

Uvod

Sistem za globalno pozicioniranje (GPS – global positioning system) omogućuje jednostavno i brzo određivanje trodimenzionalnog položaja, brzine i smjera kretanja objekata na bilo kojoj tački Zemljine površine ili njenoj okolini, kao i raspodelu jedinstvenog vremena. Ove funkcije dostupne su u svim meteorološkim uslovima, bez obzira na doba dana i noći. Broj korisnika GPS nije ograničen. Oprema korisnika je pasivnog karaktera – pri radu ne emituje nikakvo (pa ni radio) zračenje. Danas su u svetu u upotrebi dva sistema za globalno pozicioniranje. Jedan je razvilo i održava ga Ministarstvo odbrane Sjedinjenih Američkih Država (poznat pod nazivom NAVSTAR – Navigational Satellite Timing And Ranging), a drugi Ministarstvo odbrane Ruske Federacije (poznat pod nazivom GLONASS – ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА). Oba sistema razvijena su prvenstveno za vojne potrebe, ali je danas i njihova civilna upotreba veoma raširena. U ovom članku u kratkim crtama je opisan NAVSTAR GPS, tako da će se u daljem tekstu nazivi GPS i NAVSTAR upotrebljavati sa istim značenjem.

Hronologija razvoja GPS

Preteča GPS je satelitski sistem za određivanje horizontalnog položaja na nivou mora, poznat pod nazivom TRANSIT, koji je razvijen sa osnovnom namenom za određivanje položaja američkih podmornica sa balističkim raketama. Razvoj ovog sistema trajao je od 1960. do 1964. godine, kada je dostigao svoju punu operativnost. Komercijalna (civilna) upotreba ovog sistema počela je 1967. godine. TRANSIT je operativan i danas, iako je u američkoj vojsci potpuno zamenjen GPS-om 1996. godine. Princip rada ovog sistema zasnovan je na merenju Doplerovog pomeranja frekvencije radio-signala emitovanih sa satelita, pri čemu su orbite satelita poznate. TRANSIT ima pet satelita koji se nalaze u približno kružnoj orbiti na visini oko 1100 km. Sateliti emituju dva signala, jedan na 150 MHz, a drugi na 400 MHz. Samo jedan satelit može se „videti“ na horizontu, ali ne u proizvoljnom trenutku, već na svakih 35 do 100 minuta. Pri određivanju položaja uređaj za prijem signala mora da miruje, a greška iznosi od 80 do 100 metara za jedan prolaz satelita, ili oko 35 metara ako se koriste signali sa više uzastopnih merenja (prolaza).

Razvoj GPS počeo je 1967. godine lansiranjem satelita TIMATION I. Satelit

TIMATION II lansiran je dve godine kasnije. Ovim satelitima izvršena je provera GPS koncepta, po kome se koordinate prijemnika određuju na osnovu merenja rastojanja od najmanje četiri satelita (čije koordinate su poznate). Na dan 17. aprila 1973. godine memorandumom tadašnjeg američkog sekretara za odbranu (a na osnovu iskustava sa TRANSIT i TIMATION sistemom) započeta je prva faza razvoja GPS. U ovoj fazi lansirana su dva satelita: NTS-1 i NTS-2. Druga faza razvoja GPS započinje 1978. godine, tokom koje je lansirano 11 satelita tzv. I bloka. Ovi sateliti bili su namenjeni isključivo za testiranje sistema. Treća faza obuhvata period od 1989. do 1995. godine, kada je lansirano 9 satelita bloka 2 i 19 satelita bloka 2A. Aprila 1995. godine sistem je ušao u punu eksploataciju. Kod satelita ove faze prvi put su primenjene sledeće tehnike:

- unošenje namernih grešaka u podatke za koordinate satelita i vreme, kako bi se deo sistema namenjen civilnoj upotrebi namerno učinio manje preciznim u odnosu na deo sistema namenjen vojnim potrebama (tzv. „selective availability“ način rada);

- dodatna zaštita P-signal (preciznog koda namenjenog vojnim potrebama) kriptovanjem u Y-kod (tzv. anti-spoof).

Četvrta faza predviđena je za period od 1996. godine do 2001. godine kada treba da bude lansiran 21 satelit bloka 2R. Peta faza planira se za period od 2002. do 2013. godine kada će se lansirati 33 satelita bloka 2F.

Opis GPS-a

GPS sistem može se podeliti na sledeća tri segmenta: svemirski, kontrolni i korisnički segment.

Svemirski segment sačinjavaju 24 satelita koji se nalaze u približno kružnoj orbiti oko Zemlje na visini od oko 20 200 km iznad nivoa mora i emituju radio-sig-nale sa podacima o koordinatama satelita i o vremenu slanja. Sateliti se nalaze u šest orbitalnih ravni – po četiri satelita u svakoj. Sve orbitalne ravni se seku u pravi koja sa ekvatorijalnom ravni zaklapa ugao od oko 55° . Susedne orbitalne ravni seku se pod uglom od 60° . Svaki satelit napravi pun okret oko Zemlje za 11 časova i 58 minuta. Ovakav raspored satelita omogućuje da se u svakom trenutku sa bilo koje tačke Zemljine kugle može „videti“ pet do osam satelita (za tačno određivanje položaja potrebno je da GPS prijemnik nesmetano prima signale sa najmanje četiri satelita). Signali se emituju na frekvencijama Link1 (L1) od 1575,42 MHz i Link2 (L2) na 1227,6 MHz korišćenjem tehnike proširenog spektra. Emituju se dve vrste signala:

- C/A signal (Coarse/Acquisition code), čiji osnovni nosilac ima frekvenciju od 1,023 MHz i koji se emituje na frekvenciji L1,

- P signal (Precision code), čiji osnovni nosilac ima frekvenciju 10,23 MHz. Ovaj signal se emituje i na L1 i na L2 frekvenciji.

C/A signal namenjen je za civilne potrebe, a P signal se koristi u vojne svrhe. P signal može biti dodatno šifrovan, i tada se naziva Y signal. Navigacioni signal brzine 50 boda (Hz) moduliše i C/A i P signal. Navigacioni podaci su organizovani u ramove od po 1500 bita. Svaki ram ima 5 podramova dužine 300 bita. Ukupno ima 25 ramova, tako da je za predaju kompletne navigacione poruke potrebno oko 12,5 minuta. Zajedno sa navigacionim podacima, uz svaki podram šalje se i tačno vreme njegovog

slanja. Podatak o vremenu uzima se sa atomskog časovnika kojim je opremljen svaki satelit (sateliti bloka 2R imaju po 3 rubidijumska atomska časovnika). Svaki satelit osim sopstvenih koordinata šalje i koordinate ostalih satelita. U C/A signal namerno se unosi greška, kako bi se umanjila tačnost u odnosu na P (Y) signal. Ova greška može se učiniti manjom ili većom, a kontrola veličine greške je pod nadležnošću američkog Ministarstva odbrane.

Kontrolni segment sačinjavaju kontrolne stanice na Zemlji kojih ima pet: dve su na ostrvima u Tihom okeanu – Hawai i Kwajalein, jedna na ostrvu u Indijskom okeanu – Diego Garcia, jedna na ostrvu u Atlantskom okeanu – Ascension i jedna u Kolorado Springsu u SAD. Funkcija kontrolnog segmenta jeste praćenje podataka iz radio-signala koji stižu sa satelita i, po potrebi, slanje korekcionih podataka satelitima kako bi se tačnost čitavog sistema zadržala u dozvoljenim granicama. Stanica u Kolorado Springsu ima funkciju glavne kontrolne stanice i jedino ona ima dvosmernu komunikaciju sa satelitima. Ostale stanice komuniciraju samo sa glavnom stanicom.

Korisnički segment sačinjavaju GPS prijemnici. Na osnovu podataka izdvojenih iz satelitskih radio-signala GPS prijemnici mogu da izračunaju koordinate svog položaja u globalnom geodetskom sistemu WGS84 ili u nekom od nekoliko desetina drugih koordinatnih sistema koji se koriste u svetu. Osim koordinata, GPS prijemnici mogu da izračunaju svoju brzinu i smer kretanja, kao i GPS vreme. Postoji više od stotinu tipova GPS prijemnika različitih namena i preciznosti. Bez obzira na vrstu prijemnika, od prvog uključenja prijemnika (kada je memorija prijemnika koja sadrži podatke o konste-

laciji satelita prazna) pa do dobijanja podataka o položaju prijemnika potrebno je da protekne oko 12,5 minuta. Pri sledećim uključivanjima GPS prijemnika ovo vreme se skraćuje na oko 5 minuta, zahvaljujući tome što prijemnik u svojoj memoriji čuva podatke o koordinatama svih GPS satelita. Ako bi se prijemnik u isključenom stanju preneo na rastojanje udaljenije od 1000 km, ili ako bi duže vreme bio isključen (nekoliko meseci), tada bi se memorisana konstelacija satelita bitnije razlikovala od stvarne i prijemniku bi opet bilo potrebno 12,5 minuta da obnovi ove podatke.

Globalni geodetski sistem WGS84

U satelitskoj geodeziji koriste se sledeća dva koordinatna sistema:

- konvencionalni (kvazi) inercijalni koordinatni sistem (Conventional Inertial System – CIS) u kojem se opisuje kretanje satelita,

- konvencionalni zemaljski koordinatni sistem (Conventional Terrestrial System – CTS) u kojem se prikazuju rezultati pozicioniranja.

Koordinatni počeci oba koordinatna sistema poklapaju se i nalaze se u centru mase Zemlje. Z-osa oba sistema približno se poklapa sa Zemljinom osom rotacije. Ortogonalne ose CIS koordinatnog sistema definišu se u odnosu na nepokretne zvezde, dok se kod CTS koordinatnog sistema ortogonalne ose definišu u odnosu na nulti meridijan i konvencionalan Zemljin pol. Koordinatni sistem CIS kreće se zajedno sa Zemljom isključivo translatorno. Strogo uzevši, ovakav sistem nije inercijalan, jer se u njemu oseća dejstvo centrifugalne sile zbog kružnog kretanja Zemlje oko Sunca, pa otuda u njegovom nazivu reč „kvazi“. CTS koor-

dinatni sistem, osim što se kreće zajedno sa Zemljom oko Sunca, okreće se oko Z-ose ugaonom brzinom jednakom srednjoj ugaonoj brzini okretanja Zemlje oko svoje ose.



Sl. 1 – Odnosi između elipsoida, geoida i stvarnog oblika zemlje

Stvaran oblik Zemlje je nemoguće precizno matematički opisati zbog izuzetne složenosti, pa se prikazuje na sledeća dva načina (slika 1):

- pomoću obrtnog elipsoida – geometrijskog tela koje nastaje obrtanjem elipse oko njene kraće ose,

- pomoću geoida: Zemljin geoid je geometrijsko telo koje je nalik zatalasanom elipsoidu. Sve tačke površi geoida imaju istu potencijalnu energiju, pri čemu površ geoida na najbolji način aproksimira srednji nivo svih okeana na Zemlji.

Vojnim standardom 2401 [7] američkog Ministarstva odbrane definisan je globalni referentni geodetski sistem pod imenom WGS84 (World Geodetic System 1984). Ovim standardom definisan je CTS koordinatni sistem na sledeći način: koordinatni početak se nalazi u centru mase Zemlje, Z-osa je paralelna sa osom obrtanja Zemlje koja prolazi kroz konvencionalni Zemljin pol (Conventional Terrestrial Pole – CTP, koji je definisao Internacionalni biro za vreme – Bureau International de l'Heure,¹ skraćeno BIH), X-osa se nalazi u preseku

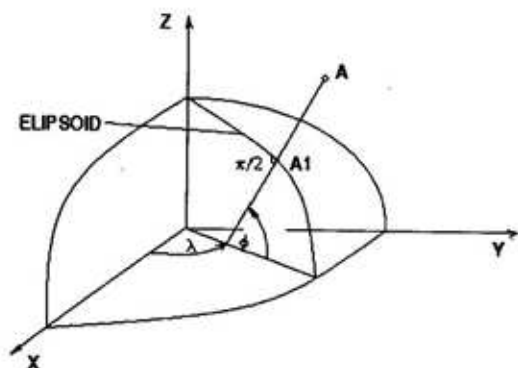
ravni CTP evkatora i ravni koja prolazi kroz Z-osu, a paralelna je sa ravni nultog meridijana (koji je takođe definisao BIH). Y-osa je tako odabrana da sa X i Z osom čini desni ortogonalni koordinatni sistem. Po definiciji, ovaj koordinatni sistem rotira oko Z-ose konstantnom ugaonom brzinom koja je jednaka srednjoj brzini rotiranja Zemlje oko konvencionalnog pola. CIS koordinatni sistem je definisan, prema standardu 2401, na osnovu Fundamentalnog zvezdanog kataloga FK5. Osim definicije CTS i CIS, ovaj standard daje i definicije WGS84 elipsoida i WGS84 geoida. Prema njemu dužina manje poluose elipse izvodnice (polarni radijus) WGS84 elipsoida iznosi 6 356 752,3142 metra, a dužina veće poluose (ekvatorski radijus) iznosi 6 378 137,0 metara [9]. Manja osa elipse leži na Z-osi CTS sistema, a presek male i velike ose elipse nalazi se u koordinatnom početku CTS sistema.

Osnovni koordinatni sistem za GPS je WGS84 CTS koordinatni sistem. Osim u ortogonalnim XYZ koordinatama ovog sistema, položaj neke tačke se izražava i preko geodetske longitude, latitude i visine. Njima se zadaju koordinate u odnosu na WGS84 elipsoid. Geodetska longituda neke tačke računa se kao ugao koji zaklapaju ravan XZ i ravan koja prolazi kroz datu tačku i Z-osu. Geodetska latituda neke tačke računa se kao ugao koji zaklapaju ravan XY i prava koja prolazi kroz datu tačku, a normalna je na površ elipsoida. Geodetska (elipsoidna) visina neke tačke predstavlja normalno rastojanje od te tačke do površi elipsoida (slika 2).

Standard 2401 definiše način konverzije koordinata iz CIS sistema u CTS

¹ Nekadašnji BIH sada je International Earth Rotation Service (IERS), Međunarodni servis za praćenje rotacije Zemlje, ali se ranije doneti standardi i definicije i dalje vode pod imenom BIH.

sistem (i obrnuto), kao i postupak za konverziju između WGS84 sistema i nekoliko desetina lokalnih koordinatnih sistema koji se danas koriste u svetu.



Sl. 2 – Geodetske koordinate tačke A: geodetska longituda (λ), geodetska latituda (ϕ) i geodetska visina (dužina $A-1$) tačke A

Konverzija iz CIS koordinatnog sistema u CTS obavlja se prema sledećoj formuli:

$$[X]_{\text{cts}} = [A] [B] [C] [D] [X]_{\text{cis}}$$

gde je:

[X]_{cts} – vektor koordinata u CTS koordinatnom sistemu,

[A] – konverzionna matrica (jakobijan) precesije,

[B] – konverzionna matrica (jakobijan) nutacije,

[C] – konverzionna matrica (jakobijan) pomeranja polova,

[D] – konverzionna matrica (jakobijan) zvezdanog vremena,

[X]_{cis} – vektor koordinata u CIS koordinatnom sistemu.

Navedeni činioci (precesija, nutacija, pomeranje polova i zvezdano vreme) uzimaju se u obzir pri konverziji koordinata zbog neravnomernog kretanja Zemlje. Precesija je pojava, uzrokovana uglavnom gravitacionim uticajem Sunca i Meseca na Zemlju, da pozitivan deo Zem-

ljine ose rotacije opiše pun kružni konus (u smeru okretanja Zemlje oko svoje ose) sa temenom u koordinatnom početku približno svakih 25 780 godina. Ugao između ose konusa i ose rotacije iznosi 23,439°. Gravitacioni uticaj Sunca i Meseca na Zemlju je promenljiv zbog promene položaja Zemlje u odnosu na njih, pa osa rotacije pri precesiji neznatno osciluje oko srednjeg položaja sa periodom od oko 18,6 godina i amplitudom od oko 9,2 sekunde. Ova pojava naziva se nutacija. Pomeranje polova je pojava da se trenutna osa obrtanja Zemlje ne poklapa sa srednjom osom. Pomeranje trenutne ose je periodičnog karaktera i sastoji se od više komponenti. Dominantna komponenta utiče da trenutna osa napravi pun krug oko srednje ose za vreme od oko 14 meseci, pri čemu rastojanje trenutne ose od srednje ose iznosi oko 0,2 sekunde. Uzimanjem u obzir zvezdanog vremena (baziranog na astronomskim merenjima stvarnog okretanja Zemlje oko svoje ose) uvažava se činjenica da Zemlja na neravnomeran način neznatno usporava obrtanje oko svoje ose (uglavnom zbog dejstva plime i oseke). Razlika između vremena merenog atomskim časovnicima (UTC ili TAI vreme, videti poglavlje GPS vreme) i zvezdanog vremena povećava se u proseku za oko 0,8 sekundi godišnje.

Kako je dato standardom 2401, konverzija koordinata iz nekog drugog geodetskog sistema u WGS84 sistem može se izvršiti primenom formula Molodenskog [7, 9].

GPS vreme

GPS vreme upravlja se prema UTC vremenu Američke mornaričke opservatorije (United States Naval Observatory

- USNO). UTC (univerzalno koordinirano vreme) predstavlja srednje vreme atomskih časovnika oko 50 opservatorija - laboratorija širom sveta. S vremena na vreme se UTC vremenu dodaje ili oduzima 1 prestupna sekunda, kako bi se razlika između UTC vremena i vremena baziranog na praćenju rotacije Zemlje oko svoje ose smanjila na najviše 0,9 sekundi (u apsolutnom iznosu). Dodavanje ili oduzimanje prestupne sekunde vrši se na predlog Međunarodnog servisa za praćenje rotacije Zemlje (IERS - International Earth Rotation Service). Prva prestupna sekunda dodata je 1972. godine, i do sada su prestupne sekunde uvek dodavane UTC vremenu. GPS vremenu se ne dodaju i ne oduzimaju prestupne sekunde, tako da je na dan 1. januara 1999. godine GPS vreme žurilo u odnosu na UTC vreme za 13 sekundi [14]. Ako se izuzmu kumulativne prestupne sekunde, GPS vreme prati UTC vreme sa apsolutnom greškom koja nije veća od 200 nanosekundi za P(Y) signal, odnosno 340 nanosekundi za C/A signal za 95% vremena.

GPS vreme je na dan 1. januara 1999. godine kasnilo u odnosu na TAI vreme za 19 sekundi. TAI vreme je međunarodno atomsko vreme, definisano kao srednje vreme većeg broja atomskih časovnika raspoređenih u laboratorijama širom sveta. Ovo vreme održava i prati Međunarodni biro za tegove i mere (Bureau International des Poids et Mesures). TAI vremenu se ne dodaju i ne oduzimaju prestupne sekunde.

Princip rada GPS

Navigacione poruke koje emituju NAVSTAR sateliti sadrže podatke o položaju satelita (putanja i trenutni položaj

svakog NAVSTAR satelita opisani su sa 6 keplerijanskih elemenata) u trenutku slanja, kao i o tačnom vremenu slanja pojedine poruke. Tačno vreme obezbeđuje se atomskim časovnikom kojim je svaki satelit opremljen. Koordinate satelita se u GPS prijemniku konvertuju u ortogonalne XYZ koordinate WGS84 koordinatnog sistema prema postupcima i formulama datim u [2] i [3]. Pod uslovom da su časovnici na satelitima idealno sinhronizovani sa časovnikom u GPS-prijemniku, za određivanje tačnog položaja prijemnika potrebna su tri satelita. Ako bi prijemnik primao signale sa samo dva satelita, tada bi se njegov izračunati položaj mogao nalaziti bilo gde na kružnici koju obrazuju dve sfere koje se seku: prva sfera čiji je poluprečnik $r_1 = C t_1$ i druga sfera poluprečnika $r_2 = C t_2$, gde je C brzina prostiranja radio-talasa, a t_1 i t_2 vremena potrebna da radio-talasi stignu sa prvog i drugog satelita do prijemnika respektivno. Centri sfera nalaze se u tačkama gde se nalaze antene satelita u trenutku emitovanja signala. Primajući signal i sa trećeg satelita, položaj prijemnika se ograničava na samo dve tačke, pri čemu se jedna može odbaciti (ona koja je izvan sfere po kojoj kruže sateliti). Iako je prijemnik opremljen kvarcnim časovnikom, potreban sinhronizam sa časovnicima na satelitima teško se može postići. U tu svrhu bi se u prijemniku morao koristiti atomski časovnik, što bi znatno povećalo cenu prijemnika. Umesto toga koriste se signali sa još jednog, četvrtog satelita. Rešavajući sistem od četiri jednačine (za svaki od 4 satelita postavlja se jednačina kojom se izražava rastojanje od GPS prijemnika do satelita) sa četiri nepoznate (X, Y i Z koordinate GPS prijemnika u WGS84 koordinatnom sistemu, kao i greška časovnika u prijem-

niku) prijemnik izračunava koordinate svog položaja i veličinu greške svog časovnika. Pošto izračuna svoje XYZ koordinate, GPS prijemnik ih može po potrebi konvertovati u geodetske koordinate WGS84 sistema ili u koordinate nekog drugog koordinatnog sistema.

Navigacionim signalom frekvencije 50 Hz modulišu se i C/A i P signal. Ovaj signal sadrži podatke o položaju satelita koji emituje signal, podatke o celokupnoj konstelaciji satelita NAVSTAR sistema, o ispravnosti satelita, o potrebnoj korekciji podataka o vremenu, koeficijentima koje treba koristiti pri obradi kašnjenja signala kroz jonosferu i troposferu, itd.

Osnovni nosilac C/A signala je pseudoslučajni kod (PRN – Pseudo Random Noise) dužine 1023 bita na frekvenciji 1,023 MHz, tako da je perioda ponavljanja ovog signala 1 ms. Ovako kratak period ponavljanja je izabran da bi se skratilo vreme potrebno za sinhronizovanje PRN sekvence sa satelita i PRN sekvence generisane u prijemniku. C/A signali nisu šifrovani i prenose se samo na L1 frekvenciji. Pseudoslučajni kod je jedinstven za svaki satelit. Svih 24 različitih pseudoslučajnih kodova (za svaki satelit po jedan) izabrani su iz skupa tzv. „zlatnih pseudoslučajnih kodova“, koji imaju osobinu da im je međukorelacija minimalna. To je neophodno jer je nosilac C/A signala L1 iste frekvencije za svih 24 satelita, pa se izdvajanje podataka sa tačno određenog satelita mora izvršiti primenom tehnike multipleksiranja sa kodnom podelom (tzv. code-division multiplexing): pseudoslučajni kodovi svakog satelita poznati su GPS prijemniku, i ako se želi izdvojiti navigacioni signal sa posebnog satelita, zbirni signal se korelira sa pseudoslučajnim kodom datog satelita. Kao rezultat korelacije pojavljuje

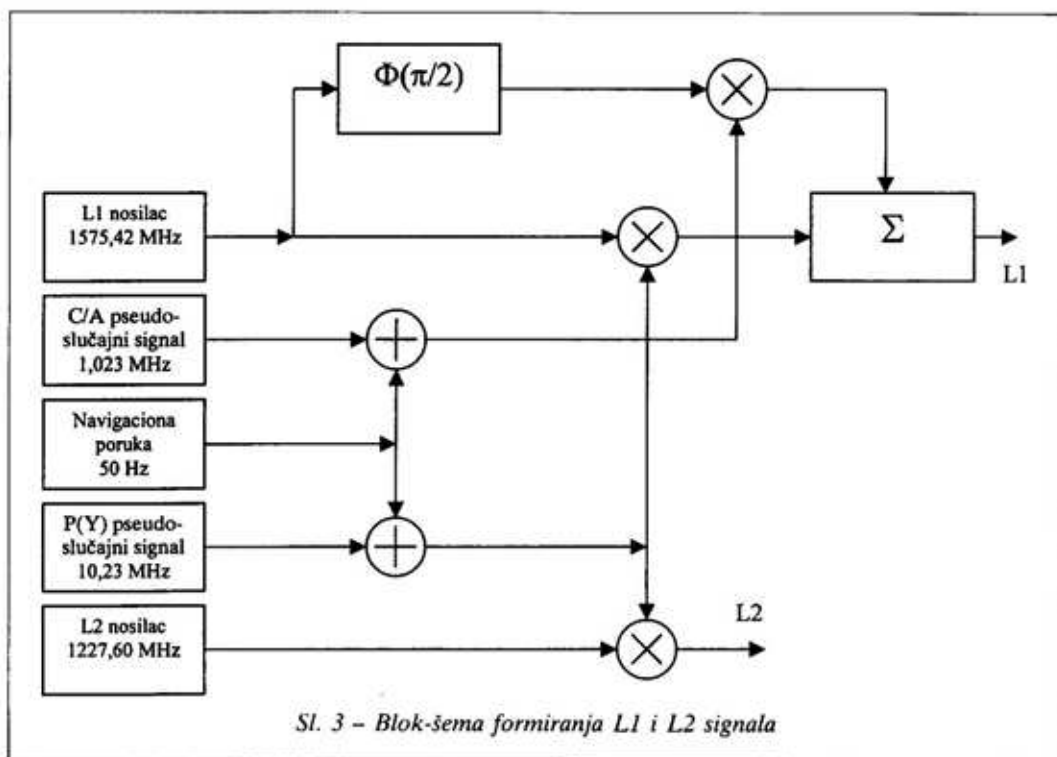
se samo signal sa željenog satelita (autokorelacija je maksimalna kada je pseudoslučajni kod satelita sinhronizovan sa pseudoslučajnim kodom prijemnika), dok se uticaj ostalih signala gubi (međukorelacija između kodova je minimalna bez obzira na vremenski pomeraj između njih).

Osnovni nosilac P – signala je pseudoslučajni kod dužine 7 dana na frekvenciji od 10,23 MHz. P – signal se po potrebi može šifrovati u Y signal, kako bi se sprečilo neautorizovano korišćenje ovog signala. Sateliti mogu slati bilo P, bilo Y signal. GPS prijemnici za civilnu upotrebu nemaju podatke o P kodovima i načinu šifriranja u Y kod. P(Y) signali se emituju i na L1 i na L2 frekvenciji. Na L1 frekvenciji nosilac je u kvadraturi (fazno pomeren za $\pi/2$) u odnosu na nosilac C/A signala. Na slici 3 prikazana je blok-šema formiranja L1 i L2 signala.

Da bi tačno izračunao svoj položaj, GPS prijemnik mora da uradi sledeće operacije:

- da se sinhronizuje sa C/A nosiocem;
- da izvrši izdvajanje i sinhronizaciju sa navigacionim signalom od 50 Hz;
- da pređe na prijem P(Y) signala (samo prijemnici koji imaju mogućnost prijema P(Y)-koda);
- da obavi sinhronizaciju sa P(Y) signalom (samo prijemnici koji imaju mogućnost prijema P(Y)-koda);
- da izvrši traženje i prihvatanje signala sa sledećih satelita (drugog, trećeg i četvrtog);
- da izračuna rastojanja do satelita postavljanjem i rešavanjem sistema jednačina (uzimanjem u obzir i nepravolinijskog prostiranja radio-talasa kroz jonosferu i troposferu).

Prema konstrukciji postoji nekoliko tipova GPS prijemnika.



Kontinualni prijemnik ima pet ili više zasebnih hardverskih kanala. Svaki od njih može kontinualno da prati po jedan satelit, pri čemu se za određivanje položaja koriste četiri najpovoljnija satelitska signala. Prijemnik ovakvog tipa je najsloženiji (a time i najskuplji), ali i najboljih performansi.

Sekvencijalni prijemnik sa jednim kanalom ima jedan hardverski kanal, tako da u svakom trenutku može da prati samo jedan satelit. Po obradi signala sa jednog satelita prijemnik prelazi na sledeći satelit, što utiče na smanjenje performansi prijemnika (pogotovo za primenu na pokretnim objektima), ali i na smanjenje njegove cene.

Sekvencijalni prijemnik sa dva hardverska kanala odmah po uključanju radi kao i onaj sa jednim kanalom. Pošto primi podatke sa četiri satelita, prijemnik

prelazi u režim u kome jedan kanal služi za prijem i obradu navigacionih signala, a drugi za praćenje signala-nosioca. Takođe, na jednom kanalu prima L1 signal, a na drugom L2 signal, čime dobija mogućnost da kompenzuje promenljivo vreme prostiranja signala kroz jonosferu.

Multipleksni prijemnik ima jedan hardverski kanal pomoću kojeg može da prati signale do osam satelita uz brzi prelazak sa jednog na drugi satelit (do 50 puta u sekundi). Nedostatak ovog prijemnika je što je odnos signal/šum $10 \log(n)$ (n – broj satelita koji se prate) lošiji od kontinualnog prijemnika, ali mu je konstrukcija mnogo jednostavnija (a time i cena manja).

Prema nameni, GPS prijemnici se mogu podeliti na:

- ručne prijemnike opšte namene koji su malih dimenzija i mase, i sa ba-

terijskim napajanjem. Neki od njih imaju mogućnost prikazivanja geografskih karata na ekranu od tečnog kristala. Mogu koristiti dodatnu antenu koja se može instalirati na krov vozila ili na neko drugo pogodno mesto;

- prijemnike predviđene za ugradnju u različita saobraćajna sredstva (avione, automobile, autobuse, brodove). Opremljeni odgovarajućim podacima i digitalizovanim geografskim kartama, ovakvi GPS prijemnici pomažu korisnicima da lakše savladaju zadate maršrute. Druga kategorija ovih prijemnika namenjena je praćenju vozila. U tu svrhu se uz GPS prijemnik dodaje neophodna oprema kojom prijemnik može da pošalje podatke o svom položaju centru za praćenje, kontinualno ili na zahtev centra (putem GSM telefonije ili posebnim radio-vezama);

- prijemnike predviđene za korišćenje na satelitima. Posebno su prilagođeni za rad pri velikim brzinama i ubrzanjima, sa posebnom zaštitom od kosmičkog zračenja;

- prijemnike za dobijanje standardnog vremena. Prijemnici ovog tipa zahtevaju samo jedan GPS satelit, jer su obično stacionarnog tipa, pa je njihova pozicija precizno utvrđena, tako da se potrebna korekcija vremena može lako izvršiti. Ovakvi prijemnici mogu se koristiti kao etaloni za vreme i za frekvenciju, jer održavaju dobru stabilnost u dužem periodu. Mogu se koristiti u kalibracionim laboratorijama, za vremensku sinhronizaciju u digitalnim mrežama, astronomskim opservatorijama, seizmografima u seizmičkim stanicama (radi preciznog određivanja epicentra zemljotresa), u uređajima za registrovanje događaja na mrežama i postrojenjima za prenos električne energije;

- prijemnike za prikupljanje podataka o položaju različitih objekata na terenu i unošenje ovih podataka u geografske informacione sisteme. Radi postizanja veće preciznosti obično se koriste tehnike za poboljšanje tačnosti merenja, kao što su diferencijalni GPS ili interferometrički GPS (videti deo o povećanju tačnosti GPS). Ovakvi prijemnici su mobilnog tipa, često sa ugrađenim računalom koji omogućuje jednostavniju razmenu podataka sa različitim bazama podataka i geografskim informacionim sistemima.

Tačnost GPS

GPS omogućuje određivanje položaja i vremena sa sledećom osnovnom tačnošću u WGS84 koordinatnom sistemu (bez primene bilo kakvih dodatnih tehnika za povećanje tačnosti).

Uz upotrebu P(Y) signala, za 95% vremena:

- greška određivanja horizontalnog položaja nije veća od 22 m, odnosno rastojanje normalne projekcije izračunatog položaja GPS prijemnika na elipsoid WGS84 i normalne projekcije tačnog položaja GPS prijemnika na elipsoid WGS84 nije veće od 22 m;

- greška određivanja vertikalnog položaja nije veća od 27,7 m, odnosno apsolutna vrednost razlike između tačne elipsoidne visine i izračunate elipsoidne visine ne prelazi 27,7 m;

- greška u merenju vremena ne prelazi 200 nanosekundi u odnosu na UTC vreme bez prestupnih sekundi.

Uz upotrebu C/A signala, za 95% vremena:

- greška pri određivanju horizontalnog položaja nije veća od 100 m, odnosno rastojanje normalne projekcije izračuna-

tog položaja GPS prijemnika na elipsoid WGS84 i normalne projekcije tačnog položaja GPS prijemnika na elipsoid WGS84 nije veće od 100 m;

- greška pri određivanju vertikalnog položaja nije veća od 156 m, odnosno apsolutna vrednost razlike između tačne elipsoidne visine i izračunate elipsoidne visine ne prelazi 156 m;

- greška u merenju vremena ne prelazi 340 nanosekundi u odnosu na UTC vreme bez prestupnih sekundi.

Izvori grešaka su:

- tačnost C/A signala degradirana je u odnosu na P(Y) signal namernim unošenjem grešaka u podatke za položaj satelita i u podatke za vreme (tzv. SA – selective availability način rada satelita). Namerno unošenje grešaka bilo je sasvim ukinuto u vreme rata zemalja članica NATO protiv Iraka, jer NATO nije raspolagao potrebnom količinom vojnih GPS prijemnika, pa je koristio civilne. Namerno unošenje grešaka je od 1. maja 2000. godine potpuno ukinuto;

- nepovoljan raspored satelita (DOP – dilution of precision – „rasipanje“ preciznosti). Poznato je da se kod tzv. slabo uslovljenog sistema linearnih jednačina pri malim varijacijama vrednosti slobodnih koeficijenata dobijaju velike varijacije u vrednostima rešenja sistema. Sličan efekat primećuje se i kod sistema nelinearnih jednačina, čijim rešavanjem se dobijaju koordinate GPS prijemnika i odstupanje časovnika GPS prijemnika: za istu veličinu grešaka u koordinatama satelita (i grešaka zbog zaokruživanja vrednosti promenljivih i konstanti koje učestvuju u računu), a pri različitim konstelacijama satelita, dobijaju se različite greške u izračunatim koordinatama GPS prijemnika. U tačkama u kojima se sfere frontova radio-talasa seku pod uglovima

koji se približavaju pravom uglu, greška je manja nego u tačkama gde su ovi uglovi mali. Za zadata tačku DOP varira u toku vremena onako kako varira konstelacija satelita koji se „vide“ iz te tačke;

- promenljiva dužina putanje signala kroz jonosferu. Variranje ove putanje može izazvati grešku od 40 do 60 m u toku dana (za 95% vremena) i od 6 do 12 m u toku noći (za 95% vremena). Ovaj problem posebno je izražen kod prijemnika koji primaju samo C/A signale. Kod prijemnika koji primaju i C/A i P(Y) signale greška se može svesti na oko 4,5 m za 95% vremena. Navigacioni podaci sadrže korekzione koeficijente za korisnike samo C/A signala pomoću kojih se uticaj promenljive jonosferske putanje može delimično umanjiti;

- promenljiva putanja signala kroz troposferu. Variranje ove putanje može izazvati grešku od 6 m za 95% vremena. Kvalitetniji prijemnici imaju ugrađen poseban algoritam kojim se uticaj ovog variranja može umanjiti;

- razlika između stvarne pozicije satelita i one sadržane u navigacionim podacima (izuzimajući mere namernog unošenja greške). Ova razlika iznosi do 8,2 m za 95% vremena;

- razlika između stvarnog vremena i vremena koje pokazuju časovnici na satelitima (izuzimajući mere namernog unošenja greške). Ova razlika unosi grešku koja je manja od 6,5 m za 95% vremena;

- prijem radio-talasa reflektovanih od površina u blizini GPS prijemnika. Ovakvi talasi u prijemniku interferiraju se direktnim talasom ili ga zamenjuju i time utiču na unošenje greške. Uticaj reflektovanih talasa na grešku procenjuje se na oko 0,5 metara.

Diferencijalni GPS (DGPS) razvijen je sa ciljem da se uticaj pomenutih čini-

laca (osim reflektovanih talasa i DOP) umanji i time poboljša preciznost sistema. Za dve tačke na površini Zemlje koje nisu udaljene više od 250 km jedna od druge uslovi prostiranja signala kroz jonosferu i troposferu približno su isti, pa je i veličina greške približno ista (osim za greške nastale usled refleksije radio-talasa). Zbog toga se u jednu tačku, čije su koordinate unapred precizno utvrđene, stavlja tzv. „referentni“ GPS prijemnik. Ovakav prijemnik izračunava grešku koju sadrže podaci sa satelita kao razliku između izračunatih i stvarnih koordinata. Podatak o grešci može se memorisati u računaru samog referentnog prijemnika za kasnije korišćenje ili odmah slati zemaljskom radio-vezom do mobilnih DGPS prijemnika. Mobilni DGPS prijemnik od izračunatog položaja (na bazi podataka primljenih sa satelita) oduzima grešku i preciznije određuje koordinate svog položaja. Pri tome mora koristiti iste satelite koje koristi i referentna stanica. Da bi se to izbeglo, referentni prijemnik može na osnovu svog tačnog položaja i primljenih signala izračunati posebno grešku koju unosi svaki satelit koji je u datom trenutku dostupan, i takav signal poslati zemaljskom radio-vezom ka mobilnim GPS prijemnicima. U tom slučaju mobilni prijemnici mogu koristiti bilo koji satelit koji je u datom trenutku dostupan.

Retko se podaci iz mobilnih GPS prijemnika zemaljskom radio-vezom šalju ka referentnom prijemniku na dalju obradu radi postizanja veće preciznosti. Ovakav postupak naziva se „inverzni DGPS“.

Za potrebe snimanja podataka na terenu nije neophodno postojanje zemaljske radio-veze. Podaci se mogu memorisati na terenu mobilnim GPS prijemnici-

ma, bez ikakve korekcije. Kasnije se mogu obraditi zajedno sa podacima o greškama koji su memorisani u računaru referentnog prijemnika u istom intervalu kada je vršen obuhvat podataka na terenu. Tako obrađeni podaci imaju poboljšanu tačnost istog kvaliteta kao da je korekcija vršena u realnom vremenu.

U navedenim postupcima (diferencijalni GPS zasnovan na C/A kodu) greška se svodi na veličine od 1 do 10 metara. Što je mobilni prijemnik bliži referentnom prijemniku – greška je manja.

Za potrebe preciznog snimanja koordinata tačaka na terenu, kada se zahteva tačnost reda centimetra, primenjuju se postupci zasnovani na interferenciji, tj. na merenju faznih razlika nosilaca signala (tzv. differential carrier-phase positioning). Pošto se fazna razlika između signala na mestu referentnog i na mestu mobilnog prijemnika može utvrditi sa tačnošću od 1% do 5%, greška bi mogla biti reda 1 cm, ako bi se koristio signal L1 čija je talasna dužina oko 19 cm. Pri tome je najveći problem da se odredi koliko ima punih talasnih dužina od oba prijemnika do satelita (ili između prijemnika), jer je rezultat merenja razlike u fazama najviše 2π (ili jedna talasna dužina), zbog periodičnosti nosećeg signala. Problem određivanja broja punih talasnih dužina (tzv. integer ambiguity) vrlo je složen, i tek u poslednjih nekoliko godina rešen je na zadovoljavajući način. Pre toga je za DGPS merenja sa centimetarskom tačnošću bilo potrebno da oba prijemnika (referentni i mobilni) satima budu nepokretni. Razvojem algoritama za nalaženje broja punih talasnih dužina ovo vreme je postepeno skraćivano. Danas postoje algoritmi kojima se, na računarima procesorske snage približne Pentium-procesoru, ovaj problem rešava za

manje od jedne sekunde [4 i 5]. Zahvaljujući tome, tačne koordinate se mogu određivati i kada je mobilni prijemnik u pokretu (tzv. RTK GPS – real-time kinematic GPS – kinematički GPS u realnom vremenu).

Zaključak

Iako razvijen prvenstveno za vojne potrebe, sistem za globalno pozicioniranje danas se koristi i u saobraćaju, transportu nafte, gasa i električne energije, geodeziji, poljoprivredi, očuvanju okoline, u rudnicima sa površinskim kopom, rekreaciji, itd. Osim pozicioniranja, GPS je značajan i kao sredstvo za raspodelu jedinstvenog vremena. Razvijene su i razvijaju se nove tehnike za povećanje tačnosti pozicioniranja. Vojni i civilni segment GPS-a danas su po tačnosti izjednačeni, jer je obustavljeno namerno unošenje grešaka u podatke civilnog dela GPS za koordinate i vreme. Osim stalnog praćenja sistema i održavanja deklarisanе tačnosti, planiraju se dalja usavršavanja GPS sistema, prvenstveno na planu smanjenja osetljivosti na smetnje i na povećanju osnovne tačnosti. U planu je uvođenje još jednog signala za civilnu upotrebu, kojim će se osnovna greška sistema (bez primene dodatnih tehnika) spustiti ispod 10 metara.

Literatura:

- [1] ARINC RESEARCH CORPORATION, 2250 E. Imperial Highway, Suite 450, El Segundo, CA 90245-3509, USA: NAVSTAR GPS SPACE SEGMENT / NAVIGATION USER INTERFACES, 10. Oct. 1993. g., rev. 13. Oct. 1995. g., rev. 25. Sep. 1997.
- [2] U. S. Coast Guard Navigation Center, 7323 Telegraph Road, Alexandria, VA 22315-39988: NAVSTAR USER EQUIPMENT INTRODUCTION (September 1996).
- [3] U. S. Coast Guard Navigation Center, 7323 Telegraph Road, Alexandria, VA 22315-39988: GLOBAL POSITIONING SYSTEM – STANDARD POSITIONING SERVICE – SIGNAL SPECIFICATION (2nd edition, June 1996).
- [4] P. J. G. Teunissen, P. J. de Jonge and C. C. J. M. Tiberius: THE LAMBDA-METHOD FOR FAST GPS SURVEYING, Delft Geodetic Computing Centre (LGR), Faculty of Geodetic Engineering Delft University of Technology Thijssseweg 11, NL-2629 JA Delft.
- [5] P. J. G. Teunissen, P. J. de Jonge and C. C. J. M. Tiberius: FAST POSITIONING USING THE LAMBDA-METHOD, Delft Geodetic Computing Centre (LGR), Faculty of Geodetic Engineering Delft University of Technology Thijssseweg 11, NL-2629 JA Delft.
- [6] Peter H. Dana, Department of Geography, University of Texas at Austin: GLOBAL POSITIONING SYSTEM OVERVIEW (September 1994, revised 12. Aug. 1999).
- [7] Department of Defense – Defense Mapping Agency, 8613 Lee Highway, Fairfax, VA, USA: WORLD GEODETIC SYSTEM (WGS) – MILITARY STANDARD (mil.std. 2401, 11. January 1994).
- [8] Robert J. Danchik AN OVERVIEW OF TRANSIT DEVELOPMENT, John Hopkins Apl Tehnical Digest, Vol. 19, number 1 pages 18–26 (1998).
- [9] DEPARTMENT OF DEFENSE WORLD GEODETIC SYSTEM 1984, ITS DEFINITIONS AND RELATIONSHIPS WITH LOCAL GEODETIC SYSTEM, National Imagery and Mapping Agency, 4600 Sangamore Road, Bethesda, Maryland (NIMA TR 8350.2, Third Edition, 4 July 1997).
- [10] Lukatela, G., Drajić, D., Petrović, G., Petrović, R.: DIGITALNE TELEKOMUNIKACIJE, Građevinska knjiga, Beograd, 1984.
- [11] Stojanović I. S.: OSNOVI TELEKOMUNIKACIJA, Građevinska knjiga, Beograd, 1977.

Veb-sajtovi:

- [12] Mark Wade: ENCYCLOPEDIA ASTRONAUTICA: www.rocketry.com/mwade/spaceflt.htm
- [13] UNITED STATES NAVAL OBSERVATORY (USNO): tycho.usno.navy.mil www.usno.navy.mil
- [14] INTERNATIONAL EARTH ROTATION SERVICE – CENTRAL BUREAU: hpiers.obspm.fr