

HIPERBOLNI I SATELITSKI SUSTAVI ZA NAVIGACIJU

Hyperbolic and Satellite Navigation Systems

UDK 621.396:656.61
Pregledni članak
Review

Sažetak

U radu je prikazan pregled aktualnih globalnih navigacijskih sustava i elektroničkih navigacijskih sustava koji su im prethodili. Analizirani su sigurnosni zahtjevi u radu navigacijskih sustava, te su navedene prednosti i ograničenja pojedinoga navigacijskog sustava u odnosu prema ispunjavanju postavljenih zahtjeva.

Ključne riječi: navigacija, hiperbolni navigacijski sustavi, LORAN, OMEGA, satelitska navigacija, GPS, GLONASS

Summary

The paper has shown the review of current electronic global navigation systems as well as their predecessors. Safety requirements imposed on the operation of navigation systems have been analysed and the advantages and limits of specific navigation systems in relation to the fulfilment of the requirements imposed on them.

Key words: navigation, hyperbolic navigation system, LORAN, OMEGA, satellite navigation, GPS, GLONASS.

1. Uvod

Introduction

Navigacija je smisleno kretanje u prostoru planiranim rutama, uz dovoljno često određivanje navigacijskih veličina (pozicija, smjer) uspoređujući stvarne parametre s isplaniranom rutom. Radi lakšeg snalaženja na zemljovidu i određivanja jednoznačne pozicije na

Zemljinoj površini, svaka točka na zemaljskoj kugli karakterizirana je zemljopisnom duljinom i zemljopisnom širinom, ucrtanima na geografskim kartama kao paralele i meridijani. Za pozicije u zraku, npr. za letjelice, potrebne su tri koordinate, te se određuje i visina objekta. Kako pozicija može biti na tlu, na moru i u zraku, navigacija se dijeli na kopnenu, pomorsku i zračnu.

Elektronička navigacija koristi se elektroničkim uređajima koji emitiraju i primaju elektromagnetske valove s pomoću kojih se određuje pozicija. Korisnički radionavigacijski prijamnik obrađuje signale koje prima od zemaljskih radionavigacijskih postaja ili od navigacijskih satelita. Pozicija korisnika nalazi se u presjecištu dvaju ili triju linija pozicija ili stajnica koje se utvrde kao moguća pozicija nekom navigacijskom metodom. Linije pozicije mogu biti pravci ako su određene smjerom prema odašiljačima (kut u odnosu prema referentnom smjeru sjevera), kružnice ako su dobivene mjereći udaljenost od odašiljača ili hiperbole ako su dobivene mjerenjem razlika udaljenosti od dvaju odašiljača.

2. Hiperbolni navigacijski sustavi

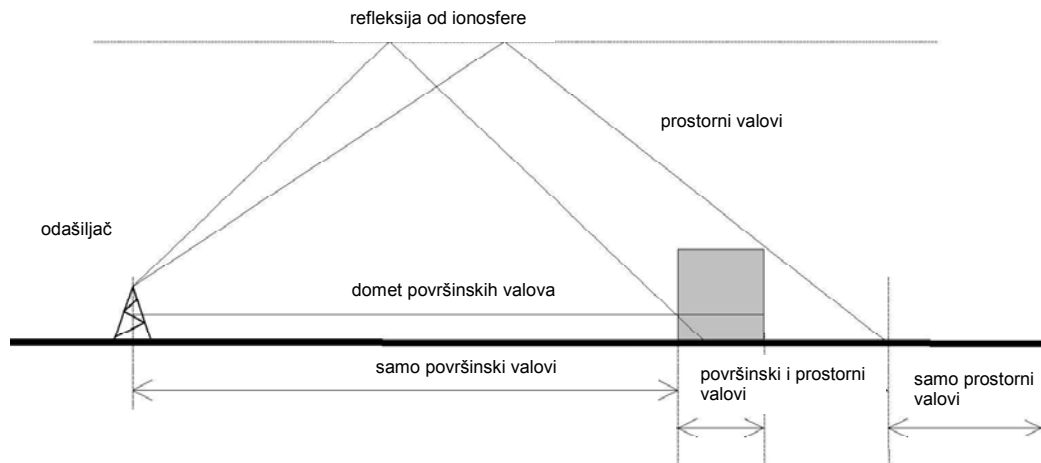
Hyperbolic Navigation System

Za zračnu i pomorsku navigaciju najviše se dosad koristilo tzv. hiperbolnim navigacijskim sustavima. Hiperbola je krivulja kojoj je razlika udaljenosti između fokusa konstantna. Sve točke jednake razlike udaljenosti nalaze se na hiperboli kao stajnici. Mjerenje razlike udaljenosti od odašiljača kod elektroničkih sustava za hiperbolnu navigaciju, svodi se na izravno mjerenje razlike u vremenu širenja elektromagnetskih valova od parova odašiljača ili na mjerenje faznih razlika na mjestu prijama. Za mjerenje razlika u stizanju signala nije potrebna precizna vremenska sinkronizacija odašiljača

* doc. dr. sc. Tomislav Kos, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za radiokomunikacije i visoku frekvencijsku elektroniku, Unska 3, 10000 Zagreb

** doc. dr. sc. Mislav Grgić, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za radiokomunikacije i visoku frekvencijsku elektroniku, Unska 3, 10000 Zagreb

*** doc. dr. sc. Srećko Krile, Sveučilište u Dubrovniku, Pomorski odjel, Ćira Carića 4, 20000 Dubrovnik



Slika 1. Prikaz rasprostiranja površinskoga i prostornog vala

Fig. 1. Scheme of spreading of surface and space wave

i prijmnika, što bi bilo nužno ako bi se izravno mjerile udaljenosti. Sustav se sastoji od jednoga glavnog i dva ili više pomoćnih odašiljača, kojima se međusobni rad sinkronizira emisijom glavnog odašiljača. Spajanjem točaka istih razlika udaljenosti ili istih razlika faza dobivaju se hiperbole u fokusima kojih su odašiljači. Utvrđivanjem hiperbola za više razlika udaljenosti ili razlika faza dobiva se polje hiperbola što pokriva područje oko odašiljača. Za svaki hiperbolni navigacijski sustav postojale su posebne navigacijske karte na kojima su bile ucrtane mreže hiperbola, obično u boji, posebno označene za sve parove odašiljača koji rade na tom području. Najrašireniji hiperbolni radionavigacijski sustavi Loran [1] i Omega razlikuju se i po načinu emitiranja signala i po načinu mjerenja vremena.

S obzirom da širenje elektromagnetskih valova ovisi o mediju kroz koji se šire, na točnost sustava utječe faktor propagacije. Odašiljači u hiperbolnim navigacijskim sustavima uglavnom rade na niskim i vrlo niskim frekvencijama, kako bi se izbjegao istodobni prijam površinskog i prostornog vala. Vremensko kašnjenje prostornog vala ovisi o visini ionosferskih slojeva i udaljenosti od odašiljača. Faktor je propagacije ovisan o stanju u atmosferi i ionosferi, i podložan je stalnoj promjeni, što uzrokuje promjenjivu pogrešku na mjestu prijama. Pogreška se povećava s porastom udaljenosti od odašiljača. Ovisno o visini ionosferskih slojeva prostorni val širi se do različitih udaljenosti. Slika 1. prikazuje rasprostiranje površinskog i prostornog vala. Unutar označenog područja zbrajaju se površinski i prostorni val. Izvan dometa površinskog vala može biti primljen samo prostorni val.

Drugi važan činitelj koji ima iznimnu važnost u određivanju točnosti navigacijskog sustava je faktor površine sjecišta stajnica. Kako poziciju određuje sjecište dviju stajnica, točnost pozicije ovisi o neodređenosti površine presjecišta. Uz pretpostavku da svaka od stajnica može imati neko odstupanje od stvarne stajnice,

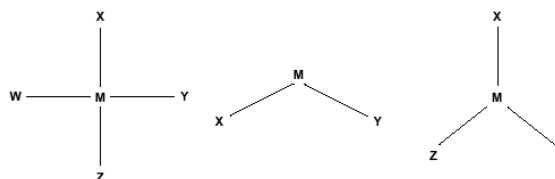
presjecište nije točka, već je površina položaja. Veličina površine presjecišta stajnica ovisi o kutu presijecanja, i najmanja je ako se stajnice sijeku pod pravim kutom. S povećanjem udaljenosti od odašiljača kut presijecanja hiperbola postaje sve manji, a pogreška pozicije sve veća.

2.1. Loran-C

Loran-C

LORAN (*L*ong *R*ANge *N*avigation) najstariji je hiperbolni navigacijski sustav, razvijen u Americi tijekom Drugoga svjetskog rata. Prva varijanta sustava Loran-A počela se primjenjivati 1943. godine i više se njome ne koristi, a vojna varijanta Loran-D nema veće primjene. Zadržao se samo sustav Loran-C, i u masovnoj je upotrebi od kraja sedamdesetih godina [1].

Loran-sustav koristi se pretpostavkom da je brzina rasprostiranja radiovalova konstantna u cijelom području pokrivanja sustava. S obzirom na to da su udaljenost, vrijeme i brzina međusobno ovisni, ako se pretpostavi da je brzina propagacije signala konstantna, moglo bi se mjerenjem vremena potrebnoga da signal od odašiljača dođe do naše pozicije, izračunati udaljenost do odašiljača.

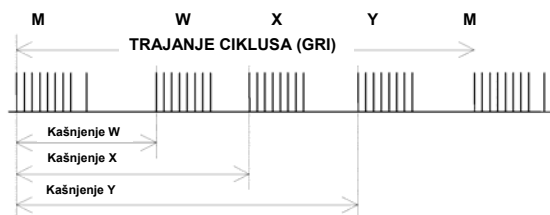


Slika 2. Geometrijski rasporedi lanaca LORAN-C

Fig. 2. Geometric schedule of LORAN-C chain

Odašiljači sustava Loran-C rade na dugom valu na jedinstvenoj frekvenciji od 100 kHz. Sustav radi u lancima s jednim glavnim odašiljačem i dva do četiri pomoćna odašiljača. Širom svijeta radi trenutno oko 30 lanaca Loran-C.

Impulsna snaga odašiljača je od 400 kW do 3 MW. Ostvariva točnost sustava kreće se od 100 do 200 m ovisno o udaljenosti od bazne linije. Bazne su linije spojnice između glavnog odašiljača (M) i pomoćnih odašiljača (W, X, Y, Z) čije moguće geometrijske rasporede prikazuje slika 2. Duljina baznih linija sustava Loran-C je između 300 i 1500 km. Točnost pozicioniranja sustava Loran-C može biti i bolja od 30 m, ali ta se točnost odnosi na ponovljivost, tj. mogućnost da se korisnik vrati na prijašnju poziciju s navedenom točnošću.



Slika 3. Shema emisije lanca LORAN-C

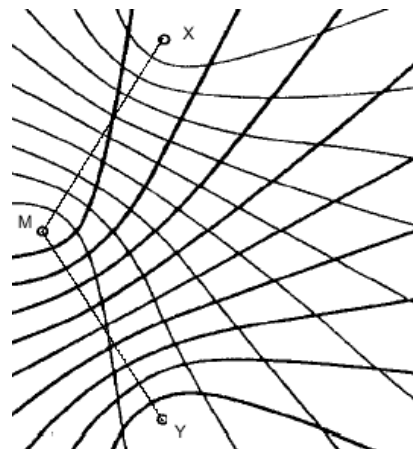
Fig. 3. Scheme of emission of LOAN-C chain

Određivanje pozicije zasniva se na mjerenju razlike u vremenu kašnjenja signala između parova odašiljača u lancu. Loran-odašiljači emitiraju skupine impulsa, koje prijatelj mora prepoznati. Da bi se jednoznačno identificirala emisija glavnog i pomoćnih odašiljača pojedinog lanca i da bi se izbjegle međusobne smetnje, odašiljači ne emitiraju istodobno, nego uz točno definirano vrijeme kašnjenja emisije pomoćnih odašiljača. Trajanje ciklusa emisije lanca GRI (*Group Repetition Interval*) i kašnjenje emisije pomoćnih odašiljača tako su određeni da i na najudaljenijim mjestima prijama ne bi bilo preklapanja signala. Odašiljači u lancu emitiraju pakete od po osam impulsa točno definiranog oblika (tzv. Loran-impulsi). Glavni se odašiljač prepoznaje po dodatnom devetom impulsu. Shema odašiljanja prikazana je na slici 3.

Trajanje ciklusa emisije lanca GRI i kašnjenje impulsa pomoćnih odašiljača (Coding Delay) različiti su za svaki Loran-lanac i omogućuju da se prepozna pojedini lanac. Na temelju kašnjenja skupine impulsa pomoćnih odašiljača prijatelj može identificirati pojedine odašiljače. Mjerenjem razlika vremena prijama TD (*Time Difference*) između trenutka prijama TOA (*Time of Arrival*) signala pomoćnog odašiljača minus TOA radiosignala glavnog odašiljača mogu se izračunati razlike udaljenosti do pojedinih parova odašiljača u lancu. Sva mjesta istih razlika udaljenosti leže na krivulji u obliku hiperbole kojoj su u fokusu odašiljači. Slika 4. prikazuje oblik hiperbolnih linija pozicije (stajnice) dvaju parova odašiljača.

Odašiljači imaju vrlo precizne cezijeve satove za vremenski standard, s maksimalnim odstupanjem 50 -

300 ns na dan. Korištenje atomskim satovima osiguralo se da sat glavnog (*master*) odašiljača ne odstupi više od 100 ns od UTC (*Universal Time Coordinated*) vremena. Pomoćni odašiljači odstupaju manje od 50 ns u usporedbi s glavnim odašiljačem.



Slika 4. Linije pozicije dvaju parova odašiljača LORAN-lanca s baznim linijama MX i MY

Fig. 4. Line of positions of two pairs of transmitters of LORAN chain with basic lines MX and MY

U novije se vrijeme Loran-lanci sinkroniziraju međusobno kako bi se odašiljači različitih lanaca mogli kombinirati za dobivanje novih stajnica. Time se proširuje upotrebljivost sustava za određivanje pozicije.

Iz slike 4. vidi se da se s porastom udaljenosti od bazne linije povećava razmak između hiperbola. U području produžetka na baznu liniju ne mogu poslužiti hiperbole za navigaciju. Ta sistemski pogreška hiperbolnog navigacijskog sustava zove se GDOP-pogreška (*Geometric Dilution of Precision*). GDOP je bezdimenzijski faktor koji izražava osjetljivost točnosti utvrđene pozicije na pogreške u mjerenju razlika vremena prijama TD. GDOP je funkcija gradijenta pojedine linije pozicije i kuta pod kojim se sijeku linije pozicije dvaju parova odašiljača u lancu.

Domest sustava Loran-C leži između 800 i 2.500 km za površinski val i do 5.000 km za prostorni val. Potrebno je razlikovati površinski od prostornog vala jer za prostorni val mogu nastupiti velike pogreške pozicioniranja.

Sustav Loran-C ima vrlo veliku pouzdanost i dostupnost bolju od 99,9 %. Ispad rada sustava moguć je samo u težem oštećenju odašiljačkih antena ili ako se udarom groma oštete izlazni stupnjevi odašiljača.

Vrlo značajno svojstvo sustava je ponovljivost pokazivanja pozicije unutar nekoliko dana ili tjedana. To znači da se nakon prvotnog utvrđivanja referentne točke ili pozicije, korisnik može ponovno vratiti na tu poziciju s vrlo velikom točnošću. Ponovljivost povratka na istu poziciju je lošija ako se razdoblje između mjerenja poveća na nekoliko mjeseci, a najnepovoljnija je pri prijelazu između ljeta i zime.

Ponovljivost ima pogrešku od 18 do 90 m.

Stanice Loran-C stalno se nadziru da bi se detektirale eventualne nepravilnosti u radu koje bi izazvale pogreške u pozicioniranju. Pomoćni odašiljači signaliziraju korisniku ako Loran-par ne funkcionira ispravno, pa je zbog neispravnosti određena bazna linija između parova odašiljača neprikladna za navigaciju.

2.2. OMEGA-sustav

Omega System

Ovaj hiperbolni navigacijski sustav razvijen je u Americi krajem 60-ih godina, a 1982. postao je potpuno funkcionalan. Veliki se domet ostvaruje odabirom vrlo niske prijenosne frekvencije od 10,2 do 13,6 kHz, koja je omogućivala navigaciju čak i podmornicama na dubinama do 100 m. Omega-sustav zamišljen je kao globalni sustav koji pokriva cijelu zemaljsku kuglu s ukupno 8 odašiljača izlazne izračene snage od po 10 kW. Antenski sustav Omega-odašiljača zbog vrlo niske frekvencije emitiranja impozantnih je dimenzija, a stupanj iskorištenja je samo 20 %. Visina središnjega antenskog jarbola je 450 m, na koji je ovješeno osam radijatora duljine po 600 m, poduprtih na stupove visoke 100 m.

Odašiljači su raspoređeni po cijeloj zemaljskoj kugli u sljedećim državama: Norveška, Liberija, Havaji, Sjeverna Dakota, La Réunion, Argentina, Australija i Japan.

Omega-sustav ne koristi se glavnim i pomoćnim odašiljačima, nego prijamnik automatski odabire parove odašiljača s najpovoljnijom geometrijom i najboljom kvalitetom primljenog signala. Pojedini odašiljači međusobno se razlikuju po specifičnoj frekvenciji emitiranja.

Kako na rasprostiranje vrlo niskih frekvencija radijskih valova Omega-sustava jako utječu razlike vodljivosti tla (kopno - more) i različita visina ionosferskih slojeva danju i noću, u prijammiku izmjerene razlike brzina rasprostiranja signala od pojedinih odašiljača morale su se korigirati. Te su se korekcije obavljale dijelom empirijski, a dijelom prema korekcijskim tablicama. Kod Omega-sustava se morala, zbog vrlo velikih udaljenosti od odašiljača, uzeti u obzir i povećana spljoštenost zemaljske kugle na polovima. Zbog ovih problema i vrlo niske radne frekvencije, Omega-prijamnici bili su vrlo složeni i skupi, a služili su uglavnom za prekooceansku plovidbu i letove. Ostvariva točnost pozicioniranja bila je 2 do 4 nautičke milje, a u najpovoljnijim okolnostima do 1 nautičke milje. Sustav je, s obzirom na shemu emitiranja, omogućivao određivanje pozicije svakih 10 sekunda. Dostupnost Omega-sustava bila je veća od 97 % u godini dana, a planirani prekidi rada zbog održavanja pojedinog odašiljača najavljivali su se 30 dana unaprijed.

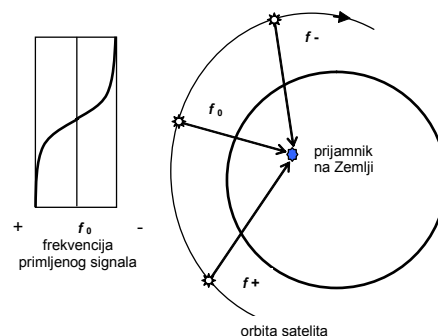
Uvođenjem satelitskoga navigacijskoga sustava GPS, održavanje i financiranje Omega-sustava postaje ekonomski neisplativo, tako da je on prestao s radom 1997. godine.

3. Satelitski navigacijski sustavi

Satellite Navigation Systems

Satelitski navigacijski sustavi omogućuju da se odrede položaj, brzina i druge veličine objekata na temelju radijskih valova primljenih sa satelita. Uobičajeno je da se navigacijski sateliti postavljaju u orbite na visinama od 800 do 36.000 km kako bi se pokrila što veća površina na Zemlji. Satelit na visini od 1.000 km pokriva 1 - 2 % Zemljine površine, dok na visini od 36.000 km pokriva približno 45 % njezine površine. Osnovna prednost satelitskih navigacijskih sustava u usporedbi sa zemaljskim je u činjenici da se s relativno malim brojem odašiljača (satelita) može pokriti cijela zemaljska kugla [2], [3].

Za određivanje pozicije korisnika treba biti poznata točna pozicija satelita u svakom trenutku emitiranja navigacijskih signala. Početkom 60-ih godina započeo je u Americi razvoj satelitskoga navigacijskoga sustava za utvrđivanje pozicije, koji je trebao omogućiti globalno pokrivanje, kontinuirani rad u svim vremenskim uvjetima i visoku preciznost. Prvi satelitski navigacijski sustav nazvan Transit rabi se od 1964. godine. Kod Transit-sustava [2] mjerile su se promjene frekvencije odaslanog signala zbog Dopplerova efekta, unutar utvrđenih vremenskih intervala, do čega dolazi zbog promjene udaljenosti odašiljača (satelita) od prijammika, što je prikazano na slici 5. Sateliti Transit-sustava namjerno su postavljeni u niskim polarnim orbitama na visini od 1.000 km s vremenom ophoda od 1h 47min, kako bi Dopplerova promjena frekvencije bila što veća. Sateliti su odašiljali na dvije frekvencije: 150 i 400 MHz, kako bi se u prijammiku mogao izmjeriti i eliminirati utjecaj

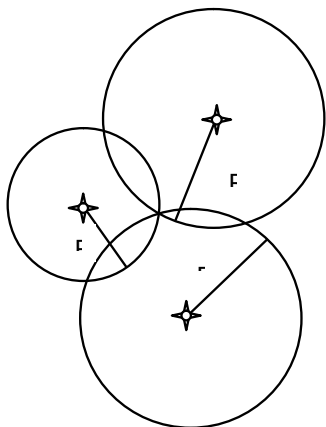


Slika 5. Dopplerov princip u Transit-sustavu

Fig. 5. Doppler principle in Transit System

ionosferskog kašnjenja na rasprostiranje signala (veličina kašnjenja signala u prolasku kroz ionosferske slojeve ovisna je o frekvenciji). S obzirom na orbitalnu visinu od 960 km, na tim je frekvencijama ukupna promjena prijamne frekvencije uzrokovane Dopplerovim efektom 3,7 ili 9,8 kHz. Sateliti su emitirali vremenske markere u intervalima od 2 minute, unutar kojih su se mjerile promjene prijamne Dopplerove frekvencije, na temelju čega se izračunavala udaljenost od satelita. S obzirom na konstelaciju i mali broj satelita u Transit-sustavu, dostupnost satelita nije bila velika jer je na njegovu

pojavu iznad obzora, ovisno o geografskoj širini, trebalo čekati u prosjeku po 30 minuta. Na bilo kojoj poziciji satelit se mogao pratiti oko 16 minuta. Svako procesiranje signala kako bi se utvrdila pozicija trajalo je 10 do 15 minuta. Ova svojstva otežavala su korištenje sustavom za objekte koji se brzo kreću, pa se on uglavnom upotrebljavao u pomorstvu i za geodetska mjerenja. Sustav je napušten 1996. godine, nakon 32 godine neprekidnog rada.



Slika 6. Mjerenje udaljenosti od triju satelita

Fig. 6. Measuring distance from three satellites

U 1969. godini ustanovljen je program DNSS (*Defense Navigation Satellite System*), koji je sjedinio sva istraživanja na usavršavanju satelitske navigacije za vojne svrhe Ratne mornarice i Ratnog zrakoplovstva SAD-a. Nastao je koncept NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System*), koji se zasnivao na mjerenjima udaljenosti od satelita, što se svodi na mjerenje vremena potrebnoga da signal emitiran sa satelita s poznatom pozicijom stigne do prijateljnika [4]. Vrijeme rasprostiranja signala pomnoženo brzinom putovanja signala (za radiovalove to je brzina svjetlosti) daje udaljenost od satelita do korisnika R. Mjerući vrijeme rasprostiranja signala dvaju satelita i računajući udaljenost do njih, prijateljnik može utvrditi svoju poziciju. Dvoznačnost pozicije može se izbjeći mjerenjem udaljenosti do trećeg satelita, što se vidi na slici 6. Da bi se osigurala što preciznija mjerenja pozicije, koja se svode na precizno utvrđivanje trenutka prijama, potrebno je osigurati što precizniju usklađenost satova satelita i prijateljnika.

3.1. GPS–sustav za globalno pozicioniranje

GPS - Global Positioning System

GPS (*Global Positioning System*) je sustav kojim se može precizno odrediti položaj korisnika na kopnu, na moru i u zraku. Sustav omogućuje korisnicima da dobiju trenutne informacije o poziciji, brzini i točnom vremenu bilo gdje na Zemlji ili u zraku, u svako doba i u svim vremenskim uvjetima. GPS-sustav kontrolira američko

Ministarstvo obrane, a bio je primarno namijenjen za vojne svrhe, ali je američki kongres dopustio i njegovu civilnu uporabu. Navigacijskim sustavom može se koristiti neograničen broj korisnika.

GPS-sustav sastoji se od triju cjelina:

- svemirski segment – sateliti koji odašilju signale,
- kontrolni segment – upravlja cijelim sustavom,
- korisnički segment – GPS-prijamnici.

a) Svemirski segment

GPS-sateliti gibaju se u približno kružnim orbitama oko Zemlje. 24 satelita raspoređena su u 6 orbitalnih ravnina s po 4 satelita u svakoj. Nagib (inklinacija) orbitalne ravnine je 55° prema ekvatoru, a visina im je 20.183 km. Vrijeme obilaska satelita iznosi 11h 58min. S punom konstelacijom od 24 satelita omogućeno je da se bilo gdje na Zemlji u svakom trenutku "vide" barem 4 do 8 satelita pri elevaciji većoj od 15° iznad obzora, a uz elevacije još bliže horizontu može se istodobno opažati i do 12 satelita. Sateliti emitiraju radiosignale s pomoću kojih se mogu mjeriti udaljenosti između satelita i prijateljnika. Uz odašiljač na satelitu se nalaze precizni atomski satovi, računalo i druga oprema prijeko potrebna za rad.

b) Kontrolni segment

GPS-sustav se nadzire s pomoću sustava zemaljskih stanica raspoređenih po cijeloj Zemlji. Obuhvaća glavnu Master kontrolnu postaju, monitorske opažачke stanice i zemaljske kontrolne stanice.

Master kontrolna postaja je u Colorado Springsu. Sakuplja podatke monitorskih stanica, računa precizne orbitalne modele satelita - efemeride, korekcije točnog vremena i parametre sustava, te prosljeđuje te podatke zemaljskim stanicama za slanje korekcija prema satelitima. Obavlja nadzor satelita i kompletnu operacionalizaciju sustava.

Kontrolne stanice raspoređene su po čitavoj zemaljskoj kugli u blizini ekvatora, uz ukupno 5 opažачkih stanica. Stanice su opremljene preciznim cezijevim satovima i neprekidno mjere pseudoudaljenosti do svih satelita na obzoru. Mjerenja se obavljaju svakih 1,5 s, a svakih 15 minuta šalju se podaci u kontrolnu (*master*) postaju.

Zemaljske kontrolne stanice odašilju poruke satelitima s podacima o efemeridama i o korekcijama vremena izračunatim u Master kontrolnoj postaji. Podaci se satelitima šalju jedan do dva puta dnevno. Ako se izgubi kontakt s upravljačkim segmentom, sateliti su u stanju zadržati svoju funkciju nekoliko tjedana do nekoliko mjeseci, ovisno o klasi (generaciji) satelita.

c) Korisnički segment

Dvije su kategorije korisnika: autorizirani i neautorizirani. U autorizirane ubrajaju se: američka

vojska i posebne državne službe. Neautorizirani su svi ostali civilni korisnici širom svijeta.

Za vojne primjene GPS-prijamnici se rabe u zrakoplovima, brodovima, kopnenim vozilima, raketama, pa čak i za pješake jedinice.

Civilna je primjena u početku bila samo navigacijska, a poslije se upotreba GPS-sustava proširila na sve vrste geodetskih i inženjerskih radova, u svim granama djelatnosti vezanima za prostor, pa se kao mali prijenosni uređaji za individualne korisnike sve masovnije rabe za sport i rekreaciju. Sve češće se GPS-prijamnici ugrađuju i u osobne automobile kao dio sustava za navigaciju, što treba pridonijeti povećanoj sigurnosti i optimizaciji prometa.

3.1.1. Usluge GPS-pozicioniranja

Services of GPS positioning

Pozicioniranje s višom razinom točnosti (PPS - *Precise Positioning Service*) namijenjeno je autoriziranim korisnicima i zasniva se na dvofrekvencijskom prijenosu. Korisnici imaju posebne GPS-prijamnike i kodove za dekriptiranje. Točnost PPS-pozicioniranja za 95% vremena bolja je od 22 m u horizontalnom i 28 m u vertikalnom smjeru [4].

Pozicioniranje sa standardnom razinom točnosti (SPS - *Standard Positioning Service*) namijenjeno je civilnim korisnicima, bez ikakve naplate i ograničenja, i zasniva se na jednofrekvencijskom prijenosu. Većina GPS-prijamnika prima samo SPS-signal. Američko Ministarstvo obrane može namjerno degradirati točnost pozicioniranja posluživši se selektivnom dostupnošću SA (*Selective Availability*). Točnost SPS-pozicioniranja uz uporabu SA je u 95% vremena bolja od 100 m u horizontalnom i 156 m u vertikalnom smjeru [4]. Bez uključene SA točnost SPS-pozicioniranja je u 95% vremena bolja od 36 m u horizontalnom, a 77 m u vertikalnom smjeru [8].

3.1.2. GPS satelitski signali

GPS satellite signals

Svi GPS-sateliti istodobno odašilju signale na dvjema prijenosnim frekvencijama, L1 i L2. Frekvencije nosilaca precizno se nadziru s pomoću atomskih satova. Blok II. sateliti imaju 4 vremenska standarda, ostvarena s pomoću dva rubidijeva i dva cezijeva sata. Stabilnost tih satova dostiže 10^{-13} – 10^{-14} tijekom jednog dana. Vrlo točni standardi frekvencije omogućuju da se dobiju stabilne osnovne takt-frekvencije $f = 10,23$ MHz. Prijenosne frekvencije L1 i L2 su 154-ti, tj. 120-i višekratnik osnovne frekvencije takta, L1 = 1575,42 MHz i L2 = 1227,60 MHz.

Prijenosni su signali modulirani binarnom bifaznom modulacijom BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) s pomoću triju sinkroniziranih kodova. Tablica 1. prikazuje frekvencije pojedinih komponenata signala.

a) Kod za pozicioniranje standardnom razinom točnosti, C/A-kod (*Coarse Acquisition / Clear Access*) modulira fazu nositelja L1. Predviđen je za standardnu SPS-uslugu, i dostupan je svim korisnicima. Kodna sekvenca ima pseudoslučajni oblik PRN-koda (*Pseudo Random Noise*) s frekvencijom takta 1,023 MHz i spektralnom širinom signala od približno 2 MHz. Kodna se sekvenca ponavlja svakih 1023 bita (1 ms), što daje efektivnu valnu duljinu koda od oko 300 m.

Tablica 1. Frekvencije komponenata GPS-signala

Table 1. Frequency of components of GPS signal

| Komponente signala | Frekvencija (MHz) |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Osnovna frekvencija takta | $f = 10,23$ |
| Prijenosna frekvencija L1 | $154 f = 1575,42$ |
| Prijenosna frekvencija L2 | $120 f = 1227,60$ |
| P-kod | $f = 10,23$ |
| C/A-kod | $f / 10 = 1,023$ |
| W-kod | $f / 20 = 0,5115$ |
| Navigacijska poruka (D-kod) | $f / 204600 = 50 \times 10^{-6}$ |

Kod je različit za svaki pojedini satelit i sateliti se na temelju njega identificiraju. PRN-kodovi omogućuju CDMA (*Code Division Multiple Access*), tako da kodovi istodobno primljeni s različitih satelita ne koreliraju međusobno. Svi signali mogu biti primljeni na istoj frekvenciji i svaki se pojedini signal može selektivno izdvojiti.

b) Kod za pozicioniranje s višom razinom točnosti, P-kod (*Precise / Protected*) modulira faze obaju nositelja L1 i L2. Namijenjen je za PPS-uslugu za autorizirane korisnike. Kodna je sekvenca dugačka 267 dana i dijeli se u nizove sa sedmodnevnim sekvencama. Početkom svakog tjedna započinje nova sekvenca. Frekvencija takta je 10,23 MHz, a efektivna valna duljina je oko 30 m. Duljina koda omogućuje veću točnost. P-kod se može posebno šifrirati s pomoću W-koda da se onemogući neovlašteno korištenje. Šifriranjem se dobiva Y-kod, koji zahtijeva posebni A-S (*Anti-Spoofing*) modul i kodni ključ, samo za autorizirane korisnike. Moduliranjem P-koda na obje prijenosne frekvencije omogućuje se mjerenje kašnjenja i kompenzacija utjecaja ionosfere na rasprostiranje signala.

c) Navigacijska poruka: D-kod (*Data code*) sadrži podatke o točnim orbitalnim pozicijama (efemeridama) satelita, koeficijente modeliranja ionosfere, informacije o stanju satelita i pogrešci sata, te i almanah-podatke o aproksimativnim orbitama svih ostalih GPS-satelita. Navigacijska se poruka prenosi brzinom od 50 bit/s, a informacija je složena u okvire podataka od 1.500 bitova. Okviri su podijeljeni u 5 podokvira po 300 bitova, s trajanjem podokvira od 6 s i trajanjem okvira od 30 s. Niz od 25 okvira (125 podokvira) čini kompletnu navigacijsku

poruku. Za prijenos cijelog paketa informacija treba 12,5 min. Da se skрати vrijeme za dobivanje inicijalne pozicije, podaci o efemeridama satelita i podaci vremena smješteni su u podokvire i ponavljaju se svakih 30 s. Svaki podokvir počinje s telemetrijskom riječi (TLM) koja služi za sinkronizaciju i HOW (*Hand-Over Word*) riječi koja omogućuje prijelaz sa C/A-koda na P-kod.

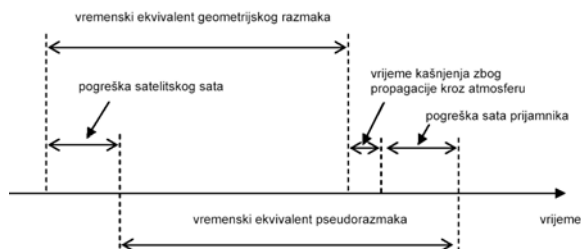
3.1.3. Prijam i obrada signala

Reception and treatment of a signal

GPS-signal koji emitiraju sateliti sastoji se od integrirane kombinacije komponenata vala nositelja, PRN-koda i navigacijske poruke. Moguće su ove kombinacije signala:

- nositelj L1 + C/A-kod + navigacijska poruka,
- nositelj L1 + P-kod + navigacijska poruka,
- nositelj L2 + P-kod + navigacijska poruka.

GPS-prijamnici trebaju izdvojiti komponente signala s pojedinog satelita, rekonstruirati prijenosni signal i prepoznati kodove pojedinog satelita. Obradom signala u prijarniku izdvajaju se PRN-kodovi svakog satelita za mjerenje vremena rasprostiranja signala i navigacijske poruke za utvrđivanje pozicije satelita, a posebnom obradom može se dobiti i signal nositelj za fazna mjerenja.



Slika 7. Pogreške izmjeranog vremena

Fig. 7. Errors in calculated time

Nakon razlaganja ulaznog signala na osnovne komponente, one se obrađuju u sklopovima za praćenje signala. Tehnikom korelacije izdvajaju se PRN-kodovi. GPS-prijamnik generira repliku C/A-koda satelita (i/ili P-koda), koji ima pohranjen u memoriji. U posmačnom se registru kodna kombinacija vremenski pomiče dok se ne postigne korelacija s kodom sa satelita. Kad se kodovi poklope, detektira se najjači signal. Ako se generira pogrešna replika PRN-koda, ne može biti korelacije, pa se ne detektira signal.

Početna pozicija PRN-koda prijarnika u trenutku pune korelacije je vrijeme dolaska TOA (*Time of Arrival*) PRN-koda sa satelita do prijarnika. TOA omogućuje da se mjeri vrijeme rasprostiranja signala i izračuna udaljenost od satelita do korisnika. Ta udaljenost naziva se pseudoudaljenost jer sadrži u sebi pogreške od kojih se neke mogu djelomično ili potpuno korigirati podacima

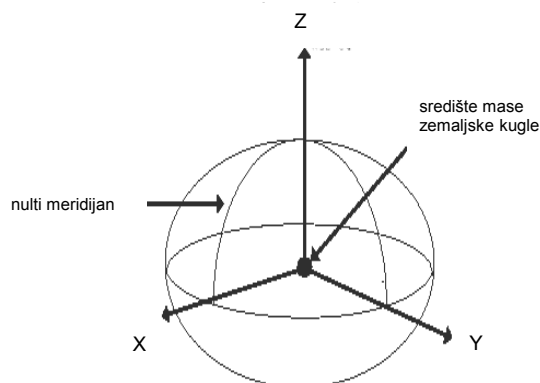
dobivenima iz navigacijske poruke. Pogreške izmjeranog vremena prikazane su na slici 7.

3.1.4. Mjerenje udaljenosti i pogreške u vremenu

Measuring distance and errors in time

Pozicija prijarnika utvrđuje se kao mjesto presijecanja linija pseudoudaljenosti prema više satelita. Orbitalni podaci (efemeride) omogućuju da prijarnik proračuna trenutnu poziciju svakog satelita u tri dimenzije. Pseudoudaljenosti od triju satelita bile bi dostatne da se utvrdi trodimenzionalna pozicija uz savršeno točni sat u prijarniku.

Pozicija satelita izračunava se o obzirom na referentni koordinatni sustav s centrom u središtu zemaljske kugle s koordinatama X, Y, Z prikazanima na slici 8.



Slika 8. Geocentrički koordinatni sustav

Fig 8. Geocentric coordinate system

Udaljenost od satelita može se odrediti kao razlika pozicija satelita i objekta, prema sljedećem

$$\left| P_s - P_k \right| = r = c \cdot t, \text{ izrazu:} \quad (1)$$

gdje su: P_s - pozicija satelita, P_k - pozicija objekta, r - udaljenost, c - brzina radijskih valova (brzina svjetlosti).

Jednadžba pozicije može se napisati kao funkcija koordinata X, Y i Z:

$$(X_s - X_k)^2 + (Y_s - Y_k)^2 + (Z_s - Z_k)^2 = r^2. \quad (2)$$

Ovom se jednadžbom koristi za svaki navigacijski satelit. Izraz (2) se može napisati na sljedeći način:

$$\begin{aligned} (X_{s1} - X_k)^2 + (Y_{s1} - Y_k)^2 + (Z_{s1} - Z_k)^2 &= [c(t_{p1} - t_{o1} - dt_1)]^2 \\ (X_{s2} - X_k)^2 + (Y_{s2} - Y_k)^2 + (Z_{s2} - Z_k)^2 &= [c(t_{p2} - t_{o2} - dt_2)]^2 \\ (X_{s3} - X_k)^2 + (Y_{s3} - Y_k)^2 + (Z_{s3} - Z_k)^2 &= [c(t_{p3} - t_{o3} - dt_3)]^2 \\ (X_{s4} - X_k)^2 + (Y_{s4} - Y_k)^2 + (Z_{s4} - Z_k)^2 &= [c(t_{p4} - t_{o4} - dt_4)]^2 \end{aligned} \quad (3)$$

U ovim izrazima su: t_p - trenutak prijama, t_o - trenutak odašiljanja pojedinog satelita, dt - odstupanje sata na satelitu. X_s , Y_s i Z_s su koordinate pojedinog satelita, koje

su poznate iz navigacijske poruke. Pozicija objekta s koordinatama X_k , Y_k i Z_k koju želimo odrediti predstavlja tri nepoznanice, a nepoznanica je i točan trenutak prijama t_p , zbog odstupanja sata GPS-prijamnika. Kako broj mjerenja mora biti jednak broju nepoznanica, treba obaviti četiri mjerenja pseudoudaljenosti, za što su potrebna četiri satelita (s_1 , s_2 , s_3 i s_4).

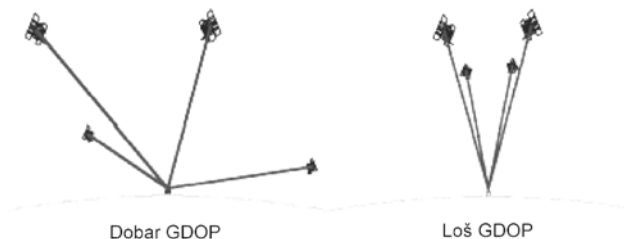
Pozicija se prijamnika izračunava iz pozicija satelita, izmjerenih pseudoudaljenosti (korigiranih za odstupanje sata svakog satelita i prijamnika, i ionosferska kašnjenja) i zadnje utvrđene pozicije prijamnika.

Pozicija korisnika u koordinatama X , Y , Z je nepraktična i pretvara se u GPS-prijamniku u zemljopisnu širinu, zemljopisnu duljinu i visinu. Postoje različiti geodetski koordinatni sustavi, zbog različitih aproksimacija geoidnog oblika zemaljske kugle. GPS-sustav standardno se koristi WGS-84 (*World Geodetic System*) koordinatnim sustavom za prikaz pozicije.

3.1.5. Pogreške pri određivanju pozicije

Errors on position fixing

Točnost određivanja pozicije ili brzine korisnika GPS-sustava ovisi o međusobnom utjecaju različitih činitelja [3], [4]. Pogreške pozicioniranja mogu nastati zbog geometrijskih i sistemskih pogrešaka.



Slika 9. Prikaz povoljnog i nepovoljnog geometrijskog rasporeda satelita

Fig. 9. The scheme of convenient and inconvenient geometric schedule of a satellite

Geometrijske pogreške nastaju zbog prostorne raspodjele satelita i korisnika. Geometrijska mjera preciznosti GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) je bezdimenzijski faktor. Visoke vrijednosti GDOP-faktora najčešće su povezane uz smanjeni broj vidljivih satelita. Općenito je prihvaćeno da je geometrijski raspored satelita povoljan ako je GDOP manje od 5. Na slici 9. prikazana su dva geometrijska rasporeda s 4 vidljiva satelita kod kojih se razlikuje točnost pozicioniranja. Najveća se točnost može postići kad je kut među satelitima, gledano s pozicije prijamnika, blizu 90° .

Sistemske pogreške obuhvaćaju sve pogreške nastale pri određivanju udaljenosti između korisnika i satelita.

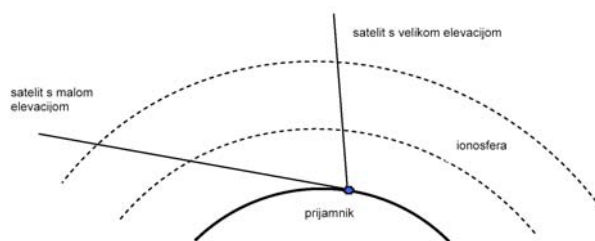
Općenito točnost pozicioniranja ovisi o kvaliteti mjerenja pseudoudaljenosti do satelita, te o točnosti položaja satelita u orbitama.

Glavni izvori pogrešaka pozicioniranja kod GPS-sustava su:

- ionosfersko kašnjenje,
- troposfersko kašnjenje,
- prijam reflektiranog vala,
- efemeride satelita,
- odstupanje satelitskog sata,
- odstupanje sata GPS-prijamnika,
- šum prijamnika.

a) Ionosfersko kašnjenje

GPS-sustav koristi se dvjema frekvencijama prijenosnog signala, L1 i L2 (1575,42 i 1227,6 MHz). Na putu od satelita do korisnika na Zemlji GPS-signal prolazi 97,5% prijeđenog puta kroz vakuum, što ne utječe na njegovo rasprostiranje, i oko 2,5% puta prolazi kroz slojeve ionosfere i oni izazivaju kašnjenje signala, a time i pogreške u mjerenju udaljenosti. Kašnjenje kroz ionosferu ovisno je o frekvenciji signala, pa se, mjereći vrlo male razlike u vremenu prijama na dvije različite frekvencije, može izračunati iznos ionosferskog kašnjenja, čime se koriste specijalni GPS-prijamnici s većom točnošću pozicioniranja. GPS-prijamnici za komercijalnu uporabu primaju samo jednu frekvenciju, i za njih se ionosferska korekcija provodi na temelju podataka o gustoći ionosfere koji se šalju u navigacijskoj poruci. To rezultira manjom preciznošću jer se korekcijska veličina dobiva kao srednja vrijednost za šire zemljopisno područje. Osim toga, debljina ionosferskog sloja ovisi o elevaciji satelita, kao što se vidi na slici 10., a to jako utječe na iznos kašnjenja signala. Kašnjenje signala kroz slojeve ionosfere može biti reda veličine od 10 ns za satelite s velikom elevacijom do 150 ns za satelite s elevacijom nižom od 10° , što može izazivati pogrešku pseudoudaljenosti od 3 do 45 m.



Slika 10. Prolazak GPS-signala kroz ionosferu ovisno o elevaciji satelita

Fig. 10. Passage of GPS signal through ionosphere related to the elevation of a satellite

b) Troposfersko kašnjenje

Sloj troposfere mnogo je niži i tanji od onoga ionosfere i izaziva također kašnjenje signala. Ovo je kašnjenje jednako na svim frekvencijama, pa se ne može eliminirati

dvofrekvencijskim prijenosom. Pogreška mjerenja pseudoudaljenosti zbog troposferskog kašnjenja približno je jednaka za sve satelite s elevacijom većom od 10° , pa se može lako korigirati.

c) Prijam reflektiranog vala

Refleksiju satelitskih signala mogu izazvati raznovrsni objekti u okolini prijavnika, zbog čega reflektirani signali stižu do prijavnika s kašnjenjem u odnosu prema direktnom signalu. Kako je antena GPS-prijavnika neusmjerena, ne mogu se razlikovati direktni i reflektirani signal. Kašnjenje utječe na sklopove za usklađivanje takt-frekvencije u prijavniku i izaziva pogreške pozicioniranja.

d) Efemeride satelita

GPS-sustav definira standarde za SPS-uslugu pozicioniranja, koji se prije svega odnose na karakteristike signala svemirskog segmenta. Utjecaj ionosfere, troposfere i višestruki put nisu uključeni u specifikacije. Točnost pozicije svakog GPS-satelita nadzire sustav opažачkih stanica. GPS-sustav osigurava korisnicima točnost pozicioniranja ovisno o točnosti podataka efemerida satelita, koje su najčešće s točnošću do 30 m.

e) Odstupanje satelitskog sata

Podatak o apsolutnom pomaku satelitskog sata sadržan je u navigacijskoj poruci. Važan je podatak i trenutak u kojem je odstupanje izmjereno, te brzina promjene koja se može očekivati do sljedećeg mjerenja. GPS-prijamnik proračunava na temelju toga predviđenu veličinu odstupanja od trenutka mjerenja odstupanja sadržanoga u navigacijskoj poruci, što može rezultirati manjim pogreškama.

f) Odstupanje sata GPS-prijavnika

Ovu pogrešku ne izaziva pomak sata prijavnika od GPS-vremena koja se eliminira dostatnim brojem mjerenja pseudoudaljenosti, nego pomak i treperenje vremenske reference između mjerenja. Moderni višekanalni GPS-prijavnici s istodobnim paralelnim mjerenjima reduciraju pogreške nastale zbog odstupanja sata na vrlo male vrijednosti.

g) Šum prijavnika

Smanjenjem visokofrekvencijskog šuma prijavnika poboljšava se odnos signal/šum primljenih signala, što omogućuje uporabu slabijih satelitskih signala za pouzdanu navigaciju. Time se poboljšavaju svojstva GPS-prijavnika u situacijama kad je direktna vidljivost satelita smanjena zbog prepreka (drveće, zgrade i sl.). To ne znači da je prijamnik ujedno i otporniji na interferencijske smetnje. Utjecaj šuma prijavnika na pogrešku pozicioniranja je slučajna veličina s pogreškom od oko 3 m.

3.2. Sovjetski globalni navigacijski sustav

GLONASS

Soviet global navigation system GLONASS

Razvoj GLONASS (*Globalnaja Navigacionaja Sputnikovaja Sistema*) navigacijskog sustava počinje 1970. godine, kao nastavak razvoja i uspješnog rada niskoorbitalnog SRNS (Satelitski radionavigacijski sustav) sustava Tsicada. Prvi sateliti GLONASS-sustava (Cosmos – 1413, - 1414, - 1415) lansirani su u orbitu 1982. godine. Do 1991. godine lansirano je ukupno 12 funkcionalnih satelita, s pomoću kojih se mogla određivati globalna pozicija korisnika, čime je počela druga faza korištenja sustavom. Planirano je da GLONASS postane osnovni navigacijski sustav u Rusiji za sva vozila [1].

Sustav je zamišljen kao globalni navigacijski sustav za dobivanje pozicije, brzine i preciznog vremena za pomorske, zračne i kopnene korisnike. On treba biti univerzalan i za vojne i za civilne svrhe širom svijeta. Ukupni predviđeni broj satelita u orbiti je 24, što će omogućiti istodobni prijam signala 5 do 11 navigacijskih satelita, ovisno o poziciji korisnika.

GLONASS-sustav neprestano se unaprjeđuje i modernizira. To uključuje modernizaciju zemaljskog sustava nadzora i poboljšanja satelitskog segmenta, da bi im se produžio životni vijek [7].

Konstelacija GLONASS-satelita bit će po 8 satelita jednoliko raspoređenih u tri orbitalne ravnine. Ravnine imaju inklinaciju (nagib prema ekvatoru) od $64,8^\circ$ i razmaknute su 120° . Orbitalna visina satelita je 19.100 km, a vrijeme obilaska je 8/17 zvezdanog dana, što znači da nakon 8 dana GLONASS-sateliti naprave točno 17 orbitalnih rotacija. Gledajući sa Zemlje, svaki se satelit pojavi na istome mjestu na nebu svakih 8 dana. Budući da se u svakoj orbitalnoj ravnini nalazi 8 satelita na jednakim razmacima, jedan će od njih biti lociran u istoj točki na nebu u isto vrijeme svaki dan. Iako imaju različite orbitalne konfiguracije, GPS i GLONASS-sustavi osiguravaju praktički identične mogućnosti.

Kao i kod GPS-sustava, kod GLONASS-a se utvrđuju pseudoudaljenosti. Zbog toga su strukture signala slične. Razlikuju se u modulacijskim postupcima. Sateliti emitiraju signale na dvjema frekvencijama u L-pojasu, L1 i L2. Ti se signali moduliraju s dva binarna koda, C/A-kodom i P-kodom, te binarnim podacima. GLONASS-sateliti emitiraju signale na različitim kanalima, tj. na različitim frekvencijama. GLONASS-prijamnik odvaja signale vidljivih satelita odabirom specifične frekvencije pridružene svakom satelitu postupkom FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). Kako FDMA ne zahtjeva specijalnu kodnu modulaciju za razlikovanje pojedinih satelita, svi GLONASS-sateliti emitiraju isti kod.

Frekvencije kanala utvrđuju se prema izrazima:

$$L1 = (1602 + k \times 9/16) \text{ MHz} \quad (4)$$

$$L2 = (1246 + k \times 7/16) \text{ MHz} \quad (5)$$

gdje je k - broj kanala.

Slično kao i za GPS-sustav, u GLONASS-sustavu se C/A-kod emitira samo na nositelju L1, a P-kod na oba nositelja, L1 i L2. Prijamnici za C/A-kod koriste se samo L1 nositeljem, a prijamnici za P-kod mogu mjeriti pseudoudaljenosti na obje frekvencije, što im omogućuje korekcije ionosferske refrakcije.

Brzina C/A-koda je 0,511 Mbit/s, a P-koda 5,11 Mbit/s. Ti su kodovi pseudoslučajne sekvence PRS (*Pseudo Random Sequence*). C/A-kod od 511 bita ponavlja se svake 1 ms.

GLONASS-sustav odašilje dva tipa navigacijske poruke, jednu uz C/A-kod, a drugu uz P-kod. Obje poruke emitiraju se brzinom od 50 bit/s. Podaci sadrže navigacijsku poruku svakog satelita i cjelokupnu konstelaciju ostalih satelita, te raspored kanala. Najveće razlike između ovih dviju navigacijskih poruka su u vremenu potrebnome da se dobiju efemeride satelita. Za P-kod potrebno je 10 s, a za C/A-kod 30 s. Vrijeme potrebno za emitiranje almanaha aproksimativnih podataka za sve satelite je za P-kod 12 minuta, a za C/A-kod 2,5 minute.

GLONASS kalibracijska poruka točnog vremena sadržava razliku između pomaka vremena i frekvencije danog GLONASS-satelita i sistemskog GLONASS-vremena, koje je korelirano s univerzalnim UTC-vremenom. GLONASS-metoda emitiranja informacija o orbitama satelita razlikuje se od GPS-metode. Za vrijeme svakog 0,5-satnog vremenskog intervala, svaki satelit izravno šalje svoju poziciju u geocentričnim koordinatama, svoju brzinu i ubrzanje.

Za vrijeme mjerenja korisnik interpolira poziciju satelita, koristeći se njegovim koordinatama, brzinom i ubrzanjem. Dobivene koordinate odgovaraju sovjetskom geocentričnom sustavu iz 1985. godine. (SGS-85). Od 1993. godine GLONASS emitira efemeride u sustavu (PZ-90) sličnome modelu WGS-84, kojim se koristi GPS. Postoji matrica za preračunavanje pozicije između oba sustava.

Točnost pozicioniranja GPS i GLONASS-sustava vrlo je slična. Tablica 2. daje usporedbu najvažnijih osobina satelitskih navigacijskih sustava GPS i GLONASS [4].

Tablica 2. Usporedba GPS i GLONASS-sustava

Table 2. Comparison GPS and GLONASS system

| | GPS | GLONASS |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|
| Broj satelita | 24 | 24 |
| Broj orbitalnih ravnina | 6 | 8 |
| Broj satelita po orbiti | 4 | 8 |
| Frekvencije nositelja L1 | 1565,2-1585,7 MHz | 1602,5625-1615,5 MHz |
| L2 | 1217,4-1237,8 MHz | 1240-1260 MHz |
| Modulacija | prošireni spektar | prošireni spektar |
| Vrijeme ophoda | 717,94 min | 675,73 min |
| Radius orbite | 26 560 km | 25 510 km |
| Nagib orbite | 55° | 64,8° |
| C/A sinkronizacijska riječ | 8 bit/20 ms | 30 bit/10 ms |
| Brzina C/A-koda | 1,023 Mbit/s | 0,511 Mbit/s |
| Ponavljanje C/A-koda | 1 ms | 1 ms |
| Brzina P-koda | 10,23 Mbit/s | 5,11 Mbit/s |
| Ponavljanje P-koda | 38 tjedana | ? |
| Razmak kanala L1 | 0 | 0,5625 MHz |
| L2 | 0 | 0,4375 MHz |
| Prijenos podataka | 50 bit/s | 50 bit/s |
| Duljina okvira podataka | 1500 bit/30 s | 7500 bit/150 s |
| Podokviri podataka | 5/300 bit | 5/1500 bit |

Zanimljive su mogućnosti povezivanja obaju satelitskih navigacijskih sustava, poradi njihove zajedničke uporabe za pozicioniranje. Kao rezultat zajedničkog rada ruskih stručnjaka i međunarodnih organizacija, definirane su prve norme i svojstva koje će omogućiti zajedničko korištenje GPS i GLONASS-sustava. Prvi komercijalni prijamnici za prijam signala obaju sustava ispitani su 1996. godine.

4. Točnost, cjelovitost, raspoloživost i kontinuitet navigacijskih sustava *Accuracy, integrity, availability and continuity of navigation systems*

Prihvatanje navigacijskih sustava u zrakoplovstvu i pomorstvu ovisi o strogim sigurnosnim aspektima.

Navigacijski sustav mora zadovoljiti više sigurnosnih zahtjeva:

- 1) točnost,
- 2) cjelovitost,
- 3) raspoloživost,
- 4) kontinuitet.

1) Točnost (*accuracy*) predstavlja stupanj poklapanja između procijenjene ili izmjerene pozicije s pravom pozicijom u danom vremenu. Radionavigacijska točnost obično se prikazuje kao:

a) predvidiva - točnost pozicije u odnosu na geodetske ili geografske koordinate Zemlje,

b) ponovljiva - točnost s kojom se korisnik može vratiti na poziciju koordinata izmjerenih s istim navigacijskim sustavom prije toga,

c) relativna - točnost kojom korisnik može utvrditi jednu poziciju relativno u odnosu na drugu bez obzira na pogrešku stvarne pozicije.

2) Cjelovitost (*integrity*) je mjera pouzdanosti utvrđene pozicije izražena kao vjerojatnost da sustav detektira i najavi stanje pri kojem je ukupna pogreška sustava veća od dopuštenih granica. Navigacijski bi sustav trebao omogućiti pravodobno upozorenje korisnicima kad se sustav ne bi smio rabiti za navigaciju.

3) Raspoloživost (*availability*) predstavlja postotak vremena u kojemu je sustav raspoloživ na području pokrivanja unutar zahtijevanih granica performansi, te su navigacijski signali dostupni za upotrebu.

4) Kontinuitet (*continuity*) jest mogućnost cjelokupnog sustava (uključujući sve elemente potrebne za podržavanje pozicioniranja) da osigura funkcionalnost bez nenadanih prekida za vrijeme trajanja namjeravane operacije, npr. slijetanja zrakoplova ili uplovljavanja broda. Rizik je kontinuiteta vjerojatnost da će rad sustava biti nenadano prekinut (ometen), i da neće moći omogućiti podršku za namjeravanu operaciju.

Hiperbolni navigacijski sustavi su u tom pogledu mnogo sigurniji i pouzdaniji od sustava satelitske navigacije. Satelitska navigacija omogućila je veliki broj novih primjena, ali su uočena i mnoga ograničenja. Postojeći satelitski navigacijski sustavi, američki GPS i sovjetski GLONASS, ne zadovoljavaju ove sigurnosne zahtjeve za sve faze leta ili plovidbe, pogotovo ne za

precizni prilaz pri slijetanju ili ulasku u luku. Podaci pozicije dobiveni satelitskim navigacijskim sustavom mogu poslužiti u zrakoplovstvu tek nakon što se usporede s drugim provjerenim navigacijskim sustavom zrakoplova. Za pomorsku primjenu koristi se tzv. diferencijskim GPS uz diferencijske korekcije koje povećavaju točnost pozicioniranja. Iako se zemaljskim hiperbolnim navigacijskim sustavima uz pojavu GPS i GLONASS satelitskih navigacijskih sustava sve manje koristi, postoji potreba da se zemaljski navigacijski sustavi i dalje upotrebljavaju kao dopuna satelitskoj navigaciji.

Literatura

References

- [1] U.S. Department of Transportation, United States Coast Guard, Specification of the Transmitted Loran-C Signal, COMDTINST M16562.4A, 1994
- [2] B. W. Parkinson, T. Stanisell, R. Beard, K. Gromov, A History of Satellite Navigation, NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Volume 42, Number 1, 1995, p.p.109-164
- [3] W. Blanchard, Frin, *The Air Pilot's Guide to Satellite Positioning Systems*, Airlife Publishing Ltd, 1995
- [4] E. D. Kaplan, *Understanding GPS Principles and Applications*, Artech House Publishers, 1996
- [5] E. A. Bretz, X marks the Spot, maybe, IEEE Spectrum, April 2000, pp. 26-36
- [6] D. Kügler, Integration of GPS and Loran-C/Chayka, A European Perspective, NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation, Vol. 46, No. 1, Spring 1999, pp. 1-11
- [7] <http://www.rssi.ru/SFCSIC/english.html>
- [8] Assistant Secretary of Defence, Global Positioning System SPS Performance Standard, October 2001
- [9] T. Kos, B. Kviz, Global Navigation Satellite System (GNSS), Proceedings of the 43rd International Symposium Electronics in Marine, ELMAR-2001, Zadar, Croatia, 2001, pp. 75-79
- [10] T. Vintar, B. Kviz, M. Grgić, Safety Parametres on Sea Positioning, Proceedings of the 40th International Symposium Electronics in Marine, ELMAR'98, Zadar, Croatia, 1998, pp. 65-69

Rukopis primljen: 9.12.2004.