

Abdulah Muminagić*
Medžida Mulić**

UDK 528.5: 527.61
Pregledni rad

SISTEM ZA GLOBALNO POZICIONIRANJE – GPS

1. UVOD

Iako se, na inicijativu US ministarstva odbrane, GPS (Globalno Pozicionirajući Sistem) razvio i operira kao podrška vojnoj navigaciji, ova se tehnologija pokazala veoma pogodna za pozicioniranje u civilne svrhe. Geodeti su odgovorili na izazov i privatili mogućnosti koje im pruža GPS. U USA su usvojeni novi pogodni standardi tačnosti koji se koriste u novoj eri, eri satelitske geodezije. Ustanovljen je novi pogodan koordinatni referentni sistem.

Primarni rezultat GPS premjera je poliedar stanica sa precizno poznatim relativnim lokacijama. Ovi geometrijski položaji mogu biti izraženi kao elipsoidne (geodetske) koordinate tj, latituda, longituda i visina. Poznato je da se elipsoidna visina razlikuje od ortometrijske visine (koju koriste geodeti) za undulaciju geoida.

Pokazalo se da, kao nusprodukt, GPS ima mogućnost da u mnogim primjenama zamijeni nivelanje. U tu svrhu bilo bi poželjno da se sračuna geoidna undulacija sa istom tačnošću sa kojom elipsoidna visina može biti izvedena iz GPS mjerenja. Nažalost ovo nije moguće ali je moguće sračunati razlike undulacija sa centimetarskom tačnošću (Leica 1995). Do sada je sračunato nekoliko tačnih geoidnih modela za razne regione i države, a neki su dostupni na Internetu.

Za kreativan um GPS otvara vrata za nove forme geodetskih mreža. Zanimljiv pristup u novoj koncepciji daje SWEPOS, švedska nacionalna mreža permanentnih referentnih stanica. Otvorena je mogućnosti drugačije organizacije geodetske djelatnosti uopće, kao i katastarskih ureda pomognutih bazama podataka koje omogućavaju brzu i jednostavnu razmjenu podataka.

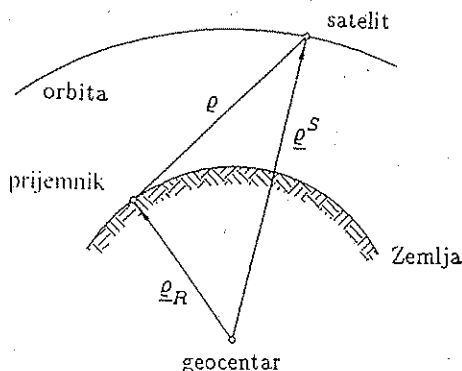
2. ELEMENTI SATELITSKIH GEODETSKIH MJERENJA

Geodetska mjerenja satelitskim metodama zahtijevaju razumijevanje statistike, astronomije, više geodezije i elektronike. Zbog činjenice da se satelit kreće u prostoru, postoji potreba da se povežu nebeski (space-fixed) koordinatni sistem i terestrički (earth-fixed) koordinatni sistem. Mjerenje vremena ulazi u najmanje dva načina: prvi, ono povezuje koordinatne sisteme i drugo, mjerenje vremena putovanja signala sa satelita do prijemnika, što je osnova mjerenja. Razumijevanje mogućnosti i ograničenosti GPS mjerenja zahtijeva poznavanje mehanike orbitalnog kretanja i onih fenomena koji utiču na putanju satelita i poruke koju emituje.

* Prof.dr Abdulah Muminagić, Građevinski fakultet Sarajevo

** Asis. Medžida Mulić, dipl.inž.geod., Građevinski fakultet Sarajevo

2.1. Princip satelitskog pozicioniranja



Slika 2.1. Princip satelitskog pozicioniranja

Osnovna jednačina satelitske geodezije (2.1) povezuje rang (prostorna udaljenost) ρ , sa vektorom trenutnog položaja satelita ρ^S i vektorom položaja mjesta opažanja ρ_R

$$\rho = \| \rho^S - \rho_R \| \quad (2.1)$$

Ova jednačina vrijedi pod pretpostavkom da je satelit za trenutak zaustavljen na orbiti. Njegove prostorne koordinate ρ^S mogu se izračunati iz emitiranih (broadcast) efemerida. Pretpostavit ćemo također da su satovi satelita i prijemnika podešeni tačno na GPS vrijeme.

Prostorna udaljenost ρ između satelita i prijemnika određena je kao razlika prostornih vektora geocentar-satelit (ρ^S) i geocentar-prijemnik (ρ_R). Vidi sliku 2.1.

Da bi se odredio položaj tačke, potrebno je odrediti prostorne udaljenosti od tri satelita (svaka prostorna udaljenost opisuje sferu). Presjek tih triju sfera daje rješenje tri nepoznate (latitudu, longitudu i visinu).

Problem se usložnjava činjenicom da su u prijemnicima ugrađeni relativno jeftini kvarcni satovi koje nije moguće tačno podesiti na GPS vrijeme. To ima za posljedicu da je izmjerena udaljenost do satelita malo duža ili kraća od prave udaljenosti. Problem se rješava tako da simultano mjerimo udaljenosti do četiri satelita, kako bismo dobili rješenje za četvrtu nepoznatu-pogrešku sata.

Tako izmjerene udaljenosti do satelita nazivamo **pseudoudaljenost ili pseudorang R**. Pseudorang ili pseudoudaljenost jednaka je pravoj udaljenosti (rang) plus mala korekcija $\Delta\rho$, koja je uzrokovana pogreškom sata prijemnika δ . Tako dobijamo formulu za pseudo-udaljenosti:

$$R = \rho + \Delta\rho = \rho + c \delta \quad (2.2)$$

gdje c predstavlja brzinu svjetlosti.

Razmatranjem izraza (2.1) dolazi se do zaključka da tačnosti određivanja položaja, uz korištenje samo jednog prijemnika, u osnovi zavisi od slijedećih faktora:

- tačnosti položaja svakog satelita
- tačnosti mjerenja pseudoudaljenosti
- geometrijskog rasporeda satelita u orbitama u trenutku opažanja.

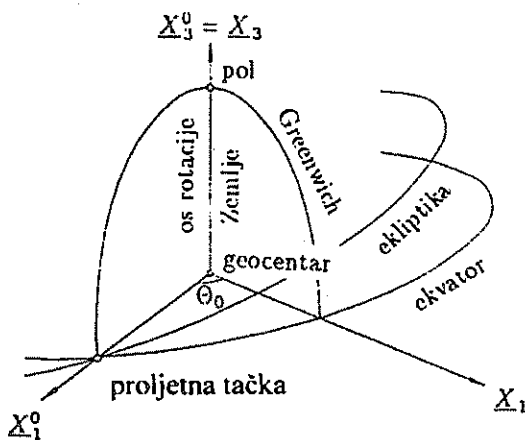
Utjecaji sistematske pogreške u tačnosti položaja pojedinog satelita te moguće pogreške sata satelita mogu se eliminirati u mjerenim pseudoudaljenostima razlikama sa pseudoudaljenosti mjerenih sa dva stajališta. Postupak diferenciranja jedan je od osnovnih metoda mjerenja u satelitskoj geodeziji.

Na tačnost mjerenja pseudoudaljenosti utječu mnogi faktori, kao npr, atmosferski utjecaji, koji se metodama razlika znatno smanjuju.

Geometrijski raspored satelita izražava se tzv.GDOP-om (Geometric Dilution of Precision). GDOP je inverzno proporcionalan volumenu tijela koje definišu pravci prijemnik-sateliti čije signale u tom trenutku prijemnik prima. Velik GDOP ukazuje na lošu geometriju satelita i rezultati takvih mjerenja bit će loši.

2.2. REFERENTNI SISTEMI

U jednačini (2.1) oba vektora moraju biti izražena u jedinstvenom koordinatnom sistemu. Za globalnu primjenu kao što je satelitska geodezija, pogodan je ekvatorski koordinatni sistem, slika 2.2. Neophodno je razlikovati prostornofiksni ili inercijalni (nebeski) koordinatni sistem X^0_i od terestričkog ili fiksiranog za zemlju koordinatnog sistema X_i . Inercijalni sistem služi kao referentni za vektor ρ^S , a terestrički kao referentni za vektor ρ_R . Ugao Θ_0 između ova dva sistema zove se Grinvičko zvijezdano vrijeme.



Slika 2.2. Ekvatorski koordinatni sistem

2.2.1. Konvencionalni inercijalni referentni sistem

(Conventional Celestial Reference System)

Ovaj sistem je konvencionalno definiran, te njegova praktična realizacija ne znači neophodno i koincidenciju sa teorijskim sistemom. Nazvan je (konvencionalno) Inercijalni referentni okvir (Celestial Reference Frame, **CRF**). Ponekad se zove i kvazi-inercijalni, što naglašava da geocentrički sistem i nije rigorozno inercijalni zbog ubrzanog kretanja Zemlje oko Sunca. Jedan primjer takvog referentnog okvira je **ICRF** kojeg je ustanovio Međunarodni servis za rotaciju Zemlje (International Earth Rotation Service, **IERS**). **ICRF** definiran je opažanjem skupa od preko 500 vangalaktičkih objekata, mahom kvazara i galaktičkih nukleusa.

2. 2. 2. Konvencionalni terestrički referentni sistem (Conventional Terrestrial Reference System)

Opet po dogovoru, osa X_3^0 je identična sa srednjim položajem zemljine obrtne ose, **CIO** (Conventional International Origin). Os X_1^0 usmjerena je ka srednjem Grinvičkom meridijanu. Ovaj sistem nazvan je (konvencionalno - dogovorno) Terestrički referentni okvir (Terrestrial Reference Frame - **TRF**) i definiran je pomoću skupa terestričkih kontrolnih stanica koje služe kao referentne tačke. Većina referentnih stanica opremljena je laserskim (Satellite Laser Ranging-**SLR**) ili interferometrijskim (Very Long Baseline Interferometry-**VLBI**) mjernim uređajima.

Primjeri terestričkog referentnog okvira su **WGS 84** (World Geodetic System 1984) i **ITRF** (International Terrestrial Reference Frame). Uz skraćenicu **ITRF** stoji i godina realizacije, npr. **ITRF94** ili **ITRF89**.

WGS 84 je geocentrični sistem definiran koordinatama više od 1500 terestričkih tačaka. Od 1987 godine GPS koristi ovaj sistem kao referentni. Ovom sistemu pridružen je geocentrični ekvipotencijalni elipsoid, definiran sa četiri parametra prikazana u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Parametri elipsoida WGS-84

Parametri i vrijednosti	Opis
$a = 6\,378\,137\text{ m}$	Velika poluosu elipsoida
$\overline{C}_{2,0} = -484.16685 * 10^{-6}$	Zonalni koeficient drugog stepena
$\omega_E = 7292115 * 10^{-11} \text{ rads}^{-1}$	Uglovna brzina rotacije Zemlje
$\mu = 3986005 * 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$	Gravitaciona konstanta Zemlje

IERS redovno određuje terestrički referentni okvir **ITRF**. Ovaj sistem definiran je sa više od 180 terestričkih tačaka, za koje se uzima u obzir pomjeranje tektonskih ploča, što je i razlog pridruživanje godine u naziv realiziranog okvira. Od 1996, **ITRF 94** je operativna verzija.

Upoređenja **WGS 84** i **ITRF** pokazuju značajne razlike, koje proističu iz činjenice da je **WGS84** realiziran na osnovu **TRANSIT** opažanja, dok je **ITRF** realiziran na osnovu **SLR** i **VLBI**. Referentne tačke **WGS84** sistema određene su sa tačnošću 1-2 m, dok su referentne tačke **ITRF**- a određene sa centimetarskm tačnošću. Također postoji značajna razlika u iznosu gravitacione konstante koja uzrokuje razlike u orbitama satelita. Zbog toga je u dva navrata **WGS84** poboljšana. Poboljšanja se prije svega odnose na koordinate **GPS**

opažakih stanica koje su na osnovu GPS rezultata popravljene 1994 i 1997. Ove realizacije nose oznake prema sedmicama u kojima su provedene te su označene sa WGS84(G730) i WGS84 (G873). Ovim se postiglo da se razlike između WGS84 i ITRF94 značajno ne razlikuju, te za praktične primjene nije potrebna transformacija između ova dva sistema.

Nakon provedenih poboljšanja parametri koji definiraju WGS84 (G873) prikazani su u tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Važeći parametri elipsoida WGS84(G 873)

Parametri i vrijednosti	Opis
$a = 6\,378\,137.0\text{ m}$	Velika poluosica elipsoida
$1/f = 298.257223563$	Recipročna sploštenost
$\omega_E = 7292115 \cdot 10^{-11}\text{ rads}^{-1}$	Uglovna brzina rotacije Zemlje
$\mu = 3986005 \cdot 10^8\text{ m}^3\text{ s}^{-2}$	Gravitaciona konstanta Zemlje

Relacije između različitih terestričkih referentnih okvira uspostavlja se općenito pomoću trodimenzionalne slične transformacije, tj. sedamparameterske transformacije.

$$X_{\text{WGS}} = C + \mu R X_{\text{TRF}} \quad (2.2)$$

3. ORGANIZACIJA SISTEMA ZA GLOBALNO POZICIONIRANJE

Sistem za Globalno Pozicioniranje zamišljen je kao sistem koji određuje rang - udaljenost od poznatog položaja satelita u orbiti do traženog položaja na kopnu, moru ili u zraku. Ustvari, satelitski signal je neprekidno označen svojim (pripadajućim) vremenom transmisije prenosa tako da kad je signal primljen, može se mjeriti period prenosa sa sinhroniziranim prijemnikom. Početni ciljevi GPS-a su bili trenutno određivanje položaja i brzine (tj. navigacija), i precizna koordinacija vremena (tj. prenos vremena).

Detaljna definicija po Wooden 1985 glasi: NAVSTAR Sistem za Globalno Pozicioniranje GPS je svemirski orijentiran navigacioni sistem za svako vrijeme kojeg je razvilo Ministarstvo odbrane USA, kako bi zadovoljio zahtjeve vojnih snaga za tačnim i kontinuiranim određivanjem njihovog položaja, brzine i vremena u zajedničkom koordinatnom sistemu bilo gdje na ili blizu Zemlje.

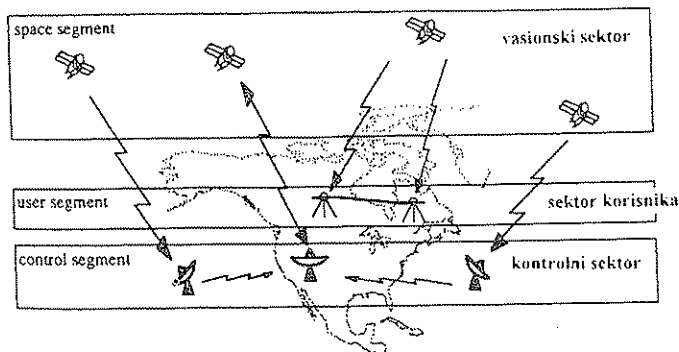
Iako su prvobitni ciljevi GPS-a bili vojni, US Kongres je, na prijedlog Predsjednika, naložio Ministarstvu odbrane da promovira njegovu civilnu upotrebu. Ovo je uveliko ubrzano uvođenjem Makrometra za geodetska mjerenja. U to vrijeme, ovaj je instrument bio u komercijalnoj upotrebi, dok je vojska još testirala navigacione prijemnike tako da je prva produktivna primjena GPS-a bilo razvijanje geodetskih mreža visoke tačnosti.

Kao što je već rečeno GPS koristi pseudorangove (pseudoudaljenosti) izvedene iz emitiranih satelitskih signala. Pseudorangovi su izvedeni ili iz mjerenja vremena putovanja (kodiranog) signala kojeg smo pomnožili sa njegovom brzinom ili pak, mjerenjem faze signala. U oba slučaja su uposleni satovi i prijemnika i satelita. Pošto ovi satovi nikad nisu perfektno sinhronizirani, umjesto pravih udaljenosti - rangova dobiju se pseudoudaljenosti -

pseudorangovi, gdje je uzeta u račun greška sinhronizacije (greška sata), jednačina 2.2. Zbog toga svaka jednačina ovog tipa ima četiri nepoznate: tri koordinate tačke sadržane u rangu i pogreška sata. Prema tome neophodna su četiri satelita da bi se riješile četiri nepoznate. Zato GPS koncept podrazumijeva barem četiri vidljiva satelita na bilo kojem mjestu na zemlji, 24 sata na dan. Rješenje postaje komplikovanije kad koristimo fazna mjerenja. Ovo opažanje je neodređeno zbog nepoznatog cijelog broja valnih dužina signala tako da je formula za fazni pseudorang proširena za tzv. "integer ambiguity" (cijeli broj valnih dužina).

Globalni pozicionirajući sistem sačinjen je od tri sektora (segmenta), sl. 3.1, tabela 3.1.

- svemirskog (vasionskog) kojeg čine sateliti koji emitiraju signale
- kontrolnog koji nadzire cijeli sistem
- korisničkog kojeg čine prijemnici svih vrsta i namjena.



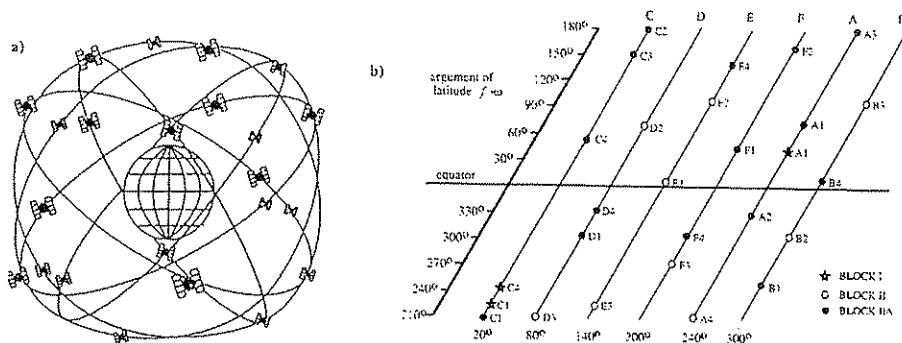
Slika br. 3.1. Svemirski, kontrolni i korisnički sektor (segment)

Tabela 3.1. Funkcija i produkti svemirskog, kontrolnog i korisničkog segmenta

segment	input	funkcija	produkt
svemirski	navigaciona poruka	generira i emitira kodove, noseće valove, navigacionu poruku	P (Y)- kod C/A -kod L1 i L2 noseće valove
kontrolni	P(Y)-kod, opaža vrijeme(UTC)	daje GPS vrijeme, efemeride, upravlja satelitima	navigaciona poruka
korisnik	kodna i fazna opažanja, navigaciona poruka	navigaciono rješenje, relativno pozicioniranje, OTF, itd.	položaj, brzina, vrijeme

3.1. SVEMIRSKI SEGMENT (VASIONSKI SEKTOR)

3.1.1. Konstelacija



Slika 3.2. konstelacija GPS satelita:

a) globalni raspored satelita, b) položaj satelita u orbitalnim ravnima

Sateliti se kreću po skoro kružnim orbitama, na visini oko 20200 km iznad Zemlje, sa periodom rotacije od oko 12 zvezdanih sati. Konstelacija i broj satelita mijenjao se od planiranih 24 satelita u tri orbitalne ravni s inklinacijom u odnosu na ekvator od 63° , do današnje konstelacije koju čine 24 satelita, raspoređena u 6 orbitalnih ravni s inklinacijom 55° , kao na slici 3.2. Aktuelna konstelacija je 27 aktivnih satelita od kojih su tri rezervna aktivna satelita, GPS (1998).

S punom konstelacijom satelita, svemirski segment garantira globalnu pokrivenost sa 4 do 8 satelita koji se mogu u bilo koje doba dana simultano opažati pri elevaciji 15° . Ukoliko se elevacijska maska reducira na 10° ili 5° , moguće je povremeno opažati i do 10 odnosno 12 satelita. Ovo naravno vrijedi ako nemamo smetnji pri opažanju.

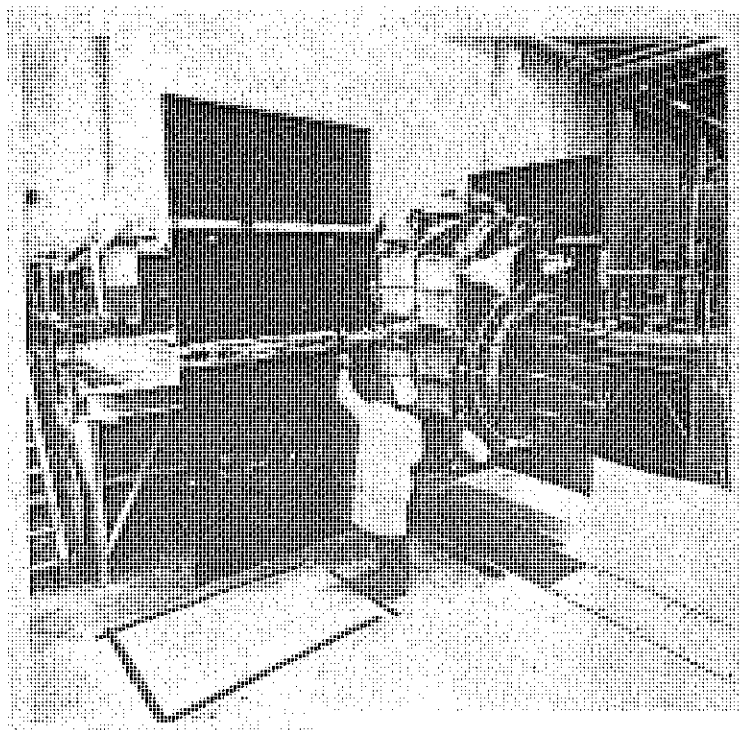
3.1.2. Sateliti

GPS sateliti, uglavnom, obezbjeđuju platformu za radio predajnike, atomske satove, kompjutere, raznu pomoćnu opremu neophodnu za funkcionisanje sistema, kao što su solarni paneli za napajanje strujom, te pogonski sistem za poravnanje satelita u orbiti i kontrolu stabilnosti.

Elektronska oprema svakog satelita omogućava korisniku da mjeri pseudorang R do satelita, i svaki satelit emituje poruku koja omogućava korisniku da odredi prostorni položaj p^s satelita u određenom trenutku. Time je korisniku omogućeno da presjekom sračuna svoj položaj p_R na ili iznad Zemlje, slika 2.1.

Sateliti imaju razne sisteme identifikacije kao: broj lansiranja, dodijeljeni pseudoslučajni šum (PseudoRandom Noise-PRN) kod, broj pozicije u orbiti, kataloški broj NASA-e ili međunarodna oznaka. Uobičajeno je da se za identifikaciju satelita koristi PRN broj.

Postoji pet tipova GPS satelita: Blok I, Blok II, Blok IIA, Blok IIR, Blok IIF.



Slika 3.3 Montaža GPS satelita u laboratoriju

3.1.2.1. Satelitski signal

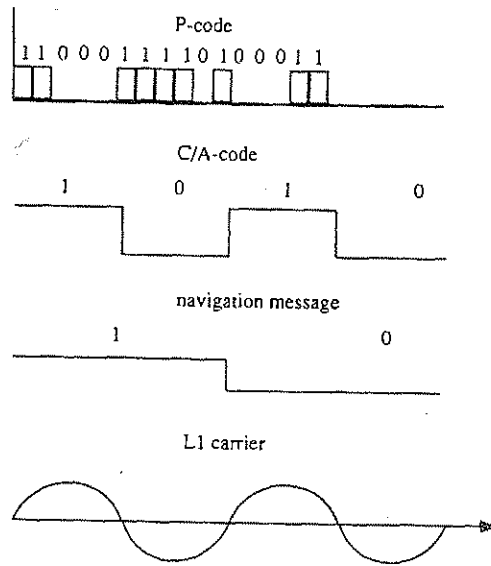
Sateliti emituju signale širokog spektra koji su koherentno izvedeni iz fundamentalne frekvencije od 10.23 MHz a koju kontroliraju atomski satovi u satelitu. Množenjem fundamentalne frekvencije sa 154 i 120 dobije se respektivno, $L1=1575.42$ MHz i $L2=1227.60$ MHz, frekvencije nosećih valova $L1$ i $L2$. Dvojne frekvencije su bitne za eliminiranje glavnog izvora pogrešaka - jonosferske refrakcije.

Pseudorangovi koji su izvedeni iz mjerenja vremena putovanja signala od svakog satelita do prijemnika koriste dva pseudoslučajna koda koja su modulirana na dva osnovna noseća vala.

Prvi kod je **C/A kod** (Coars/Acquisition-code), dostupan za civilne korisnike. On je unaprijed određen kao **SPS** (Standard Positioning Service) ima efektivnu valnu duljinu oko 300 m. Ovaj kod moduliran je samo na nosećem valu $L1$, i tako onemogućava neovlaštenim korisnicima da koriste punu operativnu sposobnost sistema.

Navigaciona poruka, također nazvana i telemetrija, modulirana je na obadva nosača, $L1$ i $L2$. Ona sadrži informacije o efemeridama satelita, GPS vremenu, ponašanju satova, i poruku o stanju sistema, slika 3.4.

Drugi kod je **P- kod**, (Precision -code) unaprijed označen kao **PPS** (Precise Positioning Service) koji je glavni kod za vojnu navigaciju. Njegova efektivna valna duljina je oko 30 m. Moduliran je na oba noseća vala, L1 i L2. Ovo je pseudoslučajni šum-kod (PRN) matematički generiran miješanjem druga dva pseudoslučajna koda. P-kod se ne ponavlja za 37 sedmica. Prema tome, moguće je dodijeliti sedmični dio za razne satelite. Kao rezultat, svi sateliti mogu emitovati na istom nosećem valu, a biti različiti jer se emituju međusobno isključivi kodni nizovi.



Slika 3.4. Šematska prezentacija GPS kodova i nosećeg vala.

Svi kodovi počinju jednom sedmično u ponoć između subote i nedjelje, prema tome stvaraju, ustvari, GPS sedmicu kao glavnu jedinicu vremena. Zbog činjenice da ima manje od 37 satelita u orbiti, neki od P(Y)-kodnih sedmičnih nizova ostaju neupotrijebljeni. Međutim, oni su dostupni za transmisiju sa zemaljskih stanica. Oba L1 i L2 noseća vala modulirana su sa istim P(Y) kodom.

3.1.2.2. Satelit i GPS vrijeme

Satelitsko vrijeme definirano je atomskim satom na svakom satelitu. Satelit operira na vlastitom sistemu vremena, tj, sve satelitske transmisije (emitovanja) kao C/A kod, P(Y) kod, navigaciona poruka poslana je po satelitskom vremenu. Podaci u navigacionoj poruci se međutim odnose na GPS vrijeme. Kontrolni segment ustanovljava GPS vrijeme koje se opet od UTC (USNO) vrijeme ne razlikuje unutar 1 μ sec. Međutim GPS vrijeme je kontinuirano i ne izravna se za skok ("leap second") sekunde. Najveća jedinica GPS vremena je 1 sedmica definirana kao 604800 sekundi. Zadnja zajednička epoha (trenutak) između GPS vremena i UTC(USNO) bilo je u ponoć 5/6 januara 1980. Navigaciona poruka sadrži popravke za prevodenja satelitskog u GPS vrijeme. U slučaju PPS korigovano

vrijeme je unutar 176 nsec (95%) u odnosu na UTC (USNO), a za SPS, tačnost je 363 nsec (95%).

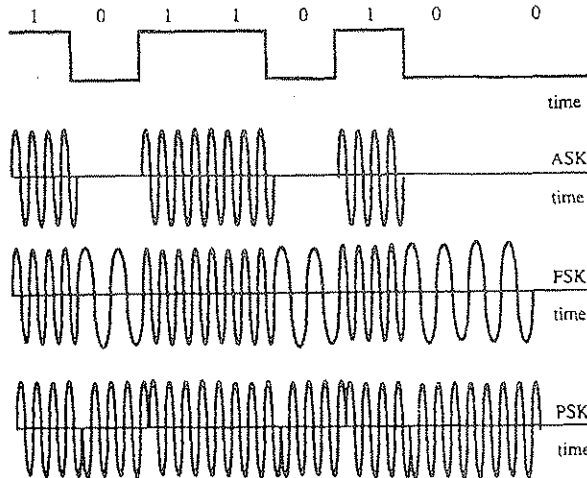
Relativistički utjecaji su važni za geodetska mjerenja, ali se ona srećom mogu tačno sračunati. Detaljnije vidi [Leic 1994].

3.1.2.3. Struktura GPS signala

Jednostavni sinusoidni val, koji je nazvan noseći val (ili samo nosač) može biti moduliran da prenosi informacije kao što su komunikacije glasom ili digitalizirane slike. U slučaju GPS-a, moduliranje omogućava mjerenje ranga pomoću mjerenja vremena putovanja moduacije. Postoje bar tri često korištene metode digitalnog moduliranja:

- amplitudno moduliranje (amplitude-shift keying) **ASK** (pomak amplitude)
- frekventno moduliranje (frequency-shift keying) **FSK** (pomak frekvencije)
- fazno moduliranje (phase-shift keying) **PSK** (pomak faze)

Slika br. 3.5. pokazuje proizvoljan niz digitalnih podataka koji se sastoji od binarnih cifara 0 i 1. Ove su binarne cifre nazvane čipovi, biti, kodovi ili pulsevi. Sekvenca binarnih cifara u nizu podataka obično je pseudoslučajna sekvenca koja možda "lokalno" izgleda kao slučajaj signal ali koja ustvari prati neku matematičku formulu.



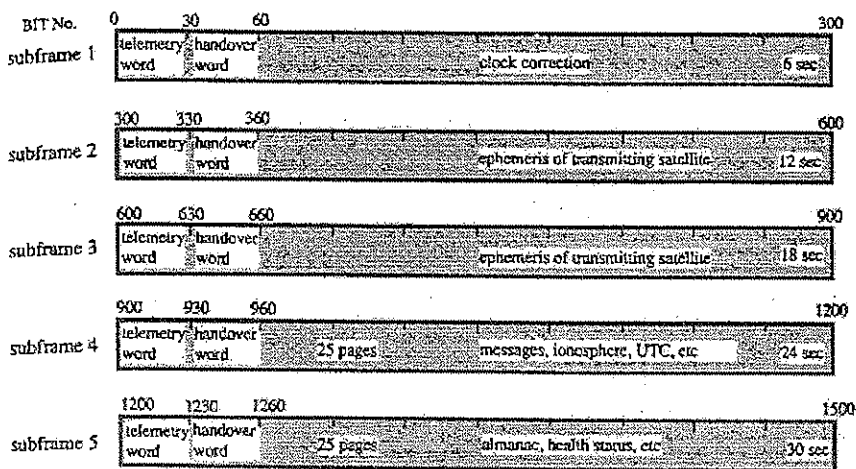
Slika 3.5. Metode digitalnog moduliranja

3.1.2.4. Navigaciona poruka

Svaki satelit emituje niz podataka nazvan **navigaciona poruka**, i na L1 i na L2, u iznosu od 50 bps (bita na sekundu). Jedan pregled strukture navigacione poruke vidi se na slici 3.6.

Navigaciona poruka (nazvana i D-kod ili Data code) služi za prenošenje neophodnih podataka prijemniku, prije svega parametara putanje satelita. Kodiranje informacija zahtijeva 1500 bita te se pri frekvenciji od 50 Hz, prenosi 30 sekundi. Ukupna informacija ("frame"-okvir) podijeljena je u pet podokvira ("subframe") koji sadrže po deset riječi, svaka po 30 bps. Svaki podokvir počinje sa telemetrijskom riječi **TLM** koja sadrži sinhronizacijsku masku i "hand-over" riječi **HOW**, iz koje se izvodi broj **TOW** - (time-of week") - vrijeme u sedmici za epochu na početku slijedećeg podokvira.

Prvi podokvir sadrži između ostalog broj GPS sedmice i tri koeficijenta kvadratnog polinoma za modeliranje korekcije sata satelita. U trećem i četvrtom podokviru prenose se emitovane - brodkast efemeride dotičnog satelita. Osim navedenog navigaciona poruka sadrži: almanah, podatke o jonosferi, podatke o ispravnosti (health status) satelita, UTC vrijeme, itd.



Slika 3. 6. Struktura okvira navigacione poruke

3.2. KONTROLNI SEGMENT

Kontrolni segment je odgovoran za operativnost cijelog GPS sistema. Glavna kontrolna stanica (master control station-MCS) je locirana blizu Colorado Springsa, Colorado, USA.. Posmatrano sa tačke gledišta korisnika, primarna misija kontrolnog segmenta je da dopunjuje i osavremenjava navigacionu poruku koju emitiraju sareliti. Da bi se ovo izvelo, sačinjen je Operacioni kontrolni sistem (OCS) od 6 monitoring pratećih stanica raspoređenih kao na slici 3.7. koje neprekidno prate sve satelite u vidnom polju. Ovi podaci se prenose u glavnu kontrolnu stanicu u Colorado Springs, gdje se izvode opsežna

računanja sa ciljem da se sačini " up-to-date " - (dopuna) za navigacione poruke koje će se poslati satelitima.



Slika 3.7. Monitoring stanice

Značajno je primijetiti da se od kontrolnog segmenta očekuje samo da osmatra satelite kako bi obezbijedila navigaciona poruka takve tačnosti da se dobiju navigacione poruke tražene tačnosti tj. SPS (Standard Position Service) i PPS (Precise Positioning Service). Da bi se pomogle civilne primjene GPS-a postali su dostupni i mnogi drugi servisi, koji uključuju različite podatke: kao precizne efemeride, softveri za planiranje kampanja, softveri za opće pozicioniranje, podaci o jonosferi i troposferi, različite korekcije, raspored planiranih kampanja, itd...

Razvoj ovih servisa je u stalnoj ekspanziji. Preko Interneta su dostupne neke od ključnih baza podataka .

Da bi se podržalo kartografisanje i geodetske aktivnosti razvijene su posebne GPS mreže pratećih stanica (GPS tracking stations). Broj takvih tačaka stalno raste, a ustanovljavaju ih razne nacionalne agencije za kartografiju, univerziteti, razne istraživačke grupe u cijelom svijetu. Ovdje ćemo samo spomenuti početnu CIGNET (Cooperative International GPS Network) koja je prerasla u Međunarodni GPS servis za geodinamiku (International GPS service for Geodynamics-IGS), koji je formalno počeo raditi 1. januara 1994. IGS je servis za podršku, preko podataka, dobijenih pomoću GPS istraživačima iz oblasti geodezije i geofizike kao i za primjene GPS mjerenja visoke tačnosti. Postoji uska saradnja između IGS-a i IERS-a (International Earth Rotation Service). Podaci se primarno razmjenjuju preko Interneta.



Slika 3.7. IGS mreža opažачkih stanica

3.2. 1. Efemeride

Postoje tri nivoa tačnosti podataka za određivanje položaja i brzine satelita u terestričkom referentnom sistemu :

- almanah (najmanje tačan, sadržane u navigacionoj poruci)
- brodkast efemeride (srednje tačnosti, sadržane u navigacionoj poruci)
- precizne efemeride (najveća tačnost, dostupne 4-14 dana nakon mjerenja)

3.3 SEGMENT KORISNIKA

Segment korisnika čine prijemnici svih namjena i tačnosti. Razlikujemo dvije osnovne vrste korisnika: vojne i civilne. Prema planu razvoja GPS segment korisnika predstavljaju sva pokretna vojna sredstva: brodovi, avioni, vozila, rakete, pa i pješačke jedinice.

Vrlo brzo nakon uspostavljanja sistema GPS se počeo koristiti i u vrlo različite civilne svrhe: Prvo se počelo koristiti i u civilnoj navigaciji ali se vrlo brzo počeo primijenjivati i u geodeziji. Danas se GPS rutinski primjenjuje za geodetske mreže, brojne zadatke inženjerske geodezije, u fotogrametriji za pozicioniranje kamere. Značajan je porast primjene globalnog pozicioniranja i u svim drugim granama ljudske djelatnosti vezane za

- C
- C
- m
- P
- ta
- Y

altim
dvost
primj
posre
prijer
pogre

prijer
trans
(PRN
prim

prostor, te se široko primjenjuje za praćenje zračnog, kopnenog i vodenog saobraćaja, kao i u raznim geoznanostima, šumarstvu, poljoprivredi, ribolovu a sve više za rekreaciju i praćenje sportskih događaja.

3.3.1. Vrste prijemnika

U ovisnosti od komponente satelitskog signala koje prijemnici koriste da bi odredili svoj položaj razlikujemo četiri osnovna tipa prijemnika:

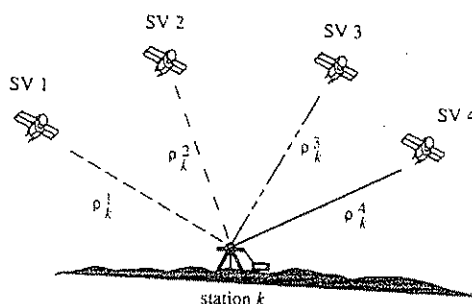
- C/A kodni za mjerenje pseudoranga (namjena-navigacijska, mali format)
- C/A kodni za fazna mjerenja (C/A kod i L1 nosač, namjena-navigacija i precizna mjerenja do 10 km)
- P kodni (koriste P-kod na L1 i L2 nosača, namjena precizna mjerenja -100km sa cm tačnošću)
- Y kodni (isključivo ovlašćeni korisnici).

4. OPAŽANJA GPS-om

Za razliku od većine drugih metoda satelitske geodezije (SLR, VLBI, satelitska altimetrija) čija se mjerenja zasnivaju na mjerenju reflektovanih signala (vrijeme putovanja dvostrukog puta), GPS mjerenja zasnivaju se na "konceptu jednostrukog puta signala" uz primjenu dva sata, jednog na satelitu i drugog u prijemniku. Mjerenje udaljenosti vrši se posredno, iz mjerenja vremena ili faznih razlika primljenog signala i signala generiranog u prijemniku. Zato su udaljenosti dobijene i kodnim i faznim mjerenjima opterećene pogreškama sinhronizacije satova te ih zato i zovemo pseudoudaljenostima.

4.1 Pseudorang

Pseudorang (pseudoudaljenost) je mjera dužine između satelita i antene prijemnika, koja se odnosi na epohe emisije i prijema kodova. (Slika 4.1.) Vrijeme transmisije (putovanja) signala mjereno je koreliranjem identičnih pseudoslučajnih kodova (PRN) generiranih u satelitu sa onim generiranim u prijemniku. Mjerenje pseudoudaljina se primjenjuje i za P- kod i za C/A kod.



Slika 4.1. Pseudoudaljenosti do 4 satelita

Vrijeme emisije mjereno satovima na satelitu obično se obilježava sa t^p , a ono prijema na prijemniku sa t_k . Oba se zovu **nominalna** vremena. Ako je t_r istinito vrijeme, onda je:

$$\begin{aligned} t_{rk} &= t_k + dt_k \\ t_r^p &= t^p + dt^p \end{aligned} \quad (1)$$

Pseudorastojanje $P_k^p(t_k)$ dobijemo u metrima po formuli:

$$P_k^p(t_k) = (t_k - t^p)c \quad (2)$$

gdje je c -brzina svjetlosti. Ova formula bi važila kada bi se mjerni talas rasprostirao u vakumu i ne bi bilo grešaka satova i drugih. U tom slučaju bi pseudorastojanje bilo jednako geometrijskoj razdaljini između elektronskih centara antena satelita i prijemnika.

Mjerni talas, međutim, prolazi kroz slojeve različitih karakteristika prohodnosti elektromagnetskih talasa, što nas primorava uvoditi odgovarajuće popravke u gornju formulu, pa će se onda formula obogatiti dodatnim članovima:

$$\begin{aligned} P_k^p(t_k) &= (t_{r,k} - t_r^p)c - c(dt_k - dt^p) + I_{k,p}^p(t_k) + \\ &+ d_{k,p}(t_k) + d_{k,p}^p(t_k) + d_p^p(t_k) + \varepsilon_p \end{aligned} \quad (3)$$

Ovdje je:

- c - brzina svjetlosti
- dt_k - greška sata na prijemniku
- dt^p - greška sata na satelitu
- $I_{k,p}^p(t_k)$ - popravka za uticaj jonosfere (pošto su sateliti na velikoj visini)
- $T_k^p(t_k)$ - popravka za uticaj troposfere (pošto su sateliti na velikoj visini)
- $d_{k,p}(t_k)$ - popravke za uticaj hardvera (uređaja na satelitu) i
- $d_p^p(t_k)$ - na opažачkoj stanici
- $d_{k,p}^p(t_k)$ - popravka za uticaj reflektovanih talasa (zavisi od geometrijsko-fizičkih odnosa satelit i prijemnik prema terenu ispod njih)
- ε_p - uticaj slučajnih šumova

Uzevši u obzir da je prvi član s desne strane zapravo mjerena topocentrička dužina ρ , formula (3) će se pisati:

$$\begin{aligned} P_k^p(t_k) &= \rho_k^p(t_{r,k}) - c(dt_k - dt^p) + I_{k,p}^p(t_k) + T_k^p(t_k) + \\ &+ d_{k,p}(t_k) + d_{k,p}^p(t_k) + d_p^p(t_k) + \varepsilon_p \end{aligned} \quad (4)$$

Kako je $t_{r,k}$ (istinito vrijeme), prvi član ćemo razviti u red oko nominalnog vremena na prijemniku t_k i zadržavajući samo prvi član, dobijamo:

$$\rho_k^p(t_{r,k}) = \rho_k^p(t_k) + \rho_k^p(t_k) dt_k$$

uvrstivši ovo u (4):

$$P_k^p(t_k) = \rho_k^p(t_k) - c \left[1 - \frac{\rho_k^p(t_k)}{c} \right] dt_k + c \cdot dt^p + I_{k,P}^p(t_k) + \quad (5)$$

$$T_k^p(t_k) + d_{k,P}^p(t_k) + d_{k,P}^p(t_k) + d_P^p(t_k) + \varepsilon_P$$

ρ_k^p se izvodi iz praćenja promjena ρ_k^p po vremenu. A $\rho_k^p(t_k)$ se u Dekartovom koordinatnom sistemu (u sistemu WGS84) računa po poznatoj formuli:

$$\rho_k^p(t_k) = \sqrt{(u^p - u_k)^2 + (v^p - v_k)^2 + (w^p - w_k)^2} \quad (6)$$

gdje su u, v, w koordinatne osi sistema. u_k, v_k, w_k su poznate – to su koordinate prijemnika, a u^p, v^p, w^p može se uzeti iz emitovanog položaja satelita na orbiti. Imaju i tačniji načini, a i ovaj izgleda zadovoljava kao prvo približenje.

Ova je dužina (daljina) neophodna kod obrade opažanja i po postupku pseudodaljina i faza nosećeg talasa.

Osim popravaka navedenih u (5) predlaže se još i popravka za relativistički efekat (po teoriji relativiteta).

4.2. Faze nosećeg talasa

Kod ovoga postupka opaža se razlika između faze nosećeg talasa emitovanog sa satelita i faze oscilatora prijemnika. Mjerenja se bilježe na rekorderu u jednakim vremenskim intervalima t . Promjene vrijednosti ovih razlika nastaju zbog promjena udaljenosti satelit-prijemnik prouzročenih kako kretanjem satelita, tako okretanjem Zemlje.

Zbog nemogućnosti sinhronizacije satova prijemnika bolje od jedne μ sec ovim načinom se ne bi mogle postići tačnosti koje se zahtijevaju (tačnost koordinata ± 3 mm što bi zahtijevalo tačnost vremena od 0,01 nsec!). Međutim se ovoj "nezgodi" doskočilo kako tehnički, tako i matematički.

4.2.1. Podaci dobijeni opažanjem jednog satelita sa jedne tačke

Faza nosećeg talasa $\varphi_k^p(t)$ kada se sa stanice k opaža satelit p biće (za područje zračenja L_1):

$$\varphi_k^p(t) = [\varphi_k(t) - \varphi^p(t)] + N_k^p(1) + I_{k,\varphi}^p(t) + \frac{f}{c} T_k^p(t) + d_{k,\varphi}(t) + d_{k,\varphi}^p(t) + d_\varphi^p(t) + \varepsilon_\varphi \quad (7)$$

gdje je:

$\varphi_k(t)$ - faza prijemnika u nominalno vrijeme t

$\varphi^p(t)$ - faza satelita u nominalno vrijeme t

$N_k^p(1)$ - početni pomak za cio broj talasa nastao prilikom proizvoljnog uključivanja brojača pratećeg registra na početku opažanja; za $L1$

$I_{k,\varphi}^p(t)$ - uticaji jonosfere

$T_k^p(t)$ - uticaji troposfere

$d_{k,\varphi}(t)$ - uticaji nesavršenstva hardvera prijemnika

$d_\varphi^p(t)$ - uticaji nesavršenstva hardvera satelita

$d_{k,\varphi}^p$ - uticaj reflektovanih talasa

ε_φ - slučajni šumovi pri mjerenju faza nosećeg talasa

N i svi članovi sa indeksom φ izraženi su u talasnim dužinama. T je u metrima i zbog toga se množi sa f/c . Prvi član $[\varphi_k(t) - \varphi^p(t)]$ pretpostavlja, znači, da se mjerenje rasprostiranja nosećeg vala događa u vakumu. Dalje razvijanje formule pretpostavlja da se vrijeme emitovanja i prijema razlikuje za τ - tačno vrijeme putovanja talasa u vakumu od satelita do prijemnika, pa je ta činjenica izražena formulom:

$$\varphi^p(t) = \varphi_T^p(t - \tau_k^p)$$

Daljim razvijanjem dolazi se do konačne formule:

$$\varphi_k^p(t) = \frac{f}{c} \rho_k^p(t) - f \left[1 - \frac{\rho_k^p(t)}{c} \right] dt_k + f dt^p + N_k^p(1) + \frac{a^p}{c} \rho_k^p(t) + I_{k,\varphi}^p(t) + \frac{f}{c} T_k^p(t) + d_{k,\varphi}(t) + d_{k,\varphi}^p(t) + d_\varphi^p(t) + \varepsilon_\varphi \quad (8)$$

ρ i p se računaju na naprijed opisani način.

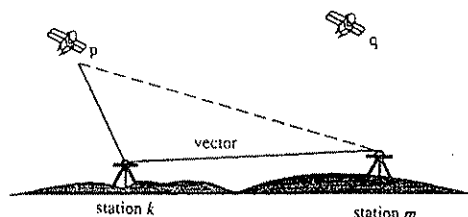
Sličnost sa formulom (5) za pseudodajline je evidentna.

k i m

Na st

opet

4.2.2. Pojedinačne razlike (single differences)



Sl.4.2. Geometrijska šema pojedinačnih razlika:
dva prijemnika opažaju isti satelit u istom trenutku

Ova metoda se koristi za određivanje rastojanja ili razlika koordinata dviju tačaka k i m vektora $\overline{S_{k,m}}$.

$$\overline{S_{k,m}} = \Phi_{m,p} - \Phi_{k,p} \quad (9)$$

Na stanicama k i m postavljaju se prijemnici i istovremeno mjere fazne razlike nosećeg talasa.

Znači sastave se jednačine (8) za mjerenja sa stanice k na satelit p i sa stanice m opet na satelit p. Njihova razlika je (za L1 noseći val):

$$\begin{aligned} \varphi_{km}^p(t) &= \varphi_k^p(t) - \varphi_m^p(t) = \\ &= \frac{f}{c} [\rho_k^p(t) - \rho_m^p(t)] + \frac{a_p}{c} [\rho_k^p(t) - \rho_m^p(t)] + \\ &+ \frac{f}{c} [\rho_k^p(t) dt_k - \rho_m^p(t) dt_m] + N_{km}^p(1) - f(dt_k - dt_m) + \\ &+ I_{km,\varphi}^p(t) + \frac{f}{c} T_{km}^p(t) + d_{km,\varphi}(t) + d_{km,\varphi}^p(t) + \varepsilon_{km,\varphi}^p \end{aligned} \quad (10)$$

Značenje članova ove formule:

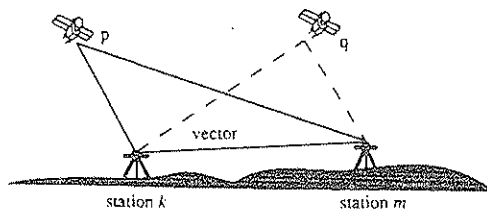
$$\begin{aligned}
 N_{km}^p(t) &= N_k^p(t) - N_m^p(t) \\
 I_{km,\varphi}^p(t) &= I_{k,\varphi}^p(t) - I_{m,\varphi}^p(t) \\
 T_{km}^p(t) &= T_k^p(t) - T_m^p(t) \\
 d_{km,\varphi}^p(t) &= d_{k,\varphi}^p(t) - d_{m,\varphi}^p(t) \\
 d_{km,\varphi}^p(t) &= d_{k,\varphi}^p(t) - d_{m,\varphi}^p(t) \\
 \varepsilon_{km,\varphi}^p(t) &= \varepsilon_{k,\varphi}^p(t) - \varepsilon_{m,\varphi}^p(t)
 \end{aligned} \tag{11}$$

Iz (11) se vidi da se skoro svi članovi u (10), sem prvog, bitno smanjuju ovim postupkom, a sa smanjenjem φ_{km} skoro iščezavaju. Tako se izbjegava mukotrpno uvođenje popravaka.

4.2.3. Dvostruke razlike (Double Differences)

To je slučaj kada se sa dvije stanice k i m u isto nominalno vrijeme opažaju dva satelita p i q . Znači, u stvari imamo razlike dvije pojedinačne razlike $k_{m,q} - k_{m,p}$. Formula će biti:

$$\begin{aligned}
 \varphi_{km}^{pq}(t) &= \varphi_{km}^p(t) - \varphi_{km}^q(t) = \frac{a^p}{c} [\rho_k^p(t) - \rho_m^p(t)] - \frac{a^q}{c} [\rho_k^q(t) - \rho_m^q(t)] + \\
 &+ \frac{f}{c} [\rho_k^p(t) - \rho_m^p(t)] - \frac{f}{c} [\rho_k^q(t) - \rho_m^q(t)] + \\
 &+ \frac{f}{c} [\rho_k^p(t) dt_k - \rho_m^p(t) dt_m] - \frac{f}{c} [\rho_k^q(t) dt_k - \rho_m^q(t) dt_m] + \\
 N_{km}^{pq}(1) &+ I_{km,\varphi}^{pq}(t) + \frac{f}{c} T_{km}^{pq}(t) + d_{km,\varphi}^{pq}(t) + \varepsilon_{km,\varphi}^{p,q}
 \end{aligned} \tag{12}$$



Sl.4. 3. Geometrijska šema dvostrukih razlika: dva prijemnika opažaju dva satelita u istom trenutku

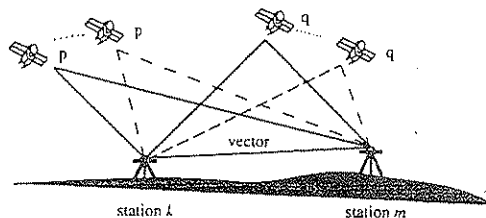
U ovoj formuli su:

$$\begin{aligned}
 N_{km}^{pq}(1) &= N_{km}^p(1) - N_{km}^q(1) \\
 I_{km,\varphi}^{pq}(t) &= I_{km,\varphi}^p(t) - I_{km,\varphi}^q(t) \\
 T_{km}^{pq}(t) &= T_{km}^p(t) - T_{km}^q(t) \\
 d_{km,\varphi}^{pq}(t) &= d_{km,\varphi}^p(t) - d_{km,\varphi}^q(t) \\
 \varepsilon_{km,\varphi}^{pq}(t) &= \varepsilon_{km,\varphi}^p - \varepsilon_{km,\varphi}^q
 \end{aligned}
 \tag{12'}$$

Najvažnija osobina ovoga postupka je da se eliminišu krupne greške dt_k i dt_m satova prijemnika, kao i greške satova na satelitima. Posebno ako su zanemarljive razlike u vremenu opažanja. Male greške satova koje su funkcija promjene topocentričkog rastojanja u ostale. Takođe se ne eliminiše uticaj reflektovanih talasa.

4.2.4. Trostruke razlike (Triple Differences)

Metoda trostrukih razlika je ustvari, razlika dvostrukih razlika između dvije različite epohe – trenutka.



Slika 4.4. Geometrijska šema trostrukih razlika: dva prijemnika opažaju dva satelita u dvije epohe (trenutka)

Ova metoda je možda najjednostavnija jer poništava neodređenost (ambiguity) cijelog broja valnih duljina. Rješenje položaja dobijeno ovom metodom često se razmatra kao "predprocesing tehnika" za dobijanje dobrog približnog položaja za metodu duplog diferenciranja.

4.3. Metode mjerenja

Važno je znati koju metodu ćemo primjeniti. To, naravno, zavisi od projekta zadatka koji se rješava, raspoložive opreme za mjerenje i obradu podataka itd.

Za razvijanje geodetskih mreža koristi se tzv. statička metoda kod koje se antena prijemnika centriše iznad centra biljege tačke u željenoj mreži. Kod statičke relativne metode prijemnik ostaje stacionaran dok se ne završe opažanja po unaprijed određenom planu. Vrijeme opažanja se razlikuje i zavisi od varijabli kao što su: sposobnost prijemnika (jedno ili dvo frekventni), softvera i dužine strane kao i namjene mreže. Koordinate te tačke dobiju se u WGS84 ili u nekom drugom željenom koordinatnom sistemu. Kinematička

metoda je kada je prijemnik u pokretu. Npr. kod određivanja položaja navigacionih objekata i kod raznih vrsta premjera i kartografisanja.

Sažetak

Na osnovi raspoložive literature dali smo kratak pregled tehnike, tehnologije, organizacije, štetnih uticaja i načina njihove eliminacije ili bitnog smanjenja na rezultate mjerenja sa GPS. Navedene su mogućnosti GPS u geodeziji, održavanju vremena, navigaciji itd. Cilj je upoznavanje šireg kruga stručnjaka sa ovom metodom budućnosti.

Abstract

Using literature we had at the disposal we gave the short review about technique, technology, organization, injurious influences and their elimination, or, at least, their essential reduces at the results of measuring with GPS. Possibilities of GPS in geodesy, timing, navigation etc are underlined. The aim is to make acquainted the large population of geodesists with this method of the future.

Literatura

1. Ž. Bačić, T. Bačić Satelitska geodezija II, skripta, Sveučilište u Zagrebu 1999.
2. A. Bilajbegović i dr. Osnovni geodetski radovi, suvremene metode – GPS. Tehn. knjiga Zagreb 1991.
3. W.H. Bragg U svetu svetlosti – Novo pokolenje Beograd – 1952.
4. B. Hofmann-Wellenhof, GPS Theory and Practic, Springer, Wien, New York, H. Lichtenegger, and J. Collins 1992.
5. A. Leick GPS Satellite surveying – N.York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore – 1994.
6. A. Muminagić Viša geodezija I, Građevinski fakultet Sarajevo – 1981.
7. A. Muminagić Viša geodezija II, Naučna knjiga Beograd 1987.