

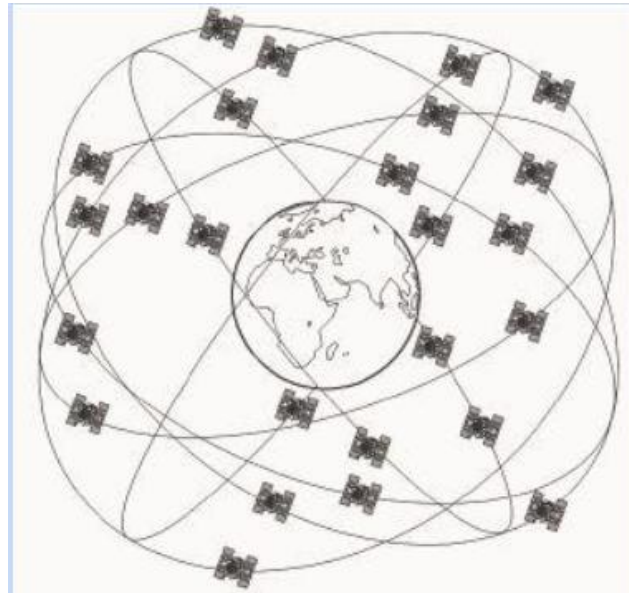


ANALIZA METODE MERENJA GPS TEHNOLOGIJOM

ANALIZA METODE MERENJA GPS TEHNOLOGIJOM

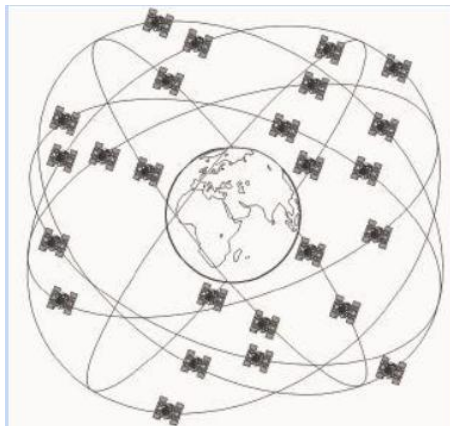
- Globalni Navigacioni Satelitski Sistemi (GNSS) je skup uređaja i programa kojima se vrši precizno određivanje položaja tačaka na Zemlji, vrši navigacija pokretnih objekata i distribuira tačno vreme.
- Satelitski sistemi za pozicioniranje i navigaciju:
 - Američki -NAVSTAR, sinonim za GPS,
 - Ruski - GLONASS,
 - Indijski lokalni – IRNSS,
 - Kineski – BeiDou (poznat i pod imenom COMPASS),
 - Evropski – GALILEO.
- Da bi se odredili izvori nesigurnosti (grešaka) kod GPS merenja potrebno je **ispitati karakteristike prijemnika i antena kao i izvore greške pseudodužina.**

OSOVNE KARAKTERISTIKE GPS SISTEMA



- **GPS je pasivni sistem** gde korisnici samo primaju signale.
- Koristi **trilateraciona metoda** pozicioniranja.
- **L opseg** frekvencija (1 GHz – 2 GHz).
- **Globalna pokrivenost**: 6 orbita sa 4-5 satelita u svakoj ravni.
- **Tri osnovne komponente**: kosmičke, kontrolne i korisničke.

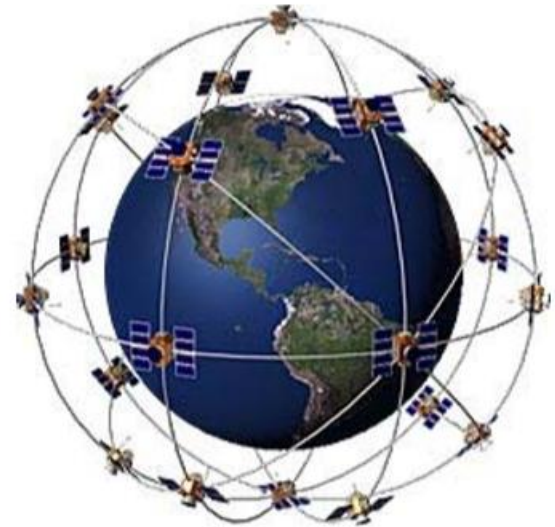
OSOVNE KARAKTERISTIKE GPS SISTEMA



OSOVNE KARAKTERISTIKE GPS SISTEMA

GPS se sastoji iz tri osnovna segmenta:

- svemirskog - kojeg čine sateliti koji šalju signale,
- kontrolnog - koji upravlja celim sistemom,
- korisničkog - koji uključuje različite tipove prijemnika.



Svemirski segment

- Sastoji se od 24 satelita koji se kreću u približno kružnoj orbiti na visini od 20200 km iznad Zemljine površine s periodom rotacije od približno 12 zvezdanih sati.
- Svaki satelit odašilje radio signal širokog spektra, precizno kontrolisani atomskim satovima, koji se nalaze u svakom satelitu.
- Visokotačni standardi frekvencije omogućuju da se precizno proizvede osnovna frekvencija u L-bandu (radijskom opsegu) od 10,23 MHz. Iz nje su izvedena dva signala, nosači L1 i L2, koji su generisani množenjem osnovne frekvencije sa 154 i 120: $L1 = 1575,42 \text{ MHz}$ i $L2 = 1227,60 \text{ MHz}$

OSOVNE KARAKTERISTIKE GPS SISTEMA

Kontrolni segment

- Kontrolni segment obuhvata glavnu komandnu stanicu, opažačke stanice i zemaljske kontrolne stanice.
- Glavni zadaci kontrolnog dela GPS-a su: praćenje satelita u svrhu određivanja orbita i vremena, sinhronizacija vremena satelita i slanje poruka s neophodnim informacijama o satelitima.
 - **Opazačke stanice** razmeštene su na Zemljinoj površini u blizini ekvatora. Svaka od ovih stanica opremljena je preciznim atomskim satom i neprekidno meri pseudoudaljenosti do svih satelita na horizontu. Ta se merenja registruju svakih 1,5 sekundi, te se koristeći jonosferske i meteorološke podatke, podaci filtriraju u 15-minutne intervale podataka koji se šalju glavnoj kontrolnoj stanici.
 - **Glavna kontrolna stanica** smeštena je u Falconu, Colorado Springs, Colorado. Ovde se sakupljaju podaci s opažačkih stanica, računaju putanje satelita i parametri sistema. Podaci se potom prosleđuju jednoj od tri zemaljske stanice, radi eventualnog slanja prema satelitima.
 - **Zemaljske kontrolne stanice** šalju satelitu podatke o efemeridama i o satovima satelita izračunate u glavnoj kontrolnoj stanici, te se zbog toga sastoje od velikih antena s pratećom opremom. Efemeride su tačni podaci o položaju satelita.

OSOVNE KARAKTERISTIKE GPS SISTEMA

Korisnički segment

- Korisnički segment čine svi prijemnici i njegovi korisnici.
- koriste za izvođenje svih vrsta geodetskih kontrolnih i inženjerskih radova, u fotogrametriji, za snimanje linijskih objekata, u vazdušnom, vodenom, kopnenom saobraćaju, geofizici, poljoprivredi i šumarstvu itd.
- Sastoji se od hardvera i softvera.
- Hardver - tri osnovne komponente: **antena** (prima frekvencije sa GPS satelita), **kristalni oscilator** (služi kao časovnik), **mikroprocesor** (obrađuje signale).
- Softver – čine različite verzije kompijuterskih programa koji omogućavaju prikupljanje podataka, njihovu obradu, analizu, čuvanje, razmenu i grafički prikaz.

GPS SIGNALI

- Vremenski interval koji je potreban da se dobije max korelacija, služi za merenje pseudodužine, a fazna razlika između signala prijema i njegove modulirane replike je fazno merenje.

GPS signali sastoje se od tri komponente:

- Noseći talasi (na dve osnovne frekvencije):
 - L1:1575.42 MHz (154x10.23 MHz), talasne dužine ~190 mm
 - L2: 1227.60 MHz (120x10.23MHz), talasne dužine ~ 244 mm
 - Planirano i L5: 1176.45 MHz (115x10.23MHz)
- Kodovi: C/A (1.023 MHz), P(Y) (10.23 MHz).
- Navigacioni podaci.

PRINCIPI GPS MERENJA

- Dve osnovne vrste mernih veličina: kodna (C/A, P) i fazna merenja (L1, L2).

Kodna merenja

- **Pseudodužina:** $PR = c \cdot (t_r - t_s)$, PR - pseudodužina između prijemnika r i satelita s , t_r - vreme prijema signala, t_s - vreme emitovanja signala, c - brzina prostiranja signala.
- Satelitski časovnik odstupa od sistemskog GPS vremena za Δt_s , časovnici u satelitu i prijemniku sinhronizovani su sa greškom Δt_u , signal pri kretanju kroz atmosferu ima vreme kašnjenja Δt_a , pri merenju su prisutne slučajne greške ε_R , sledi da je **pseudodužina**:

$$PR = c \cdot (t_r - t_s) = R + c \cdot \Delta t_u + c \cdot \Delta t_a - c \cdot \Delta t_s + \varepsilon_R$$

pri čemu je R - geometrijsko rastojanje između satelita i prijemne antene.

PRINCIPI GPS MERENJA

Fazna merenja

- Fazna razlika je razlika između faze talasa oscilatora prijemnika i primljenog signala:

$$\Delta\phi_r^s(t_r) = \phi_s(t_s) - \phi_r(t_r) \cdot t$$

- Pomoću faze referentnog signala određuje se trenutak prijema signala u vremenskom sistemu prijemnika:

$$t_r = \frac{\phi_r(t_r)}{f_r}$$

- Pseudoduzina** koja se meri jednaka je:

$$PR = c \cdot (t_r - \bar{t}_s) = R + c \cdot \Delta t_u + c \cdot \Delta t_a - c \cdot \Delta t_s + N \cdot \lambda$$

- Razlika kodnih i faznih merenja – fazna neodređenost.
- U zavisnosti od načina tretiranja sistematskih grešaka, obrada kodnih i faznih merenja vrši se na dva načina:
 - ocenjivanjem,
 - eliminacijom.

PRINCIPI GPS MERENJA

- Kako su fazna merenja preciznija od kodnih, potrebno je precizno i konzistentno definisati trenutke vremena prijema, odnosno emitovanja signala.
- U slučaju prekida praćenja signala pojavljuje se izvor greške zbog fazne neodređenosti (koja ne zavisi od vremena i konstantna je sve dok prijemnik neprekidno prati signal).
- Generalno, uticaji multiputanja i jonosfere mogu dostići do $\approx 30\text{m}$, a troposferska (atmosferska) refrakcija 3-30m.

Određivanje pojedinih izvora grešaka pri merenju

- Kako se elektromagnetni talasi prostiru od satelita do prijemnika kroz atmosferu, na vrednost merene pseudoduzinu utiče više izvora grešaka:
 1. greške u vezi satelita,
 2. greške u vezi prijemnika,
 3. greške u vezi sa atmosferom.
- Prema karakteru uticaja greške se mogu podeliti na: slučajne, sistematske, grube.

1. Greške u vezi satelita

- greške efemerida i satelitskih orbita,
- greške časovnika satelita,
- uticaj kvaliteta geometrije.

2. Greške u vezi prijemnika

- greške prijemnika,
- ekscentricitet faznog centra antene i njegove varijacije,
- fazni skokovi i celobrojna neodređenost.

3. Greške u vezi sa atmosferom

- jonosferska refrakcija,
- troposferska refrakcija,
- višestruka refleksija signala.

Klasifikacija grešaka po značaju

1. Greške u vezi satelita

1. Greške efemerida i satelitskih orbita

Greške satelitskih efemerida potiču od predviđanja položaja satelita (sadržane su u navigacionoj poruci) i izvor su grešaka u računanju apsolutnog položaja tačke. Kontrolni segment sistema obezbeđuje tačnost položaja satelita od 1-2 m. Za postizanje veće tačnosti koriste se precizne efemeride tačnosti do 5 cm.

Greške satelitske orbite, a posebno komponenta u pravcu merene pseudodužine utiče na apsolutne koordinate tačke. Kod relativnog pozicioniranja, greška orbite od 25 m dovodi do greške vektora od 1ppm.

2. Greške časovnika satelita

Ova greška direktno utiče na tačnost merenja pseudodužine preko merenja vremena puta signala.

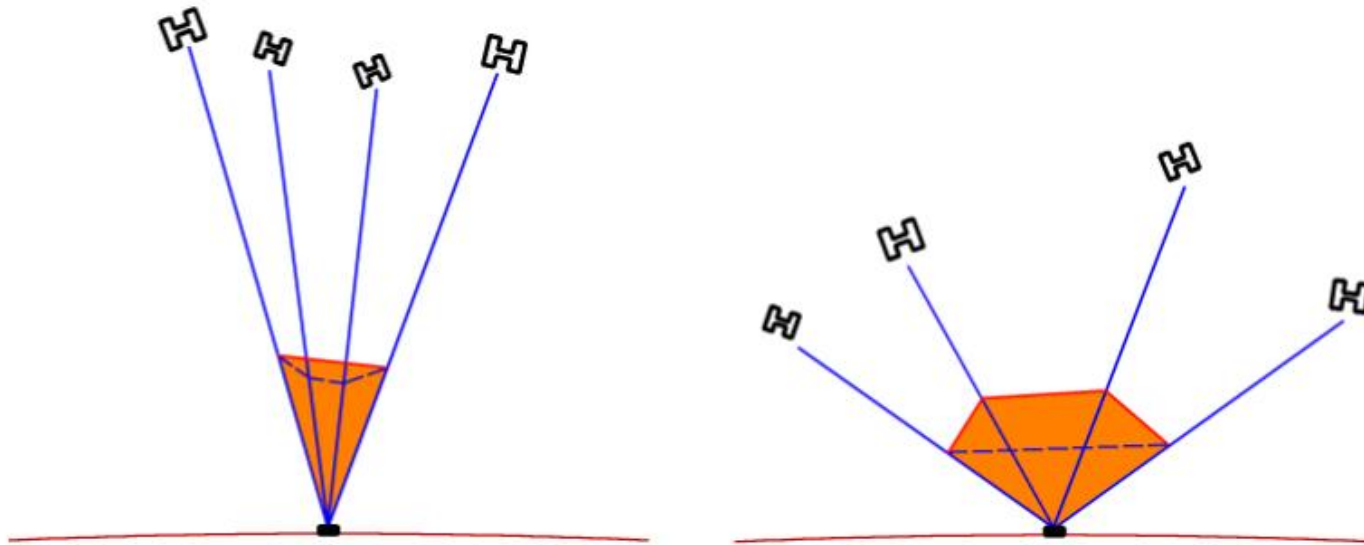
Nominalna tačnost časovnika satelita je 1ns. Stanje časovnika satelita se prati od strane kontrolnog centra kao i odstupanje od sistemskog GPS vremena koje se održava u granicama od 1 ms.

Klasifikacija grešaka po značaju

1. Greške u vezi satelita

3. Uticaj kvaliteta geometrije satelita

- Kvalitet geometrije satelita značajno utiče na preciznost merenja, a kao mera kvaliteta geometrije koristi se vrednost DOP (Dilution Of Precision) (“dilatacija” preciznosti).
- Može se posmatrati kao recipročna vrednost zapremine odgovarajuće prizme sa temenom u tački opažača. Veća zapremina ovog tela znači bolju satelitsku geometriju. Pošto dobra geometrija znači nizak DOP faktor, recipročna vrednost zapremine ovog tela direktno je proporcionalna DOP faktoru.
- Geometrija kvaliteta satelita se izražava pomoću:
 - 1.HDOP (Horizontal Dilution Of Precision) (greška horizontalnog položaja).
 - 2.VDOP (Vertical Dilution Of Precision) (greška vertikalnog položaja).
 - 3.PDOP (Position Dilution Of Precision) je kombinacija horizontalne i vertikalne komponente, ukupne greške položaja zbog geometrije satelita.
 - 4.GDOP (Geometric Dilution of Precision) daje ocenu stanja satelita za datu lokaciju i vreme (pozicija satelita relativno u odnosu na druge satelite).



Loš (levo) i dobar (desno) PDOP

PDOP vrednosti mogu se prema kvalitetu podeliti u nivoe:

- $PDOP \leq 4$ – izvrsno,
- $PDOP 5-8$ – prihvatljivo,
- $PDOP \geq 9$ – loše.

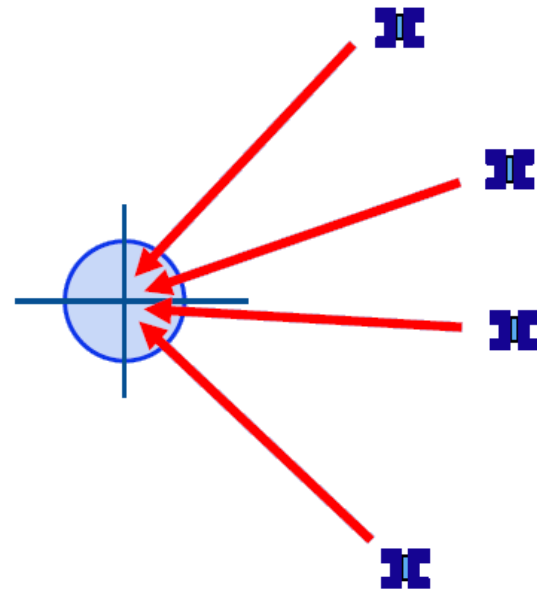
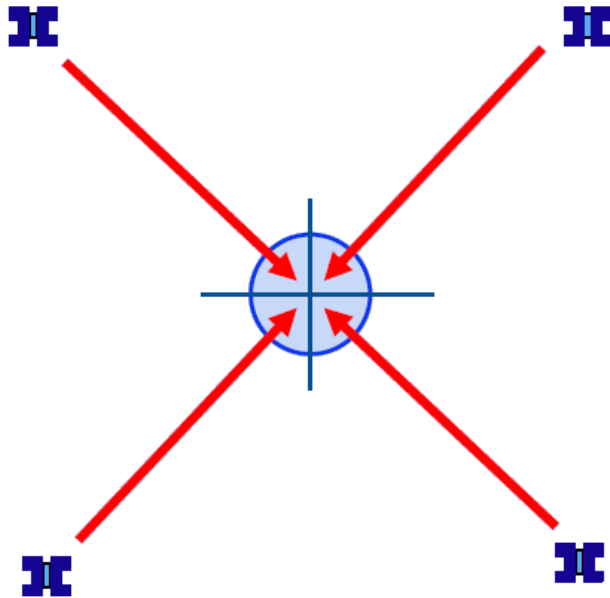
U zavisnosti od vrste pozicije prijemnika, postoje odgovarajuće vrednosti:

- HDOP (horizontalni DOP) za dvodimenzionalni položaj (x,y)- max vrednost 3.
- VDOP (vertikalni DOP) za visinu (h)- max vrednost 5.
- PDOP (poziciona DOP) za trodimenzionalni položaj (X,Y,Z)- max vrednost 6.

Klasifikacija grešaka po značaju

- Za vrednosti DOP-a < 1 ostvarena je najviša moguća preciznost, a za vrednosti od 1-2 odlična.

HDOP

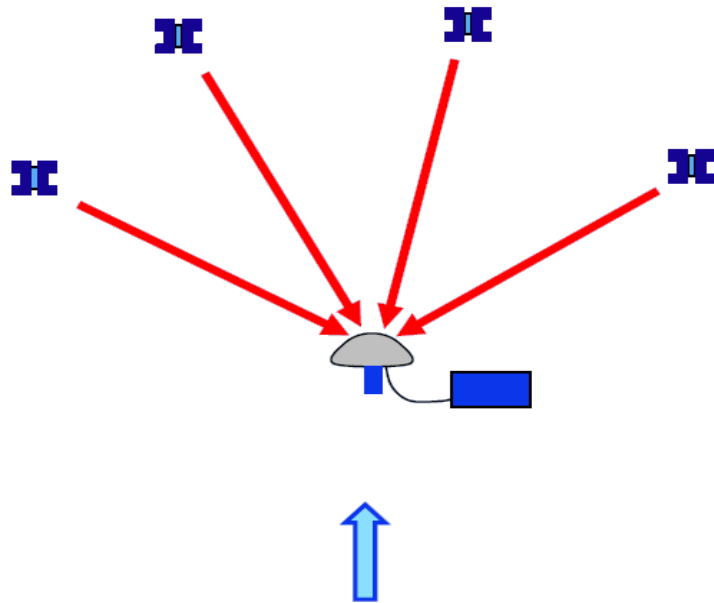


- ✓ Ravnomerna raspoređenost 4 satelita (u četiri kvadranta) u odnosu na horizont opažača, mala vrednost HDOP-a.

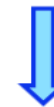
Neravnomeran raspored 4 satelita (u dva kvadranta) u odnosu na horizont opažača, visoka vrednost HDOP-a.

Klasifikacija grešaka po značaju

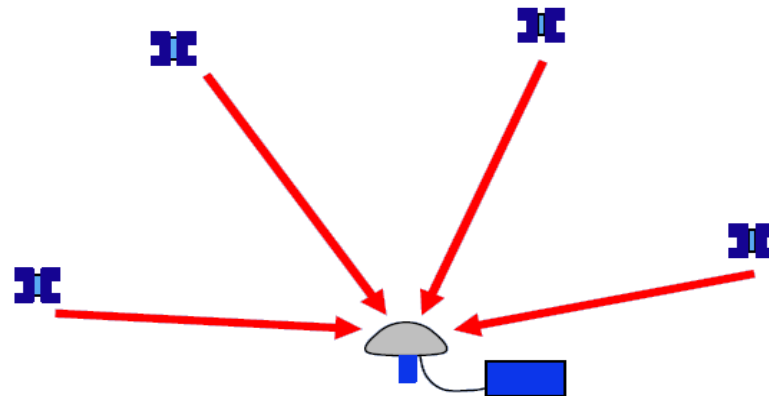
VDOP



Neravnomerna raširenost 4 satelita na nebu (2 “niska satelita”) u odnosu na opažača, visoka vrednost VDOP-a.



- ✓ Ravnomerna raširenost 4 satelita na nebu u odnosu na opažača, mala vrednost VDOP-a.



Klasifikacija grešaka po značaju

2. Greške u vezi prijemnika

1. Greške prijemnika

- Ukupna greška prijemnika potiče od časovnika prijemnika i elektronskih komponenti prijemnika.
- Časovnici prijemnika su kvarcni oscilatori čija je nominalna tačnost 1 μs .
- Tipovi oscilatora: TCXO - temperaturno kompenzovan kristalni oscilator, OCXO - kristalni oscilator na bazi temperaturno stabilne pećnice, VCXO - naponski kontrolisan kristalni oscilator
- Glavne osobine kvarca: stabilnost frekvencije, parametar starenje.
- Izlazni signal jednog realnog oscilatora:

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi f_0 t + \varphi(t)) = U_0 \cdot \sin \Phi(t)$$

Klasifikacija grešaka po značaju

2. Greške u vezi prijemnika

Ispitivanje stabilnosti oscilatora prijemnika

- Relativno frekventno odstupanje: kao mera stabilnosti:

$$y(t) = \frac{f_r(t)}{f_0} = \frac{\phi(t)}{2\pi f_0}, f_r(t) = f(t) - f_0$$

Specijalne varijanse (Alanove varijanse) definišu stohastičke frekvencijske fluktuacije u vremenskom i u frekvencijskom domenu:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N - 2n + 1)} \sum_{k=1}^{N-2n+1} (\bar{y}_{k+n} - \bar{y}_k)^2, \bar{y}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} y_i$$

Stabilnost oscilatora u frekvencijskom domenu opisuje se spektralnom gustinom:

$$S_y(f) \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha}, \alpha = -\mu - 1$$

Frekvencijski standardi se kalibrišu poređenjem prema sledivom referentnom standardu - Jedna od vodećih laboratorija u svetu - Američka laboratorija NIST.

Klasifikacija grešaka po značaju

2. Greške u vezi prijemnika

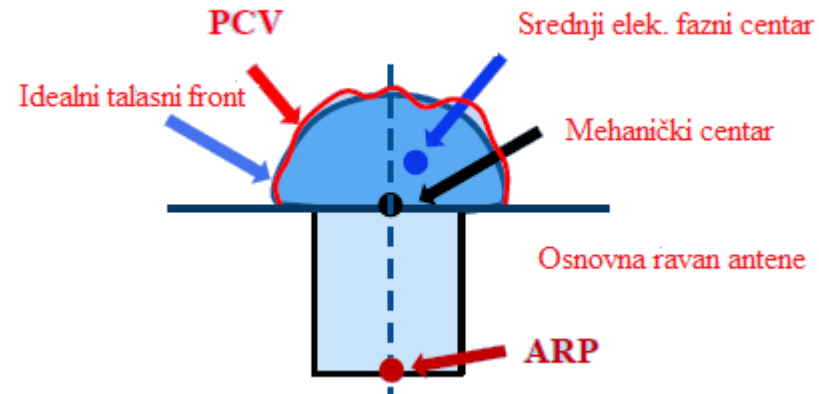
- Greške zbog kašnjenja signala - termički šum u hardveru za praćenje signala je izvor slučajnih grešaka koje pre svega utiču na preciznost merenih kodnih i faznih merenja.

2. Ekscentricitet faznog centra antene i njegove varijacije

Različiti tipovi antena: mikrostrip, jedno ili dvopolne, kvadrifilarna, spiralno helikoidna, choke ring.

Definicija faznog centra antene:

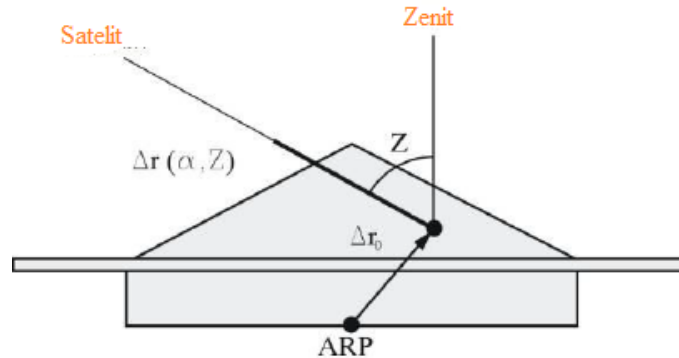
- Srednji električni fazni centar antene,
- Mehanički centar antene,
- Referentna tačka antene (ARP),
- Trenutni položaj elektr. faznog centra (PCV)



Klasifikacija grešaka po značaju

2. Greške u vezi prijemnika

- Varijacija faznog centra antene imaju sistematski uticaj.



$$\mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r}(\alpha, z)\mathbf{e}$$

- Glavne prednosti apsolutnih vrednosti PCV-a:
 - 1) oslobođene od uticaja multiputiputanja i
 - 2) pokrivaju celu hemisferu
- Apsolutne metode određivanja faznog centra:
 - „gluva” komora (anechoic chamber calibration)
 - robotizovani sistem kalibracije
- Relativne metode određivanja faznog centra
 - terenska kalibracija (absolute field calibration): korekcije faznog centra test antene zasnovane na apsolutnim vrednostima referentne antene dobijene u komori.

Klasifikacija grešaka po značaju

2. Greške u vezi prijemnika

3. Fazni skokovi i celobrojna neodređenost

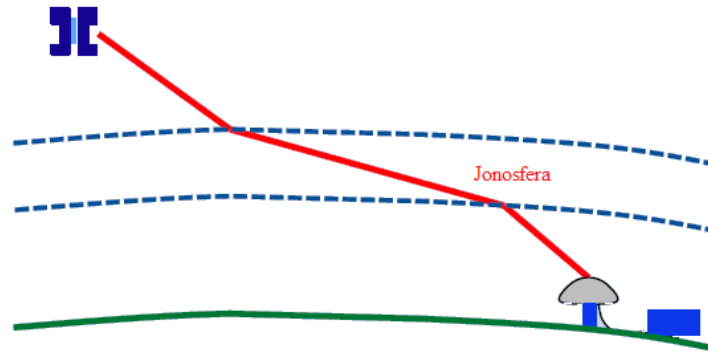
- GPS prijemnici mere deo talasne dužine (npr. deo od 19 cm za L1 signal) kada se prijemnik prvi put “lokuje” na satelit i kontinuirano meri fazu od tog trenutka.
- Broj ciklusa između satelita i prijemnika kod inicijalizacije (inicijalni ceo broj N je nepoznat - fazna neodređenost) i merena faza su povezane sa geometr. dužinom izrazom: $\Phi = \rho + N \lambda + \varepsilon$
- U slučaju gubitka signala dolazi do faznog skoka i prijemnik se ponovo inicijalizuje pri čemu se pojavljuje nova celobrojna neodređenost.
- Izvori faznih skokova: - prepreke na putu satelitskog signala (zgrade, drveće i dr.) - nizak odnos signala i šuma (SNR) zbog loših uslova atmosfere, multiputanja, niske visine satelita i dr. - greška obrade signala zbog softvera prijemnika

Klasifikacija grešaka po značaju

3. Greške u vezi sa atmosferom

1. Jonosferska refrakcija

- Emitovan signal sa GPS satelita dolazi do jonosfere (najviši sloj atmosfere, donja granica ~ 60 km, gornja granica ~ 1000 km) koja uzrokuje “promenljivo vreme kašnjenja” signala, odnosno dolazi do jonosferske refrakcije.
- Jonosfera kao disperzivna sredina utiče na signale na različitim frekvencijama različito, odnosno pojavljuju se različita kašnjenja.



- Za izračunavanje kašnjenja signala koriste se neki od modela koji uzimaju u obzir gustinu elektrona duž putanje signala (TEC kao integral gustine elektrona).
- Sadržaj elektrona zavisi od više parametara: časa u danu, latitude mesta opažanja, visine satelita, godišnjeg doba i dr.

Klasifikacija grešaka po značaju

3. Greške u vezi sa atmosferom

2. Troposferska refrakcija

- Troposfera je najniži deo Zemljine atmosfere, maksimalne visine 18 km i čine je neutralni atomi i molekuli.
- Vrednost kašnjenja signala je identičan na svim frekvencijama i na svim tipovima merenja (kodna i fazna).
- Troposferska refrakcija zavisi od atmosferskih parametara: pritiska, temperature i vlažnosti vazduha kao i od geometrije satelit-prijemnik (ugla elevacije satelita) i položaja prijemnika.
- Za troposferske uticaje primenjuju se adekvatni modeli i parametri troposf. refrakcije se ocenjuju tokom GPS pozicioniranja.

Klasifikacija grešaka po značaju

3. Greške u vezi sa atmosferom

3. Višelinijiska putanja signala

- Pojava višelinijiskih putanja se javlja kada signal koji emituje satelit stigne do prijemnika pošto je prešao putanju koja nije direktna putanja, naročito posle refleksije od bliske prepreke.
- Zavisi isključivo od okruženja prijemnika (prirodnih reflektujućih površina i veštačkih objekata) i utiče na različit način na fazna i kodna merenja pseudoduzina.
- Korišćenje antena sa odgovarajućom zaštitom ili antena koje su projektovane da bi se ovaj uticaj eliminisao ili umanjio.

Klasifikacija grešaka po značaju

Izrazi za ocenu tačnosti merenja GPS vektora, uslovi tačnosti (empirijske pretpostavke)

- Izvore slučajnih grešaka u GPS kodnim i faznim merenjima predstavljaju, pre svega procesi u elektronskim sklopovima prijemnika i pojava višestruke refleksije signala.
- Njihovo dejstvo su slučajne greške merenja koje se označavaju kao komponente tzv. mernog šuma.
- Pored njih, u sastav mernog šuma ulaze i nemodelirani sistematski uticaji kao i nepoznate rezidualne greške koje su preostale nakon eliminacije ili redukcije sistematskih uticaja.
- Kod formulacije stohastičkog modela originalno merenih faznih i kodnih pseudodužina usvajaju se sledeće empirijske pretpostavke:
 - Fazne i kodne pseudodužine na obe frekvencije usvajaju se kao međusobno nezavisne,
 - Merni šum faznih i kodnih pseudodužina sastavljen je od nemodeliranih i slučajnih rezidualnih komponenti, slučajne greške usled višestruke refleksije signala i slučajne greške merenja elektronskih uređaja za praćenje signala.
 - Za različita zenitna odstojanja GPS satelita signali prelaze različite puteve kroz Zemljinu atmosferu od čega zavisi intenzitet rezidualnih atmosferskih uticaja, pa je tačnost izmerenih faznih i kodnih pseudodužina u funkciji visine satelita iznad horizonta.
 - Na tačnost pseudodužina utiče jačina GPS signala koja zavisi od dužine puta kroz Zemljinu atmosferu i visine satelita.

Klasifikacija grešaka po značaju

Izrazi za ocenu tačnosti merenja GPS vektora, uslovi tačnosti (empirijske pretpostavke)

Varijansa faznih i kodnih merenja ima sledeću strukturu:

$$\sigma^2 = \sigma_A^2 + \sigma_M^2 + \sigma_\varepsilon^2$$

(σ_A - standard merenja pseudodužine slučajnih rezidualnih atmosferskih varijacija, σ_M - standard slučajnog uticaja višestruke refleksije, σ_ε - standard slučajnih grešaka praćenja signala)

Pored toga, varijansa je funkcija parametra p koji može biti zenitno odstojanje satelita ili odnos signala i šuma SNR:

$$\sigma^2(\alpha) = \begin{cases} \sigma^2, & \alpha > \alpha_0 \\ \sigma^2(\alpha), & \alpha \leq \alpha_0 \end{cases}$$

MNK izravnanjem velikog broja merenja kod relativnog statičkog GPS pozicioniranja postiže se tačnost relativnog položaja od nekoliko milimetara (1-5mm).

Model dvostrukih razlika faznih pseudodužina: $L_{A-B} = r_{A-B} + \lambda \cdot N_{A-B} + M_{A-B} + \varepsilon_{A-B}$.

Klasifikacija grešaka po značaju

Izrazi za ocenu tačnosti merenja GPS vektora, uslovi tačnosti (empirijske pretpostavke)

- **Postavljanjem odgovarajućih uslova pri merenju** trebalo bi da budu obuhvaćeni uticaji koji doprinose ukupnoj tačnosti, kao što su:
 - dužina merne sesije,
 - izbor najpovoljnijih perioda za merenje,
 - način otklanjanja ili smanjenja pojedinih izvora grešaka (faznih skokova, geometrije satelita, refleksije signala).
- **Preciznost GPS merenja** se može odrediti *metodom nulte baze* kada je jedna antena povezana sa dva prijemnika istog tipa.

Metode merenja tehnikom GPS

- **Tri osnovna problema pozicioniranja:**
 - pozicioniranje jedne tačke (apsolutno pozicioniranje),
 - pozicioniranje dve tačke (relativno pozicioniranje),
 - pozicioniranje više tačaka.
- **Tri režima rada pri određivanju koordinata tačaka:**
 - statički (prijemnici nepokretni za vreme opažanja),
 - kinematički (prijemnici se kreću za vreme opažanja),
 - diferencijalni GPS (koriste se nepokretni i pokretni prijemnici).
- **Četri metode pozicioniranja primenom GPS:**
 - apsolutno statičko pozicioniranje,
 - relativno statičko pozicioniranje,
 - apsolutno kinematičko pozicioniranje,
 - relativno kinematičko pozicioniranje.

Metode merenja tehnikom GPS

Pozicioniranje	Metoda	Karakteristike	Tačnost
Apsolutno	Apsolutna statička	Primenom C/A koda	20 m – 50 m
		Primenom P koda	5 m -20 m
		Korišćenjem preciznih efemerida	2 m - 5 m
	Apsolutna kinematička	Veoma kratkotrajna opažanja (1 ms)	20 m – 50 m
Relativno	Relativna statička	Dugotrajna opažanja (čas, dan). Baze veće od 100 km	0,1 mm + 1mm/km
		Kratkotrajna opažanja (5-30 min). Kratke baze, manje od 10 km. Dvofrekventni prijemnici	5 mm + 1mm/km
	Relativna kinematička	Kratkotrajna opažanja (5 min). Neophodno vraćanje na stanicu.	5 mm + 1mm/km
		Kratkotrajna opažanja. Potrebna veza među stanicama.	5 mm + 1mm/km
		Rad bez zaustavljanja. Zahteva se poseban softver.	1 cm - 5 cm + 1mm/km
	Diferencijalni GPS (dgps)		
		Primenom kodnih merenja	0,6 m – 15 m
		Primenom faznih merenja	0,6 mm – 6 mm