tri takve sfere. Međutim, pošto merene pseudodužine sadrže istu nepoznatu grešku sinhronizacije časovnika prijemnika i satelita b , za kompletno rešenje neophodno ih je najmanje četiri. Matematički izraženo, GPS trilateracija sastoji se u rešavanju jednačina:

$$P_i = \sqrt{(x - x^{(i)})^2 + (y - y^{(i)})^2 + (z - z^{(i)})^2} + b \quad (3.1)$$

po nepoznatim koordinatama (x, y, z) tačke A i nepoznatoj greški sinhronizacije b , pri čemu su poznate koordinate satelita označene gornjim indeksom $i = 1, 2, 3, 4$.

NAVSTAR GPS je sistem vojnog porekla i karaktera, tako da su za njegovu potencijalnu civilnu upotrebu od samog početka uvedena određena ograničenja. Razmatrajući razne aspekte nacionalne bezbednosti, Vlada SAD je formulisala politiku koja predviđa dva režima korišćenja sistema: standardno pozicioniranje za civilnu mirnodopsku upotrebu (SPS), i precizno pozicioniranje za DoD ovlašćene korisnike (PPS). Standardno SPS pozicioniranje dostupno je svima bez direktne nadoknade za korišćenje. Tokom devedesetih godina prošlog veka njegova tačnost je u horizontalnom smislu bila degradirana na oko 100 m takozvanom SA merom zaštite, ali je ona u međuvremenu 2000. godine ukinuta predsedničkim ukazom. Pristup potpunoj funkcionalnosti sistema ograničen je od 1994. godine takozvanom AS merom zaštite, na taj način što se precizni signal emituje u šifrovanom obliku koga mogu koristiti samo ovlašćeni PPS korisnici.

GPS nije jedini predstavnik u klasi satelitskih radionavigacionih sistema. SSSR je, gotovo istovremeno kad i SAD, započeo razvoj sopstvenog satelitskog sistema pod nazivom GLONASS. Zbog raspada SSSR i problema u vezi finansiranja kosmičkog programa, sistem je dostigao konstelaciju od 24 satelita samo jedno kratko vreme tokom 1996. godine, ali je nedavnim lansiranjem nekoliko satelita Rusija iskazala namere da dovede GLONASS na nivo potpune funkcionalnosti. S druge strane, pitanja zavisnosti suvereniteta i bezbednosti od jednog tako važnog resursa kao što je satelitski navigacioni sistem koga kontroliše armija samo jedne



Slika 3.1. Princip GPS trilateracije. Za određivanje koordinata tačke i greške sinhronizacije neophodne su najmanje četiri merene pseudoduzine.

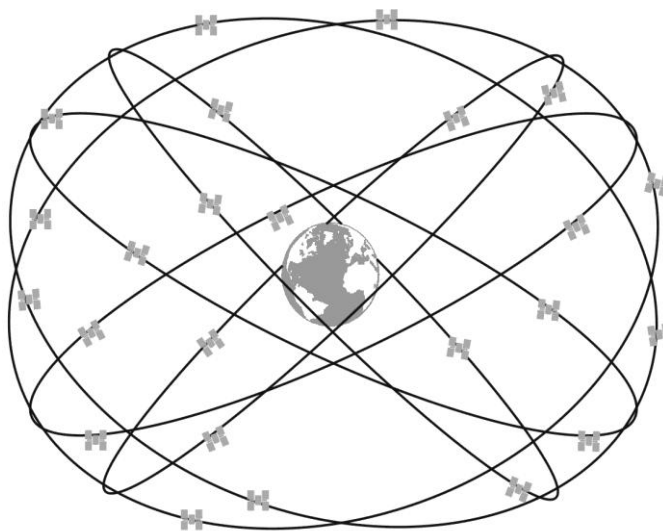
države, navela su 1999. godine Evropsku uniju na odluku o pokretanju satelitskog navigacionog programa pod civilnom kontrolom. Evropska komisija u saradnji sa Evropskom svemirskom agencijom odmah je počela intenzivno da radi na definiciji arhitekture satelitskog sistema pod nazivom GALILEO, sa namerom da proglasi njegovu potpunu operativnost 2008. godine. Kina je lansiranjem dva GEO satelita tokom 2000. godine takođe pokazala da ima ambiciozne planove sa svojim eksperimentalnim satelitskim navigacionim sistemom BEIDOU, ali još uvek nisu poznati svi detalji njegove definitivne arhitekture.

Danas je uobičajeno da se GPS, GLONASS, kao i ostali realizovani, planirani ili budući sistemi nazivaju globalnim navigacionim satelitskim sistemima (GNSS). GNSS navigacija više nije ograničena samo na Zemlju i njenu neposrednu okolinu. Američka nacionalna svemirska agencija (NASA) objavila je da već razmatra konstelaciju satelita u niskim orbitama oko Marsa.

3.2 Kosmički segment sistema

Projektovana konstelacija obuhvata 24 GPS satelita u gotovo kružnim orbitama poluprečnika 26560 km i sa periodom obilaska oko Zemlje od približno 12 časova (slika 3.2). Po četiri satelita raspoređeno je u šest orbitalnih ravni nagnutih pod uglom od 55° u odnosu na ekvator. Ukupan raspored satelita optimizovan je tako da svakom korisniku na površi Zemlje obezbeđuje elektronska vidljivost najmanje četiri satelita iznad horizonta.

GPS sateliti su opremljeni kako standardnim komponentama neophodnim za komunikaciju i pozicioniranje, tako i posebnim modulima sasvim specifične vojne



Slika 3.2. Nominalna GPS satelitska konstelacija od 24 satelita u 6 orbitalnih ravni.

Tabela 3.1. Osnovne karakteristike raznih generacija GPS satelita.

Karakteristika	Block II/IIA	Block IIR	Block IIF
Ukupan broj satelita	28	21	12
Godina prvog lansiranja	1989	1997	2005
Težina satelita	900 kg	1100 kg	1700 kg
Snaga solarnih panela	1100 W	1700 W	2900 W
Projektovani vek trajanja	7.5 god.	10 god.	15 god.

namene, kao što je na primer sistem za rano otkrivanje nuklearnih udara (NDS). Osnovna satelitska konstrukcija obuhvata još solarne panele koji obezbeđuju električnu energiju, reakcione točkove za kontrolu orijentacije i mlazne sisteme za korekciju orbite. Količina goriva i stanje sistema za napajanje ograničavaju prosečni vek trajanja satelita na oko 10 godina, zbog čega se moraju periodično zamenjivati novim. GPS sateliti su prvobitno lansirani u orbite pomoću raketa nosača Atlas F. Kasnije je ta odluka promenjena u korist višenamenskih kosmičkih vozila (Space Shuttle), ali je ponovo preispitana nakon nesreće broda Challenger 1986. godine, i od tada se lansiranje vrši raketama nosačima tipa Delta II.

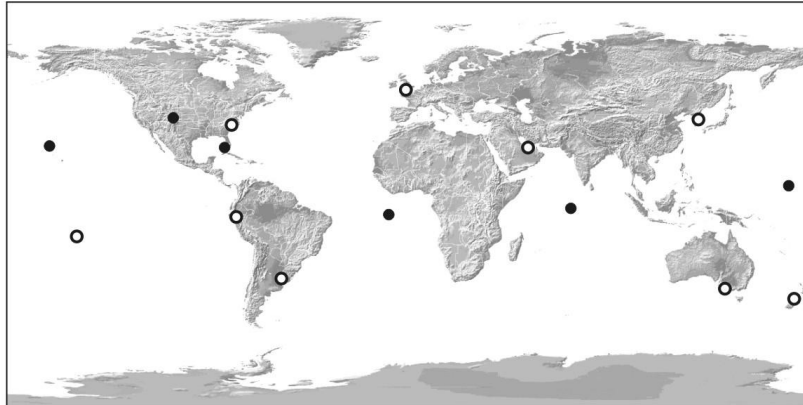
Do sada je lansirano nekoliko generacija GPS satelita. Tabela 3.1 sadrži osnovne karakteristike nekih od njih. Prva generacija od 10 prototip satelita pod nazivom Block I služila je da demonstrira izvodljivost celog sistema. Nju su do proglašenja potpune operativnosti 1995. godine zamenila 24 satelita generacije Block II i IIA, da bi narednih deset godina puna konstelacija bila održavana lansiranjem novih Block IIR satelita. Svaka satelitska generacija projektovana je sa većom funkcionalnošću i dužim vekom trajanja u odnosu na prethodnu.

Lansiranje poslednje generacije od 27 GPS satelita pod nazivom Block IIF započelo je 2005. godine. Ministarstvo odbrane SAD je u međuvremenu donelo odluku o smanjenju planiranog broja satelita na 12, procenjujući da bi njihova modifikacija u skladu sa najavljenom modernizacijom sistema bila preskupa. Iz istih razloga je pokrenut i dugoročni projekat potpuno nove generacije satelita pod nazivom GPS III, za koju se prva lansiranja očekuju tek nakon 2010. godine.

3.3 Kontrolni segment sistema

Kontrolni GPS segment (OCS) zadužen je za kompletno upravljanje satelitskim operacijama, i u njegove osnovne zadatke spada:

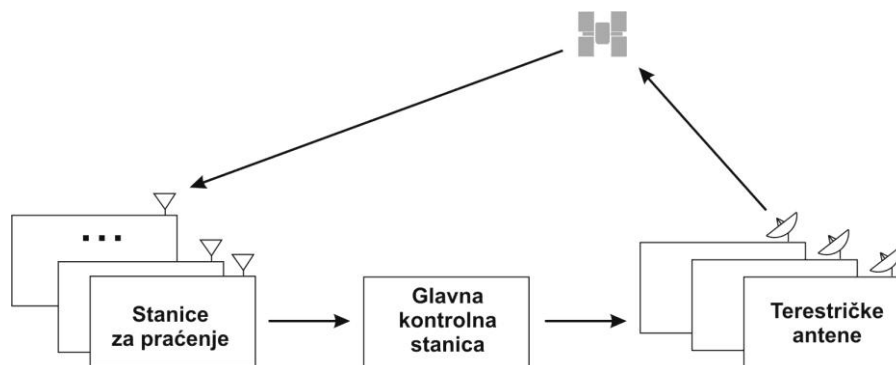
- praćenje satelitskih orbita i izvođenje satelitskih manevara,
- praćenje i održavanje ispravnog funkcionisanja satelita,
- održavanje GPS vremena,
- predikcija satelitskih efemerida i parametara časovnika,
- ažuriranje satelitskih navigacionih poruka,



Slika 3.3. Raspored stanica kontrolnog GPS segmenta (crni krugovi). Stanice u nadležnosti NGA (beli krugovi) nisu formalno u sastavu kontrolnog segmenta.

U središtu kontrolnog segmenta je glavna kontrolna stanica (MCS) smeštena u vazduhoplovnoj bazi Schriever, Colorado Springs, koja obezbeđuje sve neophodne komandne i kontrolne funkcije. Pored nje, satelitski signali se kontinuirano primaju na još pet stanica, globalno raspoređenih po longitudi (slika 3.3): Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein, Hawaii i Cape Canaveral. Sve ove stanice za praćenje opremljene su GPS prijemnicima koje kontrolišu cezijumski atomski standardi, meteorološkim senzorima i uređajima za komunikaciju sa glavnom kontrolnom stanicom preko terestričkih i satelitskih linkova. Četiri stanice za praćenje imaju velike terestričke antene kojima se ostvaruje veza sa GPS satelitima u S-opsegu radio frekvencija. DoD geoprostorna agencija (NGA) takođe upravlja određenim brojem svojih stanica za praćenje, ali one nisu formalno deo kontrolnog segmenta već se koriste za naknadnu analizu kvaliteta.

Slika 3.4 ilustruje elemente kontrolnog segmenta i njihove funkcije. Opažanja sa stanica za praćenje prosleđuju se glavnoj kontrolnoj stanici, gde se na osnovu



Slika 3.4. Elementi kontrolnog GPS segmenta i njihove funkcije.

njih određuju i prognoziraju orbite GPS satelita i stanja njihovih časovnika. GPS vreme definiše odabrani skup atomskih časovnika na stanicama za praćenje, tako da se sinhronizacija satelitskih časovnika vrši ustvari računanjem koeficijenata polinoma koji modeliraju njihova odstupanja. Prognoziranje satelitske efemeride i koeficijenti časovnika upućuju se potom iz glavne kontrolne stanice u jednu od terestričkih antena koja ih radio putem prosleđuje satelitskim memorijama. Ovo ažuriranje navigacionih poruka vrši se još uvek najmanje jednom dnevno, iako sateliti generacije Block IIR i IIF imaju takozvane Autonav mogućnosti međusobne komunikacije koje znatno redukuju potrebu za čestim kontaktima sa kontrolnim segmentom.

Potencijalne mere za povećanje kvaliteta kontrolnog segmenta obuhvaćene su u takozvanoj DoD inicijativi za poboljšanje GPS tačnosti (AII). Tim dokumentom se pre svega predlaže ravnopravno uključivanje podataka jednog broja NGA stanica za praćenje u proces predikcije satelitskih efemerida i stanja časovnika. Na taj način se omogućuje kontinuirano praćenje svih satelitskih signala i obezbeđuje veća pouzdanost rezultata. AII takođe predviđa i proširenje područja pokrivenosti mreže terestričkih antena jer je postojeća infrastruktura takva da GPS satelit može biti izvan njihovog radio vidokruga i do dva časa.

3.4 Korisnički segment sistema

Današnju globalnu rasprostranjenost i ogroman uspeh u civilnoj primeni, GPS duguje pre svega revoluciji u tehnologiji integrisanih kola koja je GPS prijemnike učinila kompaktnim, portabilnim i za red veličine jeftinijim nego što se to uopšte moglo zamisliti pre dve decenije.

U početku je, međutim, situacija bila potpuno drugačija. Korisnički segment je ustvari DoD koncept u okviru nacionalnog odbrambenog programa koji predviđa da GPS prijemnici budu integrisani u svaki značajniji odbrambeni sistem. Stoga je vojni sektor ne samo kategorički odbijao svaku pomisao na mogućnost ozbiljne civilne eksploatacije svog sistema, nego je i nametao tako oštra ograničenja da su prvi proizvođači civilnih GPS prijemnika imali obavezu da se registruju kao proizvođači vojne opreme. Srećom, tenzije su vremenom popuštale, tako da je prvobitni odnos 90% vojnih prema 10% civilnih korisnika danas upravo obrnut.

Prvi set GPS prijemnika izrađen je za potrebe DoD u fazi testiranja izvodljivosti NAVSTAR sistema. Satelitsku konstelaciju je u to vreme činilo svega nekoliko satelita Block I, a sistem je bio više od deset godina daleko od operativne upotrebe. Potencijalno tržište automobilske navigacije još uvek nije bilo spremno za masovnu primenu jer nisu postojale odgovarajuće digitalne karte i baze podataka. Interesantno je, međutim, da su čak i u tim uslovima prepoznate velike mogućnosti sistema za geodetsko korišćenje.

Prvobitno tržište civilne GPS primene bilo je ograničeno i skoncentrisano na precizno pozicioniranje. Prvi civilni GPS prijemnici sa takvim mogućnostima,

Macrometer V-1000 i Texas Instruments TI 4100, pojavili su se 1982. godine. Bili su to po današnjim standardima ogromni, skupi uređaji, težine više desetina kilograma i potrošnje snage od preko 100 W, ali su u svoje vreme predstavljali revolucionarnu novinu demonstrirajući mogućnost relativnog pozicioniranja sa milimetarskom tačnošću.

Kada je 1989. godine otpočelo lansiranje Block II satelitske generacije uz najavu potpune operativnosti sistema, proizvođači GPS prijemnika ubrzano su se orijentisali na istraživanje i razvoj, predviđajući ogromno tržište i širok spektar primene. Tehnologija je u kratkom roku toliko napredovala da je industrijska proizvodnja već 1992. godine mogla da ponudi masovnom tržištu ručne GPS prijemnike po prihvatljivim cenama. Od 1997. godine proizvode se prijemnici džepnog formata sa napajanjem na alkalne baterije, a od 2000. godine GPS čipovi se ugrađuju u ručne časovnike i mobilne telefone. Minijaturizacija je dostigla takav stepen da je GPS postao ne samo deo svakodnevnog života, već i suštinski element javne i komercijalne infrastrukture.

4 GPS merenja i izvori grešaka

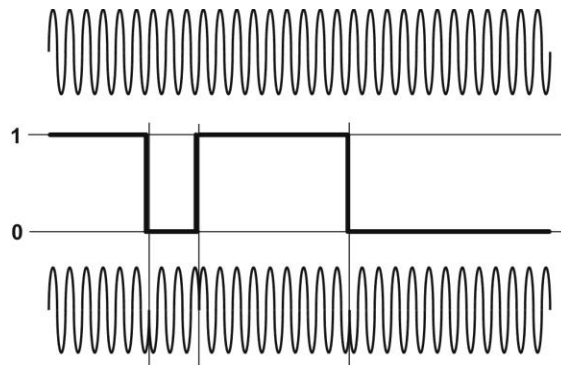
4.1 Princip kodnih i faznih merenja

GPS signali. GPS sateliti emituju signale koristeći dve frekvencije iz L-opsega, pod nazivom Link 1 (L1) i Link 2 (L2), koje se nalaze unutar UHF frekvencijskog područja:

$$\begin{aligned} \text{L1: } f_{L1} &= 1575.42 \text{ MHz} \\ \text{L2: } f_{L2} &= 1227.60 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Na frekvenciji L1 emituju se dva signala, od kojih je prvi za civilno korišćenje, a drugi je namenjen DoD ovlašćenim korisnicima. Signalu na L2 mogu da pristupe samo ovlašćeni korisnici. Svaki signal sastoji se od sledeće tri komponente:

- *Noseći talasi.* To su jednostavno čisti sinusni radio talasi frekvencije f_{L1} ili f_{L2} . Odgovarajuće talasne dužine iznose $\lambda_{L1} = 19.0$ cm i $\lambda_{L2} = 24.4$ cm.
- *Kodovi.* Predstavljaju ih jedinstveni binarni nizovi nula i jedinica, koji omogućavaju GPS prijemnicima da trenutno odrede vreme puta signala. Smenjivanje pojedinačnih nula i jedinica izgleda nasumično i ne odaje nikakvu pravilnost, zbog čega se ovi nizovi nazivaju još i pseudoslučajnim (PRN) kodovima. Međutim, njihova svojstva su ustvari rezultat pažljivo osmišljenog matematičkog algoritma koji omogućuje da ih sateliti mogu emitovati simultano na istoj frekvenciji. Svaki GPS satelit emituje dve vrste kodova: javno dostupne C/A kodove i zaštićene precizne kodove P(Y). C/A kod je niz od 1023 bitova (čipova), koji se ponavlja svake milisekunde. Frekvencija smenjivanja čipova iznosi 1.023 MHz, što znači da je trajanje jednog čipa oko 1 μ s, a njegova širina (talasna dužina) oko 300 m. Svakom GPS satelitu dodeljen je jedinstveni C/A kod. P(Y) kod je, nasuprot tome, veoma dugačak niz od oko 10^{14} čipova sa frekvencijom smenjivanja 10.23 MHz i talasnom dužinom od oko 30 m. Svakom GPS satelitu dodeljen je deo kodne sekvence koji se ponavlja nakon nedelju dana. Od 1994. godine ne emituju se čisti P kodovi već šifrirani Y kodovi, odakle i potiče oznaka P(Y).
- *Navigacioni podaci.* To je binarno kodirana poruka koja se sastoji od podataka o stanju ispravnosti satelita, njegovim efemeridama (položajima i brzinama), parametrima časovnika i almanahu (približnim efemeridama svih ostalih satelita u konstelaciji). Bitovi navigacione poruke emituju se na frekvenciji od svega 50 Hz, što znači da je trajanje jednog navigacionog bita 20 ms. Potrebno je ukupno 12.5 minuta da se emituje cela navigaciona poruka, ali se podaci koji su kritični za pozicioniranje i navigaciju ponavljaju svakih 30 s.



Slika 4.1. Princip binarnog faznog kodiranja (BPSK). Promene vrednosti bitova sa 0 na 1 i obrnuto, menjaju fazu nosećeg talasa za 180° .

Sve tri komponente signala koherentno su izvedene iz oscilacija jednog od atomskih standarda u satelitu čija osnovna frekvencija, f_0 , iznosi 10.23 MHz. Odnos frekvencija pojedinih komponenti prema osnovnoj frekvenciji prikazan je u tabeli 4.1.

Kompletan GPS signal dobija se kombinovanjem komponenti u procesima binarnog sabiranja i fazne modulacije. Prvo se navigaciona poruka binarno kombinuje sa kodom: rezultujući bit je 0 ako su navigacioni bit i kodni čip jednaki (oba su 0 ili su oba 1), a 1 ako su navigacioni bit i kodni čip različiti. Tako dobijena kombinacija ugrađuje se potom u noseći talas modulisanjem njegove faze: promene vrednosti bita sa 0 na vrednost 1 i obrnuto menjaju fazu nosećeg sinusnog talasa za 180° . Slika 4.1 ilustruje ovaj specifični način modulacije koji se naziva binarnim faznim kodiranjem (BPSK).

Modulisanje nosećeg talasa kodovima ima za posledicu da se snaga signala, koja je pre modulacije skoncentrisana u jednoj frekvenciji, raspodeljuje na znatno širi frekvencijski opseg (oko 2 MHz za signal sa C/A kodom, odnosno oko 20 MHz za signale sa P(Y) kodom). Iako ukupna snaga signala ostaje ista, njena spektralna gustina postaje na taj način mnogo niža od pozadinskog šuma. Gustina snage se u prijemniku može ponovo skoncentrisati na jednu frekvenciju ako su kodovi

Tabela 4.1. Odnos fekvencija komponenti signala prema osnovnoj frekvenciji.

Komponenta signala	Frekvencija
Noseći talas L1	$154 \cdot f_0$
Noseći talas L2	$120 \cdot f_0$
C/A kod	$f_0/10$
P(Y) kod	$1 \cdot f_0$
Navigaciona poruka	$f_0/204600$

poznati. Signali ovakvih svojstava nazivaju se signalima širokog spektra, i nalaze veliku primenu u komunikaciji i navigaciji.

PRN kodovi s vrednostima ± 1 dizajnirani su tako da poseduju dva specijalna korelaciona svojstva. Prvo, kroskorelacija dva kodna niza ima zanemarljivo malu vrednost. Drugim rečima, zbir proizvoda članova dve kodne sekvence koje su relativno pomerene jedna u odnosu na drugu približno je jednak nuli. To na primer znači da za C/A kodove dva proizvoljna satelita k i l važi da je:

$$\sum_{i=0}^{1022} x^{(k)}(i) \cdot x^{(l)}(i+n) \approx 0 \quad (4.2)$$

za svako n , pri čemu je $x(1023 + m) = x(m)$ jer se kodovi ponavljaju. Drugo, PRN kodna sekvenca takođe ima zanemarljivo malu autokorelaciju za svako n , osim za $n = 0$, kada se poklapa sama sa sobom:

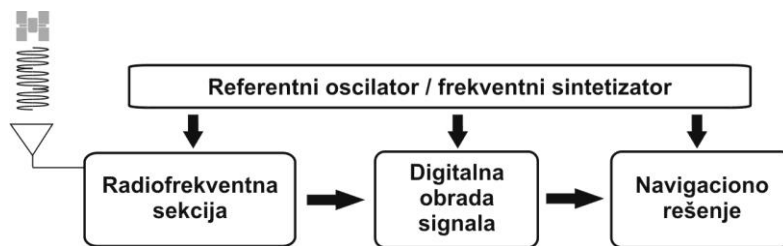
$$\sum_{i=0}^{1022} x^{(k)}(i) \cdot x^{(k)}(i+n) \approx 0. \quad (4.3)$$

Upravo zahvaljujući kroskorelacionim i autokorelacionim svojstvima kodova, GPS prijemnici su u stanju da detektuju signale, identifikuju satelite koji ih emituju i vrše merenje pseudoduzina.

GPS prijemnici. Svaki standardni GPS prijemnik obavlja sledećih pet osnovnih funkcija:

- prijem signala koje emituju sateliti,
- razdvajanje signala po pojedinim satelitima,
- merenje vremena puta signala i Doplerovog pomaka,
- dekodiranje navigacione poruke,
- određivanje položaja, brzine i vremena.

Slika 4.2 ilustruje opštu funkcionalnu shemu GPS prijemnika i komponente u kojima se izvršavaju ove operacije. Prijem signala vrši se u anteni, u kojoj se prvo filtriraju i pojačavaju. GPS antene su po konstrukciji omnidirekzione, jer moraju prihvatati signale sa satelita koji su raspoređeni svuda iznad lokalnog horizonta. Po prolasku kroz antenu signali dospevaju u radiofrekventnu sekciju prijemnika, gde se dodatno filtriraju i pojačavaju, i tom prilikom im se frekvencija snižava na vrednost koja je pogodnija za digitalizaciju analogno-digitalnim pretvaračem (ADC). U narednoj sekciji prijemnika, koja je posvećena digitalnoj obradi, vrši se merenje vremena puta, određivanje Doplerovog pomaka i dekodiranje navigacione poruke za svaki satelit čiji se signal prati. Poslednja sekcija obrađuje izvršena merenja i navigacione podatke u skladu sa predviđenom namenom prijemnika. Položaj, brzina i vreme su najčešći rezultati obrade, osim kod specifičnih primena



Slika 4.2. Funkcionalna shema GPS prijmnika.

kao što su transfer vremena, osmatranje jonosferske aktivnosti ili jednostavno prikupljanje podataka. Celim postupkom upravlja mikroprocesor, a obezbeđuje ga referentni oscilator prijmnika preko niza takozvanih numerički kontrolisanih lokalnih časovnika (NCO).

Postupak kojim prijmnik meri vreme puta signala i određuje njegov Doplerov pomak konceptualno je veoma jednostavan, kao što ilustruje slika 4.3. Prijmnik ustvari generiše kopiju C/A kodnog niza i vremenski je pomera u odnosu na originalni C/A kodni niz koga prima sa satelita, prateći pri tome neprekidno vrednost korelacione funkcije. Kopija i original koda vremenski su poravnate onda kada vrednost korelacione funkcije dostigne maksimum. Ukupan vremenski pomak do momenta poravnanja predstavlja ustvari vreme potrebno signalu da od satelitske antene stigne do antene prijmnika. Naknadno množenje brzinom prostiranja radio talasa daje kodnu pseudoduzinu. Ceo proces odvija se u povratnom kontrolnom sistemu implementiranom u vidu kodnog filtera (DLL). Direktno korišćenje P(Y) koda za merenje vremena puta signala nije moguće zbog njogove dužine, već se izvodi posredno uz pomoć podataka iz navigacione poruke i poznatih vremenskih relacija između C/A i P(Y) kodova.

Nakon poravnanja i merenja vremena puta kodovi se uklanjaju iz signala, tako da preostaje samo noseći talas modulisan navigacionom porukom. On se dalje prati u drugom povratnom kontrolnom sistemu koji se naziva faznim filterom (PLL). U tu svrhu prijmnik generiše kopiju nosećeg talasa i menja mu frekvenciju sve dok se ne poklopi sa frekvencijom i fazom originalnog nosećeg talasa. Tokom tog procesa istovremeno se identifikuju bitovi navigacionih podataka. Razlika između frekvencije kopije i originala nosećeg talasa pokazuje koliko je satelitski noseći talas Doplerski pomeren usled relativnog kretanja satelita i prijmnika. Razlika



Slika 4.3. Princip merenja GPS prijmnika upoređenjem kopije i originala signala.

između faze kopije i originala nosećeg talasa se u trenutku prvog merenja može odrediti samo u okviru jednog faznog ciklusa zbog periodičnosti sinusne funkcije. Od tog momenta poseban registar počinje da uvećava ili smanjuje svoj brojač kad god se fazna razlika promeni za ceo fazni ciklus. Nepoznati ceo broj faznih ciklusa na početku merenja naziva se faznom neodređenošću. Množenje izmerene fazne razlike talasnom dužinom radio talasa daje faznu pseudodužinu, a kada se talasnom dužinom pomnoži izmereni Doplerski pomak dobija se njena brzina promene.

Kodne i fazne pseudodužine predstavljaju meru istih rastojanja, ali između njih postoje dve bitne razlike. Prva se odnosi na tačnost. Rezolucija sa kojom komponente prijemnika mere vreme puta signala i njegovu fazu iznosi oko 1% odgovarajuće talasne dužine, što znači da je tačnost kodnih pseudodužina na metarskom, a faznih pseudodužina na milimetarskom nivou. Druga razlika sastoji se u tome da su kodne pseudodužine potpuna mera rastojanja između prijemnika i satelita, dok su fazne pseudodužine neodređene zbog nepoznatog celog broja faznih ciklusa.

Poslednja operacija koju izvodi svaki standardni GPS prijemnik sastoji se u određivanju takozvanog PVT navigacionog rešenja (položaj, brzina, vreme). U principu, simultano merenje kodnih pseudodužina i Doplerskih pomaka do najmanje četiri satelita dovoljno je da korisnik može odrediti položaj, brzinu i stanje časovnika prijemnika. Algoritam se zasniva na matematičkoj obradi rezultata merenja uz pomoć informacija iz dekodiranih navigacionih poruka o satelitskim položajima i brzinama. Kvalitet rešenja zavisi od tačnosti merenja, broja satelita i njihovog rasporeda u odnosu na korisnika. GPS prijemnik vrši PVT računanje automatski, kontinualno i gotovo trenutno.

4.2 Greške satelitskog porekla

Podaci o satelitskim orbitama i časovnicima rezultat su određivanja kontrolnog GPS segmenta na osnovu opažanja sa stanica za praćenje. Kontrolni GPS segment koristi poseban model kojim prognozira vrednosti ovih parametara, da bi ih potom prosledio satelitima koji ih emituju u obliku navigacione poruke. Satelitske efemeride i koeficijenti časovnika, koji se koriste u trenutku GPS merenja, opterećeni su dakle i greškama određivanja i greškama predikcije.

Greška satelitskih efemerida. Tačnost određivanja efemerida GPS satelita koju kontrolni segment rutinski postiže iznosi danas 1 – 2 m. To su takozvane emitujuće efemeride. Istog reda veličine su i greške merenih pseudodužina. Međutim, pošto emitujuće efemeride predstavljaju ustvari prognozirane vrednosti, kontrolni segment ih povremeno ažurira (dva puta dnevno), jer im tačnost opada sa protokom vremena.

Nezavisno od kontrolnog GPS segmenta, postoji nekoliko civilnih naučnih organizacija koje se takođe bave određivanjem orbita GPS satelita. Najpoznatija je

Međunarodna GPS služba (IGS), koja raspolaže sa preko 200 stanica ravnomerno raspoređenih po čitavom svetu sa kojih se permanentno vrše GPS opažanja. IGS određuje takozvane precizne efemeride, čija je tačnost bolja od 5 cm. Precizne IGS efemeride se mogu slobodno preuzeti sa Interneta, ali za razliku od emitujućih efemerida nisu dostupne u realnom vremenu.

Greške satelitskih časovnika. GPS sateliti su opremljeni atomskim rubidijumskim i cezijumskim oscilatorima (časovnicima) koji veoma stabilno održavaju svoju frekvenciju tokom dugog vremenskog perioda. Međutim, i pored visoke tačnosti, ovi časovnici odstupaju od sistemskog GPS vremena za neki mali iznos koji, uz to, nije ni konstantan.

Kontrolni GPS segment određuje pored efemerida i stanje časovnika svakog satelita. Odstupanje pokazivanja časovnika od sistemskog GPS vremena Δt modelira se polinomom drugog stepena:

$$\Delta t = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2, \quad (4.4)$$

pri čemu a_0 , a_1 i a_2 predstavljaju koeficijente, a t_0 je referentno vreme. Pošto sateliti emituju koeficijente u okviru navigacione poruke, korisnik je u stanju da u svakom trenutku vremena popravi pokazivanje časovnika satelita. Koeficijenti nisu apsolutno tačni jer ih kontrolni segment ocenjuje na osnovu merenja, tako da i popravljena očitavanja satelitskih časovnika sadrže grešku koja se kreće u rasponu 1 – 2 ns. Množenjem brzinom svetlosti dobija se da je greška pseudoduzina usled greške satelitskih časovnika reda veličine 1 m.

4.3 Greške sredine prostiranja signala

Na svom putu od satelitskih antena do prijemnika GPS signali prolaze delom kroz praktično prazan vasioni prostor, a delom kroz Zemljin atmosferski omotač. Pošto se brzina moduliranih nosećih talasa menja pri prolasku kroz medijum koji nije vakuum, to unosi dodatnu nesigurnost u merenje vremena puta signala.

U zavisnosti od toga koja se pojava ispituje, Zemljin atmosferski omotač može se podeliti u različite slojeve. Sa stanovišta kretanja elektromagnetnih talasa koji imaju GPS frekvencije, Zemljina atmosfera deli se na jonosferu i troposferu. Ova dva atmosferska sloja karakteristična su po tome što se u njima GPS signali različito ponašaju.

Jonosfersko kašnjenje signala. Zemljinu jonosferu čine viši delovi atmosfere (od 50 km do 1500 km), u kojima je proces jonizacije dovoljnog intenziteta da utiče na prostiranje radio talasa. Sam proces jonizacije sastoji se u odvajanju elektrona iz atoma i molekula gasova atmosfere. Slobodni elektroni koji više nisu u sastavu atoma i molekula nazivaju se jonima. Njihovo stvaranje odvija se pod uticajem

raznih oblika Sunčevog zračenja. U tom smislu najznačajniji je takozvani F jonosferski region koji počinje na visini od oko 150 km, a u kojem na proces jonizacije prevashodno utiče Sunčevo ultraljubičasto zračenje. Jonizacija je najintenzivnija tokom dana i dostiže maksimum kasno popodne. Međutim, tokom noći nema direktnog Sunčevog uticaja, tako da se veliki broj slobodnih elektrona ponovo vezuje za atome.

Osnovnu kvantitativnu karakteristiku stanja jonosfere predstavlja gustina elektrona, odnosno broj slobodnih elektrona u jedinici zapremine, N_e . Ova gustina zavisi od mnogih faktora, kao što su doba dana ili godine, magnetne bure ili jedanaestogodišnji ciklus Sunčevih pega. Varijacija gustine elektrona može dostići i nekoliko redova veličine.

Jonosfera dvojako utiče na GPS signale, zato što elektromagnetni talasi koji napuštaju satelitske GPS antene predstavljaju kombinaciju nosećih talasa visoke frekvencije, i fazne modulacije pseudoslučajnim kodovima niske frekvencije. To znači da se prilikom prolaska GPS signala kroz jonosferu razlikuju dva indeksa prelamanja: grupni indeks prelamanja n_g i fazni indeks prelamanja n_f . Izrazi za ove indekse prelamanja glase:

$$n_g = 1 + \frac{40.3N_e}{f^2}, \quad n_f = 1 - \frac{40.3N_e}{f^2}, \quad (4.5)$$

pri čemu f označava frekvenciju, a 40.3 predstavlja numeričku vrednost konstante. Sredine, kao što je jonosfera, čiji indeks prelamanja zavisi od frekvencije, nazivaju se disperzivnim sredinama.

Iz jednačine (4.5) sledi da će prisustvo jonosfere uzrokovati kašnjenje modulacione faze i ubravanje faze nosećeg talasa. To znači da će izmerene kodne pseudodužine biti veće, a fazne pseudodužine manje od istinite vrednosti. Isti izraz pokazuje da je za fazna merenja jonosferski indeks prelamanja manji od jedinice, odnosno da se faza nosećeg GPS talasa kreće brže od svetlosti. Ova činjenica nije u suprotnosti sa teorijom relativnosti, jer noseći talasi sami po sebi ne sadrže nikakvu informaciju. Komunikacija koja se ostvaruje pseudoslučajnim kodovima ne može, međutim, da se odvija brže od svetlosti.

Greška izmerenih GPS pseudodužina usled jonosferskog kašnjenja zavisi od zenitnog odstojanja pravca ka satelitu čiji se signali primaju. Pseudodužine u pravcu zenita mogu imati grešku zbog jonosferske refrakcije 10 – 30 m. Međutim, kada se opaža satelit koji je blizu horizonta, greška dostiže i 150 m, jer signal u tom slučaju duže putuje kroz jonosferu.

Troposfersko kašnjenje signala. Atmosferski sloj od fizičke površi Zemlje do visine od približno 80 km naziva se neutralnom atmosferom, i obuhvata tri temperaturno razdvojena regiona: troposferu, stratosferu i deo mezosfere. Za razliku od jonosfere, neutralna atmosfera nije disperzivna sredina. Njen indeks

prelamanja n zavisi samo od aktuelnih atmosferskih parametara, temperature T , atmosferskog pritiska P i parcijalnog pritiska vodene pare e :

$$n = 1 + c_1 \frac{P}{T} + c_2 \frac{e}{T^2}, \quad (4.6)$$

gde c_1 i c_2 predstavljaju konstante. Neutralni atmosferski region često se u celini naziva troposferom zbog dominantnog uticaja na prostiranje radio talasa, iako troposfera u užem smislu reči obuhvata samo najnižih 10 km atmosfere gde temperaturni gradijent u proseku iznosi $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$.

Troposfera sadrži 80% ukupne molekularne mase atmosfere, i gotovo celokupnu količinu vodene pare i aerosola. Suvi vazduh troposfere sastoji se od mešavine gasova azota, kiseonika i argona, koja obuhvata 99.95 ukupne zapremine. Prisustvo vodene pare uglavnom je rezultat isparavanja vodenih površina i vegetacije, i njen sadržaj u ukupnoj zapremini iznosi od 1% do 4%. Za razliku od suvog vazduha koji predstavlja veoma konzistentnu mešavinu gasova, vodena para skoncentrisana je u najnižih 4 km troposfere, gde varira kako vremenski tako i prostorno.

Greška merenja pseudodužina usled uticaja troposferske refrakcije takođe zavisi od zenitnog odstojanja. U pravcu zenita greška iznosi oko 2.3 m, dok za opažanja prema satelitima koji su blizu horizonta dostiže i 15 m.

4.4 Greške prijmnika

U ovu grupu spada merni šum prijmnika koji utiče na preciznost kodnih i faznih merenja, kao i uticaj višestruke refleksije GPS signala od prirodnih ili veštačkih površina u okolini prijmnika.

Šum prijmnika pojavljuje se zbog toga što u elektronskim komponentama uvek ima kretanja elektrona, a time i električne struje. Kodne pseudodužine imaju zbog toga preciznost od oko 1 m, dok je preciznost faznih pseudodužina 1 – 2 mm.

Višestruka refleksija je pojava da GPS antena pored toga što prima direktno signale sa GPS satelita, prima i signale koji se odbijaju od okolnih glatkih prirodnih ili veštačkih površina. Direktni i odbijeni signali mešaju se u anteni, zbog čega kodne pseudodužine mogu imati grešku od nekoliko metara. Fazne pseudodužine, međutim, teorijski ne mogu imati grešku usled višestruke refleksije veću od četvrtine talasne dužine (oko 5 cm). Za razliku od šuma prijmnika koji se ne može nikako otkloniti, uticaj višestruke refleksije moguće je znatno smanjiti ako se GPS antena ne postavlja u blizini reflektujućih površi.

5 Matematički modeli GPS merenja

5.1 Funkcionalni model pseudodužina

Kao što je već rečeno, GPS prijemnik meri kodne pseudodužine do satelita na taj način što upoređuju primljene kodove sa kodovima koje sami generišu, čime efektivno mere ustvari vreme puta signala. Fazne pseudodužine mere se tako što GPS prijemnik upoređuje fazu primljenog nosećeg talasa sa fazom nosećeg talasa kojeg sam generiše, čime efektivno meri faznu razliku. Funkcionalni model ovih pseudodužina predstavlja ustvari funkcionalnu vezu između merenih i nepoznatih veličina.

Funkcionalni model kodnih pseudodužina. Kodnu pseudodužinu od stanice A do satelita i koja je u trenutku GPS vremena t izmerena na frekvenciji f (ili 1 ili 2) označavaćemo sa $P_{A,f}^i(t)$. Ona se dobija kada se brzinom svetlosti c_0 pomnoži razlika čitanja časovnika prijemnika t_A u trenutku prijema t , i časovnika satelita t^i u trenutku kada je signal emitovan $t - \tau$:

$$P_{A,f}^i(t) = c_0[t_A(t) - t^i(t - \tau)]. \quad (5.1)$$

Pri tome τ označava istinito vreme puta signala od satelita do prijemnika. Visina satelita nad Zemljinom površi iznosi oko 20000 km, tako da je vreme puta signala manje od 0.1 s.

Pošto časovnici prijemnika i satelita odstupaju od sistemskog vremena, njihova čitanja u trenucima t i $t - \tau$ iznosiće:

$$\begin{aligned} t_A(t) &= t + \delta t_A(t) \\ t^i(t - \tau) &= t - \tau + \delta t^i(t - \tau) \end{aligned} \quad (5.2)$$

gde su sa δt_A i δt^i označene greške časovnika prijemnika i satelita u odgovarajućim trenucima vremena. Zamenom izraza (5.2) u izraz (5.1) dobija se:

$$P_{A,f}^i(t) = c_0\tau + c_0[\delta t_A(t) - \delta t^i(t - \tau)]. \quad (5.3)$$

Proizvod brzine svetlosti i vremena puta $c_0\tau$ daje ukupan put koji je signal prešao od satelita do prijemnika, prolazeći naravno tom prilikom kroz jonosferu i troposferu. Ovaj put je jednak zbiru pravolinijskog rastojanja r između satelita i prijemnika, troposferskog kašnjenja T i jonosferskog kašnjenja I :

$$c_0\tau = r_A^i(t, t - \tau) + T_A^i(t) + I_{A,f}^i(t). \quad (5.4)$$

Primitimo da u članu za jonosfersko kašnjenje stoji indeks frekvencije f zbog toga što je jonosfera disperzivna sredina. Ako se radi jednostavnosti izbacimo argument vremena, i ako se ima u vidu da kodna pseudodužina sadrži i grešku merenja ε , dobija se konačni oblik funkcionalnog modela:

$$P_{A,f}^i = r_A^i + c_0 \delta t_A - c_0 \delta t^i + T_A^i + I_{A,f}^i + \varepsilon_{A,f,P}^i. \quad (5.5)$$

Funkcionalni model faznih pseudodužina. Faznu pseudodužinu od stanice A do satelita i koja je u trenutku GPS vremena t izmerena na frekvenciji f (ili 1 ili 2) označavaćemo sa $L_{A,f}^i(t)$. Ona se dobija kada se talasnom dužinom λ pomnoži razlika faze nosećeg talasa prijemnika φ_A u trenutku prijema t , i faze nosećeg talasa satelita φ^i u trenutku kada je signal emitovan $t - \tau$:

$$L_{A,f}^i(t) = \lambda_f [\varphi_{A,f}(t) - \varphi_f^i(t - \tau)] + \lambda_f N_{A,f}^i. \quad (5.6)$$

Veličina N predstavlja takozvanu faznu neodređenost. Ona se pojavljuje zato što je noseći talas jednostavni periodični sinusni talas, tako da prijemnik može da meri faznu razliku samo u okviru jedne talasne dužine. Fazna neodređenost ostaje konstantna, odnosno ne zavisi od vremena, sve dok prijemnik neprekidno prati signal sa konkretnog satelita. Bilo kakav prekid praćenja signala znači potpuno novu faznu neodređenost.

Imajući u vidu da je faza jednaka proizvodu iz frekvencije i vremena, faze nosećih talasa prijemnika i satelita mogu se napisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} \varphi_{A,f}(t) &= f_f t_A(t) = f_f [t + \delta t_A(t)] \\ \varphi_f^i(t - \tau) &= f_f t^i(t - \tau) = f_f [t - \tau + \delta t^i(t - \tau)] \end{aligned} \quad (5.7)$$

Kada se izraz (5.7) zameni u izrazu (5.6), i pri tome uzme u obzir fundamentalna relacija između brzine svetlosti, frekvencije i talasne dužine $c_0 = \lambda f$, dobija se:

$$L_{A,f}^i(t) = c_0 \tau + c_0 [\delta t_A(t) - \delta t^i(t - \tau)] + \lambda_f N_{A,f}^i. \quad (5.8)$$

Postupajući dalje kao u slučaju kodnih pseudodužina, dolazi se do funkcionalnog modela faznih pseudodužina sledećeg oblika:

$$L_{A,f}^i = r_A^i + c_0 \delta t_A - c_0 \delta t^i + T_A^i - I_{A,f}^i + \lambda_f N_{A,f}^i + \varepsilon_{A,f,L}^i. \quad (5.9)$$

Upoređenje funkcionalnih modela kodnih i faznih pseudodužina, (5.5) i (5.9), otkriva da oni imaju veoma sličnu strukturu, ali i da između njih postoje sledeće razlike:

- Kod kodnih pseudodužina je znak člana koji opisuje jonosfersku refrakciju pozitivan, dok je kod faznih pseudodužina negativan. Ova razlika potiče od činjenice da prisustvo jonosfere produžava kodne pseudodužine, a skraćuje fazne pseudodužine.
- Kod faznih pseudodužina postoji član sa faznom neodređenošću, dok kod kodnih pseudodužina tog člana nema. Prema tome, kodne pseudodužine predstavljaju punu meru rastojanja između satelita i prijemnika, za razliku od faznih pseudodužina koje sadrže nepoznati broj talasnih dužina.
- Slučajne greške merenja kodnih i faznih pseudodužina razlikuju se za dva do tri reda veličine. Slučajna greška merenja kodnih pseudodužina je metarskog nivoa, dok su kod faznih pseudodužina u pitanju milimetri.

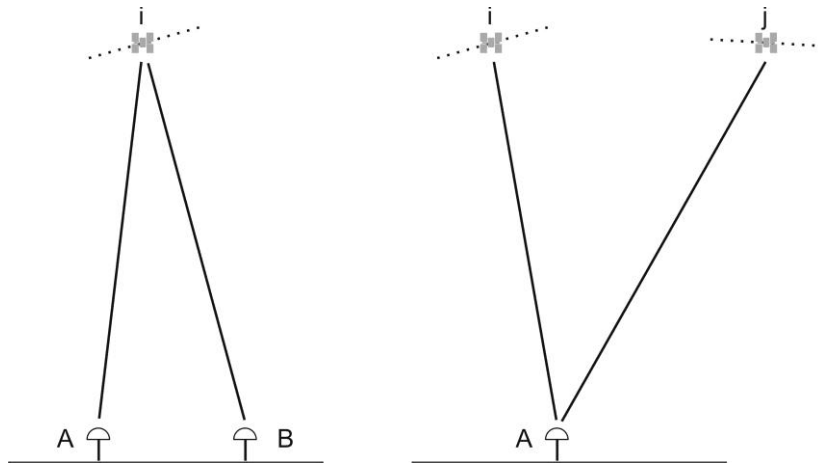
Na osnovu navedenih razlika može se reći da kodne pseudodužine predstavljaju potpuna, ali neprecizna rastojanja, a fazne pseudodužine veoma precizna ali zato neodređena rastojanja. Kada se, međutim, na neki način reši fazna neodređenost odnosno ceo broj talasnih dužina N , fazne pseudodužine pretvaraju se u potpuna, milimetarski precizna rastojanja, kojima se u geodeziji mogu određivati isto tako milimetarski precizne koordinate tačaka.

Preostaje još pitanje gde su u funkcionalnim modelima (5.5) i (5.9) koordinate tačke A ? One su implicitno sadržane u geometrijskom rastojanju r . Ako su $x_A(t)$, $y_A(t)$ i $z_A(t)$ koordinate tačke A u trenutku prijema, a $x^i(t - \tau)$, $y^i(t - \tau)$ i $z^i(t - \tau)$ koordinate satelita i u trenutku emitovanja signala, tada se rastojanje r uvek može napisati u obliku:

$$r_A^i = \sqrt{\left[x_A(t) - x^i(t - \tau) \right]^2 + \left[y_A(t) - y^i(t - \tau) \right]^2 + \left[z_A(t) - z^i(t - \tau) \right]^2} . \quad (5.10)$$

5.2 Proste, dvostruke i trostruke razlike

Kada je u pitanju korišćenje GPS u geodetske svrhe, najkorisniju informaciju u funkcionalnim modelima merenih kodnih i faznih pseudodužina predstavlja geometrijsko rastojanje r jer su u njemu sadržane koordinate tačke čiji se položaj određuje. Međutim, funkcionalni modeli pokazuju da su u strukturi merenih pseudodužina prisutne razne greške, kao što su odstupanja časovnika, troposferska i jonosferska refrakcija, ili nepoznati ceo broj talasnih dužina. Da bi se obezbedila što viša tačnost određivanja koordinata tačaka, neophodno je da se te greške svedu na najmanju moguću meru, ili po mogućstvu potpuno eliminišu. Najefikasniji način da se to postigne je formiranje linearnih kombinacija merenih pseudodužina u vidu takozvanih prostih, dvostrukih i trostrukih razlika.



Slika 5.1. Ilustracija prostih razlika interferometrijskog tipa (levo) i Doplerskog tipa (desno).

U nastavku ćemo formiranje razlika prikazati na primeru faznih pseudodužina jer se njima postiže geodetska tačnost. Potpuno isti postupci važe i za kodne pseudodužine.

Proste razlike. Proste razlike dobijaju se kada se formira razlika simultano izmerenih pseudodužina od tačaka A i B prema istom satelitu i , ili razlika simultano izmerenih pseudodužina od jedne tačke, na primer A , prema dva satelita i i j . U prvom slučaju radi se o prostim razlikama interferometrijskog tipa. Drugi slučaj predstavljaju proste razlike Doplerskog tipa. Slika 5.1 ilustruje koncept ova dva tipa prostih razlika.

Razmotrimo sada samo proste razlike interferometrijskog tipa, zato što se one gotovo isključivo koriste u geodetske svrhe. Funkcionalni model faznih pseudodužina od tačaka A i B prema istom satelitu i , izmerenih u istom trenutku vremena t , glasi:

$$\begin{aligned} L_{A,f}^i &= r_A^i + c_0 \delta t_A - c_0 \delta t^i + T_A^i - I_{A,f}^i + \lambda_f N_{A,f}^i + \varepsilon_{A,f,L}^i \\ L_{B,f}^i &= r_B^i + c_0 \delta t_B - c_0 \delta t^i + T_B^i - I_{B,f}^i + \lambda_f N_{B,f}^i + \varepsilon_{B,f,L}^i \end{aligned} \quad (5.11)$$

Oduzimanjem ove dve pseudodužine dobija se prosta razlika čiji funkcionalni model ima sledeći oblik:

$$\begin{aligned}
L_{AB,f}^i &= L_{A,f}^i - L_{B,f}^i \\
&= (r_A^i - r_B^i) \\
&\quad + c_0(\delta t_A - \delta t_B) \\
&\quad + (T_A^i - T_B^i) \\
&\quad - (I_{A,f}^i - I_{B,f}^i) \\
&\quad + \lambda_f(N_{A,f}^i - N_{B,f}^i) \\
&\quad + (\varepsilon_{A,f,L}^i - \varepsilon_{B,f,L}^i)
\end{aligned} \tag{5.12}$$

Model proste razlike napisali smo na ovaj način da bi se videlo da sadrži šest članova koje možemo sada ukratko prodiskutovati.

Prvi član modela sastoji se od razlike geometrijskih rastojanja od tačaka A i B prema istom satelitu i . Dok su pojedinačna rastojanja veličine oko 20000 km, njihova razlika je mnogo manja, i iznosi otprilike onoliko koliko je i rastojanje između tačaka A i B .

Drugi član predstavlja razliku odstupanja časovnika prijemnika na tačkama A i B . Kolika će ta razlika biti zavisi od znakova pojedinačnih odstupanja. Savremeni prijemnici ne dopuštaju da im odstupanje časovnika od sistemskog GPS vremena bude veće od 1 ms po apsolutnoj vrednosti, tako da razlika može dostići najviše 2 ms. Međutim, treba imati u vidu da se ova razlika množi brzinom svetlosti, što onda dostiže vrednost i do 600 km! Primitimo da funkcionalni model ne sadrži grešku časovnika satelita.

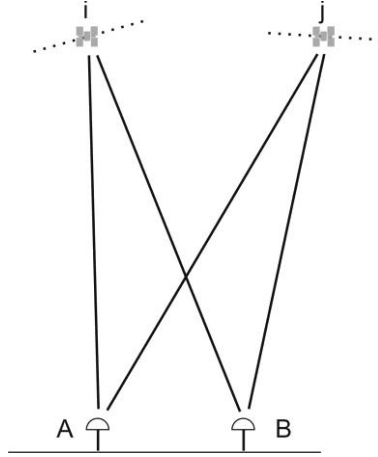
Treći član sastoji se u razlici troposferskih uticaja. Ovi uticaji će na stanicama A i B biti tim sličniji što su stanice bliže jedna drugoj, jer je u normalnim okolnostima rastojanje između stanica od nekoliko kilometara ili nekoliko desetina kilometara svakako malo u poređenju sa rastojanjem do satelita (20000 km).

Četvrti član predstavlja razliku jonosferskih uticaja. Iako se jonosfera može menjati značajnije od troposfere, i za ovaj član važi da je praktično beznačajan kada su stanice A i B na kratkom međusobnom rastojanju.

Peti član je ustvari fazna neodređenost proste razlike. Pošto fazne neodređenosti pseudodužina sa tačaka A i B nemaju između sebe nikakve veze, ovaj član može imati proizvoljno veliku vrednost.

Konačno, šesti član predstavlja slučajnu grešku proste razlike. Pošto pojedinačne greške imaju slučajan karakter, tačnost proste razlike je manja od tačnosti pojedinačnih pseudodužina.

Izraz (5.12) je praktično kompletan funkcionalni model proste razlike. Ako su tačke A i B na kratkom međusobnom rastojanju (na primer manjem od 10 km), troposferski i jonosferski uticaji mogu se zanemariti, tako da funkcionalni model poprima jednostavniji oblik:



Slika 5.2. Ilustracija dvostrukih razlika.

$$L_{AB,f}^i = r_{AB}^i + c_0(\delta t_A - \delta t_B) + \lambda_f N_{AB,f}^i + \varepsilon_{AB,f,L}^i, \quad (5.13)$$

pri čemu smo kod nekih članova upotrebili označavanje kao kod proste razlike. U svakom slučaju, obradom prostih razlika ne određuju se koordinate tačaka A i B , već koordinatne razlike između njih.

Dvostruke razlike. Dvostruka razlika dobija se kada se formira razlika između proste razlike simultano izmerenih pseudodužina od tačaka A i B prema satelitu i , i proste razlike simultano izmerenih pseudodužina od istih tačaka A i B prema drugom satelitu j . Slika 5.2 ilustruje koncept dvostruke razlike.

Za formiranje dvostruke razlike korišćemo kompletan funkcionalni model prostih razlika (5.12). Modeli prostih razlika do satelita i i j glase:

$$\begin{aligned} L_{AB,f}^i &= r_{AB}^i + c_0(\delta t_A - \delta t_B) + T_{AB}^i - I_{AB,f}^i + \lambda_f N_{AB,f}^i + \varepsilon_{AB,f,L}^i \\ L_{AB,f}^j &= r_{AB}^j + c_0(\delta t_A - \delta t_B) + T_{AB}^j - I_{AB,f}^j + \lambda_f N_{AB,f}^j + \varepsilon_{AB,f,L}^j \end{aligned} \quad (5.14)$$

Oduzimanjem ove dve proste razlike dobija se tražena dvostruka razlika čiji je funkcionalni model:

$$\begin{aligned}
L_{AB,f}^{ij} &= L_{AB,f}^i - L_{AB,f}^j \\
&= (r_{AB}^i - r_{AB}^j) \\
&\quad + (T_{AB}^i - T_{AB}^j) \\
&\quad - (I_{AB,f}^i - I_{AB,f}^j) \\
&\quad + \lambda_f (N_{AB,f}^i - N_{AB,f}^j) \\
&\quad + (\varepsilon_{AB,f,L}^i - \varepsilon_{AB,f,L}^j)
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Očigledno je da u dvostrukoj razlici više nisu prisutne ni greške časovnika prijemnika, tako da model sada sadrži ukupno pet članova. Njihova veličina je generalno približna veličini odgovarajućih članova u modelu proste razlike. Kada su, dakle, tačke A i B na kratkom međusobnom rastojanju, tada se troposferski i jonosferski uticaji ponovo mogu zanemariti, tako da pojednostavljeni model dvostruke razlike ima sledeći oblik:

$$L_{AB,f}^{ij} = r_{AB}^{ij} + \lambda_f N_{AB,f}^{ij} + \varepsilon_{AB,f,L}^{ij} \tag{5.16}$$

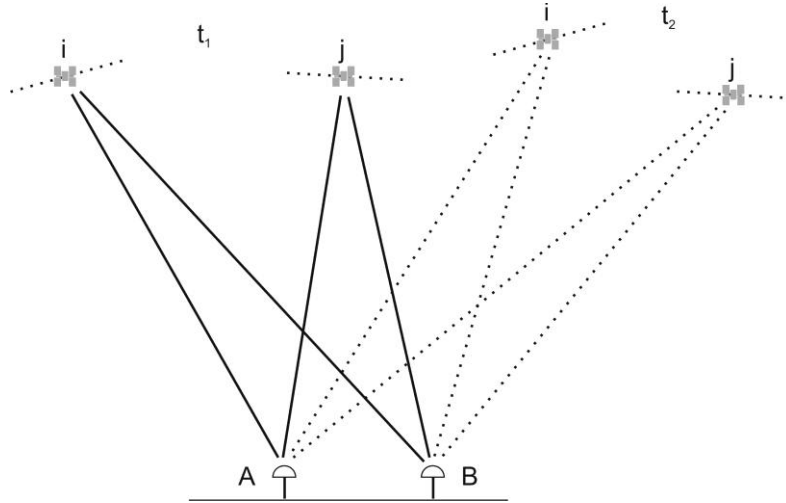
Dvostruke razlike su naročito popularne za obradu GPS merenja kod geodetskog pozicioniranja. Njihova glavna prednost sastoji se u tome što ne sadrže greške časovnika prijemnika i satelita, i što je generalno mnogo lakše rešiti fazne neodređenosti. Međutim, dvostruka razlika predstavlja linearnu kombinaciju četiri pseudoduzine, tako da im je tačnost još niža od tačnosti prostih razlika. Osim toga, obradom dvostrukih razlika takođe se mogu oceniti samo koordinatne razlike između tačaka, a ne njihove koordinate.

Trostruke razlike. Trostruka razlika dobija se kada se formira razlika između dvostruke razlike simultano izmerenih pseudoduzina od tačaka A i B prema satelitima i , j u trenutku vremena t_1 , i iste te dvostruke razlike u trenutku t_2 . Slika 5.3 ilustruje situaciju.

Ako se napišu modeli dvostruke razlike u trenucima vremena t_1 i t_2 :

$$\begin{aligned}
L_{AB,f}^{ij}(t_1) &= r_{AB}^{ij}(t_1) + T_{AB}^{ij}(t_1) - I_{AB,f}^{ij}(t_1) + \lambda_f N_{AB,f}^{ij} + \varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_1) \\
L_{AB,f}^{ij}(t_2) &= r_{AB}^{ij}(t_2) + T_{AB}^{ij}(t_2) - I_{AB,f}^{ij}(t_2) + \lambda_f N_{AB,f}^{ij} + \varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_2)
\end{aligned} \tag{5.17}$$

primetićemo pre svega da jedino fazne neodređenosti nisu funkcija vremena, što uvek važi ukoliko ne dođe do prekida prijema signala. Oduzimanjem dvostrukih razlika dobiće se funkcionalni model trostruke razlike, koji ima sledeći oblik:



Slika 5.3. Ilustracija trostrukih razlika.

$$\begin{aligned}
 \delta L_{AB,f}^{ij} &= L_{AB,f}^{ij}(t_1) - L_{AB,f}^{ij}(t_2) \\
 &= [r_{AB}^{ij}(t_1) - r_{AB}^{ij}(t_2)] \\
 &\quad + [T_{AB}^{ij}(t_1) - T_{AB}^{ij}(t_2)] \\
 &\quad - [I_{AB,f}^{ij}(t_1) - I_{AB,f}^{ij}(t_2)] \\
 &\quad + [\varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_1) - \varepsilon_{AB,f,L}^{ij}(t_2)]
 \end{aligned} \quad (5.18)$$

Iz jednačine (5.18) postaje jasno u čemu su prednosti trostrukih razlika. Pre svega, struktura trostruke razlike smanjena je još za jedan član, tako da ih je sada četiri. Eliminisan je član koji se odnosi na fazne neodređenosti jer su one konstantne veličine pa se ne pojavljuju u razlici. Preostali članovi po pravilu su još manji u odnosu na dvostruke razlike. Jedini izuzetak predstavlja član sa slučajnim greškama merenja.

Članovi u strukturi trostruke razlike koji se odnose na troposferske i jonosferske uticaje mogu se praktično zanemariti kada su merenja međusobno vremenski malo razdvojena. Uobičajeni intervali u kojima se izvode uzastopna GPS merenja kreću se od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Za tako kratke vremenske periode stanje troposfere i jonosfere gotovo da se uopšte ne menja. Ako se, dakle, uticaji troposfere i jonosfere zanemare, dobija se izuzetno jednostavan funkcionalni model trostruke razlike:

$$\delta L_{AB,f}^{ij} = \delta r_{AB}^{ij} + \delta \varepsilon_{AB,f,L}^{ij} \quad (5.19)$$

Nažalost, i pored jednostavnosti, trostruke razlike nisu pogodne za geodetsko određivanje koordinatnih razlika jer im je tačnost mnogo niža u odnosu na tačnost dvostrukih razlika. One se, međutim, mogu koristiti za otkrivanje faznih skokova, odnosno trenutaka vremena kada je tokom merenja došlo do prekida prijema signala.

5.3 Frekvencijske kombinacije

Formiranje prostih, dvostrukih ili trostrukih razlika nije jedini način da se u merenjima smanje ili eliminišu uticaji pojedinih izvora grešaka. Korisnici koji raspolažu dvofrekventnim GPS prijemnicima imaju mogućnost da linearno kombinuju merenja iste pseudoduzine izvršena na obe frekvencije. Takve linearne kombinacije nazivaju se frekvencijskim kombinacijama. Razmotrićemo u nastavku frekvencijske kombinacije samo faznih merenja. Postupak je identičan i za kodna merenja.

Ako su $L_{A,1}^i$ i $L_{A,2}^i$ fazna merenja jedne iste pseudoduzine između stanice A i satelita i , koja su izvršena na frekvencijama f_1 i f_2 , tada opšti oblik frekvencijske kombinacije glasi:

$$L_{A,k}^i = aL_{A,1}^i + bL_{A,2}^i, \quad (5.20)$$

gde je k oznaka konkretne kombinacije, a a i b predstavljaju realne brojeve. Frekvencija f_k i talasna dužina λ_k frekvencijske kombinacije, dobijaju se onda po sledećim izrazima:

$$f_k = af_1 + bf_2, \quad \lambda_k = \frac{c_0}{f_k}. \quad (5.21)$$

Od teorijski beskonačnog broja frekvencijskih kombinacija izdvojićemo samo tri koje se naročito često koriste u geodetskoj obradi GPS merenja.

Frekvencijska kombinacija L_{GF} . Ova frekvencijska kombinacija dobija se jednostavnim oduzimanjem faznih merenja izvršenih na obe frekvencije:

$$L_{A,GF}^i = L_{A,1}^i - L_{A,2}^i, \quad (5.22)$$

odakle se vidi da koeficijenti imaju vrednosti $a = 1$ i $b = -1$. Iz izraza (5.21) sledi da ova kombinacija nema frekvenciju, i da joj prema tome talasna dužina nije definisana. Ako se u izraz (5.22) zamene modeli faznih pseudoduzina, u rezultujućoj kombinaciji neće biti ni geometrijskih rastojanja, ni grešaka časovnika, ni troposferskih uticaja. Odatle i ime ove frekvencijske kombinacije ($GF =$

Geometry Free). U frekvencijskoj kombinaciji L_{GF} preostaju samo jonosferski uticaji, fazne neodređenosti i naravno slučajne greške merenja.

Pošto frekvencijska kombinacija L_{GF} ne sadrži geometrijska rastojanja, ona se ne može koristiti za određivanje koordinatnih razlika između tačaka. Glavna primena joj se sastoji u ispitivanju jonosfere. Kada su jonosferski uslovi relativno mirni, frekvencijska kombinacija L_{GF} može veoma dobro poslužiti za otkrivanje faznih skokova.

Frekvencijska kombinacija L_{IF} . Ova frekvencijska kombinacija dobija se kada koeficijenti a i b u izrazu (5.20) imaju sledeće vrednosti:

$$a = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad b = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (5.23)$$

tako da je:

$$L_{A,IF}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{A,1}^i - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{A,2}^i. \quad (5.24)$$

Formalna talasna dužina ove frekvencijske kombinacije iznosi svega 0.11 m, za razliku od originalnih nosećih talasa čije su talasne dužine 0.19 m i 0.24 m. Međutim, njen značaj sastoji se u tome što u potpunosti eliminiše uticaj jonosfere, odakle joj potiče i ime (IF = Ionosphere Free). Da bismo videli da je to zaista tako, podsetimo se da su jonosferski uticaji na prvoj i drugoj frekvenciji obrnuto proporcionalni kvadratima frekvencija:

$$I_{A,1}^i = \frac{C}{f_1^2}, \quad I_{A,2}^i = \frac{C}{f_2^2}, \quad (5.25)$$

pri čemu je C jedna ista konstanta. Ako se sada ovi članovi kombinuju pomoću koeficijenata a i b , dobija se:

$$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{A,1}^i - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} I_{A,2}^i = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{C}{f_1^2} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{C}{f_2^2} = 0. \quad (5.26)$$

Činjenica da ne sadrži jonosferske uticaje, čini frekvencijsku kombinaciju L_{IF} naročito atraktivnom za geodetsku obradu GPS merenja. Ustvari, kada su GPS prijemnici na većem međusobnom rastojanju (od nekoliko desetina kilometara do nekoliko stotina kilometara), kombinacija L_{IF} predstavlja glavni izbor ukoliko treba postići geodetsku tačnost.

Frekvencijska kombinacija L_{WL} . Ova frekvencijska kombinacija dobija se kada koeficijenti a i b u izrazu (5.20) imaju sledeće vrednosti:

$$a = \frac{f_1}{f_1 - f_2}, \quad b = -\frac{f_2}{f_1 - f_2}, \quad (5.27)$$

tako da je:

$$L_{A,WL}^i = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_{A,1}^i - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_{A,2}^i. \quad (5.28)$$

Formalna talasna dužina ove frekvencijske kombinacije iznosi 0.86 m, što je mnogo više od talasnih dužina originalnih nosećih talasa, zbog čega se tako i zove (WL = Wide Lane). Velika talasna dužina pruža dodatnu prednost što se fazne neodređenosti mnogo lakše rešavaju nego u slučaju malih talasnih dužina. Stoga se frekvencijska kombinacija L_{WL} masovno koristi u geodetskoj obradi izvršenih GPS merenja.

Našoj diskusiji frekvencijskih kombinacija neophodno je dodati još neka zapažanja. Prvo, frekvencijske kombinacije mogu da se formiraju samo ako su na raspolaganju dvofrekventna merenja. To naravno iziskuje nabavku generalno skupljih dvofrekventnih GPS prijemnika. Zatim, frekvencijske kombinacije nisu ograničene na originalna merenja. Naprotiv, najčešći slučaj je ustvari da se one formiraju na svim nivoima razlika (prostih, dvostrukih i trostrukih). Konačno, u frekvencijskim kombinacijama kombinuju se i slučajne greške. Zbog toga je tačnost kombinacija u opštem slučaju niža od tačnosti originalnih merenja.

5.4 Stohastički model GPS merenja

Geodetsko korišćenje sistema NAVSTAR GPS podrazumeva da se izvršena GPS merenja obrađuju po metodi najmanjih kvadrata kako bi se statistički optimalno ocenile nepoznate koordinate tačaka. Metod najmanjih kvadrata sa svoje strane zahteva da se pored funkcionalnog modela merenja formuliše i njihov stohastički model. Pojednostavljeno govoreći, formulisanje stohastičkog modela znači da se svakom merenju koje učestvuje u obradi dodeli standardna devijacija σ koja karakteriše njegovu tačnost.

Bilo bi sasvim pogrešno verovati da pseudodužine izmerene sa neke stanice prema svim vidljivim GPS satelitima imaju istu tačnost. Razlozi su sledeći:

- Signali sa satelita koji je bliže horizontu putuju duže kroz jonosferski omotač Zemlje u odnosu na signale sa satelita koji je u zenitu. Iako se formiranjem razlika i frekvencijskih kombinacija u najvećoj meri otklanja

delovanje jonosferske refrakcije, u merenjima uvek preostanu rezidualni jonosferski uticaji.

- Signali sa satelita koji je bliže horizontu putuju takođe duže i kroz troposferu. Prema tome, i iz tog razloga su merenja prema nižim satelitima manje tačnosti u odnosu na merenja u pravcu zenita.
- Signali sa satelita koji je bliže horizontu imaju mnogo više mogućnosti odbijanja od horizontalnih i vertikalnih reflektujućih površina u odnosu na signale koji dolaze iz pravca zenita. To znači da su merenja prema nižim satelitima podložnija uticaju višestruke refleksije.
- Konačno, signali sa satelita koji je bliže horizontu imaju dosta manju snagu u odnosu na signale iz pravca zenita, tako da ih GPS prijemnici prate sa većom greškom.

Navedene činjenice pokazuju da se merenja pod različitim vertikalnim uglovima α u odnosu na horizont razlikuju međusobno u stohastičkom smislu. U opštem slučaju, tačnost pseudoduzine raste (odnosno smanjuje joj se standard σ) kako se povećava njen vertikalni ugao. Ako se standard pseudoduzine koja je u pravcu zenita ($\alpha = 90^0$) obeleži sa σ_0 , tada se standard pseudoduzine koja ima vertikalni ugao α obično modelira kao:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_0}{\sqrt{\sin \alpha}}. \quad (5.29)$$

Problem različitih standarda nije jedini kada je u pitanju stohastički model. GPS merenja takođe pokazuju i da su međusobno zavisna. Tako, na primer, između dvostrukih razlika postoji značajna korelacija, kao i kod trostrukih razlika. GPS merenja koja su izvedena u kratkom vremenskom intervalu takođe imaju korelaciju koja je jača nego kod merenja izvedenih u dužem vremenskom periodu. Pošto je empirijsko određivanje korelacije inače teško i nepouzđano, ova pitanja se obično zanemaruju, osim kada se GPS merenja koriste za visokoprecizne radove ili u naučne svrhe.

6 GPS pozicioniranje, primene i modernizacija

6.1 Autonomno GPS pozicioniranje

Korisnik opremljen GPS prijemnikom je dakle u stanju da odredi svoj trenutni položaj u realnom vremenu, bez ikakve pomoćne infrastrukture u vidu dodatnih prijemnika, radio komunikacije, ili signala sa posebnom strukturom. Ovakav način korišćenja naziva se autonomnim ili apsolutnim GPS pozicioniranjem. Međutim, autonomno GPS pozicioniranje ne mora biti ograničeno na određivanje položaja u realnom vremenu, iako je ovaj režim rada prvenstveno predviđen za navigaciju. Ako to dozvoljava priroda njegove aplikacije, korisnik može jednostavno samo memorisati rezultate izvršenih GPS merenja, a naknadno određivati položaj odgovarajućom softverskom obradom.

Kvalitet autonomnog GPS pozicioniranja zavisi od dva ključna faktora: broja i rasporeda satelita, i kvaliteta izvršenih merenja. Broj satelita i njihov prostorni raspored u odnosu na lokaciju korisnika često se nazivaju satelitskom geometrijom. Ona se menja u funkciji vremena pošto se sateliti kreću, zalaze za horizont ili se pojavljuju iznad horizonta. U principu, dobru satelitsku geometriju čini nekoliko satelita koji su ravnomerno raspoređeni po azimutu a nalaze se nešto iznad horizonta, sa još jednim ili dva satelita u pravcu bliskom zenitu. Ako je deo neba zaklonjen prirodnim ili veštačkim preprekama, broj vidljivih satelita još uvek može biti dovoljan za određivanje položaja, ali će on svakako biti niže tačnosti.

Drugi faktor koji određuje kvalitet autonomnog GPS pozicioniranja je kvalitet izmerenih pseudodužina i Doplerskih pomaka. Postoji čitav niz izvora sistematskih i slučajnih grešaka koje utiču na tačnost merenja. Njihovo poreklo može biti u navigacionim podacima, sredini prostiranja signala, ili samom GPS prijemniku i njegovoj neposrednoj okolini. Uticaj nekih izvora grešaka, kao što je troposferska refrakcija, može se značajno smanjiti obračunavanjem popravaka, a korisnici sa dvofrekventnim prijemnicima u stanju su da gotovo potpuno eliminišu uticaj jonosferskog kašnjenja signala. U svakom slučaju, efekti pojedinih izvora grešaka veoma su različiti, i kreću se u rasponu od nekoliko decimetara pa do nekoliko desetina metara.

Imajući ovog puta u vidu da su merenja opterećena greškama, skup simultano izmerenih kodnih pseudodužina do n satelita može se sada matematički modelirati na sledeći način:

$$P^{(i)} = \sqrt{(x - x^{(i)})^2 + (y - y^{(i)})^2 + (z - z^{(i)})^2} + b + \epsilon^{(i)}, \quad (6.1)$$

gde član $\epsilon^{(i)}$ obuhvata sve greške merenja i nemodelirane uticaje koji se odnose na kodnu pseudodužinu $P^{(i)}$. Koordinate opažanog satelita $(x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)})$ dobijaju se iz podataka navigacione poruke, i predstavljaju poznate veličine. Gornji indeks i uzima vrednosti $i = 1, 2, \dots, n$.

Potreban je sistem od najmanje četiri ovakve jednačine ($n = 4$) da bi se odredile nepoznate koordinate i greška sinhronizacije prijemnika (x, y, z, b), pri čemu se očigledno mora ignorisati prisustvo nepoznatih članova $\varepsilon^{(i)}$. Kada je $n > 4$, uzima se u obzir prisustvo grešaka, a sistem jednačina tretira se tako da rešenje u nekom smislu bude najbolje prilagođeno izmerenim pseudoduzinama. Pristup koji se najčešće koristi za rešavanje ovakvog optimizacionog problema je statistički postupak ocenjivanja pod nazivom metod najmanjih kvadrata (MNK). MNK ocene nepoznatih parametara (x, y, z, b) izvode se pod matematičkim uslovom:

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{(x - x^{(i)})^2 + (y - y^{(i)})^2 + (z - z^{(i)})^2} + b - P^{(i)} = \min, \quad (6.2)$$

koji transformiše početni sistem od n jednačina sa 4 nepoznate u jedinstveno rešivi sistem od 4 jednačine sa 4 nepoznate, i istovremeno pruža mogućnost ocenjivanja nepoznatih grešaka merenja $\varepsilon^{(i)}$.

Situacija je nešto drugačija kada je u pitanju skup simultano merenih faznih pseudoduzina. Njihov matematički model ima oblik:

$$L^{(i)} = \sqrt{(x - x^{(i)})^2 + (y - y^{(i)})^2 + (z - z^{(i)})^2} + b + \lambda \cdot N^{(i)} + \varepsilon^{(i)}, \quad (6.3)$$

koji se od odgovarajućeg modela kodnih pseudoduzina razlikuje po dodatnom članu $\lambda \cdot N^{(i)}$, gde λ označava talasnu dužinu nosećeg talasa L1 ili L2, a $N^{(i)}$ je nepoznati ceo broj faznih ciklusa u faznoj pseudoduzini do satelita i . Pošto faznih neodređenosti ima onoliko koliko i izmerenih faznih pseudoduzina, dobija se sistem od n jednačina sa $n + 4$ nepoznatih ($x, y, z, b, N^{(1)}, N^{(2)}, \dots, N^{(n)}$), koji ima beskonačno mnogo rešenja. Korisnik dakle ne može određivati položaj u realnom vremenu merenjem faznih pseudoduzina. Autonomno GPS pozicioniranje zasniva se prevashodno na kodnim pseudoduzinama.

6.2 Diferencijalno GPS pozicioniranje

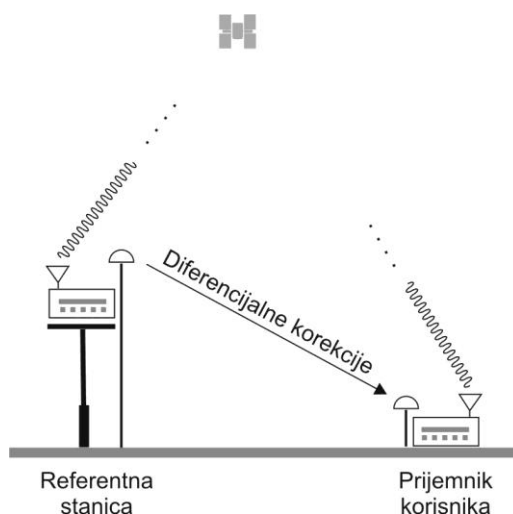
Tačnost položaja od nekoliko metara do nekoliko desetina metara, koja se postiže autonomnim GPS pozicioniranjem, zadovoljava većinu potreba navigacije u otvorenom prostoru. Mnoge važne aplikacije međutim imaju zahteve za većom navigacionom tačnošću. Uplovljavanje u luke i marine po lošem vremenu, kretanje specijalizovanih aerodromskim vozila ili gradska vožnja, samo su neke od situacija gde se zahteva metarska tačnost navigacije. Kriterijumi kvaliteta preciznog sletanja ili upravljanja velikim građevinskim i poljoprivrednim mašinama još su oštriji, i kreću se od nekoliko decimetara pa do svega nekoliko centimetara.

Imajući u vidu faktore koji utiču na tačnost određivanja položaja, očigledno je da se kvalitet autonomnog GPS pozicioniranja može povećati na dva načina: poboljšanjem satelitske geometrije i redukcijom grešaka merenja. Da bi se

poboljšala satelitska geometrija neophodno je pre svega povećati broj GPS satelita. Jasno je da korisnici nemaju takvu mogućnost, ali zato mogu koristiti poseban uređaj, pod nazivom pseudolit (skraćeno od pseudosatelit), koji emituje signale identične onima koje emituju pravi GPS sateliti. Nekoliko pseudolita raspoređenih na području radova izvanredno doprinosi ukupnoj satelitskoj geometriji, naročito u slučajevima kada je deo neba blokiran za prijem pravih GPS signala. Nažalost, GPS prijemnici moraju u tom slučaju biti naročito modifikovani da bi mogli primiti pseudolitske signale.

Ispostavlja se da je pristup sa redukcijom grešaka merenja mnogo jednostavniji. Simultana merenja dva relativno bliska GPS prijemnika biće opterećena greškama koje su po znaku i intenzitetu veoma slične. Isto važi i za greške dva merenja koja su izvedena uzastopno u relativno kratkom vremenskom roku. Drugim rečima, greške GPS merenja međusobno su korelisane i prostorno i vremenski. Osim toga, ukupna greška merenja lako se ocenjuje ako je GPS prijemnik na poznatoj lokaciji, jer je onda prijemnik u stanju da uporedi izmerene pseudodužine sa rastojanjima sračunatim iz koordinata referentne stanice i satelita. Ove činjenice omogućuju poseban način pozicioniranja koje se naziva diferencijalnim GPS pozicioniranjem (DGPS).

Osnovni DGPS koncept prikazan je na slici 6.1. GPS prijemnik na referentnoj stanici vrši merenje pseudodužina do svih vidljivih satelita u unapred definisanim trenucima vremena koji se nazivaju epohama opažanja. Pošto se referentna stanica nalazi na lokaciji sa poznatim koordinatama, prijemnik je u stanju da za svaku epohu opažanja oceni greške izmerenih pseudodužina, i emituje ih radio antenom u okolni prostor. U ovom kontekstu, ocenjene greške pseudodužina nazivaju se diferencijalnim korekcijama. GPS korisnik, koji je u blizini referentne stanice,



Slika 6.1. Princip diferencijalnog GPS pozicioniranja.

prihvata diferencijalne korekcije radio antenom, primenjuje ih na svoja merenja i određuje položaj. Za prenos diferencijalnih korekcija može se upotrebiti i bilo koji drugi oblik terestričke ili satelitske telemetrije (kontrolisane radio veze).

Pored satelitske geometrije i tačnosti merenja, kod DGPS pozicioniranja pojavljuju se dva dodatna faktora od kojih zavisi kvalitet određivanja položaja:

- *Udaljenost od referentne stanice.* Kada je korisnik u neposrednoj blizini referentne stanice, pretpostavka o visokoj korelaciji između grešaka njegovih merenja i merenja na referentnoj stanici ima potpuno opravdanje. Sa udaljavanjem od referentne stanice prostorna korelacija između grešaka postaje sve slabija, tako da se smatra da na rastojanjima većim od 100 km diferencijalne korekcije više ne reprezentuju adekvatno greške merenja na lokaciji korisnika. Rastojanje između referentne stanice i korisnika može takođe imati značaja i zbog dometa radio veze ako se ona koristi za prenos korekcija.
- *Starost i kašnjenje korekcija.* S druge strane, da bi pretpostavka o visokoj vremenskoj korelaciji grešaka odgovarala stvarnosti neophodno je da vremenski interval od generisanja diferencijalnih korekcija do njihove primene bude što kraći. U tom pogledu ponekad se razlikuju dva pojma. Pod kašnjenjem korekcija podrazumeva se interval vremena od trenutka kada su korekcije generisane na referentnoj stanici do trenutka njihovog prijema korisničkim prijemnikom. Starost korekcija je vremenski interval od trenutka njihovog generisanja do trenutka kada ih korisnički prijemnik primeni na svoja merenja. Da bi se smanjio uticaj kašnjenja i starosti, referentna stanica određuje i emituje ne samo diferencijalne korekcije već i brzinu njihove promene.

Kada se primeni u svom izvornom obliku, DGPS omogućuje pozicioniranje sa tačnošću od 1 – 3 m, u zavisnosti od rastojanja do referentne stanice i starosti diferencijalnih korekcija. Međutim, danas je pojam DGPS pozicioniranja mnogo širi, i podrazumeva nekoliko modifikacija koje su u međuvremenu nastale:

- *Konvencionalni DGPS.* Kada se diferencijalne korekcije računaju samo za originalne kodne pseudodužine (eventualno uglačane faznim merenjima), takav pristup označava se kao konvencionalni DGPS. Konvencionalno diferencijalno GPS pozicioniranje predstavlja ustvari DGPS u užem smislu te reči.
- *Precizni DGPS.* Diferencijalne korekcije mogu se računati na potpuno isti način i za originalne fazne pseudodužine. Njihovo korišćenje međutim podrazumeva problem faznih neodređenosti. Ako rastojanje do referentne stanice nije veće od 20 – 30 km, moguće je postići tačnost bolju od 0.1 m, zbog čega se ovaj način pozicioniranja i zove precizni DGPS.

- *Relativno pozicioniranje.* Umesto da računa i emituje korekcije, referentna stanica može emitovati direktno originalna opažanja zajedno sa njihovim epohama. Korisnički GPS prijemnik kombinuje primljene pseudoduzine sa sopstvenim pseudoduzinama izmerenim u istim epohama, i u tom postupku određuje relativni položaj u odnosu na referentnu stanicu. Pošto se na taj način umesto koordinata korisnika dobijaju koordinatne razlike između korisnika i referentne stanice, ova metoda određivanja položaja naziva se relativnim GPS pozicioniranjem. Naravno, koordinate korisnika lako se računaju kada se koordinatne razlike dodaju na poznate koordinate referentne stanice.
- *Kinematičko pozicioniranje.* Kinematičko pozicioniranje je relativno GPS pozicioniranje pokretnog korisnika u realnom vremenu. Ako se tom prilikom koriste kodne pseudoduzine, postiže se tačnost relativnih položaja na nivou od nekoliko decimetara. Kinematičko pozicioniranje faznim pseudoduzinama obezbeđuje tačnost bolju od decimetra, pod uslovom da su prethodno rešene fazne neodređenosti, i tada se ova posebna forma određivanja putanje pokretnog korisnika naziva RTK pozicioniranjem. Proces rešavanja faznih neodređenosti poznat je kao inicijalizacija. Ukoliko iz bilo kog razloga dođe do prekida signala neophodna je ponovna inicijalizacija. RTK varijantom, pod nazivom Stop&Go, postiže se čak centimetarska tačnost ako se korisnik kraće vreme zadržava na tačkama čiji se položaji određuju.
- *Statičko pozicioniranje.* Relativno pozicioniranje stacionarnog korisnika u odnosu na referentnu stanicu naziva se statičkim pozicioniranjem. Ono očigledno nema nikakav navigacioni značaj, niti su rezultati potrebni u realnom vremenu, pa stoga ne zahteva ni komunikacionu vezu korisnika sa referentnom stanicom. Relativni položaji tačaka određuju se umesto toga naknadnom softverskom obradom proizvoljno dugo prikupljenih rezultata merenja. Zbog velikog broja opažanja, odnosno mogućnosti stroge statističke analize i pouzdanog rešavanja faznih neodređenosti, statičkim GPS pozicioniranjem postiže se milimetarska tačnost relativnih položaja.

U stručnoj literaturi ne samo da postoji određena terminološka nekonzistentnost u korišćenju pojmova diferencijalnog i relativnog GPS pozicioniranja, već se vodi i polemika o tome jesu li to različite metode ili dve varijante istog postupka. U svakom slučaju, ove metode razlikuju se po tome što jedna koristi diferencijalne korekcije a druga originalna opažanja. Diferencijalnim pozicioniranjem formalno se određuju apsolutni položaji tačaka, a relativnim pozicioniranjem koordinatne razlike. S druge strane zajedničko im je to da nijedna nije autonomna, jer se obe zasnivaju na korišćenju dva GPS prijemnika. Moglo bi se ustvari dokazati da diferencijalno i relativno pozicioniranje daju teorijski iste rezultate pod uslovom da nema nikakvog kašnjenja diferencijalnih korekcija.

6.3 Višestanični DGPS sistemi

Diferencijalno pozicioniranje može se zasnivati na jednostaničnoj ili višestaničnoj arhitekturi. U jednostaničnom DGPS modelu koristi se samo jedna referentna stanica za računanje diferencijalnih korekcija. Ovaj koncept je jednostavan, ali ograničava korisnika na relativno mali prostor oko referentne stanice u kojem su diferencijalne korekcije upotrebljive. Zbog degradacije tačnosti sa udaljavanjem od referentne stanice, jednostanični DGPS sistemi koriste se obično u izolovanim lokalnim aplikacijama.

Višestanični DGPS model podrazumeva korišćenje diferencijalnih korekcija sa nekoliko referentnih stanica. Prednost ovog koncepta sastoji se u tome što znatno povećava područje pokrivenosti i obezbeđuje homogeniji kvalitet pozicioniranja. Implementacija višestaničnih DGPS sistema povezana je međutim sa većim troškovima instaliranja i održavanja, kompleksnijim hardverskim i softverskim zahtevima, i dodatnim kašnjenjem korekcija zbog mrežnog računanja.

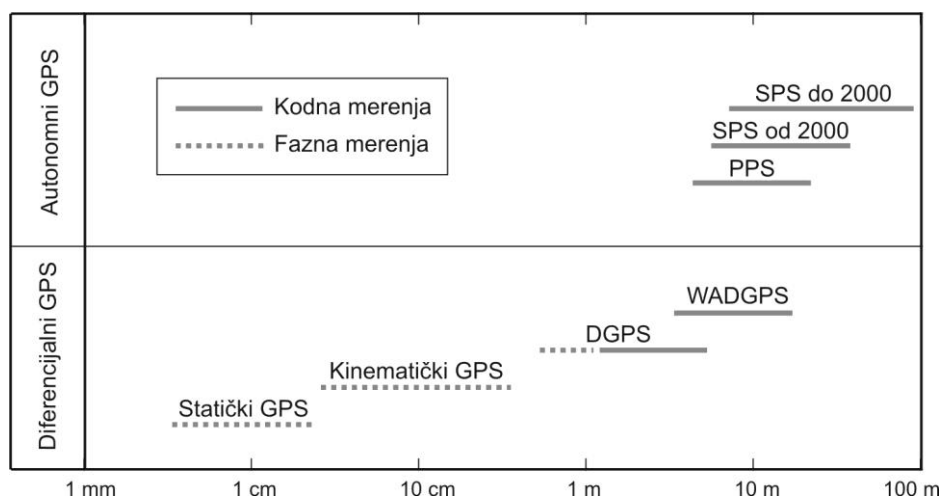
Višestanični DGPS sistemi sastoje se od mreže referentnih stanica, jednog ili više kontrolnih centara i odgovarajuće komunikacione infrastrukture. U zavisnosti od područja pokrivenosti, gustine referentnih stanica, strukture diferencijalnih korekcija i načina njihovog emitovanja, razlikuju se dva osnovna tipa realizacije:

- *Lokalni DGPS sistemi (LADGPS)*. Ovo su višestanični DGPS sistemi sa ograničenim područjem pokrivenosti i relativno velikom gustinom referentnih stanica. Princip LADGPS korišćenja sastoji se u prijemu korekcija sa najbliže referentne stanice, ili osrednjenih vrednosti korekcija sa nekoliko okolnih referentnih stanica. Diferencijalne korekcije računaju se u skalarnom obliku, a emituju se po pravilu terestričkim sredstvima veze. Zbog područja pokrivenosti i načina emitovanja korekcija, LADGPS sistemi nazivaju se još i lokalnim sistemima unapređenja (LAAS), ili terestričkim sistemima unapređenja (GBAS). LADGPS sistemi obično su predviđeni za precizno DGPS pozicioniranje.
- *Globalni DGPS sistemi (WADGPS)*. Uspostavljanje LADGPS sistema na području veličine kontinenta bilo bi nepraktično i neekonomično zbog velikog broja referentnih stanica. Alternativa je centralizovani WADGPS sistem malog broja referentnih stanica i velikog područja pokrivenosti. Korekcije se po WADGPS konceptu određuju u vektorskom obliku. To znači da kontrolni centar prikuplja skalarne korekcije sa svih referentnih stanica i razlaže ih na komponente koje predstavljaju efekte pojedinih izvora grešaka. Vektorske korekcije prosleđuju se GEO satelitima sa kojih se emituju u takvom obliku da korisnik može odrediti vrednosti pojedinih komponenti na osnovu svog približnog položaja. Zbog toga su WADGPS sistemi poznati i kao globalni sistemi unapređenja (WAAS), ili satelitski

sistemi unapređenja (SBAS). Najpoznatiji sistemi koji se trenutno razvijaju su američki WAAS, evropski EGNOS i japanski MSAS.

Negde unutar ove kategorizacije nalaze se i nacionalne mreže referentnih stanica koje su pojedine zemlje u međuvremenu uspostavile za potrebe precizne navigacije i pozicioniranja na svojoj teritoriji. Ovakve mreže ustvari najviše odgovaraju LADGPS arhitekturi sa prosečnim međustaničnim rastojanjima između 50 km i 100 km, ali imaju i neke karakteristike WADGPS sistema kao što su dekompozicija korekcija ili mogućnost njihovog prenosa putem Interneta.

Pregled tipične tačnosti pozicioniranja koja se može postići raznim metodama GPS korišćenja dat je na slici 6.2. Za vreme aktivne SA mere zaštite, autonomno SPS pozicioniranje moglo je obezbediti tačnost položaja od nekoliko desetina metara. Od 2000. godine, ovim režimom rada postiže se tačnost bolja od 10 m. PPS korisnici opremljeni dvofrekventnim prijemnicima imaju mogućnost eliminacije jonosferskih uticaja i nešto višeg kvaliteta pozicioniranja. Dalje poboljšanje GPS performansi moguće je jedino dodatnim investicijama u vidu sistemskih proširenja. WADGPS sistemi nude globalnu položajnu tačnost od nekoliko metara u realnom vremenu. Metarski i decimetarski nivo karakterističan je za LADGPS sisteme pozicioniranja, pri čemu ključnu ulogu imaju udaljenost referentne stanice i tip korekcija. Određivanje relativnih položaja u odnosu na obližnje referentne stanice izvodi se čak i sa centimetarskom tačnošću u realnom vremenu ako se koriste fazna GPS merenja. Sistemi sa takvim mogućnostima nalaze danas veliku primenu u preciznoj navigaciji i masovnim geodetskim radovima. Konačno, statičkim GPS pozicioniranjem moguće je ostvariti milimetarsku preciznost relativnih položaja,



Slika 6.2. Tipična prosečna tačnost različitih metoda GPS pozicioniranja.

ali ne u realnom vremenu. Ovakav režim korišćenja ograničen je na visokotačna geodetska i geodinamička istraživanja.

6.4 GPS primene i modernizacija

Od prvobitne ideje o isključivo vojnoj nameni, do današnje dominantno civilne upotrebe, broj i raznovrsnost GPS aplikacija narasli su do nivoa koji projektanti sistema nisu mogli ni da zamisle. Svaki dan se praktično otkrivaju sasvim nove oblasti primene. Rastući zahtevi naveli su DoD da još 1998. godine sačini plan modernizacije NAVSTAR sistema, predviđajući sve širi spektar korisnika u naredne dve decenije.

Većina aktuelnih GPS aplikacija može se orijentaciono smestiti u jednu od sledećih kategorija:

- precizno pozicioniranje i transfer vremena,
- vazduhoplovna i kosmička navigacija,
- kopneni transport i pomorska navigacija,
- potrošačko tržište.

Precizno pozicioniranje i transfer vremena. Precizno GPS pozicioniranje faznim merenjima nalazi primenu pre svega u geodetskim i geofizičkim istraživanjima. Milimetarski precizni relativni položaji omogućuju određivanje pomeranja kontinentalnih litosfernih ploča, istraživanje postglacijalnog izdizanja i deformacija Zemljine kore, tektonskih, seizmičkih i vulkanskih procesa, kretanja glečera i varijacija u Zemljinoj rotaciji. Rešavanje ovako krupnih naučnih problema naročito je dobilo na zamahu osnivanjem Međunarodne GPS službe (IGS), koja svoja istraživanja bazira na rezultatima permanentnih opažanja sa preko 200 globalno raspoređenih GPS stanica.

Mogućnosti preciznog relativnog GPS pozicioniranja takođe se sve više koriste za praćenje deformacija velikih inženjerskih objekata. Pomeranje brana, mostova i visokih zgrada pod uticajem vetra ili kontrolisanog opterećenja dobija se u realnom vremenu sa centimetarskom tačnošću. Podjednako efikasno je i korišćenje GPS za određivanje položaja i orijentacije kamere prilikom fotogrametrijskog snimanja iz vazduha. U istraživanjima atmosfere, precizna GPS merenja upotrebljavaju se za praćenje koncentracije elektrona u jonosferi i sadržaja vodene pare u troposferi.

Tržište za GPS prijemnike namenjene preciznim aplikacijama i naučnim istraživanjima veoma je malo. Međutim, tehnike koje su u okviru njih razvijene značajno su unapredile geodetski premer i izradu geografskih informacionih sistema (GIS), stvarajući na taj način ogromno tržište za GPS prijemnike visokih performansi i zaokružena GPS rešenja. Danas postoji veliki broj sistema sa integrisanim prijemnicima, personalnim računarima i radio vezom, koji omogućuju

brzo, efikasno i ekonomično prikupljanje pozicionih i atributskih informacija, njihovu vizualizaciju, i punjenje ili ažuriranje geografskih baza podataka.

Kontrola velikih poljoprivrednih, građevinskih ili rudarskih mašina u realnom vremenu još je jedno polje primene tehnika preciznog pozicioniranja. GPS se u ovim aplikacijama koristi za navigaciju mašina ili za navođenje pokretnih mašinskih delova na određenu visinu ili ugao. Tako su, na primer, već u upotrebi građevinske mašine sa računarski podržanim hidrauličkim sistemom, koje uz pomoć integrisanog GPS prijemnika mogu potpuno autonomno izvoditi zemljane radove, pri čemu se uloga čoveka svodi samo na kontrolisanje i nadgledanje.

GPS nije samo sredstvo za precizno pozicioniranje, nego i globalni izvor preciznog vremena i frekvencije. Nacionalne i međunarodne laboratorije, koje održavaju standard vremena, koriste GPS za međusobna upoređenja, jer su jeftini GPS prijemnici u stanju da ocenjuju vreme sa tačnošću koju su ranije postizali samo atomski standardi. GPS izvedeno vreme već se upotrebljava za sinhronizaciju elemenata telekomunikacionih mreža i analizu stanja energetskih sistema. U glavnim Internet čvorovima vreme se postavlja uz pomoć GPS. Ispostavlja se da će u budućnosti GPS postati ključni element komercijalne i industrijske infrastrukture pre kao izvor preciznog vremena, nego kao sredstvo za pozicioniranje.

Vazduhoplovna i kosmička navigacija. Sve do pre nekoliko godina civilno vazduhoplovstvo se u potpunosti oslanjalo na avionske inercijalne navigacione sisteme i pomoćna terestrička radionavigaciona sredstva. GPS se smatra velikim napretkom u ovoj oblasti, sa potencijalom da značajno poveća i ekonomičnost i sigurnost vazdušnih operacija.

Vazduhoplovna navigacija je osetljiva oblast sa veoma strogim zahtevima koji se ne odnose samo na tačnost, već i na integritet i kontinuitet navigacionog sistema. Integritet predstavlja mogućnost sistema da na vreme izda upozorenje ukoliko neka anomalija stvara rizičnu situaciju. Kontinuitet je sposobnost sistema da ispravno funkcioniše za vreme određene operacije kada ta operacija jednom otpočne. Da bi se ovi zahtevi ispunili, svaka država propisuje odgovarajuće standarde i kriterijume sertifikacije. GPS je u SAD sertifikovan kao primarno sredstvo za navigaciju u vazdušnom prostoru iznad okeana i udaljenih oblasti, a kao pomoćno navigaciono sredstvo za rutnu, terminalsku i prilaznu fazu leta.

U bližoj budućnosti očekuje se da GPS bude korišćen kao primarno navigaciono sredstvo u svim fazama leta. SAD, Evropa i Japan rade zajednički na realizaciji jedinstvenog WADGPS sistema sa globalnom pokrivenošću, u okviru kojeg će GEO sateliti emitovati na frekvenciji L1 ne samo diferencijalne korekcije nego i podatke o integritetu satelitskih signala. Sistem je planiran tako da u potpunosti ispunji kriterijume tačnosti, integriteta i kontinuiteta za rutnu i terminalsku fazu leta. Za fazu preciznog prilaza, kod koje se zahteva visinska tačnost bolja od 1 m sa garantovanim integritetom i kontinuitetom, predviđeno je uspostavljanje LADGPS

sistema na svakom većem aerodromu. Funkcija ovih sistema biće i da omoguće automatsko sletanje aviona i kontrolu saobraćaja na pistama.

GPS prijemnici na LEO satelitima već postaju primarni izvor podataka o položaju, brzini, orijentaciji, promeni orijentacije i vremena umesto nizova senzora koji su se do sada koristili u te svrhe. Nekoliko kosmičkih misija izvedenih u poslednjih deset godina dokazalo je da se na taj način znatno smanjuje cena izrade i kompleksnost kosmičkih letelica. Tako je i međunarodna kosmička stanica (ISS) projektovana da koristi GPS za navigaciju, određivanje orijentacije i praćenje letelica koje joj prilaze, a izvedeno GPS vreme za sinhronizaciju i raspored satelitskih operacija. Osim toga, izvesno je da će buduće satelitske misije koristiti GPS prijemnike i odgovarajući softver za autonomno određivanje i održavanje satelitskih orbita, jer su eksperimenti potvrdili da je takav koncept daleko bolji i efikasniji od svakog terestričkog radarskog sistema koji je danas u upotrebi.

Kopneni transport i pomorska navigacija. GPS se trenutno najviše koristi u kopnenom transportu, naročito za navigaciju i praćenje vozila. Postoji velika potreba za GPS sistemima u komercijalnom transportu, javnom saobraćaju i hitnim službama, tako da je najveći broj GPS prijemnika proizvedenih posle 1990. godine bio namenjen upravo ovom tržištu. GPS sistemi za automatsko lociranje i navigaciju vozila danas su standardni deo ponude automobilske industrije. Železničke kompanije takođe razmatraju GPS kao alternativno sredstvo za kontrolu vozova. U toku je projektovanje sistema zasnovanih na GPS tehnologiji i bežičnim komunikacijama, koji bi služili za navođenje vozila do odredišta uz pomoć informacija o trenutnom stanju saobraćaja.

GPS sistemi za sada ne mogu biti isključivo sredstvo za kopnenu navigaciju zbog toga što je za autonomno GPS pozicioniranje neophodna vidljivost najmanje četiri satelita. Reljefni oblici, krošnje drveća i visoke zgrade mogu blokirati deo neba, tako da je neprekidni prijem signala sa četiri i više satelita često nemoguć. Zato se GPS sistemi za kopnenu navigaciju obično sastoje i od dopunskih senzora kao što su žiroskopi, odometri, inklinometri, kompasi i akcelerometri, kojima se ne mogu određivati apsolutni položaji vozila, ali se mogu premostiti kraći periodi kada GPS prijemnici nisu u stanju da prate signale sa dovoljnog broja satelita.

U odnosu na kopnenu navigaciju, situacija sa prijemom GPS signala daleko je povoljnija na otvorenom moru, gde praktično ne postoje prirodne prepreke koje zaklanjaju nebo. U tom pogledu, pomorska navigacija ima još jednu prednost. Pošto srednji nivo mora i okeana predstavlja površ čija je visina približno jednaka nuli, za određivanje horizontalnog položaja plovećeg objekta i greške časovnika GPS prijemnika dovoljna su opažanja i sa samo tri satelita.

Na svetskim morima i okeanima postoje milioni čamaca, ribarskih brodova, jahti, feribota, putničkih brodova, teretnih brodova i tankera koji se oslanjaju na GPS navigaciju. Nakon nekoliko ekoloških incidenata sa izlivanjem nafte, mnoge veće luke implementirale su sistem za aktivno praćenje, koji se bazira na prijemu

DGPS pozicija tankera i većih brodova. GPS prijemnici i elektronske pomorske karte standardno se koriste za bezbednu plovidbu u priobalnim područjima i efikasno uplovljavanje u luke i marine. Precizna GPS navigacija je takođe priznato sredstvo za demarkaciju nacionalnih teritorijalnih voda i područja ribolova.

Potrošačko tržište. Poznavanje trodimenzionalnog položaja je samo za sebe jedino od akademskog interesa. Informacija o poziciji dobija međutim sasvim drugi smisao kada se poveže sa nameravanim kursom, tačkama koje su od nekog značaja ili lokacijama potencijalnog rizika. U tom kontekstu, poznavanje položaja planinara u odnosu na kamp, vozila u odnosu na mapu saobraćajnica ili plovila u odnosu na podvodne stene može biti od životne važnosti, a kada se kombinuje sa komunikacionom tehnologijom, kao što je mobilna telefonija, u stanju je da redukuje potragu i spašavanje samo na operaciju spašavanja.

Imajući u vidu današnje GPS proizvode namenjene masovnom tržištu, jasno je da GPS pokazuje svoj puni potencijal jedino u integraciji sa drugim tehnologijama, a naročito sa bežičnim komunikacionim sistemima, Internetom i geografskim bazama podataka. Telematika, kao tehnologija pružanja informacija u pokretu, doživljava veliki zamah zahvaljujući tome što se GPS položaji sada određuju tako lako. Na tržištu su široko zastupljeni dvosmerni sistemi poruka bazirani na GPS tehnologiji, koji omogućuju korisniku komunikaciju i navigaciju u odnosu na bilo koga ko ima elektronsku poštu. Sa pristupom bazama podataka raznih službi, ovaj trend prerasta u takozvane lokaciono bazirane usluge (LBS), kao što je na primer sistem obaveštavanja korisnika o uslovima na putu, udaljenosti do najbližeg restorana ili benzinske stanice, blizine neke turističke atrakcije i slično.

U narednih deset godina očekuje se eksplozivni rast tržišta GPS proizvoda svakodnevne namene, zahvaljujući tome što se ceo GPS prijemnik može smestiti na jedan čip, i ugraditi u razne potrošačke proizvode kao što su mobilni telefoni, PDA računari ili automobilski sigurnosni uređaji. Potencijalno ogromna primena GPS leži u takozvanoj proširenoj službi hitnih poziva (E911). Ona se sastoji u tome da mobilni telefoni budu osposobljeni da odrede i emituju svoju lokaciju u hitnim slučajevima. Izazov leži u mogućnosti GPS pozicioniranja u zatvorenom prostoru, koje je otežano zbog toga što prijemnik ne može uspešno dekodirati navigacionu poruku u situaciji kada je signal suviše slab. Pristup koji se trenutno testira predviđa da navigacionu poruku dešifruje server na baznoj stanici, a zatim je prosledi GPS prijemniku bežičnim signalom. Mogućnost GPS pozicioniranja u zatvorenom prostoru otvoriće čitav niz novih aplikacija.

Planovi GPS modernizacije. Situacija se u svetu značajno promenila od sedamdesetih godina prošlog veka kada je GPS projektovan. Novi politički poredak i nacionalna ekonomija omogućili su tako veliki zamah GPS industriji, da je ona sada postala ključni faktor uticaja na američku politiku modifikacije GPS

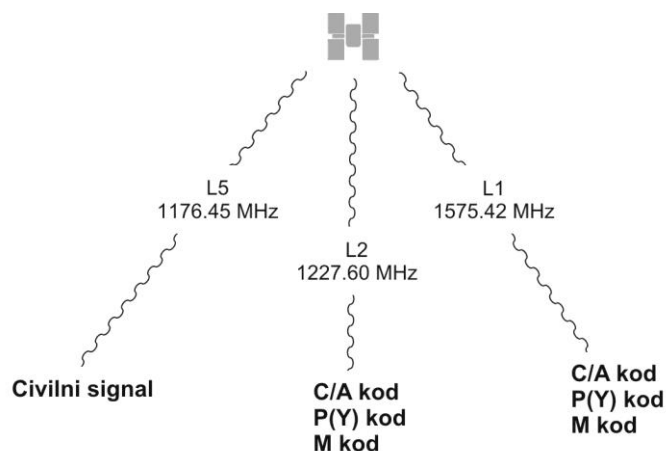
dizajna. Ukidanje SA mere zaštite 2000. godine označava prvu takvu važnu promenu.

Sa rastućom zavisnošću od GPS, pojavila su se i druga otvorena pitanja. Svaki radio sistem osetljiv je na radiofrekventnu interferenciju. GPS je još osetljiviji zbog toga što je snaga signala izuzetno mala, a tehnika širokog spektra pruža samo delimičnu zaštitu. Prekid signala izazvan slučajnom ili namernom interferencijom ima očigledne implikacije na korišćenje GPS u vojnim operacijama i njegovu primenu u vremenski kritičnim aplikacijama. Osim toga, elektromagnetni spektar postaje sve više predmet komercijalne eksploatacije. Kompanije za satelitsku komunikaciju umalo nisu 1997. godine dobile dozvolu od Međunarodne unije za telekomunikacije (ITU) da koriste deo opsega GPS frekvencije L1.

Ovi problemi naveli su DoD da već 1998. godine objavi ambiciozne planove GPS modernizacije, sa ciljem da sistem načini robusnijim i otpornijim na interferenciju, i da poveća tačnost pozicioniranja, navigacije i transfera vremena. Program modernizacije podrazumeva mere koje se odnose na civilne korisnike, vojne korisnike i kontrolni segment:

- *Civilni korisnici.* Povećanje tačnosti SPS pozicioniranja planirano je kroz uvođenje dva nova civilna signala. Pored toga što će noseći talas L2 biti modulisan C/A kodom, predviđen je i sasvim novi civilni signal, pod nazivom L5, na frekvenciji 1176.45 MHz.
- *Vojni korisnici.* Da bi se sprečilo zlonamerno korišćenje GPS, predviđeno je da vojni GPS signali budu spektralno razdvojeni od civilnih. U tu svrhu su definisana dva vojna M koda, koji će biti smešteni 6 – 9 MHz iznad i ispod L1 i L2 frekvencija. M kod će imati šifrovani oblik kao i postojeći P(Y) kod, i po potrebi će moći da se emituje sa snagom većom za 20 dB na regionalnoj osnovi.
- *Kontrolni segment.* Postojeći hardver i softver kontrolnog segmenta biće značajno unapređen. Planira se takođe i uključivanje NGA stanica za praćenje u proces određivanja satelitskih efemerida i parametara satelitskih časovnika.

Struktura modernizovanih GPS signala, čija se puna implementacija očekuje do 2015. godine, prikazana je na slici 6.3. Civilni signal na frekvenciji L1 ostaje nepromenjen, što će obezbediti da svi aktuelni GPS prijemnici mogu i dalje da funkcionišu. Modulacija L2 talasa C/A kodom značiće osetno povećanje tačnosti SPS pozicioniranja u realnom vremenu, jer će korisnici biti u stanju da pomoću dvofrekventnih merenja ocene i eliminišu uticaj jonosferske refrakcije. Treba međutim imati u vidu da je signal na L2 mnogo osetljiviji na interferenciju od signala na L1. Alokacija frekvencija je kompleksan proces u koji su uključeni mnogi interesi, tako da se može desiti da jedan frekvencijski opseg deli više korisnika. Opseg od 1215 MHz do 1350 MHz, u kojem je L2, primarno je dodeljen



Slika 6.3. Struktura GPS signala oko 2010. godine.

terestričkim radarima i radionavigacionim satelitskim sistemima, ali delove tog opsega koriste i sistemi za istraživanje kosmosa. Drugim rečima, nema garancije da L2 signal neće ometati neki drugi signal koji je formalno legalan.

Pravo poboljšanje kvaliteta pozicioniranja nastupiće onda kada bude aktiviran novi civilni signal na frekvenciji L5. Merenja na L1, L2 i L5 omogućiće formiranje dve linearne kombinacije sa mnogo većim talasnim dužinama od 86 cm, iz kojih se mogu oceniti simultano i pseudodužina i jonosferska refrakcija. Za razliku od dvofrekventnog slučaja, ove ocene imaju preciznost od nekoliko centimetara. Uz planirano poboljšanje kvaliteta satelitskih efemerida, to ustvari znači da će budući korisnici, opremljeni trofrekventnim GPS prijemnicima, moći da očekuju tačnost položaja bolju od 1 m.

Pregled evolucije kvaliteta standardnog civilnog GPS pozicioniranja do pune implementacije programa modernizacije dat je u tabeli 6.1. Planirano je da se poslednjih 12 satelita generacije Block IIR modifikuje kako bi se obezbedilo mesto za civilni signal na L2 i novi vojni signal na L1 i L2. Modifikovani sateliti noseće oznaku Block IIR-M. Novi civilni signal na L5 već je predviđen kod satelita generacije Block IIF. Puna konstelacija od najmanje 18 satelita sa C/A kodom na L1 i L2 očekuje se oko 2010. godine. Do 2015. godine biće dostignuta puna

Tabela 6.1. Evolucija kvaliteta standardnog GPS pozicioniranja.

Godina	Status signala	Tačnost položaja
1999	C/A kod na L1, aktivna SA mera zaštite	60 m
2000	C/A kod na L1, ukinuta SA mera zaštite	10 m
2010	C/A kod na L1 i L2	5 m
2015	C/A kod na L1 i L2, novi civilni signal na L5	1 m

konstelacija i sa novim civilnim signalom na L5. Do tada će postojeće satelite postepeno zameniti sateliti generacije GPS III.