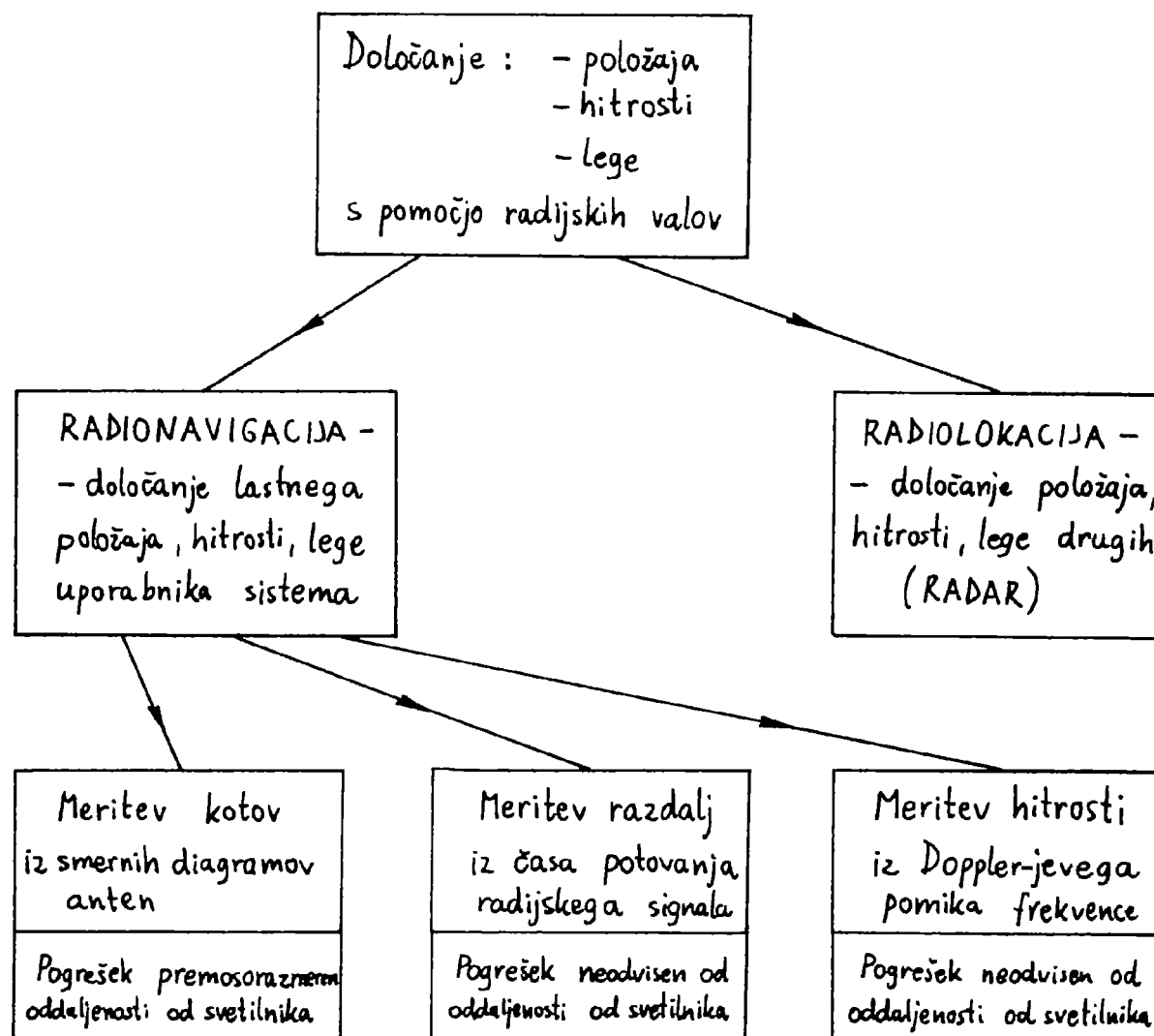


## 8. Osnove radionavigacije

### 8.1. Radiolokacija in radionavigacija

Elektromagnetnega valovanja, ki se prosto razširja po prostoru, ne uporabljamo samo za radijske komunikacije v ožjem pomenu besede, to se pravi za prenos informacije na daljavo. Zelo pomembno področje uporabe radijskih valov je določanje položaja, hitrosti in lege s pomočjo radijskih valov. ITU Radio Regulations takšno uporabo obravnava kot storitvi (službi) radiolokacije in radionavigacije.

Razlika med radiolokacijo in radionavigacijo je zelo preprosta in je prikazana na sliki 8.1. Pri radionavigaciji uporabnik določa lasten položaj, hitrost in lego (orientacijo), kjer so vse tri veličine vektorji. Pri radiolokaciji določamo položaj, hitrost in lego drugih.



Slika 8.1 - Radiolokacija in radionavigacija.

Meja med radiolokacijo in radionavigacijo ni ostra. Isto

napravo lahko uporabljamo za oboje. Radar v nosu potniškega letala se uporablja za ugotavljanje položaja nevihtnih oblakov, torej radiolokacija. Isti radar lahko opazuje tudi relief zemljišča, iz česar določimo položaj letala, torej radionavigacija.

Pri radiolokaciji in radionavigaciji lahko merimo različne veličine: kote iz smernih diagramov anten, razdalje iz časa potovanja radijskega signala in hitrosti iz Doppler-jevega pomika frekvence. Pogosto isti sistem izkorišča več različnih meritev na istem radijskem signalu. Pri meritvi zakasnitve in Doppler-jevega pomika je pogrešek neodvisen od razdalje, kotna napaka pa pomeni napako v položaju, ki se linearno veča z oddaljenostjo.

Pri radiolokaciji razlikujemo med pasivnim in aktivnim merjenjem. Pasivni merjenec nima nobene radijske opreme in izkoriščamo le odboj radijskih valov na njegovi površini. Aktivni merjenec ima vgrajen radarski odzivnik s sprejemnikom in oddajnikom, ki ojača odmev ter mu lahko doda še druge podatke.

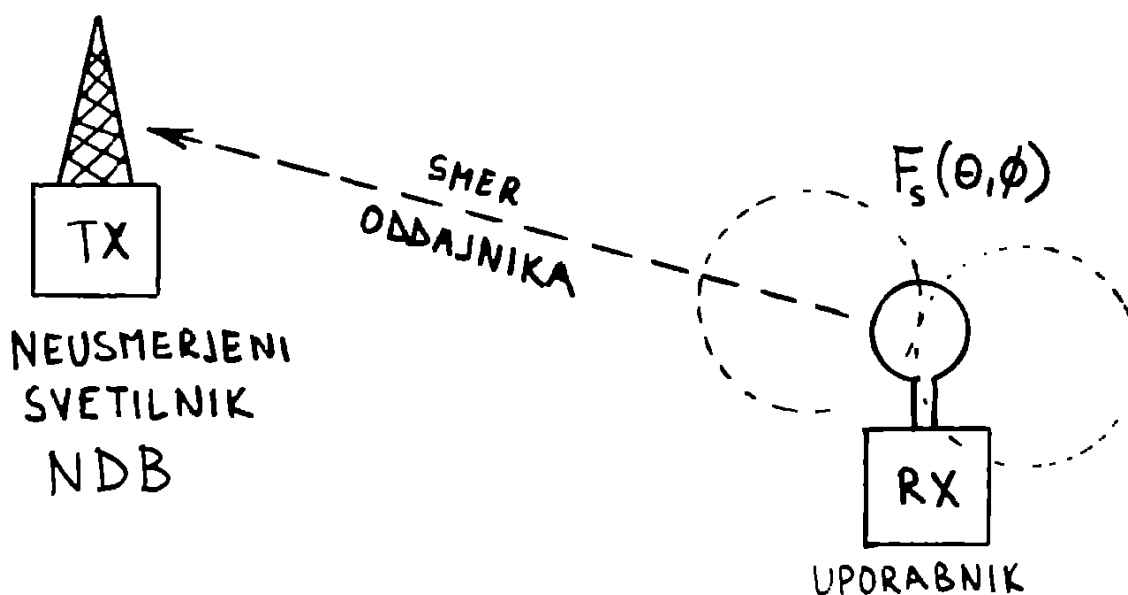
Pri radionavigaciji razlikujemo med pasivnim in aktivnim uporabnikom. Pasivni uporabnik ima samo radijski sprejemnik in z njim meri signale radijskih svetilnikov. Aktivni uporabnik ima radijski oddajnik in radijski sprejemnik, oddaja vprašanja in sprejema pasivne odmeve ter odgovore radijskih svetilnikov. Število uporabnikov v aktivnem sistemu je seveda omejeno z medsebojnimi motnjami.

V radijskih komunikacijah Shannon-ov izrek natančno določa povezavo med potrebno močjo oddajnika in pasovno širino signala. Pri radiolokaciji in radionavigaciji je pasovna širina lahko zelo različna v različnih sistemih. Za nekatere meritve (koti, Doppler) zadošča že nemoduliran nosilec. Časovne meritve zahtevajo ozke impulze, znana zaporedja merilnih vzorcev oziroma širokopasovno frekvenčno modulacijo.

Različni sistemi radiolokacije in radionavigacije delajo na zelo različnih frekvencah. Spodnjo frekvenčno mejo radijskega spektra 9kHz določa prav radionavigacijski sistem OMEGA. Radionavigacija na nizkih frekvencah, v področju dolgih in srednjih valov, omogoča velik domet preprostih svetilnikov. Mikrovalovna frekvenčna področja omogočajo širokopasovno modulacijo in s tem točne časovne meritve. ITU Radio Regulations zato dodeljuje različna frekvenčna področja obema storitvama.

## 8.2. Kotni radionavigacijski sistemi

Kotni radionavigacijski sistemi sodijo med najstarejše vrste radionavigacije. Kot neusmerjeni radijski svetilnik ali NDB (Non-Directional Beacon) lahko uporabljamo katerikoli radijski oddajnik, saj za meritve smeri zadošča že nemoduliran nosilec. Sodobni letalski radionavigacijski svetilniki delujejo v frekvenčnem pasu 190kHz-1800kHz. Sprejemnik je opremljen z usmerjeno anteno in z njeno pomočjo lahko določimo smer proti oddajniku, kot je to prikazano na sliki 8.2.



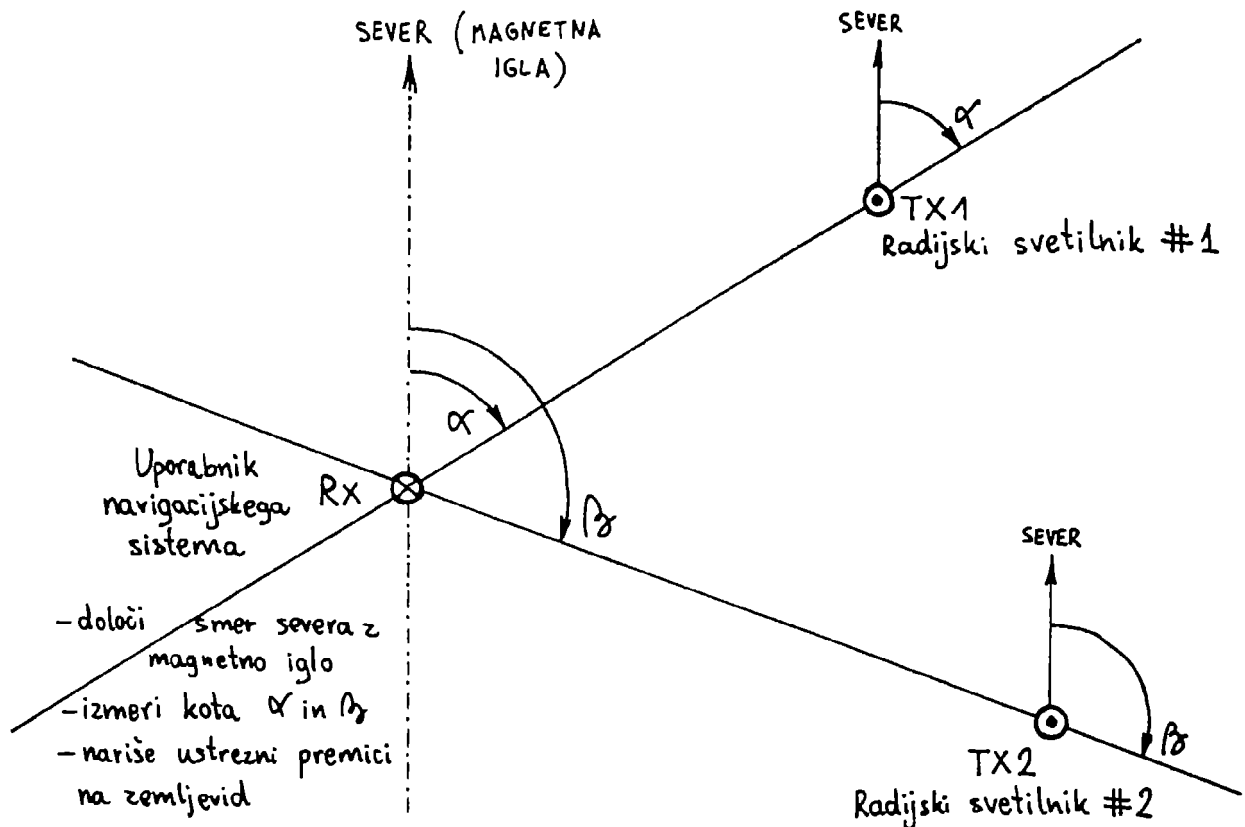
Slika 8.2 - Delovanje radiokompasa (ADF).

Začetek radijske tehnike predstavljajo dolgovalovni (30kHz-300kHz) in srednjevalovni (300kHz-3MHz) oddajniki, ki uporabljajo kot anteno visok stolp, ki seva pokončno polarizirano valovanje. Sprejemniki so pogosto opremljeni z majhno zanko kot sprejemno anteno. Majhna zanka je magnetna antena in ima smerni diagram v obliki osmice v vodoravni ravnini. Če sprejemno anteno vrtimo okoli pokončne osi, dobimo dva maksimuma in dva minimuma. Iz minimumov lahko precej natančno določimo smer oddajnika.

Sprejemnik izboljšamo z dodatkom male električne antene. Vsota smernih diagramov električne in magnetne antene ima samo en maksimum in en minimum, kar izloči dvoumnost pri določanju smeri oddajnika. Izboljšani radiokompas ali ADF (Automatic Direction Finder) ima vgrajeno krmilno elektroniko, ki sama mehansko oziroma električno zavrti magnetno anteno in poišče smer oddajnika.

Točnost radiokompasa je omejena predvsem s točnostjo smernega diagrama sprejemne antene. Ko je sprejemna antena vgrajena na kovinsko vozilo nepravilne oblike (letalo ali ladja), je točnost radiokompasa v velikostnem razredu  $\pm 10^\circ$ . Dvodimenzijska radionavigacija z magnetno iglo in radiokompasom je sicer možna, kot je to prikazano na sliki 8.3, vendar je zelo nenatančna.

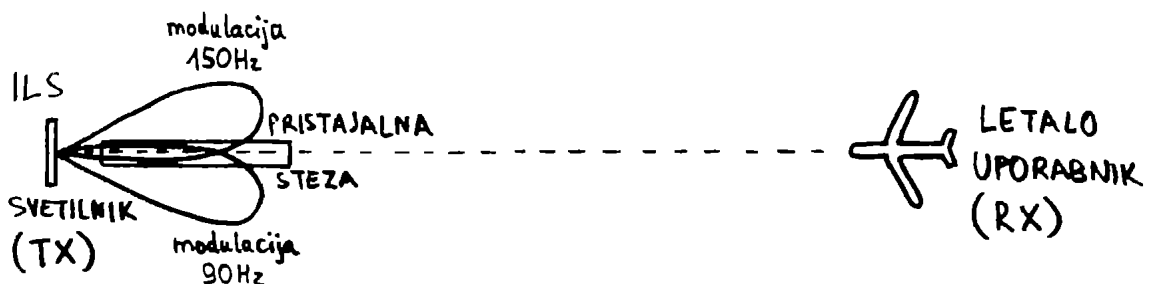
Točnost kotnega radionavigacijskega sistema lahko precej izboljšamo, če uporabimo usmerjene antene na radijskih svetilnikih. Svetilnik izdelamo dovolj velik in odstranimo ovire v njegovi bližnji okolici, tako da je smerni diagram oddajne antene nemoten. V preteklosti je bilo razvitih več različnih radionavigacijskih sistemov z usmerjenimi oddajnimi antenami za uporabo v pomorstvu in v letalstvu.



Slika 8.3 - Dvodimenzijska navigacija z radiokompasom.

V civilnem letalstvu ima danes še vedno osrednjo in najpomembnejšo vlogo sistem za instrumentalno pristajanje ali ILS (Instrumented Landing System). ILS je zelo preprost in vsebuje dva svetilnika za vodenje letala v vodoravni in pokončni ravnini proti pristajalni stezi. Oddajne antene imajo dva snopa, oba oddajata na istem radiofrekvenčnem kanalu z vodoravno linearno polarizacijo. Desni oziroma spodnji snop antene je amplitudno moduliran s 150Hz, levi oziroma gornji snop pa je amplitudno moduliran z 90Hz.

Letalo ima dva radijska sprejemnika z neusmerjenima antenama in vodoravno polarizacijo. Sprejemnik za vodoravno komponento ILS ali LOC (LOCALizer) dela v frekvenčnem pasu 108MHz-112MHz, sprejemnik za pokončno komponento ILS ali GS (Glide Slope) pa v frekvenčnem pasu 328MHz-336MHz.

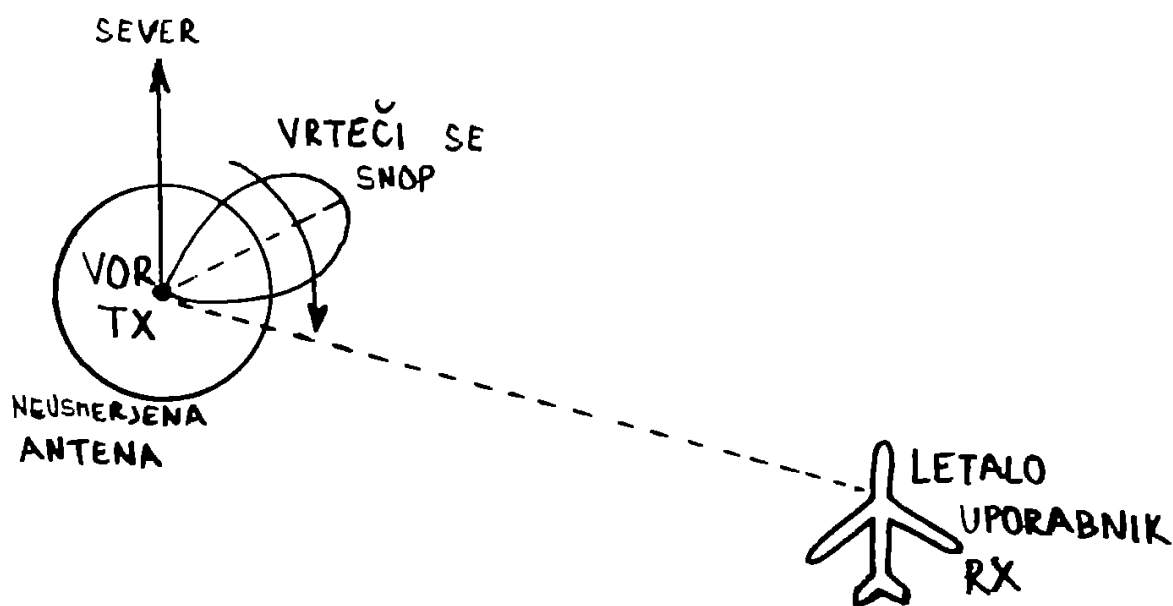


Slika 8.4 - Delovanje vodoravne komponente ILS.

Delovanje vodoravne komponente ILS je prikazano na sliki 8.4. Pilot letala preprosto zadržuje takšno smer leta, da sta jakosti obeh modulacij 90Hz in 150Hz enako močni. Velikost in smer odstopanja od osi pristajalne steze do  $\pm 2.5^\circ$  javi kazalec na merilnem sprejemniku. Drugi kazalec, postavljen pod pravim kotom, javi odstopanje od predvidene ravnine spuščanja proti pristajalni stezi (običajno pod kotom  $3^\circ$ ) do  $\pm 0.5^\circ$ .

Glavna pomanjkljivost ILS in podobnih sistemov je v tem, da lahko pripeljejo uporabnika iz ene same smeri v eno samo točko. Za približevanje potniškega letala pristajalni stezi v slabih vremenskih razmerah (megla) je ILS upravičljiv, za vse ostale uporabe pa so takšni sistemi prekomplicirani in predragi.

Uporabnost radijskega svetilnika v celotnem krogu  $360^\circ$  omogočajo svetilniki VOR (VHF Omnidirectional Range) na sliki 8.5. VOR svetilnik oddaja v frekvenčnem pasu 108MHz-118MHz z dvema vodoravno polariziranimi antenama: neusmerjeno anteno in vrtečo usmerjeno anteno. Usmerjena antena se vrti s 1800 vrtljaji v minuti, kar pomeni amplitudno modulacijo 30Hz na mestu uporabnika.



Slika 8.5 - Delovanje svetilnika VOR.

Navigacijska informacija se skriva v fazi 30Hz amplitudne modulacije, ki jo zazna uporabnik. Fazni kot 30Hz modulacije je natančno enak kot med smerjo severa in smerjo od svetilnika proti uporabniku (smer VOR radiala). Da se poenostavi meritev faze v sprejemniku na krovu letala, oddaja svetilnik VOR tudi referenčni signal s frekvenco 30Hz na neusmerjeni anteni. Referenčni signal je najprej frekvenčno moduliran na pomožni nosilec 9930Hz s kolebom  $\pm 480$ Hz, ta pa amplitudno modulira visokofrekvenčni nosilec.

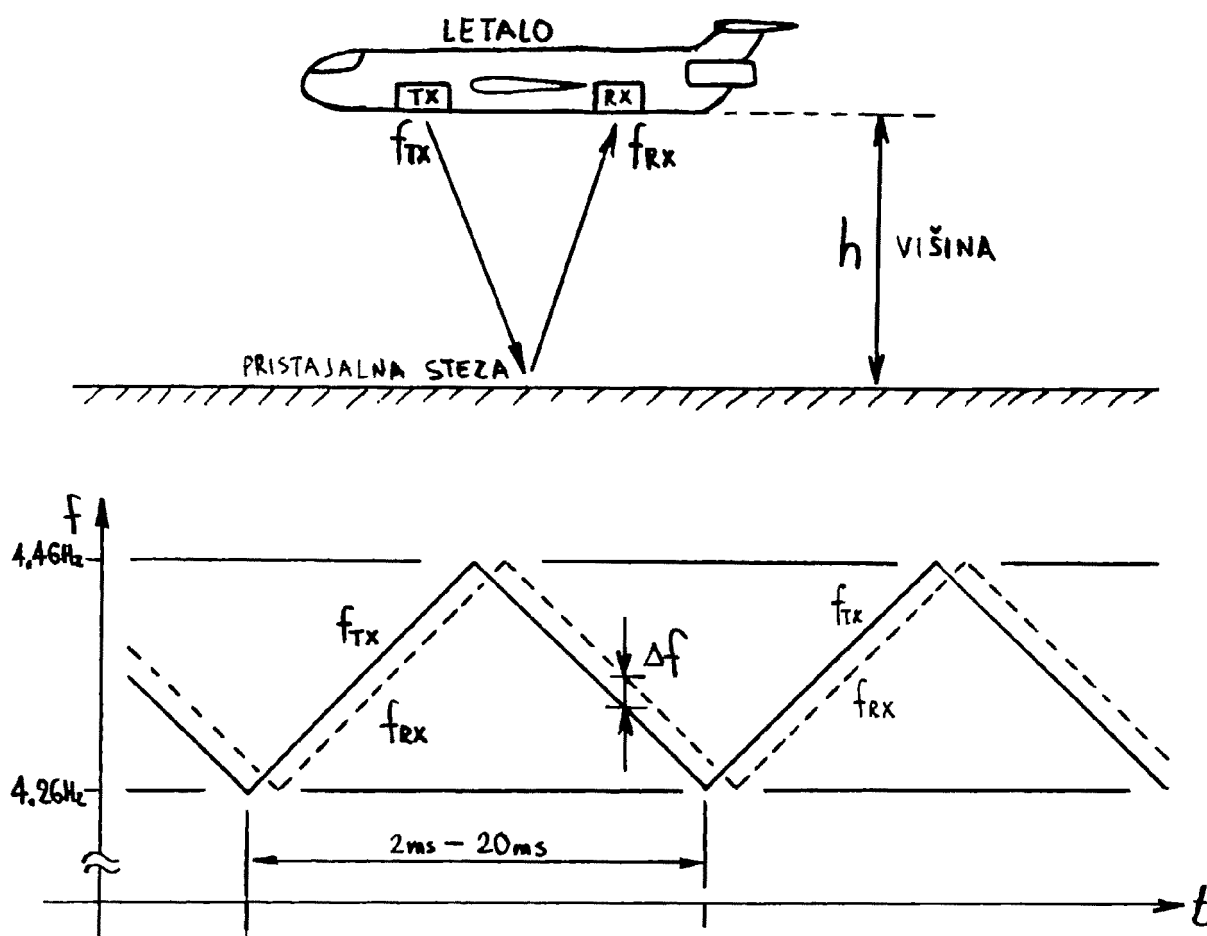
Točnost svetilnika VOR sicer ne dosega ILS, je pa veliko boljša od dolgovalovnega radiokompasa. Točnost VOR se giblje od  $\pm 5^\circ$  za preprost svetilnik in sprejemnik na krovu letala do  $\pm 1^\circ$

za Doppler-VOR oddajnik in vrhunski sprejemnik na krovu. Končno daje VOR neposredno kot med smerjo severa in smerjo radiala proti uporabniku, dva svetilnika VOR torej omogočata dvodimenzijsko navigacijo kot na sliki 8.3, a brez uporabe magnetne igle.

Visokofrekvenčna pasovna širina kotnih navigacijskih sistemov je zelo majhna in se giblje od 1kHz za dolgovalovne svetilnike do 22kHz za VOR. Pasovno širino v glavnem določa preprosta tehnična izvedba svetilnikov in radionavigacijskih sprejemnikov, saj so bili kotni sistemi razviti pred mnogimi desetletji. Domet kotnih sistemov s svetilniki na tleh in sprejemniki na letalih je omejen na radijsko vidljivost do nekaj sto kilometrov za visokoleteče uporabnike.

### Časovni radionavigacijski sistemi

Točnost kotnih radionavigacijskih sistemov je zelo omejena s točnostjo smernih diagramov uporabljenih anten. Točnost kotnih sistemov je še sprejemljiva v vodoravni ravnini, za merjenje višine pa so skoraj neuporabni. Časovni radionavigacijski sistemi omogočajo natančno merjenje razdalje ne glede na vrsto uporabljenih anten. Meritev časa potovanja radijskega signala pogosto zahteva aktivnega uporabnika in določeno radijsko pasovno širino.



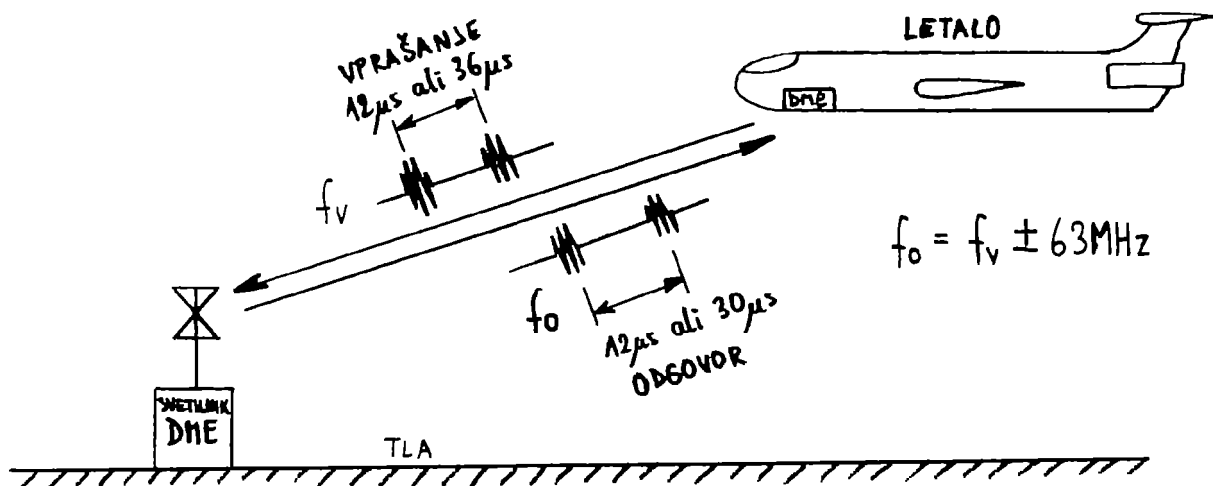
Slika 8.6 - Delovanje letalskega radiovišinomera.

Najpreprostejši zgled radijskega merilnika razdalje je letalski radiovišinomerner. Delovanje radiovišinomera je prikazano na sliki 8.6. Radiovišinomerner je frekvenčno moduliran radar, ki dela v frekvenčnem pasu 4.2GHz do 4.4GHz in izkorišča pasiven odboj radijskih valov od tal. Posebni svetilniki ali odbojniki torej niso potrebni. Oddajnik in sprejemnik imata ločeni anteni in delujeta neprekinjeno.

Frekvenca oddajnika se stalno spreminja s periodo 2ms do 20ms. Frekvenca sprejemnika sledi frekvenci oddajnika z določeno zakasnitvijo, ki je premosorazmerna višini letala nad pristajalno stezo. Zakasnitev določa razliko frekvenc (v velikostnem razredu 100kHz), ki jo izmerimo v sprejemniku. Koleb  $\pm 100\text{MHz}$  omogoča točnost meritve višine letala v velikostnem razredu 30cm.

Ker radiovišinomerner uporablja razmeroma veliko pasovno širino in vsak uporabnik aktivno oddaja radijske signale, se takoj postavi vprašanje, koliko istočasnih uporabnikov omogoča takšen sistem radionavigacije. FM radar je zelo odporen na motnje, ko je merjena razlika frekvenc dosti manjša od koleba, v slučaju radiovišinomernerja okoli 1000-krat. Na istem letalu sta lahko hkrati vključena dva ali trije radiovišinomerneri, ki omejujejo medsebojne motnje tako, da uporabljajo nekoliko različne periode kolebanja.

Letalski merilnik razdalje z aktivnimi uporabniki in aktivnimi svetilniki na tleh DME (Distance Measuring Equipment) je prikazan na sliki 8.7. DME uporablja impulze dolžine  $3.5\mu\text{s}$  v frekvenčnem pasu 962MHz-1213MHz (pokončna linearna polarizacija). Frekvenčni pas je razdeljen na 126 kanalov širine 1MHz. vsak kanal ima dodeljeni dve frekvenci za vprašanje letala in odgovor svetilnika na tleh.



Slika 8.7 - Delovanje merilca razdalje DME.

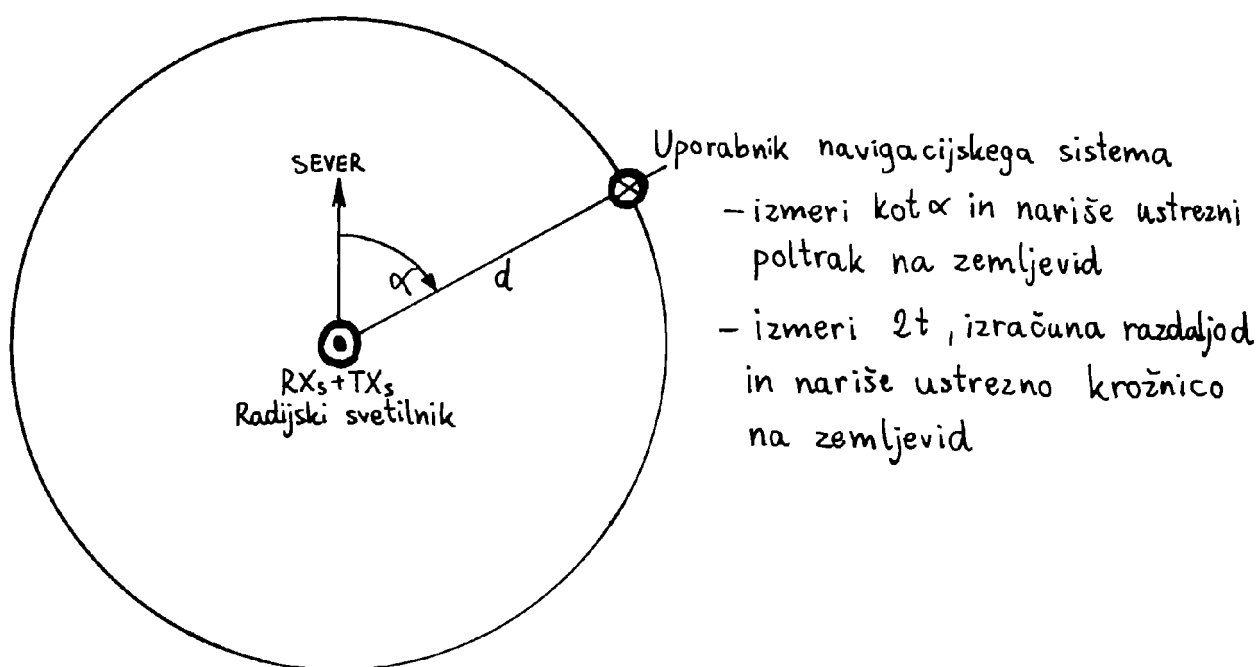
Vsako vprašanje oziroma odgovor vsebuje dva impulza. Vrsto vprašanja oziroma odgovora opisuje zakasnitev med impulzoma, ki je običajno  $12\mu\text{s}$ , druge vrednosti zakasnitev se uporabljajo bolj poredko. Merilnik na letalu preprosto izmeri čas potovanja signala od letala do svetilnika in nazaj ter od tega časa odšteje

dogovorjeno zakasnitev svetilnika, ki znaša  $50\mu\text{s}$ .

Domet DME je določen z radijsko vidljivostjo in dosega nekaj sto kilometrov za visokoleteče zrakoplove. Točnost DME je načeloma skoraj neodvisna od merjene razdalje in je za različne različice DME v velikostnem razredu nekaj sto metrov.

Sistem DME je omejen z medsebojnimi motnjami, ko več letal uporablja isti svetilnik na tleh na istem radiofrekvenčnem kanalu. Merilnik na krovu letala iz enega samega odgovora svetilnika še ne more ugotoviti, če gre za odgovor na njegovo vprašanje oziroma odgovor na vprašanje nekega drugega letala. Posamezna letala zato oddajajo vprašanja v naključno dolgih presledkih. Merilnik na krovu letala primerja rezultate zaporednih meritev in izbere tiste rezultate, ki se med sabo ujemajo. Zmogljivost enega svetilnika DME je omejena na približno 100 letal.

Svetilnik DME je pogosto postavljen na isto mesto kot svetilnik VOR. Takšna postavitve omogoča preprosto dvodimenzijsko navigacijo, kot je to prikazano na sliki 8.8. Meritev kota VOR daje za velikostni razred manj točen rezultat od razdalje DME. Izboljšana inačica dvodimenzijske navigacije je vojaški sistem TACAN (TACTical Air Navigation), kjer je kotna komponenta izvedena podobno kot VOR, le da deluje v frekvenčnem pasu DME, kar omogoča izdelavo natančnejših anten in točnost pri meritvi kota do  $\pm 0.3^\circ$ .



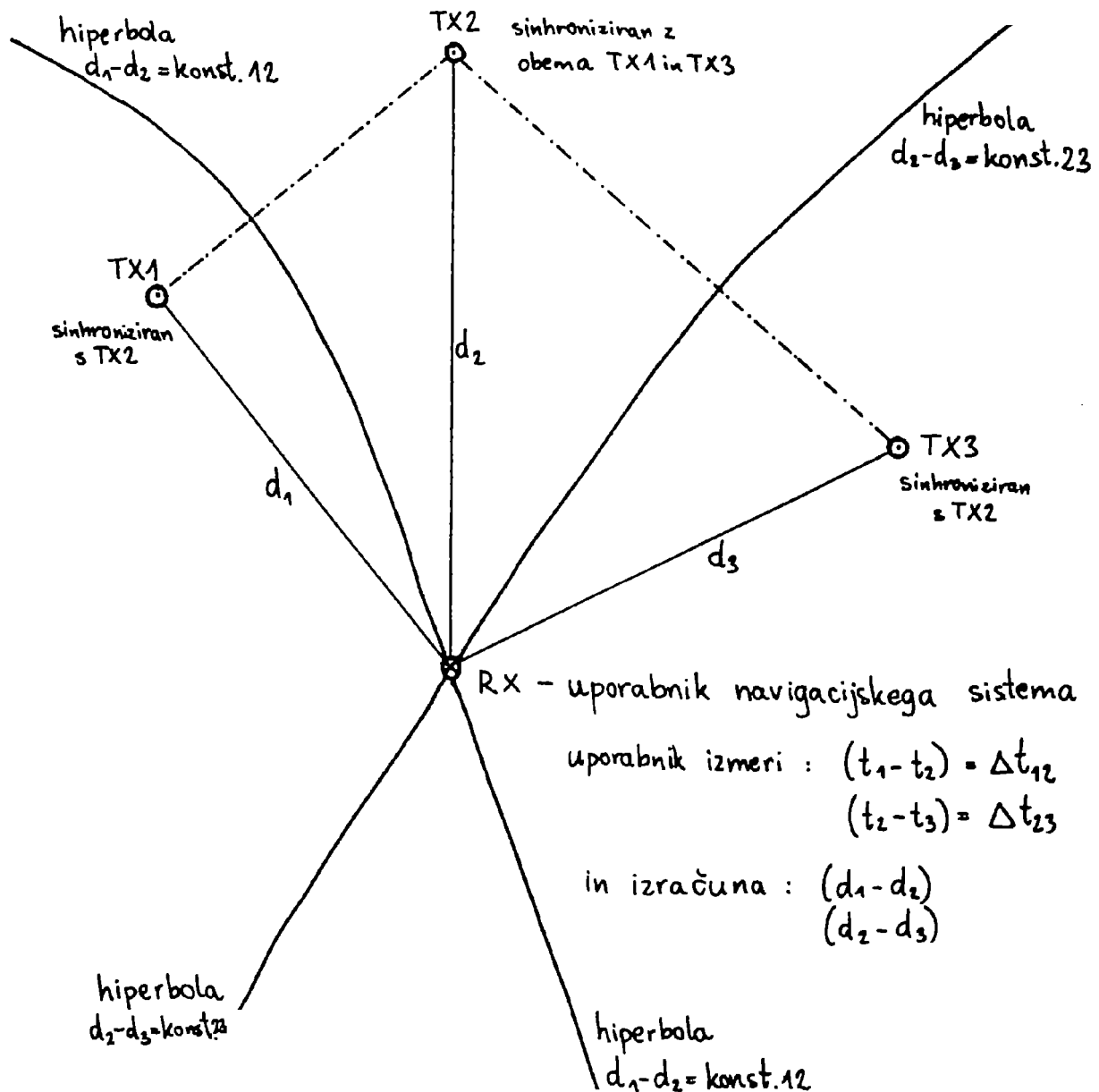
Slika 8.8 - Dvodimenzijska navigacija VOR+DME ali TACAN.

Časovni radionavigacijski sistemi so lahko zelo natančni. Slaba lastnost je zahteva po aktivnem uporabniku, ki oddaja vprašanja v obliki radijskih valov. Število uporabnikov civilnega sistema je tako omejeno na nekaj deset letal. vojaški uporabniki pa v nobenem primeru ne želijo oddajati, da svojega položaja ne bi razkrili sovražniku. Končno potrebuje vsak radijski oddajnik



ustrezno dovoljenje za delo in nadzor, da slučajno ne povzroča škodljivih motenj drugim.

Rešitev naloge je uporaba več radijskih svetilnikov, ki oddajajo med sabo sinhronizirane časovne signale. Uporabnik ima samo radijski sprejemnik in z njim ne more izmeriti zakasnitve posameznega signala. Uporabnik lahko preprosto izmeri le razlike v času prihoda posameznih signalov. Če ima uporabnik na razpolago dovolj svetilnikov, dobi iz meritev dovolj podatkov za izračun lastnega položaja v dveh ali treh dimenzijah.



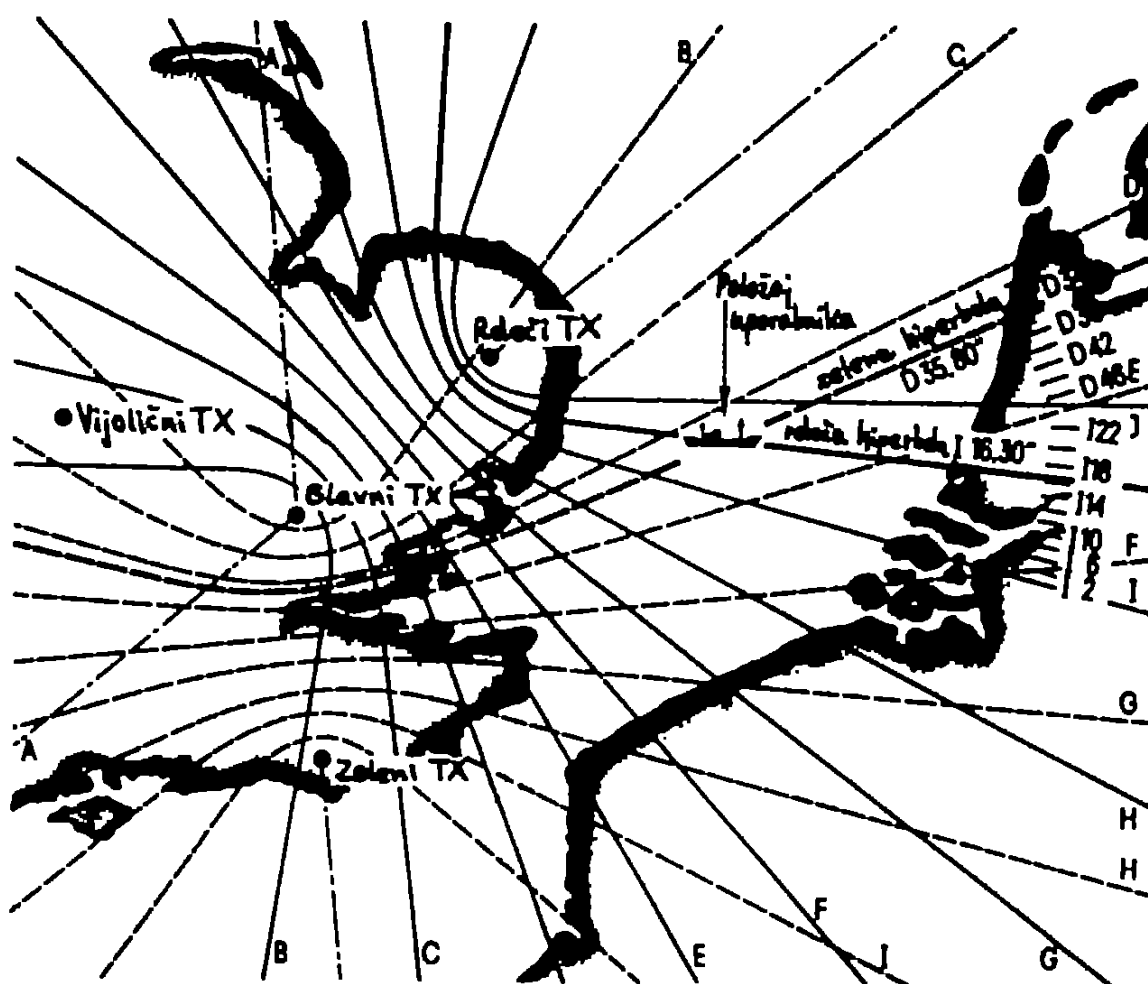
Slika 8.9 - Osnove hiperbolične navigacije.

Geometrijska krivulja, ki združuje točke z enako razliko razdalj od dveh danih točk v ravnini, je hiperbola. Vsaka meritev razlike časa prihoda signalov dveh sinhroniziranih svetilnikov določa eno hiperbolo v ravnini oziroma en rotacijskih hiperboloid v prostoru. Svetilnika se pri tem nahajata v goriščih hiperbole

oziroma rotacijskega hiperboloida.

Hiperbolična navigacija v ravnini (v dveh dimenzijah) je prikazana na sliki 8.9. Pasivni uporabnik izmeri razliko v času prihoda signalov med svetilnikoma TX1 in TX2 ter med svetilnikoma TX2 in TX3. Nato nariše na svoj zemljevid pripadajoči hiperboli. Iskani položaj uporabnika se nahaja v presečišču krivulj.

Hiperbolična navigacija torej omogoča visoko točnost časovnih meritev tudi za povsem pasivne uporabnike, ki imajo samo radijske sprejemnike. Število uporabnikov je praktično neomejeno. Točnost hiperbolične navigacije se poslabša v slučaju, ko se krivulje oziroma ploskve sekajo pod ostrim kotom. Obstaja tudi možnost večličnosti rešitve, to je sekanje krivulj ali ploskev v več točkah. V obeh primerih pomaga večje število med sabo sinhroniziranih svetilnikov, ki so primerno razporejeni v prostoru.



slika 8.10 - Zemljevid sistema DECCA.

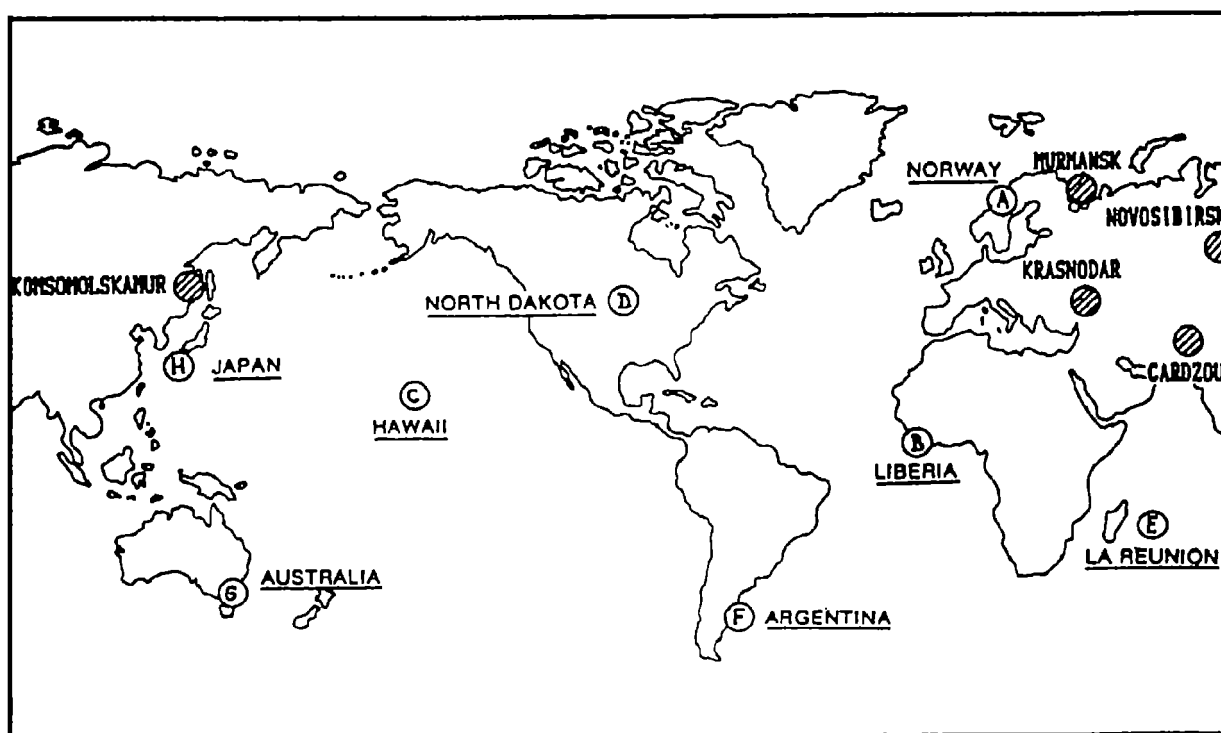
Preprost primer hiperboličnega radionavigacijskega sistema je DECCA, ki je prikazan na sliki 8.10. DECCA deluje v dolgovalovnem področju in sicer 84kHz glavni oddajnik, 112kHz "rdeči" oddajnik, 126kHz "zeleni" oddajnik in 70kHz "vijolični" oddajnik. Vse

frekvence so mnogokratniki 14kHz, oddajniki so sinhronizirani med sabo.

Pomorščak ima radionavigacijski sprejemnik s tremi merilniki faze: rdečim, zelenim in vijoličnim ter pomorski zemljevid z rdečimi, zelenimi in vijoličnimi hiperbolami. Na zemljevidu preprosto poišče hiperbole, ki ustrezajo odčitkom s pripadajočih merilnikov faze. Iskani položaj ladje se nahaja v presečišču hiperbol. Tretja družina hiperbol omogoča navigacijo v slučaju večličnih rešitev oziroma v slučaju sekantja dveh hiperbol pod ostrim kotom.

Sistemu DECCA je zelo podoben sistem LORAN-C oziroma enak ruski sistem CHAYKA. LORAN-C dela z impulzi z osrednjo frekvenco 100kHz. Impulzno delovanje omogoča preprosto izločanje valov, ki se odbijajo od ionosfere, saj so časovno zakasneni glede na neposredni val, ki se širi ob zemeljski površini. Domet sistema LORAN-C znaša okoli 2000km. Točnost je v velikostnem razredu 300m.

Pokrivanje celotne zemeljske oble omogočata sistema OMEGA in podoben ruski ALPHA, ki delata v frekvenčnem področju 9kHz-14kHz. OMEGA pri tem potrebuje samo 8 oddajnikov moči 10kw, ki so prikazani na sliki 8.11. OMEGA uporablja meritev faze na več nosilcih in omogoča točnost dvodimenzijske navigacije v velikostnem razredu 5km po celem svetu. OMEGA žal več ne dela.



slika 8.11 - svetilniki sistemov OMEGA in ALPHA.

#### 8.4. Satelitski radionavigacijski sistemi

Dolgovalovni hiperbolični radionavigacijski sistemi imajo isto omejitev: doseg lahko povečamo le tako, da povečamo valovno dolžino in s tem zmanjšamo uklonsko slabljenje zaradi zaobljenosti Zemlje. večja valovna dolžina hkrati pomeni nižje frekvence in ožje pasovne širine, kar poslabša točnost časovnih radionavigacijskih sistemov.

Doseg radijskih svetilnikov je skoraj neodvisen od frekvence, če svetilnike postavimo na umetne Zemljine satelite. Na visokih frekvencah si lahko privoščimo večje pasovne širine, kar omogoča visoko točnost časovnih meritev. Končno postane vpliv ionosfere v mikrovalovnem področju zelo majhen.

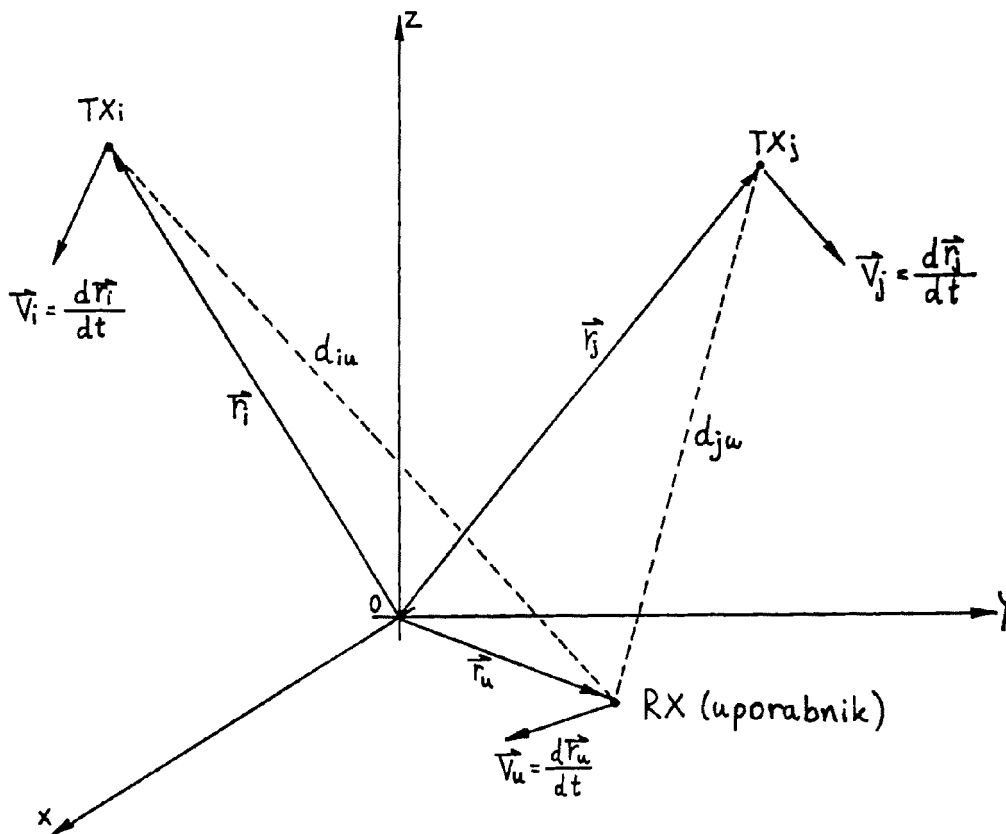
V zemeljskih radionavigacijskih sistemih so vsi svetilniki razporejeni v eni ravnini. To pomeni natančno dvodimenzijsko navigacijo v sami ravnini in hkrati zelo slabo pogojen sistem enačb za tridimenzijsko navigacijo. Bolj točno, sistem navigacijskih enačb je v tem primeru slabo pogojen za komponento vektorja položaja, ki je pravokotna na ravnino oddajnikov.

Radijski svetilniki na satelitih omogočajo večjo svobodo pri izbiri položaja svetilnikov, ki jih lahko razporedimo po celotni gornji polobli, to je po celotnem vidnem delu neba. Takšna prostorska razporeditev svetilnikov končno omogoča natančno tridimenzijsko navigacijo. Ker lahko opazujemo le satelite na zgornji polobli, so enačbe za višino še vedno slabše pogojene od vodoravnih komponent položaja uporabnika!

Sateliti se premikajo v tirnicah z razmeroma velikimi hitrostmi, kar omogoča na satelitskih signalih še dodatne Dopplerjeve meritve. Navigacijske enačbe za Dopplerjeve pomike so namreč tem boljše pogojene, čim višje so hitrosti. Razen tega lahko določene izvire pogreškov pri satelitski radionavigaciji izločimo s povprečenjem prav zato, ker se svetilniki premikajo po nebu.

Navigacijski enačbi za en par satelitov za časovne in Dopplerjeve razlike sta prikazani na sliki 8.12. Kolikšen nabor satelitov in kolikšen nabor enačb potrebujemo zavisijo od števila iskanih neznank. Za dvodimenzijsko določanje položaja mirujočega uporabnika zadoščata dve enačbi. Za tridimenzijsko določanje položaja in hitrosti uporabnika potrebujemo šest enačb.

Satelitska radionavigacija je bila ena prvih praktičnih uporab umetnih satelitov, komaj nekaj let po prvih uspešnih izstrelitvah v vesolje pred skoraj pol stoletja. Američani so leta 1960 izstrelili en sam satelit Transit v nizko tirnico (pod 1000km), ki je z namenom popravljanja pogreškov ionosfere oddajal na dveh frekvencah 54MHz in 216MHz. Podmornice z medcelinskimi balističnimi raketami naj bi z meritvijo Dopplerjevega pomika frekvence določile svoj položaj s točnostjo 10km, kar naj bi zadoščalo za zadetek cilja z jedrskim orožjem.



Navigacijska enačba za časovne razlike

$$\underbrace{|\vec{r}_i - \vec{r}_u|}_{d_{iu} \text{ oddaljenost uporabnika od TX}_i} - \underbrace{|\vec{r}_j - \vec{r}_u|}_{d_{ju} \text{ oddaljenost uporabnika od TX}_j} = c \cdot \Delta t_{ij}$$

Navigacijska enačba za Dopplerjeve razlike

$$\underbrace{\frac{(\vec{r}_i - \vec{r}_u) \cdot (\vec{v}_i - \vec{v}_u)}{|\vec{r}_i - \vec{r}_u|}}_{\text{relativna hitrost TX}_i \text{ glede na uporabnika}} - \underbrace{\frac{(\vec{r}_j - \vec{r}_u) \cdot (\vec{v}_j - \vec{v}_u)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_u|}}_{\text{relativna hitrost TX}_j \text{ glede na uporabnika}} = -c \cdot \frac{\Delta f_{ij}}{f_0}$$

slika 8.12 - časovne in Doppler-jeve navigacijske enačbe.  
Poskus s satelitom Transit je požel velik uspeh, njegovi

nasledniki pa uporabljajo par frekvenc v pasovih okoli 150MHz in 400MHz. Podobno ozvezdje satelitov z imenom Tsikada so v istih frekvenčnih pasovih postavili tudi Rusi. Čez desetletje so Američani objavili podatke o sistemu Transit in dovolili uporabo v civilne namene. Civilni sprejemniki na eni sami frekvenci (400MHz) so omogočali točnost določanja položaja okoli 300m, pri uporabi obeh frekvenc pa pod 100m.

Transit oziroma Tsikada omogočata radionavigacijo z enim samim satelitom, kar lahko pomeni do dve uri čakanja na ugoden prelet satelita in 5-10 minut dolgo meritev za en sam izračun položaja. Hitrejšo meritev lahko omogoči le ozvezdje satelitov v visokih tirnicah, da uporabnik ne čaka na ugoden prelet satelita, pač pa stalno sprejema radionavigacijske signale več satelitov.

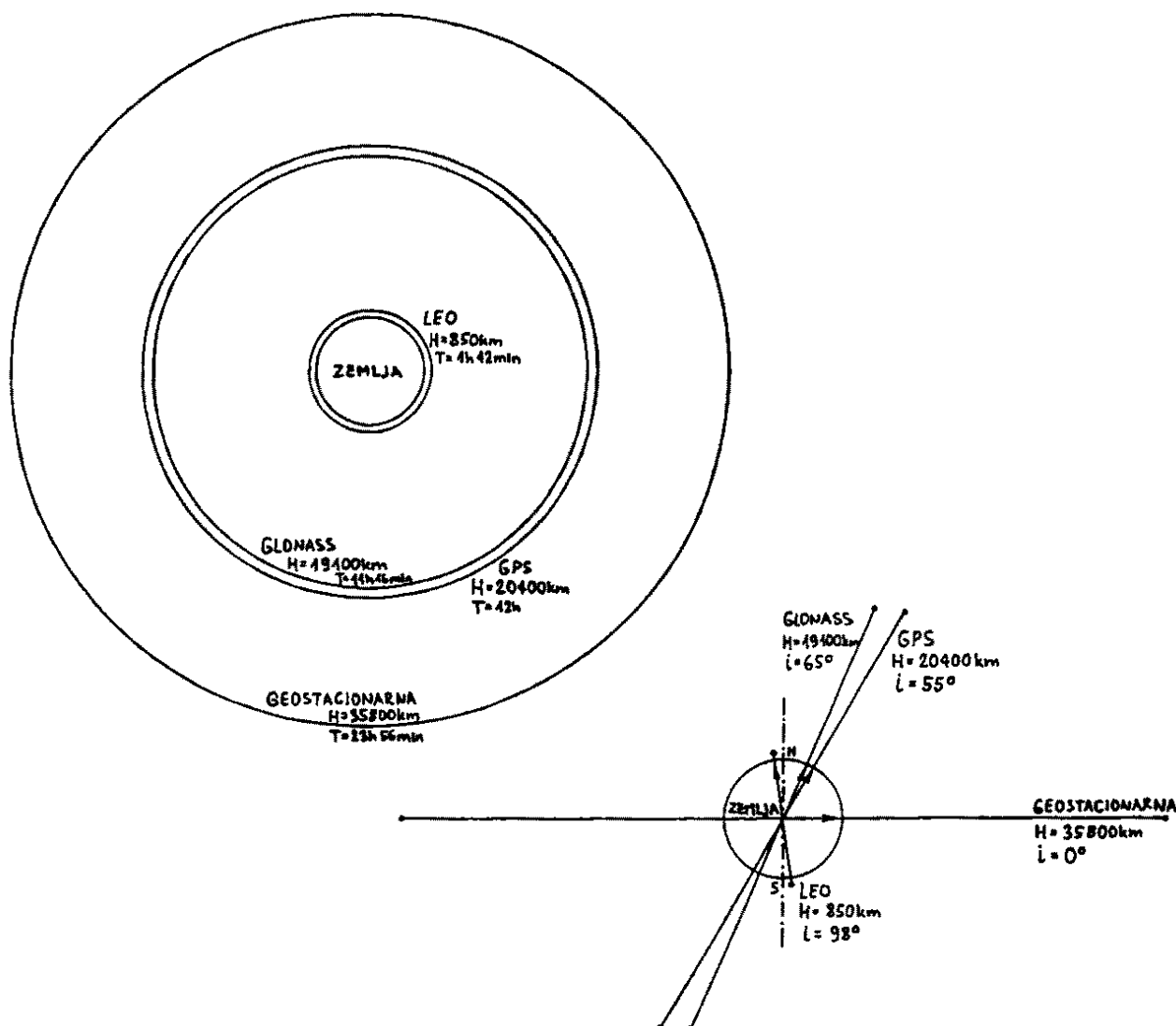
SISTEM	NAČIN DELOVANJA	ŠTEVILO SATELITOV	VIŠINA TIRNICE	FREKVENČNI PAS	MULTIPEKKS	ČAS MERITVE	TOČNOST
TRANSIT	DOPPLER NOSILCA	6	1000km	149,988MHz (VHF) 399,968MHz (UHF)	—	5min/2h	~ 200m
TSIKADA	DOPPLER NOSILCA	12	1000 km	149,94 ÷ 150,03MHz (VHF) 399,96 ÷ 400,08MHz (UHF)	FREKVENČNI	5min/2h	~ 200m
NAVSTAR- - GPS	ČAS MODULACIJE+ +DOPPLER NOSILCA	24	20400km	1575.42MHz (L1) 1227.6MHz (L2)	KODNI (PRESEJUH -24.6dB)	1s/1min	~ 20m ~ 0.1m/s
GLONASS	ČAS MODULACIJE+ +DOPPLER NOSILCA	24	19100 km	1602 ÷ 1615,5MHz (L1) 1246 ÷ 1256,5MHz (L2)	FREKVENČNI (PRESEJUH -48dB)	1s/1min	~ 30m ~ 0.1m/s

Slika 8.13 - Značilnosti satelitskih navigacijskih sistemov.

Američani so že v začetku sedemdesetih let prejšnjega stoletja preizkusili različne frekvenčne pasove in modulacije na satelitu Timation in iz rezultatov teh poskusov so razvili sistem z imenom Navstar oziroma GPS. Podoben sistem z imenom GLONASS so razvili tudi Rusi. Primerjava lastnosti različnih satelitskih radionavigacijskih sistemov je prikazana na sliki 8.13.

### 8.5. Sateliti GPS in GLONASS

Namen radionavigacijskih sistemov GPS (Global Positioning System) in GLONASS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM) ter podobnega evropskega načrta GALILEO je stalno zagotavljanje tridimenzijske radionavigacije kjerkoli na površini Zemlje. Da uporabniki ne čakajo na ugoden prelet satelita, mora ozvezdje satelitov zagotavljati vidnost najmanj štirih satelitov. Poleg tega morajo biti vidni sateliti ugodno razporejeni na nebu, da je sistem navigacijskih enačb dobro pogojen.



Slika 8.14 - Tirnice satelitov GPS/GLONASS.

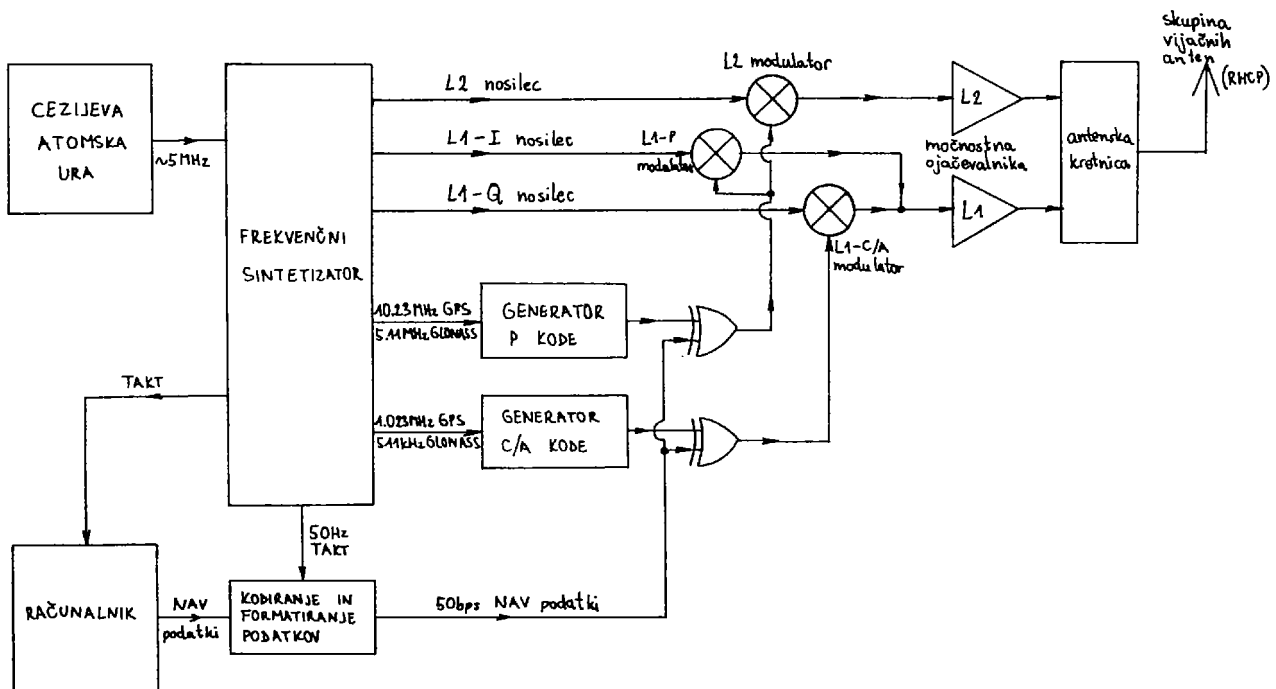
Tirnice satelitov GPS in GLONASS so prikazane na sliki 8.14. Nizke tirnice (LEO) niso primerne, ker ne zagotavljajo radijske vidljivosti in trenje z ozračjem povzroča nepredvidljive spremembe položaja satelitov. Geostacionarna tirnica ne zagotavlja primerne geometrijske razporeditve satelitov na nebu, ne pokriva polarnih področij Zemlje in ne omogoča dobro pogojenih enačb za Dopplerjeve razlike.

Načrt GPS in GLONASS predvideva po 24 satelitov, pravilno razporejenih v več različnih krožnih tirnic. Sedanji načrt GPS predvideva šest različnih ravnin tirnic, vse z naklonom  $i=55^\circ$  ter enakomerno razporejene po rektascenziji. V vsaki ravnini naj bi bili po štiri sateliti GPS v krožnici s periodo  $T=12h$  na višini  $H=20400km$ .

GLONASS predvideva (podobno prvotnemu načrtu GPS) tri ravnine tirnic, vse z naklonom  $i=65^\circ$  ter enakomerno razporejene po rektascenziji. V vsaki ravnini naj bi bilo po osem satelitov GLONASS v krožnici s periodo  $T=11h15min$  na višini  $H=19100km$ . Sateliti GLONASS opravijo 17 tirnic v osmih dneh, kar odpravlja

problem rezonanc z višjimi harmoniki težnostnega polja Zemlje, ki moti delovanje GPS.

Oba GPS in GLONASS sta v osnovi mišljena kot vojaška radionavigacijska sistema. Oprema na krovu satelitov, ki je prikazana na sliki 8.15, je zato načrtovana za povsem samostojno delovanje. Sinhronizacijo med posameznimi sateliti vzdržujejo atomske ure na krovu satelitov. Osnovna časovno/frekvenčna normala je cezijeva (Cs), pomožne atomske ure pa so preprostejši in manj točni rubidijevi (Rb) izvori.



Slika 8.15 – Navigacijska oprema na krovu GPS/GLONASS satelitov.

Sateliti GPS in GLONASS oddajajo tri različne radijske signale na dveh različnih radiofrekvenčnih kanalih "L1" in "L2" v frekvenčnem področju "L" v pasu 1.2GHz-1.65GHz. Vsi signali so fazno modulirani z znanimi psevdo-naključnimi zaporedji. Uporabniški navigacijski sprejemnik išče sinhronizacijo na znano zaporedje in določi čas prihoda signala.

Osnovna oddaja satelitov je na višji frekvenci "L1", ki znaša 1575.42MHz pri vseh satelitih GPS oziroma eden od 25 različnih kanalov v pasu 1602MHz-1615.5MHz pri satelitih GLONASS. Na frekvenci "L1" sta prisotni dve različni oddaji: "C/A" (Coarse/Acquisition) in P (Precision). Oddaja "C/A" je namenjena začetni uklenitvi sprejemnika in grobi navigaciji. Oddaja "P" vsebuje precej daljše zaporedje, ki potrebuje sinhronizacijo iz oddaje "C/A". Zaporedje "P" se oddaja z desetkrat večjo bitno hitrostjo in tako omogoča večjo točnost navigacije.

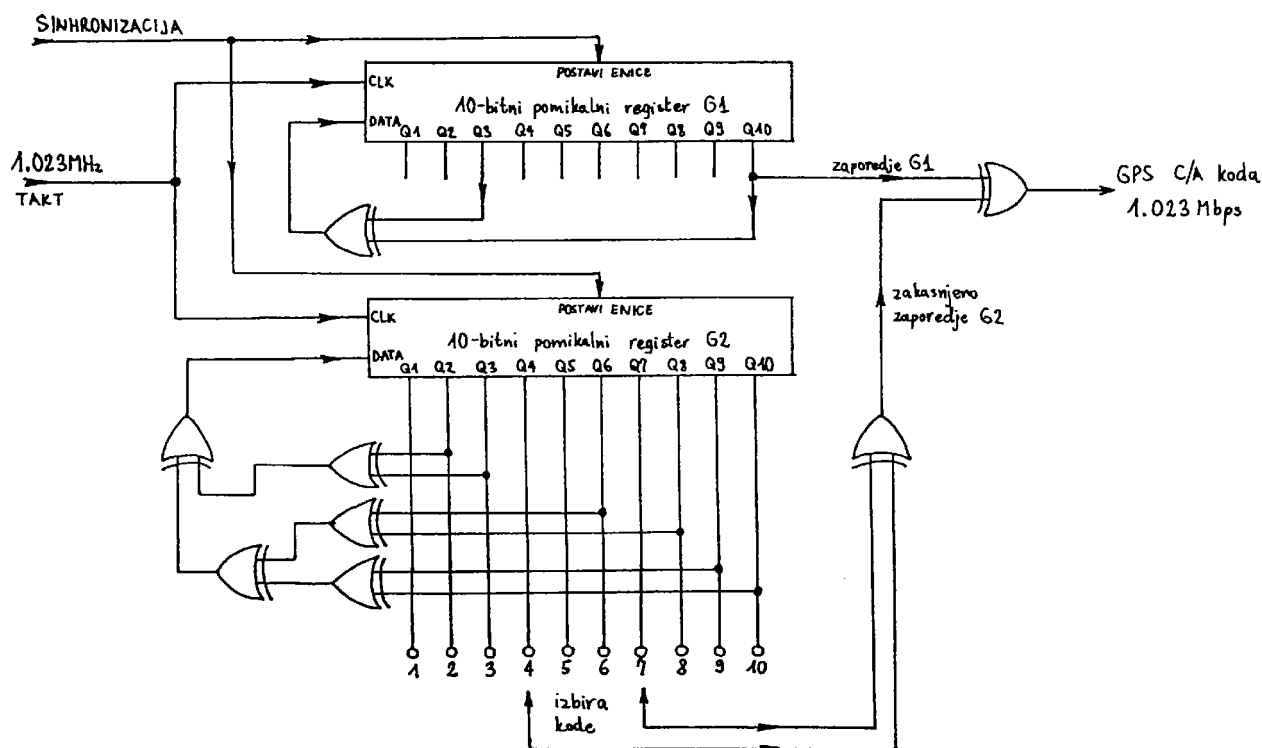
Na frekvenci "L2", ki znaša 60/77 frekvence "L1" ali 1227.6MHz pri GPS in 7/9 pripadajočega kanala "L1" pri GLONASS, se oddaja samo "P" zaporedje. Oddaja "P" zaporedja na dveh različnih frekvencah omogoča izločanje napake ionosfere. Oddaje "P" niso vedno dostopne civilnim uporabnikom v sistemu GPS, "P" zaporedja



GLONASS pa sploh niso objavljena. Civilni uporabniki lahko zato računajo le na oddajo "C/A" na eni sami frekvenci "L1".

Vsem oddajam "C/A" in "P" so dodani modulo-2 navigacijski podatki s hitrostjo 50 bitov v sekundi. Navigacijski podatki vsebujejo zelo natančne podatke o tirnici satelita (precision ephemeris), grobe podatke o tirnicah in uporabnosti ostalih satelitov v sistemu (almanah) ter podatke o odstopanju časovno/frekvenčne normale na krovu satelita. Oddaja okvirja s natančnimi podatki enega satelita traja 30s, celoten almanah se oddaja v več zaporednih okvirjih.

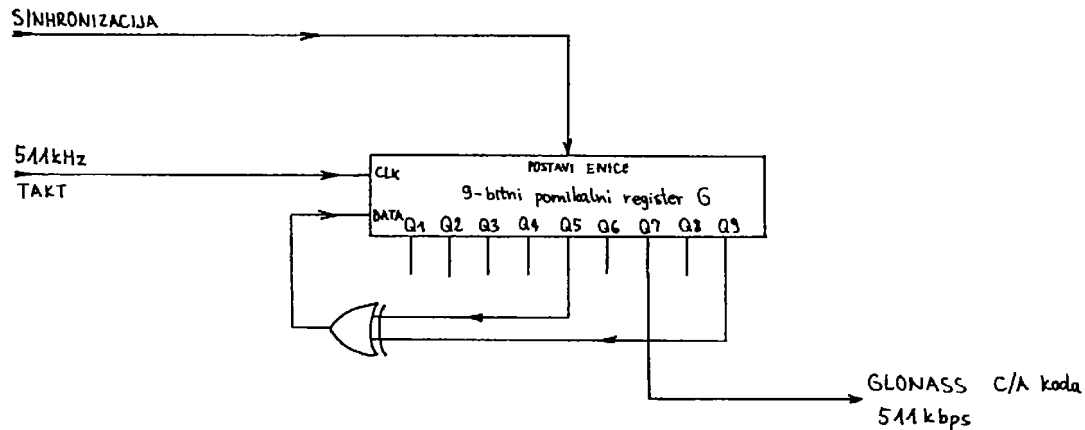
GPS uporablja izključno kodni multipleks, saj vsi sateliti stalno oddajajo na istem radiofrekvenčnem kanalu. Kodni multipleks uporablja zaporedja, ki imajo majhno križno korelacijo. Izvor "C/A" zaporedja satelitov GPS je prikazan na sliki 8.16. GPS uporablja Gold-ova zaporedja, ki so vsota modulo-2 dveh skrbno izbranih maksimalnih zaporedij enake dolžine.



Slika 8.16 - Izvor GPS C/A zaporedja.

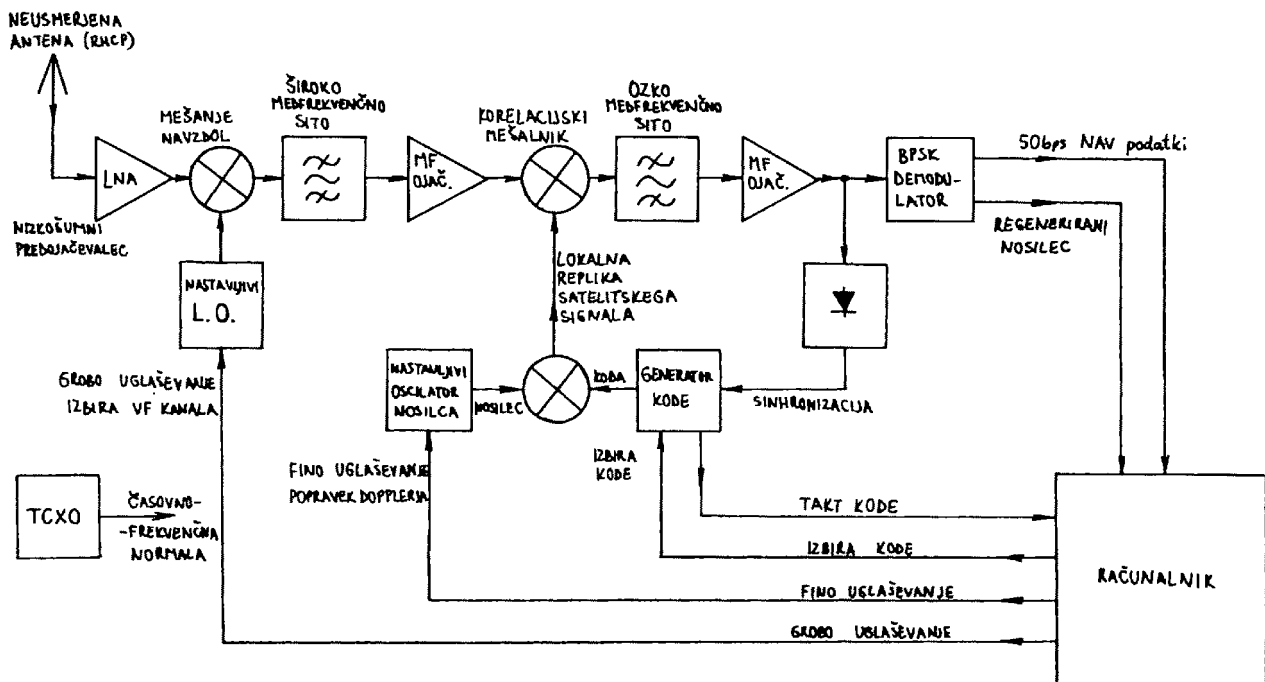
Različna Gold-ova zaporedja dobimo z izbiro medsebojne faze med osnovnima maksimalnima zaporedjema dolžine 1023 bitov. V primeru maksimalnih zaporedij to storimo s še enim seštevanjem modulo-2 zakasnjenih in sicer istega zaporedja.

GLONASS uporablja frekvenčni multipleks. Vsi sateliti GLONASS oddajajo isto maksimalno zaporedje dolžine 511 bitov. Pripadajoči izvor je prikazan na sliki 8.17.



Slika 8.17 – Izvor GLONASS C/A zaporedja.

Ne glede na to, če radionavigacijski sistem uporablja kodni ali frekvenčni multipleks, je zasnova navigacijskega sprejemnika za sprejem in sinhronizacijo vnaprej znanih zaporedij enaka. Osnovni načrt sprejemnika je prikazan na sliki 8.18 in je izveden enako kot vsi sprejemniki za razširjeni spekter.



Slika 8.18 – Osnovni načrt GPS/GLONASS sprejemnika.

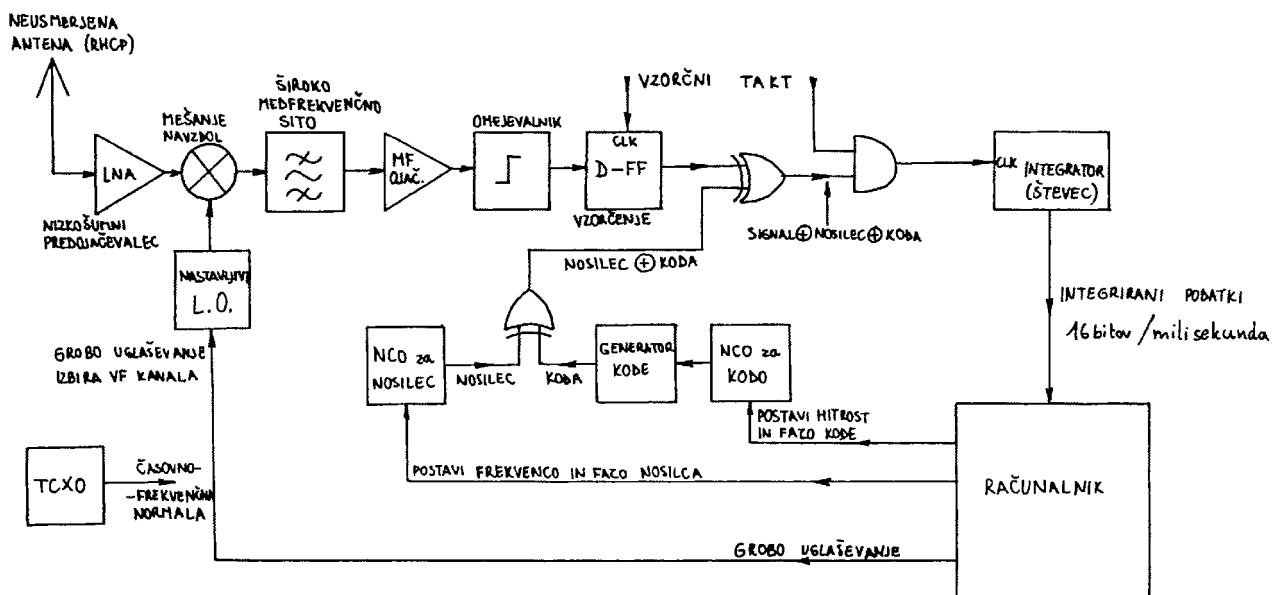
Navigacijski sprejemnik je opremljen z neusmerjeno anteno in širokopasovnim vhodnim delom. V medfrekveni pomnožimo širokopasovni satelitski signal z znanim zaporedjem in iščemo korelacijo. Ko po več ali manj zamudnem iskanju dosežemo sinhronizacijo, se spekter visokofrekvenčnega signala skrči in se prebije skozi ozkopasovno sito.

Ozkopasovnemu situ sledi detektor jakosti signala za sinhronizacijo zaporedja in BPSK demodulator za navigacijske podatke in meritev Doppler-jevega pomika na nosilcu. Vse izmerjene

podatke vodimo v računalnik, ki rešuje navigacijske enačbe. Resnični radionavigacijski sprejemnik seveda vsebuje več medfrekvenčnih kanalov za istočasni sprejem in obdelavo signalov več satelitov.

Večkanalni navigacijski sprejemnik izgleda komplicirana naprava ne glede na to, če je izdelan v analogni tehniki ali z digitalnim signalnim procesorjem. Pri satelitski navigaciji je vhodno razmerje signal/šum v sprejemniku zelo majhno, vsekakor manjše od enote. V tem primeru omejevalnik v medfrekvenčni verigi poslabša razmerje signal/šum le za 2dB, vsa nadaljna obdelava signala pa se znatno poenostavi, saj je signal kvantiziran z natančnostjo enega bita.

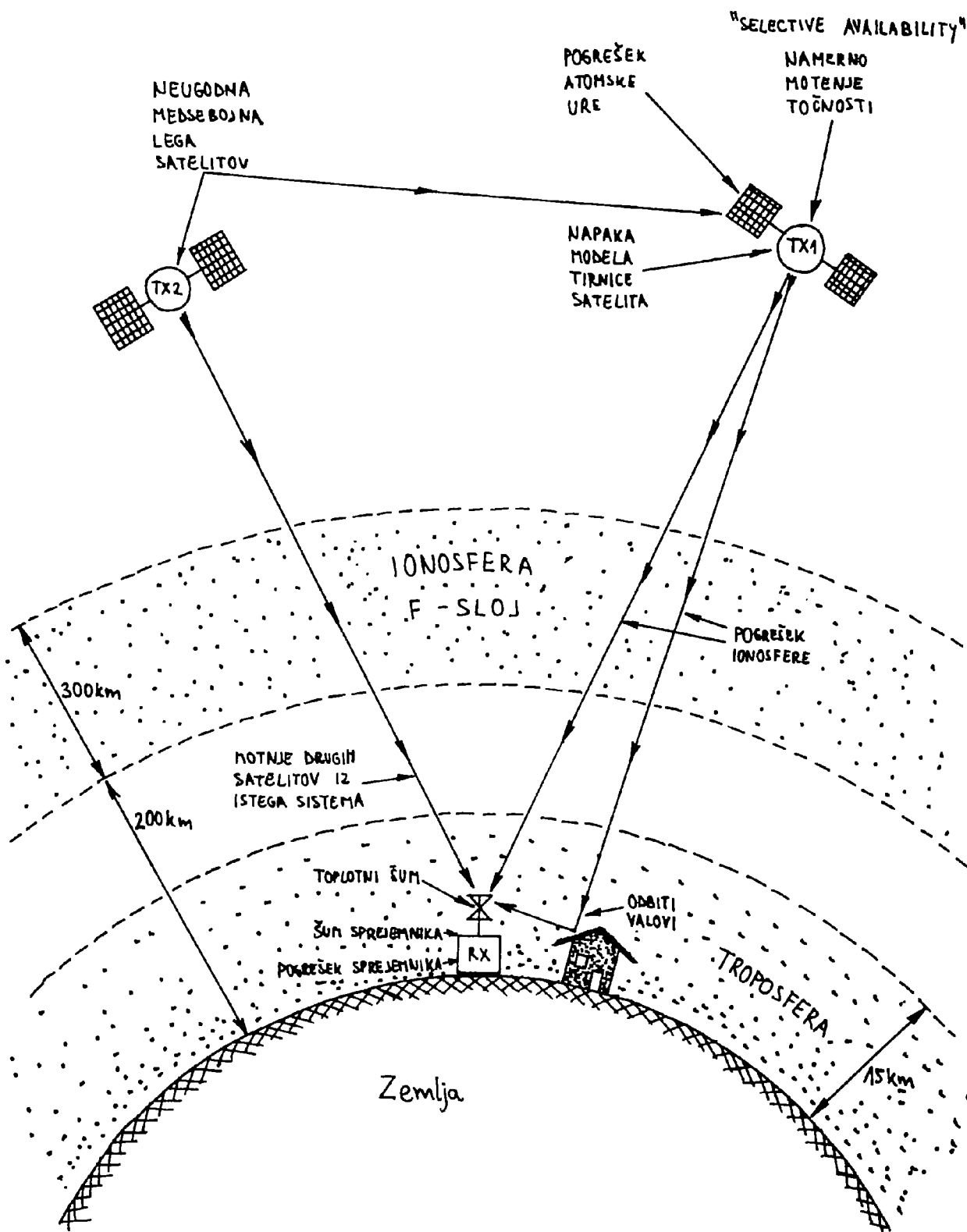
Tehnika eno-bitne obdelave signalov je sicer znana iz radioastronomije, navigacijski sprejemnik z 1-bitno obdelavo pa je prikazan na sliki 8.19. Mešalnike oziroma množilnike preprosto zamenjajo EXOR vrata, integracijo izvedemo s števcem. Po integraciji je signal sicer predstavljen z večjim številom bitov (16), je pa podatkovni pretok tako upočasnen, da ga lahko obdelata katerikoli mikroprocesor.



Slika 8.19 - Navigacijski sprejemnik z 1-bitno obdelavo.

Tudi večkanalni sprejemnik z 1-bitno obdelavo je tako preprost, da ga z lahkoto vgradimo v eno samo integrirano vezje. Višja stopnja integracije seveda omogoča podobne večkanalne sprejemnike z 2-bitno ali 3-bitno obdelavo širokopasovnih signalov, kar omogoča zanemarljivo majhno izgubo razmerja signal/šum. sodobni sprejemniki vključujejo vso obdelavo in mikroračunalnik v istem integriranem vezju in potrebujejo le peščico zunanjih analognih sestavnih delov: nizkošumni vhod sprejemnika, visokofrekvenčna sita in referenčni TCXO.

## 8.6. Pogreški pri satelitski navigaciji



Slika 8.20 - Izvori pogreškov pri satelitski navigaciji.

Točnost satelitskega navigacijskega sistema je omejena s pogreški različnih izvorov, ki so predstavljeni na sliki 8.20. Pogreške lahko razdelimo v tri velike skupine: pogreški satelitov,

pojavi pri razširjanju radijskih valov in pogreški sprejemnika. Točnost končnega rezultata lahko bistveno poslabša neugodna medsebojna lega satelitov na nebu.

Pogreški satelitov vključujejo odstopanje atomske ure na krovu, netočnost podatkov o tirnici satelita in napake pri zaokroževanju podatkov za prenos. Vsota vseh pogreškov satelita znaša nekaj metrov v dolžinskih enotah. Izjema je slučaj, ko je točnost satelitskega sistema namerno motena, ko torej upravne postaje namenoma naložijo napačne podatke o tirnici satelita in ko je atomska ura na krovu namerno motena.

Namerno motenje točnosti za civilne uporabnike GPS imenujejo Selective Availability (SA) in poslabša točnost sistema na nekaj deset do nekaj sto metrov. Vojaški uporabniki imajo seveda ključ, kako popraviti pokvarjene podatke, in vedno razpolagajo s polno točnostjo sistema. GPS omogoča tudi ukrep Anti Spoofing (AS), ki objavljeno "P" zaporedje zamenja s tajnim "Y" zaporedjem, kar sovražniku onemogoča, da bi uporabnike prelisičil z lažno "P" oddajo. SA in AS se sicer pogosto uporabljata istočasno, vendar gre za dva popolnoma različna ukrepa z različnimi cilji.

Pojavi pri razširjanju radijskih valov vključujejo vpliv ionosfere, vpliv troposfere in odbite valove, ki zaidejo v neusmerjeno anteno sprejemnika. Lomni količnik ionosfere je na uporabljenih mikrovalovnih frekvencah sicer zelo blizu enote, vendar lahko ionosfera še vedno vnaša pogrešek v velikostnem razredu 30m pri meritvi razdalje do enega samega satelita.

$$v_f = c \cdot \left( 1 + \frac{Q^2 N}{2m \epsilon_0} \cdot \frac{1}{\omega^2} \right)$$

$$v_g = c \cdot \left( 1 - \frac{Q^2 N}{2m \epsilon_0} \cdot \frac{1}{\omega^2} \right)$$

Slika 8.21 – Fazna in skupinska hitrost v ionosferi.

Fazna in skupinska hitrost elektromagnetnega valovanja v ionosferi sta prikazani na sliki 8.21. Odstopanje od svetlobne hitrosti je obratno sorazmerno kvadratu frekvence  $\omega^2$ , v izrazih pa nastopajo še naboj elektrona  $Q$ , gostota elektronov  $N$  in masa elektrona  $m$ . Fazna hitrost  $v_f$  je v ionosferi malenkost višja od svetlobne hitrosti, skupinska hitrost  $v_g$  pa nekoliko manjša od svetlobne hitrosti.

To pomeni, da se ionosfera obnaša kot zbiralna leča za meritve Doppler-jevega pomika nosilca ( $v_f$ ) in kot razpršilna leča za meritve zakasnitev modulacije ( $v_g$ ). Ker je os leče postavljena navpično, bo največji pogrešek ionosfere v izračunani nadmorski višini uporabnika. Pri meritvi zakasnitev modulacije (običajna

uporaba GPS) bo izračunani položaj uporabnika previsoko, pri meritvi Doppler-jevega pomika nosilca pa prenizko.

Ker je frekvenčna odvisnost pogreška ionosfere natančno poznana, lahko pogrešek ionosfere povsem izločimo z meritvijo na obeh frekvencah "L1" in "L2" ter ustreznim preračunavanjem rezultata. Civilni GPS sprejemnik, ki uporablja samo "C/A" oddajo na frekvenci "L1", si lahko pomaga z računskim modelom ionosfere iz almanaha, ki ga oddajajo vsi sateliti GPS. Model ionosfere vsebuje trenutne izmerjene vrednosti ionosfere v upravnih postajah, ki se dnevno spreminjajo glede na aktivnost Sonca.

Vpliv troposfere je podoben vplivu ionosfere, le da je v celotnem radijskem spektru do 100GHz skoraj neodvisen od frekvence. Troposfera se vedno obnaša kot razpršilna leča za vse meritve satelitskih signalov. Izračunani položaj uporabnika bo vedno previsoko.

Troposfera navidezno podaljša pot radijskih valov za približno 2.5m za uporabnika na morski gladini in satelit v zenitu. Pri tem predstavlja 10% te vrednosti vlaga v zraku, ki se s časom spreminja. Pogrešek za satelite nizko nad obzorjem je večji sorazmerno daljši poti radijskih valov skozi troposfero. Navigacijski sprejemniki večinoma vsebujejo model povprečne troposfere in zanemarijo odstopanja zaradi spremenljive vlažnosti zraka.

Točnost meritve kazijo tudi odbiti valovi, ki zaidejo v anteno sprejemnika. Proti odbitim valovom pomaga predvsem ugodna izbira položaja antene brez ovir v neposredni bližini. Nekaj pomaga tudi smerni diagram antene, saj odbiti valovi prihajajo večinoma od spodaj, vidni sateliti pa se nahajajo nad sprejemnikom. Končno nekaj malega pomaga tudi uporaba (desne) krožne polarizacije (RHCP), saj odboji večinoma menjajo smer krožne polarizacije.

Pogreški sprejemnika nastanejo zaradi toplotnega šuma sprejemnika, neidealne obdelave signalov v sprejemniku in netočnega računanja pri reševanju navigacijskih enačb. Pogreški sprejemnika so pri sodobnih sprejemnikih razmeroma majhni v primerjavi z ostalimi pogreški. Sistema GPS in GLONASS sta načrtovana tako, da toplotni šum sprejemnika omogoča izračun položaja uporabnika iz časovnih meritev modulacije in hitrosti uporabnika iz meritev Doppler-jevega pomika nosilcev s smiselno natančnostjo enkrat na sekundo.

Pogreški meritev signalov štirih ali več satelitov še ne pomenijo tudi končnega pogreška pri izračunu položaja ali hitrosti uporabnika. Pogrešek se lahko znatno poveča, ko je sistem navigacijskih enačb slabo pogojen. Zelo preprost primer se zgodi takrat, ko merimo zakasnitev (razdaljo) do dveh satelitov, ki sta na nebu zelo blizu skupaj. Tudi primer štirih satelitov, ki se nahajajo v eni ravnini, daje slabo pogojen sistem enačb.

Navigacijske enačbe s pogoški  $e_1, e_2, e_3$  in  $e_4$ :

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_u| - |\vec{r}_4 - \vec{r}_u| = c\Delta t_{14} - e_1 + e_4$$

$$|\vec{r}_2 - \vec{r}_u| - |\vec{r}_4 - \vec{r}_u| = c\Delta t_{24} - e_2 + e_4$$

$$|\vec{r}_3 - \vec{r}_u| - |\vec{r}_4 - \vec{r}_u| = c\Delta t_{34} - e_3 + e_4$$

Pogoški  $e_1, e_2, e_3$  in  $e_4$  so običajno statistično neodvisni.

Če imajo  $e_1, e_2, e_3$  in  $e_4$  enako standardno deviacijo  $\sigma$ , je smiselno definirati faktor GDOP (Geometrical Dilution Of Precision):

$$\text{GDOP} = \sqrt{\left|\frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_1}\right|^2 + \left|\frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_2}\right|^2 + \left|\frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_3}\right|^2 + \left|\frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_4}\right|^2}$$

$$\sigma_{r_u} = \text{GDOP} \cdot \sigma$$

Podobno definiramo VDOP (Vertical Dilution Of Precision):

$$\text{VDOP} = \sqrt{\left(\vec{1}_z \cdot \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_1}\right)^2 + \left(\vec{1}_z \cdot \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_2}\right)^2 + \left(\vec{1}_z \cdot \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_3}\right)^2 + \left(\vec{1}_z \cdot \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_4}\right)^2}$$

kjer je  $\vec{1}_z$  smerni vektor navzgor (zenit uporabnika),

in še faktor HDOP (Horizontal Dilution Of Precision):

$$\text{HDOP} = \sqrt{\left|\vec{1}_z \times \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_1}\right|^2 + \left|\vec{1}_z \times \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_2}\right|^2 + \left|\vec{1}_z \times \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_3}\right|^2 + \left|\vec{1}_z \times \frac{\partial \vec{r}_u}{\partial e_4}\right|^2}$$

Seveda velja:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{VDOP}^2 + \text{HDOP}^2}$$

Omejitve (sateliti v gornji polobli!):

$$\text{GDOP} \geq 1.632$$

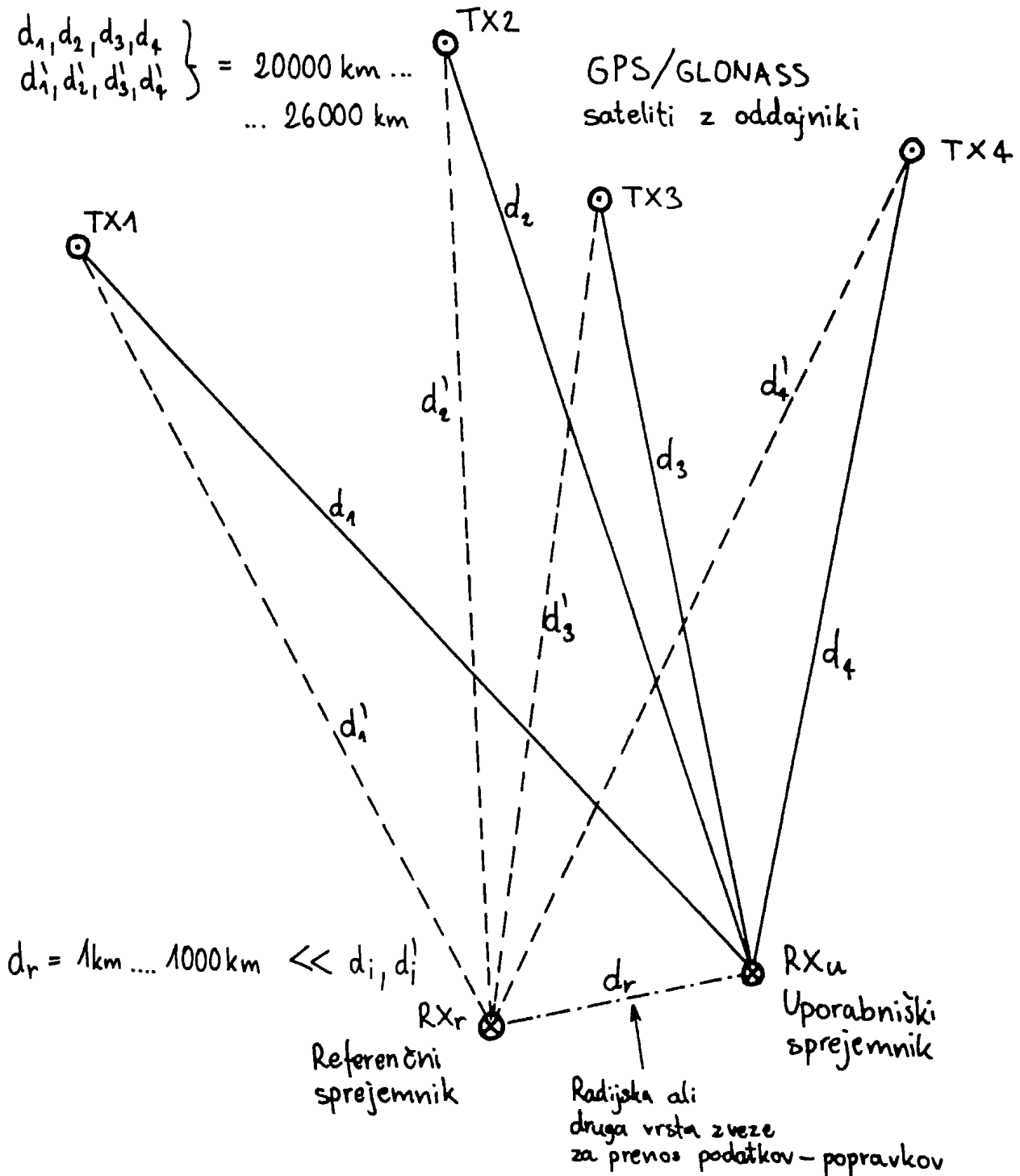
$$\text{VDOP} \geq 1.154$$

$$\text{HDOP} \geq 1.154$$

Slika 8.22 - Faktorji GDOP, HDOP in VDOP.

Da poenostavimo računanje, definiramo faktor poslabšanja točnosti izračunanega položaja GDOP (Geometrical Dilution Of Precision). Izračun GDOP pri določanju položaja iz časovnih

meritev modulacije je prikazan na sliki 8.22. GDOP doseže najnižjo vrednost takrat, ko je en satelit v zenitu, ostali trije pa so enakomerno razporejeni po obzorju z razmakom  $120^\circ$ . Poleg GDOP lahko definiramo še poslabšanje točnosti višine VDOP (Vertical Dilution Of Precision) in poslabšanje točnosti v vodoravni ravnini HDOP (Horizontal Dilution Of Precision).



Slika 8.23 – Diferencialna satelitska navigacija.

Pogreške satelitov in pojave razširjanja radijskih valov lahko preverimo in popravimo z diferencialno navigacijo, ki je



predstavljena na sliki 8.23. Pri diferencialni navigaciji namestimo enega ali več referenčnih sprejemnikov na znane točke ter z njimi merimo odstopanja razpoložljivih satelitskih signalov. Diferencialne popravke nato posredujemo uporabniku preko radijske ali drugačne zveze.

Če je razdalja med uporabnikom in referenčno postajo majhna v primerjavi z oddaljenostjo satelitov, so pogreški satelitov, ionosfere in troposfere obeh meritev dobro korelirani. V tem primeru lahko diferencialni popravki bistveno izboljšajo točnost navigacije.