

## TAČNOST I MODERNIZACIJA GLOBALNOG POZICIONOG SISTEMA

Radojević M. *Slobodan*, Vojna akademija – Centar za obuku studenata KoV, Beograd,  
Čurčić T. *Jovica*, Komanda Rečne flotile, Novi Sad

UDC: 007.528.28]:004  
629.056.84

### Sažetak:

*U radu su pregledno prikazani sadašnja koncepcija i razvoj globalnog sistema pozicioniranja (GPS). Ukratko je opisan osnovni princip rada, glavne karakteristike i njegova tačnost. Sadašnja tačnost sistema je, uglavnom, dovoljna za orijentaciju, navigaciju na vodi, u vazдушnom prostoru i na kopnu, ali ne i za brojne druge delatnosti. U radu se analiziraju načini poboljšanja karakteristika sistema satelitskog pozicioniranja, koji bi trebalo da zadovolje strože sigurnosne zahteve. Na kraju je predstavljen razvoj programa modernizacije GPS do 2030. godine.*

*Ključne reči: GPS, greške, tačnost, modernizacija.*

### Uvod

Ubrzo nakon uvođenja prvog satelitskog pozicionog sistema počinju istraživanja i pojavljuju se konkretni programi radi poboljšanja postojećeg sistema i razvoja novih, a za potrebe Ratne mornarice i Ratnog vazduhoplovstva SAD. Sredinom sedamdesetih godina prošlog veka nastaje koncept NAVSTAR GPS (***Navigation Satellite Timing and Ranging – Global Positioning System***). Taj sistem temelji se na određivanju udaljenosti od satelita, tako da se meri vreme potrebno da signal stigne od satelita do prijemnika. Sistem za globalno pozicioniranje GPS omogućuje jednostavno i brzo određivanje trodimenzionalnog položaja, brzine i smera kretanja objekata na bilo kojoj tački Zemljine površine ili njenoj okolini, kao i rasporedu 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 i pri radu ne emituje nikakvo (pa ni radio) zračenje [1].

Razvoj GPS odvijao se u tri faze. U prvoj fazi, početkom sedamdesetih godina prošlog veka, izrađeno je nekoliko satelita, eksperimentalna zemaljska kontrolna stanica i prijemnici korisnika. U decembru 1978. godine u prostoru oko Zemlje bila su četiri satelita, što je omogućilo merenje tri ko-

ordinate i brzine kretanja korisnika. Godine 1979. počela je druga faza razvoja i ispitivanja operativnih satelita, zemaljskih kontrolnih stanica i prijemnika korisnika. Treća faza od 1985. godine, obuhvatila je potpuni razvoj i proizvodnju ovih sistema, tako da je lansiranjem prvih satelita 1989. godine počelo razvijanje eksploatacionog sistema, a 1994. godine je bilo obezbeđeno globalno određivanje planarnih koordinata korisnika.

U Zalivskom ratu 1991. godine oružane snage SAD koristile su navigacijske podatke. Artiljerija je koristila tačne GPS podatke koji su omogućavali brzo i tačno određivanje koordinata sopstvenih vatrenih položaja. Vazduhoplovstvo je koristilo podatke sa GPS prijemnika za navođenje raketa na ciljeve u dubini protivnikove teritorije. Za nanošenje udara po važnim objektima korišćene su krilate rakete kod kojih je sistem navođenja bio korigovan GPS na početnom i srednjem delu leta. Koordinate objekata uvodile su se u navigacijski sistem rakete pred lansiranje, a u toku leta su se korigovale po podacima dodatnog izviđanja. Rakete su dovodene u zadatau tačku sa kružnom verovatnom greškom od 15 metara.

Međutim, GPS se ne koristi samo u vojne svrhe već i u međunarodnom vazduhoplovnom, pomorskom i putnom saobraćaju, policiji i mnogim drugim privrednim i neprivrednim oblastima. Poslednje dve godine standardnu opremu većine putničkih vozila čine i GPS prijemnici. U poslednje vreme razmatra se primena GPS za automatsko vođenje vazduhoplova na sletanje bez vizuelnog kontakta pilota sa pistom.

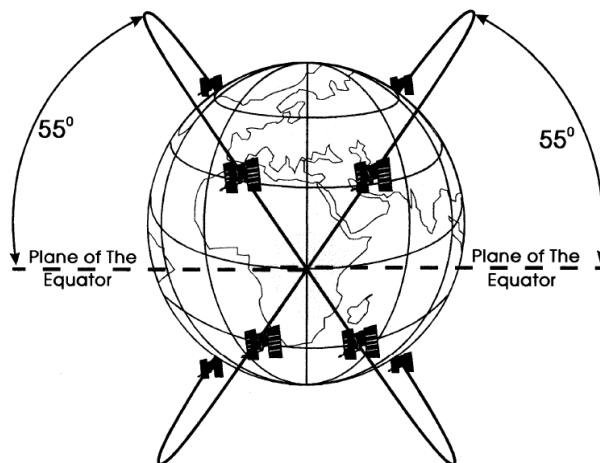
Prijemom i obradom podataka sa satelita obezbeđuju se sledeći parametri leta: trenutna pozicija u geocentričnim pravouglim koordinatama (x,y,z) ili geografska širina i dužina, brzina leta, kurs, pravac i brzina vetra, kao i ugao zanošenja. U GPS prijemnicima mogu se memorisati informacije o aerodromima, određenim tačkama na vazdušnom putu, poletno-sletnim stazama i drugo [2].

## Konfiguracija GPS

Sistem GPS sastoji se od tri odvojena segmenta: svemirskog (sateliti), kontrolnog (zemaljske stanice) i korisničkog (GPS prijemnici).

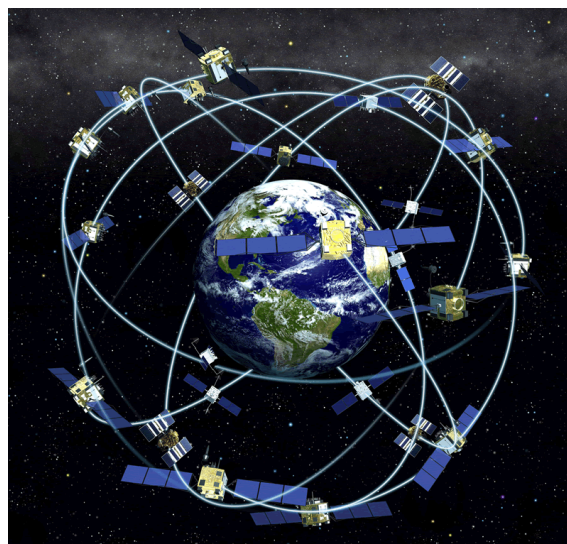
Sa 12 satelita sistema GPS 1986. godine bilo je omogućeno dvodimenzionalno pozicioniranje (određivanje geografske širine i dužine korisnika), a sa 18 satelita 1988. godine – trodimenzionalno pozicioniranje (širina, dužina i visina). Pri tome su korisnici mogli da određuju svoju poziciju sa tačnošću od 5 do 15 m i brzinu od 0,05 do 0,15 m/s, kao i da vrše sinhronizaciju svog vremenskog etalona od 5 do 15 ns, što za više od reda veličine prelazi tačnost radio-navigacijskih sistema Tranzit, Loran-C i Omega.

Da bi se obezbedilo neprekidno 24-časovno trodimenzionalno pozicioniranje, koristeći samo merenja pseudodaljina po otvorenom kanalu (za civilne svrhe), 1994. godine povećan je broj satelita sistema GPS na 24. Ova satelitska mreža obezbeđuje istovremenu vidljivost od 6 do 11 satelita, pod uglom koji nije manji od 5 stepeni iznad horizonta za sve korisnike locirane bilo gde na Zemlji i u bilo kom trenutku.



Slika 1– Nagib putanje satelita [3]

Sistem GPS danas sadrži 31 satelit koji su raspoređeni u šest polar-nih, skoro kružnih orbita (po četiri satelita u svakoj) sa nagibom putanje  $i = 55^\circ$  prema ekvatoru i međusobnim razmakom orbita od  $60^\circ$  po geograf-skoj dužini (slika 1). Sadašnju konstelaciju GPS čine 13 satelita Blok II A, 12 satelita Blok II R i šest satelita Blok II R-M. Sateliti se nalaze na visini od 20.183 km, a obleću Zemlju sa periodom približno jednakim 12 h. Takav raspored satelita omogućava korisnicima sistema da u svakoj tački na Zemlji u svakom trenutku primaju signale sa 4 do 11 satelita. Na slici 2 dat je raspored satelita koji kruže oko Zemlje.



Slika 2 – Raspored satelita oko Zemlje [4]

Zemaljski komandno-merni kompleks obuhvata: glavnu (vodeću) stanicu za upravljanje i prenos podataka (GSU) lociranu u vazduhoplovnoj bazi Falkon u Kolorado Springsu (SAD); pet kontrolnih stanica (KS) raspoređenih širom sveta (u Kolorado Springsu, u Kvajalinu, Dijego Garsiji, na Vaznesenjskom ostrvu i Havajskim ostrvima – Vahiva), kako bi se istovremeno pratila cela satelitska mreža GPS i omogućio prenos orbitalnih informacija glavnoj kontrolnoj stanici; stanicu upravljanja i prenosa podataka (SPU) u Vanderbergu u Kaliforniji; rezervne kontrolne stanice u državi Mejn, na Sejšelskim ostrvima i u zoni Panamskog kanala.

Kontrolne stanice su automatski centri praćenja radio-navigacijskih signala sa satelita. U njima se sakupljaju informacije potrebne za određivanje efemerida<sup>1</sup> i odstupanja vremena na satelitima od sistemskog vremena, a takođe i za izračunavanje prognoziranih i drugih podataka koji se skladište u računar svakog satelita. Svaka kontrolna stanica sadrži tipski četvorokanalni navigacijski korisnički prijemnik, visokostabilan etalon frekvencije sa uređajem za formiranje vremenske skale, davač meteoroloških podataka i računar sa interfejsom. Kao rezultat prijema radio-navigacijskih signala svakih 6 s meri se pseudodaljina, integralni Doplerov pomeraj frekvencije primanih signala u odnosu na frekvenciju zemaljskog etalona i izdvajaju se navigacijski podaci.

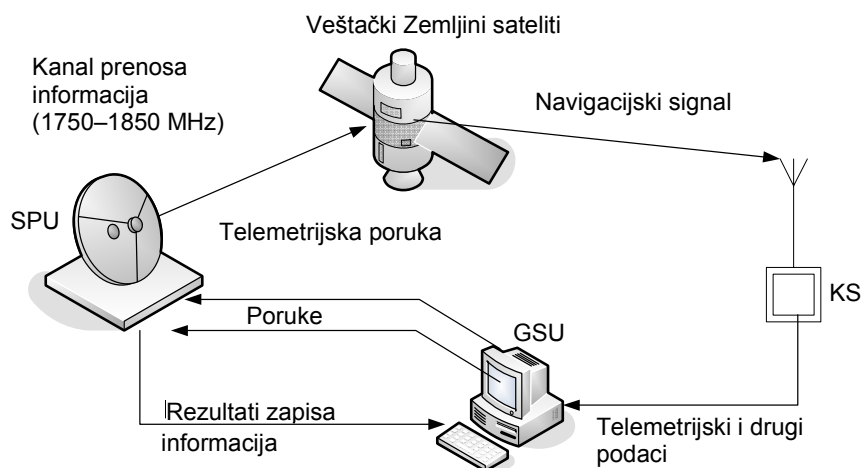
Kontrolnim stanicama upravlja glavna stanica (GSU) na koju oni prenose sve sakupljene memorisane informacije. Meteorološke informacije se u glavnoj stanici koriste za korekciju troposferskih grešaka navigacijskih parametara, izmerenih na kontrolnim stanicama. Računar kontrolne stanice sakuplja sve podatke u njoj, memoriše ih 15 min i zatim na uput preko interfejsa predaje ih kanalom veze glavnoj stanici na obradu. Časovnik jedne od kontrolnih stanica sinhronizuje se sistemom sistemskog vremena sa tačnošću  $\pm 100 \mu\text{s}$  i smatra se vodećom kontrolnom stanicom sistema, a njen časovnik referentnim za ceo sistem. Časovnici ostalih kontrolnih stanica podešavaju se prema navigacijskim signalima sa satelita.

Glavna stanica predstavlja centar prikupljanja i obrade podataka, koji dolaze sa kontrolnih stanica. U njoj i u Centru naoružanja vojnopomorskih snaga SAD izračunavaju se prognozirane efemeride i parametri modela satelitskih časovnika, a takođe i drugi navigacijski podaci, memorisani u računaru navigacijskih satelita.

Navigacijski podaci za svaki satelit, dobijeni u glavnoj stanici, dospevaju preko kanala veze u stanicu upravljanja i prenosa podataka (SPU). Odatle se oni preko komandnog radio kanala predaju odgovarajućim satelitima, gde se skladište u memoriju računara. Osnovna stanica memorisanja podataka ulazi u sastav glavne stanice (GSU), a kao rezerva koristi se odgovarajuća stanica satelitskog centra upravljanja vojnim vazduho-

<sup>1</sup> Efemeridi su vrednosti koordinata (vektor pozicije) satelita u geocentričnom koordinatnom sistemu, proračunate za fiksirane trenutke na osnovu rezultata prognoze kretanja tog satelita.

plovnim snagama. Za vreme predaje podataka satelitima kontrolne stanice prekidaju prikupljanje informacija. One se tada koriste za kontrolu pravilnosti podataka, uskladištenih u memoriju računara satelita, dekodiranjem telemetrijskih informacija iz kadra primarnih navigacijskih signala (slika 3). Proces prenosa podataka na satelite kontroliše glavna upravljačka stanica (GSU), koja analizira telemetrijske podatke i proverava predaju navigacijskih poruka sa satelita ka korisnicima [2].



Slika 3 – GPS prenos podataka: GSU – glavna stanica upravljanja; SPU – stanica upravljanja i prenosa podataka; KS – kontrolna stanica [2]

Korisnički segment čini GPS prijemnik koji prima signale sa više satelita i na osnovu njihovog različitog prostiranja na mestu prijema, uz poznavanje tačne lokacije satelita i tačnog vremena, u stanju je da proračuna svoju poziciju u tri dimenzije kao i brzinu prijemnika. Većina GPS prijemnika ove operacije obavlja automatski, u realnom vremenu i često ih predstavlja vizuelno na ekranu ili u vidu govorne poruke. Prijemnik omogućuje i vojnu i civilnu upotrebu, sa skoro neograničenim brojem aplikacija koje se mogu koristiti na kopnu, na vodi i u vazduhu.

Radio-navigacijski prijemnik korisnika automatski bira četiri optimalno raspoređena satelita i meri četiri pseudodaljine i četiri pseudoradijalne brzine, na osnovu kojih određuje svoju poziciju i vektor brzine, a takođe tačno određuje razliku etalona vremena i frekvencije u satelitu u odnosu na sistemsko vreme i referentnu frekvenciju etalona u zemaljskim stanicama.

Signali se emituju na frekvencijama  $L_1$  od 1575,42 MHz i  $L_2$  na 1227,6 MHz korišćenjem tehnike povišenog spektra. Opseg  $L$  obuhvata frekvencije od 1 GHz do 2 GHz. Tako visoka frekvencija se koristi jer signali sadrže veliki broj komponenti, tako da je potrebna širina od oko 20 MHz da bi se one prenele. Signali se koriste i za određivanje brzine kretanja

na osnovu Doplerovog efekta, a da bi se merila brzina sa tačnošću od 1 cm u sekundi potrebni su signali sa centimetarskom talasnom dužinom. Korišćenjem visokih frekvencija redukuje se uticaj jonosfere na signal (tabela 1).

Tabela 1

Vremenski parametri satelitskog signala

Komponenta	Frekvencija [MHz]
Osnovna frekvencija	$f_0 = 10,23$
Nosilac $L_1$	$f_1 = 154 f_0 = 1575,42$ ( $\lambda_1 \approx 19,0$ cm)
Nosilac $L_2$	$f_2 = 120 f_0 = 1227,60$ ( $\lambda_2 \approx 24,4$ cm)
Nosilac $L_3$ (korišćen za vojni program detekcije lansiranja projektila i nuklearnih detonacija)	1381,05
Nosilac $L_4$ (nosilac koji se razmatra za dodatne jonosferske ispravke)	1379,913
Nosilac $L_5$ (nosilac predložen za dodatne primene)	1176,45
P-kod	$P(t) f_0 = 10,23$
C/A-kod	$C(t) f_0 / 10 = 1,023$
W-kod	$f_0 / 20 = 0,5115$
Navigacijska poruka D(t)	$f_0 / 204600 = 50 \cdot 10^{-6}$

Izvor: obradio autor na osnovu podataka [1], [2] i [3].

Emituju se dve vrste signala:

- signal  $C/A^2$  (Coarse/Acquisition code), čiji osnovni nosilac ima frekvenciju od 1,023 MHz i koji se emituje na  $L_1$  frekvenciji,
- signal  $P^3$  (Precision code), čiji osnovni nosilac ima frekvenciju 10,23 MHz. Ovaj signal se emituje i na  $L_1$  i na  $L_2$  frekvenciji.

Signal C/A 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 kada je uključen Anti-Spoofing mod (A-S). To je šifrovanje P koda u Y kod da bi se predupredio eventualni prijem signala koje emituje neprijateljska strana i koji mogu da liče na GPS signale.

Navigacijski signal brzine 50 Hz moduliše i C/A i P signal. Navigacijski 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 navigacijske poruke potrebno oko 12,5 minuta. Zajedno sa navigacijskim 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 tri rubidijumska atomska časovnika). Svaki satelit osim sopstvenih koordinata šalje i koordinate ostalih satelita [1].

<sup>2</sup> C/A signal (Coarse-Clear/Acquisition code) lako ili grubo otkrivan signal-kod, grubi kod, pri manjoj tačnosti.

<sup>3</sup> P signal (Precision code) precizan kod, pri većoj tačnosti.

## *GPS Servisi*

GPS obezbeđuje dva tipa servisa: Standardni pozicioni servis – SPS (Standard Positioning Service) i Precizni pozicioni servis – PPS (Precise Positioning Service). SPS je namenjen civilnim primenama, a PPS koristi vojska. Osnovna razlika između ova dva servisa je u preciznosti podataka koje obezbeđuju.

### *Standardni pozicioni servis-SPS (Standard Positioning Service)*

SPS je servis za pozicioniranje koji je Ministarstvo odbrane SAD autorizovalo za potrebe civilnih struktura društva. Sastoji se od C/A-koda i navigacijske poruke koja se prenosi signalom frekvencije  $L_1 = 1575,42$  MHz. SPS ne koristi signal  $L_2$  kao ni P(Y) kod po signalu  $L_1$ . Servis SPS daje preciznost pozicioniranja od 100 m u horizontalnoj, 156 m u vertikalnoj ravni i vremensku preciznost od 340 ns u odnosu na UTC. Ministarstvo odbrane SAD ima mogućnost povećanja stepena tačnosti SPS u slučaju narušavanja nacionalne bezbednosti ili u slučaju ratnog stanja. Ovo povećanje stepena tačnosti SPS sistema naziva se „Selective Availability“ tj. „selektivni pristup“ i ima S/A oznaku.

### *Precizni pozicioni servis-PPS (Precise Positioning Service)*

PPS je precizniji servis satelitskog pozicioniranja od SPS sistema i koriste ga samo autorizovani korisnici. Razvijen je isključivo za vojne potrebe. Autorizaciju za ovaj sistem dodeljuje isključivo Ministarstvo odbrane SAD. On obezbeđuje preciznost pozicioniranja od 22 m u horizontalnoj ravni i 27,7 m u vertikalnoj ravni dok je vreme dato sa preciznošću od 200 ns u odnosu na UTC. Ovaj sistem ima dve zaštite a to su: S/A – Selective Availability i Anti-Spoofing (A-S) odnosno šifrovanje. S/A se koristi za zaštitu GPS pozicije, brzine i tačnosti vremena od neautorizovanih korisnika, po principu ometanja satelitskih signala ubacivanjem signala greške u njih. Šifrovanje P koda u Y kod da bi se predupredio eventualni prijem signala koje emituje protivnička strana i koji mogu ličiti na GPS signale je tzv. Anti-Spoofing (A-S). Koristi se radi odbijanja neautorizovanih korisnika koji žele da pristupe P kodu. Autorizovani korisnici imaju specijalni ključ pomoću koga pristupaju ovom sistemu. PPS prijemnici mogu koristiti P(Y)-kod ili C/A-kod, a mogu i oba. SPS prijemnici nisu zaštićeni od *spoofinga* jer koriste C/A-kod.

## Greške i tačnost pozicioniranja

Namerna degradacija signala od strane Vojske SAD (selektivan pristup, S/A – Selective Availability) koristi se da spreči protivnike SAD od upotrebe tačnog GPS signala. Do grešaka dolazi na dva načina: emitovanjem pogrešnog podatka o vremenu i emitovanjem pogrešnog podatka o poziciji satelita u orbiti (efemeride). Šifarski ključ za korekciju greške izazvane na ovaj način dostupan je samo vojnim i državnim korisnicima. Američka vlada je dekretom ukinula S/A degradaciju 1. maja 2000. godine.

Nove tehnologije koje je razvila Vojska SAD omogućuju namernu degradaciju GPS signala na regionalnoj osnovi zbog nacionalne bezbednosti, dok je degradacija signala na svetskom nivou nepotrebna.

Greške satelitskog radio-navigacijskog sistema dele se na tri grupe:

- **greške formiranja radio-navigacijskih parametara**, izazvane anomalijama prostiranja radio-talasa usled uticaja jonosfere i troposfere, greškama sinhronizacije časovnika, nestabilnošću etalona frekvencija satelita, uticajem relativističkih efekata, višestrukim refleksijama i uzajamnim smetnjama pri istovremenom radu nekoliko satelita;
- **greške formiranja efemeridne informacije** navigacijskih satelita, uslovljene instrumentalnim greškama u uređajima zemaljskih stanica trajektnih merenja, netačnošću njihovog koordinatnog privezivanja, uticajem geometrijskog faktora (određen rasporedom ovih stanica u odnosu na navigacijski satelit), greškama prognoze efemerida navigacijskih satelita zbog netačnosti modela geopotencijala Zemlje, pritiska Sunčanog vetra, otpornosti atmosfere, privlačenja drugih planeta i drugo;
- **greške navigacijskih merenja**, uslovljene odstupanjem etalona časovnika prijemnika, instrumentalnim greškama radio-navigacijskog uređaja i autonomnih navigacijskih davača visine, kursa i brzine, konačnim tačnostima rešavanja navigacijskih jednačina računarom korisnika i uticajem geometrijskog faktora [2].

### Greške formiranja radio-navigacijskih parametara

#### Uticaj jonosfere i troposfere

Promena atmosferskog stanja utiče na promenu brzine GPS signala pri njihovom prolasku kroz Zemljinu atmosferu. Signali sa satelita prolaze kroz slojeve atmosfere – jonosferu i troposferu. Jonosfera se prostire na visini između 50 i 500 km i sastavljena je od jonizovanog vazduha, dok je troposfera niži sloj atmosfere do visine 9 km na polovima i 16 km na ekvatoru [3].

Jonosferski uticaj se sporo menja i on je prosečan tokom dužeg vremena. Uticaj u nekoj određenoj geografskoj zoni može se lako odrediti



poređenjem podataka iz GPS prijemnika i poznatih podataka o toj lokaciji. Ova ispravka je ista i za ostale prijemnike u tom području. Nekoliko sistema šalje ove informacije preko radija ili druge veze i omogućavaju da prijemnici koji rade samo sa  $L_1$  signalom primene ovu korekciju. Jonosferski podaci se šalju sa satelita koji koristi GPS frekvenciju i specijalni pseudo-slučajni broj tako da su dovoljni samo jedna antena i jedan prijemnik da bi se došlo do ovih podataka. Jonosfera utiče na prostiranje radio talasa u zavisnosti od frekvencije zračenja i dužine puta koji talasi prolaze kroz nju. Zato se u vojnoj upotrebi P-kod moduliše na  $L_1$  i  $L_2$  frekvenciji. Obradom signala se ustanovi razlika u kašnjenju signala modulisanog sa  $L_1$  i signala modulisanog sa  $L_2$  i na osnovu toga izračuna uticaj jonosfere. Nova generacija satelita, Blok IIR-M, ima  $L_2C$ -kod modulisan na frekvenciju  $L_2$ , da bi se isti metod detekcije jonosferskog efekta i njegove korekcije mogao upotrebiti i na civilnim prijemnicima.

Drugi način detekcije i korekcije ove greške se sastoji u prijemu GPS signala na poznatim pozicijama na Zemlji. Poređenjem pozicije dobijene obradom GPS signala i stvarne pozicije otkriva se veličina greške koju stvara jonosfera i proračunavaju podaci o trenutnim karakteristikama jonosfere na toj lokaciji.

Vlažnost vazduha izaziva promenljiva kašnjenja. Ovaj uticaj je lokalnog karaktera i menja se brže od jonosferskih uticaja, što otežava ispravku greške. Vlažnost u troposferi utiče na prostiranje radio talasa, nezavisno od njihove frekvencije, što može uneti grešku od 0,1 do 1 metra. Promene u vlažnosti su brze i ova greška je mala, ali teška za korekciju.

Uticaj jonosfere se može predvideti i kompenzovati ugradnjom matematičkih modela u prijemnik, dok je uticaj troposfere nepredvidiv, pa se proračunom brzine dva različita signala primljena sa istog satelita, greška generisana uticajem atmosfere može minimizirati. Uticaj jonosfere može prouzrokovati grešku od 1 do 50 m, koja najčešće iznosi od 5 do 10 m, dok uticaj troposfere izaziva grešku od 0,1 do 1 metar.

Visina satelita takođe izaziva promenljiva kašnjenja pošto signal putuje kroz razređeniji vazduh na većim visinama. Pošto prijemnici mere direktno visinu, ova greška se lako ispravlja. Greška nastala usled visine satelita je najmanja kada je satelit u zenitu prijemnika, a najveća kada je satelit na horizontu, jer GPS signal putuje najduže. Za ispravljanje greške visine koriste se matematički modeli.

### *Greške uzrokovane neusklađenošću časovnika*

Sateliti koriste atomske časovnike koji imaju veliku stabilnost (rubidijum ili cezijum), veoma su tačni ali ne i savršeni pa se može pojaviti vremenska neusklađenost. Neusklađenost prouzrokuje grešku u merenju vremena pu-

tovanja signala od satelita do prijemnika pa samim tim i grešku u poziciji. Greške časovnika satelita nastaju usled stalnih pomeranja vremena atomskih časovnika satelita u odnosu na sistemsko vreme u zemaljskim stanicama. Ova odstupanja mogu dostići i 976 ms u toku 24 h. Zato se, jednom dnevno sa Zemlje, šalje signal korekcije časovnika satelita, na osnovu kojeg se formira model sa koeficijentima korekcije. Ovi koeficijenti se emituju u navigacijskoj poruci i koriste u prijemniku korisnika. Nekorigovane greške, koje se odnose samo na devijaciju časovnika, veoma su male i dovode do greške u merenju rastojanja do satelita reda veličine 30 cm. Greška pozicije uzrokovana na ovaj način može da bude od 1 do 5 metara.

### *Greške usled relativističkih faktora*

Greške usled relativističkih faktora ispoljavaju se u obliku ekvivalentnog povećanja frekvencije etalona satelita u odnosu na frekvenciju etalona zemaljskog centra sistema, a koje nastaje usled razlike gravitacionih potencijala i razlike brzine kretanja satelita i korisnika (letelice, broda, vozila itd.). Fredvard Vinterberg (Freidwardt Winterberg) je 1955. godine otkrio, da kada se posmatra sa Zemljinog referentnog sistema, časovnik na satelitu izgleda kao da radi brže nego časovnik na Zemljinoj površini. Za GPS satelite ova razlika je 38 ms na dan. Radi toga, standardna frekvencija na satelitu (10,23MHz) pre lansiranja je pomerena na frekvenciju od 10,22999999543MHz, što rezultuje da časovnik radi nešto sporije na Zemlji. Atomski časovnici na satelitima su precizno podešeni, čime se primenjuje teorija relativiteta u stvarnom životu.

### *Greške uzrokovane različitom putanjom signala*

Signal emitovan sa satelita dolazi do korisnika direktno, zajedno sa signalima koji se odbijaju od objekata (drugih aviona, raznih objekata kao što su zgrade, zidovi kanjona, čvrsta podloga, nadletana površina, naročito pri letu aviona iznad mora itd.) i time prouzrokuje grešku. Do prijemnika dolaze i signali koji se odbijaju više puta (multipath-višeputni put). Te refleksije, čija snaga može biti uporediva sa snagom direktnog signala, formiraju na prijemniku rezultujući signal. Kašnjenje i frekvencija tog signala ne odgovara kašnjenju i frekvenciji direktnog signala.

Prijemnici sistemom filtriranja smanjuju ili potpuno eliminišu ove reflektovane signale. Za veliko kašnjenje signala, prijemnik sam prepoznaje signal koji je stigao usled odbijanja i automatski ga odbacuje. Za prepoznavanje signala sa kraćim kašnjenjem usled refleksije mora se koristiti specijalna antena. Odbijeni signali sa kratkim kašnjenjem su teži za filtriranje jer je efekat skoro isti kao kod standardnih promena atmosferskog kašnjenja.

Uticao odbijanja je manje ozbiljan kod vazduhoplova, brodova i drugih pokretnih objekata. Pomeranjem GPS antene reflektovani signal mnogo odstupa od signala bez odbijanja, pa ga prijemnik lako detektuje i odbacuje, a prihvata samo validne signale. Greške refleksije su relativno male, reda veličine od 0,1 do 2,7 metara.

### *Greške usled interferencije*

Greške usled interferencije nastaju zbog uzajamnog uticaja signala sa navigacijskih satelita, kao i signala sa predajnika sistema osmatranja i veze i drugih izvora smetnji, koji upadaju u propusne opsege radio-navigacijskih uređaja korisnika [2].

### *Greške formiranja efemeridne informacije*

#### *Greške prognoze efemerida*

Greške prognoze efemerida navigacijskih satelita određene su uticajem geopotencijalnog polja, Sunčanog pritiska, kretanja polova Zemlje, otpornosti atmosfere i drugih slučajnih faktora na kretanje satelita. Određivanje geopotencijalnog modela (geoida) omogućilo je da se smanji udeo tog faktora u ukupnoj navigacijskoj grešci. Radi određivanja efemerida navigacijskih satelita sa malom greškom od 2 do 3 m neprekidno se utvrđuju informacije o uticaju navedenog i niza drugih faktora na kretanje satelita.

Parametri kretanja navigacijskih satelita prognoziraju se na osnovu efemerida, dobijenih po optimalno filtriranim podacim trajektnih merenja u prethodnoj sedmici.

Efekti pogrešnih efemerida se manifestuju kao pogrešna projekcija vektora pozicije satelita u odnosu na vektor prijemnika. Greške su reda veličine od 2 do 5 metara.

#### *Greške uzrokovane solarnom aktivnošću*

Zemlja je zaštićena od sunčeve spoljne atmosfere svojim magnetnim poljem, koje skreće solarni vetar i čini ga neškodljivim za Zemlju. Za vreme solarnih erupcija dolazi do narušavanja zemljinog magnetnog polja ulaskom čestica izbačenih solarnom erupcijom u području magnetosfere. Uticaj ove pojave na rad satelita je značajan. Na nižim visinama sateliti stalno usporavaju pod uticajem trenja. Za vreme solarnih erupcija gustina atmosfere se može povećati (trenje), do nivoa koji dovodi do

naglog gubitka visine satelita i njegovog sagorevanja u atmosferi. Sateliti na višim orbitama mogu stradati i od solarnih aktivnosti manjih razmera. Tokom geomagnetih oluja sateliti mogu izgubiti vezu privremeno ili trajno.

### *Greške zbog grupnog kašnjenja*

Greške zbog grupnog kašnjenja nastaju zbog kašnjenja pri obradi signala u uređajima satelita. Ova kašnjenja se kalibrišu pri ispitivanju uređaja na Zemlji i obuhvaćena su parametrima efemerida. Dozvoljeno grupno kašnjenje je 1 metar.

### *Greške navigacijskih merenja*

#### *Greške usled nesavršenosti prijemnika*

Greške usled nesavršenosti prijemnika korisnika izazvane su šumom prijemnika, diskretizacijom signala i nedovoljnom tačnošću računara. Šumne greške određene su kvalitetom prijemno-pojačavačkog kanala i sistema praćenja zakasnelog koda daljine ili Doplerove frekvencije. Greške diskretizacije nastaju usled digitalnog metoda merenja, pri kome se kašnjenje koda i Doplerova frekvencija menjaju diskretno sa, npr.  $T_n/64$ , gde je  $T_n$  – perioda noseće frekvencije. Greške računara nastaju zbog ograničenog broja bita procesora, nedovoljne tačnosti algoritama i kašnjenja pri izvršavanju komandi [2].

#### *Greška faznog centra antene*

Tačnost i preciznost merenja sistema znatno je povećana zahvaljujući boljim konstrukcijama prijemnika i softvera. Za tačnija merenja treba računati i ekscentar GPS antene, tj. nepoklapanje referentne tačke antene (RTA – mehanička osa antene) i srednjeg faznog centra (SFC). Zaoštajanja prijema signala u GPS antenama nisu ista u svim smerovima, nego zavise od smera iz kojih dolazi GPS signal. Zato, kod tačnijih merenja, treba računati i elektromagnetsko ponašanje tačke prijema signala na anteni (tj. tačke faznog središta – TFS). Naime, tačka faznog središta: nije mehanička tačka, stabilna, homogena i identična za frekvencije  $L_1$  i  $L_2$ . Tako će tačka faznog središta (TFS) antene menjati svoj položaj s promenom smera primljenog signala sa satelita po azimutu, elongaciji i frekvenciji primanih radio talasa. Ova greška je veličine od 0,001 do 0,01 metra.

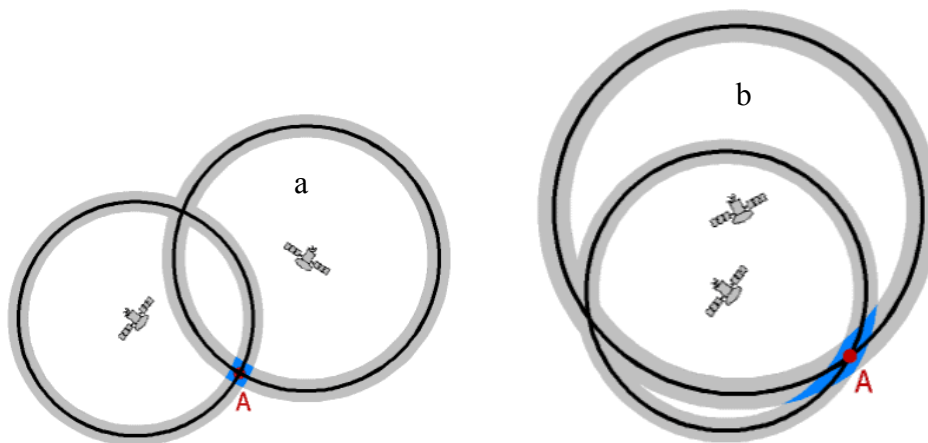
### *Greške usled dinamike korisnika*

Greške usled dinamike korisnika takođe dovode do povećanja ukupne greške pri merenju rastojanja do satelita. Te greške mogu da se kompenzuju optimalnom Kalmanovom obradom primljenih signala. Ukupna greška merenja rastojanja od korisnika do satelita za letelice sa velikom dinamikom kreće se u granicama od 3,6 do 6,3 metara.

### *Greške uzrokovane lošim izborom satelita – „geometrija satelita“*

Pojam geometrije satelita odnosi se na relativan položaj satelita u nekom trenutku. Na konačnu grešku utiče međusobna pozicija satelita i prijemnika. Ako je ugao, u čijem temenu se nalazi prijemnik, a na kracima sateliti, mali takav položaj je nepovoljan i odstupanje po jednoj od osa je veliko a po drugoj malo. Ako je ovaj ugao veliki odstupanje po osama je približno isto (slika 4).

Idealna geometrija satelita postoji kad su sateliti razmešteni pod velikim uglom relativno jedan u odnosu na drugi (4a). Nepovoljna geometrija nastaje kada su sateliti smešteni u istom pravcu ili su tesno grupisani (4b).



Slika 4 – Greška kod dobro i loše pozicioniranih satelita [5]

Veća greška u određivanju tačne pozicije predstavlja loš izbor satelita (Poor Geometric Dilution of Position), i naravno dobar izbor satelita gde je greška pozicije minimalna (Good Geometric Dilution of Position) [4].

Uticaj relativnog položaja GPS prijemnika i satelita čiji se signali uzimaju u proračun prilikom određivanja pozicije na preciznost merenja generalno se naziva **DOP (Dilution of Precision)**-smanjenje preciznosti usled prostornog rasporeda satelita). Ta vrednost je geometrijska veličina koja se odnosi na nesigurnost određivanja pozicije kinematičkim načinom rada i prikazuje se izrazom:

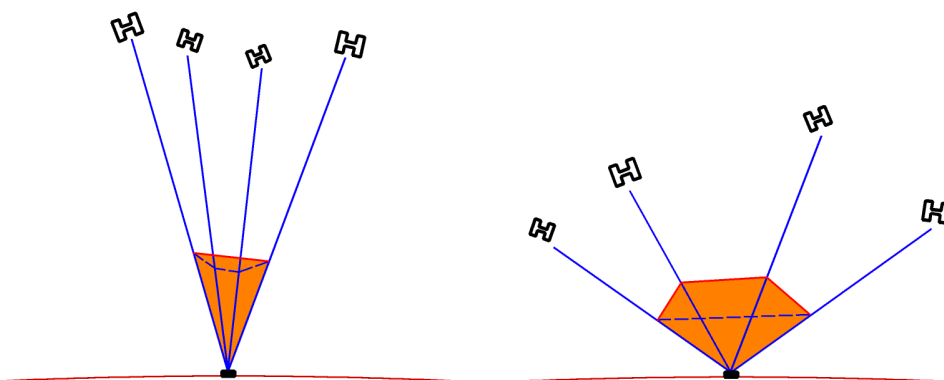
$$DOP = \sqrt{\text{trag} (A^T A)^{-1}} \quad (1)$$

gde je  $A$  matrica sistema jednačina koja zavisi od geometrije satelita i prijemnika. Niska DOP vrednost pokazuje dobru konfiguraciju satelita, dok visoka DOP vrednost lošu konfiguraciju [5].

Neimenovani broj koji opisuje uticaj položaja satelita na tačnost pozicije i obrnuto je proporcionalan zapremini tetraedra koji formiraju jedinični vektori usmereni od faznog centra antene ka pojedinom satelitu naziva se **PDOP (Position Dilution of Precision)**.

$$PDOP \approx \frac{1}{V_{tetraedra}} \quad (2)$$

**GDOP (Geometric Dilution of Precision)** jeste nedimenzionalni broj koji označava meru kvaliteta konfiguracije satelita i pokazuje relativan položaj satelita u odnosu na druge. Geometrija satelita utiče na tačnost GPS pozicioniranja. Biraju se tri satelita sa najboljim geometrijskim rasporedom, koji kad se kombinuju sa najvišim satelitom na nebu daju tetraedar najveće zapremine (slika 5). Na ovome se i zasniva algoritam izbora satelita koji su od vidljivih najpogodniji za merenja [6].



Slika 5 – Loša i dobra geometrija satelita [6]

PDOP pozicijska je DOP vrednost i najčešće se koristi, umesto GDOP, kao mera za geometriju satelita. PDOP vrednosti mogu se prema kvalitetu podeliti u nivoe:

- PDOP ≤ 4 – izvrsno,
- PDOP 5–8 – prihvatljivo,
- PDOP ≥ 9 – loše.

PDOP je manja jedinica mere koja upućuje na kvalitet horizontalnih (latituda, longituda) i vertikalnih (visina) merenja. Na prijemniku se može podesiti parametar poznat kao PDOP maska, koji ignoriše konstelacije koje imaju PDOP veći od granične vrednosti koja se specificira [7].

Kod GDOP se razlikuju: **HDOP (Horizontal Dilution of Precision)** i **VDOP (Vertical Dilution of Precision)**. **TDOP (Time Dilution of Precision)** upućuje na odstupanje sata. GDOP upućuje na rešenje tri položajne koordinate plus odstupanje sata (4 nepoznate) i može se prikazati izrazom:

$$GDOP^2 = PDOP^2 + TDOP^2 \quad (3)$$

PDOP se može prikazati i izrazom:

$$PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 \quad (4)$$

### Tačnost pozicioniranja

Trenutno garantovana tačnost GPS apsolutnog pozicioniranja, nakon ukidanja S/A, iznosi od 10 do 20 m, dok se u praksi pokazuje da je reda veličine od 5 do 13 m, pa čak i bolja (tabela 2).

Tabela 2

Prikaz najvažnijih GPS grešaka i njihov uticaj na merenje

Vrsta greške	Vrednost greške [m]
Uticaj jonosfere (najbolji model)	1–2
Uticaj jonosfere (prosečni model)	5–10
Uticaj jonosfere (loš model)	10–50
Uticaj troposfere (model)	0,1– 1
Višestruke refleksije signala	0,1–2,7
Šum merenja	0,2–1
Hardverska zaostajanja signala	0,1–1
Greška faznog centra antene	0,001–0,01
Greške proračuna efemeride	2–5
Greška časovnika satelita	1–5
Ukupno sa prosečnim modelom jonosfere	5,5–12,7

Izvor: Obrada autora na osnovu podataka [2], [4] i [7].

Izračunate vrednosti ukupnog standardnog odstupanja prema tabeli 2:

$$\sigma_{\text{ donja granica}} = \sqrt{(5^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,2^2 + 0,1^2 + 0,001^2 + 2^2 + 1^2)} = 5,5 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{ gornja granica}} = \sqrt{(10^2 + 1^2 + 2,7^2 + 1^2 + 1^2 + 0,01^2 + 5^2 + 5^2)} = 12,7 \text{ m}$$

U nastavku su navedeni najčešće korišćeni pojmovi tačnosti pozicioniranja.

Potrebno je naglasiti da termin tačnost GPS uređaja predstavlja u stvari grešku merenja. *Kružna ili sferna verovatnoća greške (Circular or spherical error probable – CEP, SEP)* predstavlja prečnik kruga (sfere) koji obuhvata 50% merenja sa poznate lokacije tokom određenog vremena, obično 24 sata [8].

Koren srednjih vrednosti kvadrata greške – Root Mean Square (RMS) Error

Na primer lokacija sa tačnim koordinatama  $(x_0, y_0)$  i  $n$  merenja sa rezultatima  $(x_1, y_1)$   $(x_2, y_2)$   $(x_3, y_3)$  ....  $(x_n, y_n)$ , tada je:

$$RMS_{\text{accuracy}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]}}{n} \quad (5)$$

RMS tačnost je jednaka jednoj standardnoj devijaciji ( $1\sigma$ ). Ona predstavlja krug koji sadrži približno 68% svih izmerenih vrednosti. Potrebno je naglasiti da RMS tačnost odgovara statičkim merenjima. Ipak, većina GPS uređaja ima bolju dinamičku tačnost, nego statičku. Dinamička tačnost predstavlja ponovljivost merenja u dinamičkim uslovima [8].

*Koren srednjih vrednosti preciznosti – RMS Precision*

Za lokaciju sa tačnim koordinatama  $(x_0, y_0)$  i  $n$  merenja sa prosečnim rezultatima  $(x, y)$ , pri čemu je  $x$  prosečna vrednost svih izmerenih  $x$  pozicija, a  $y$  prosečna vrednost svih izmerenih  $y$  pozicija, tada je:

$$RMS_{\text{precision}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2]}}{n} \quad (6)$$

Dinamička preciznost je naročito važna za operacije sa paralelnim zahvatima, npr. statička tačnost nekog dvofrekventnog prijemnika može biti 25 cm, a njegova dinamička tačnost 10 cm [8].



### *Horizontalna i vertikalna tačnost*

Vidljivi sateliti su samo oni koji se nalaze iznad horizonta mobilnog prijemnika. Zbog toga je horizontalna tačnost veća 1,5 do 2 puta od vertikalne tačnosti.

## Razlozi modernizacije GPS

Nakon pokretanja projekta „Galileo“ Evropske svemirske agencije (ESA – European Space Agency) 1999. godine, Ministarstvo obrane SAD počinje uviđati da bi GPS mogao vremenom izgubiti mesto jedinog pravog globalnog sistema za pozicioniranje i navigaciju, koje uspešno drži više od dvadeset godina.

Galileo je zamišljen kao sistem pod kontrolom civilne zajednice, za razliku od GPS, koji je pod nadzorom Ministarstva obrane SAD koje je uvek ograničavalo puni prijem signala civilnim korisnicima i odlukama na koje civilni deo zajednice nije mogao uticati.

Moguća restrukturiranja unutar GPS krenula su kada je Evropska unija na konferenciji ministara EU, održanoj 16. i 17. juna 1999. godine otpočela sa definisanjem sistema Galileo, a Evropska svemirska agencija započela rad na projektu.

Nakon što je stručni tim Galilea najavio nameru da PRS (Public Regulated Service) leži na američkom vojnom M-kodu, zbog implikacija koje bi iz toga proizašle za američku vojsku, Ministarstvo obrane SAD je ubrzalo odluku o pokretanju GPS III programa [9].

Još jedan, ne manje važan razlog da započne modernizacija GPS je taj što će Galileo biti finansiran u najvećoj meri od privatnog sektora i zavisice od poslovne sposobnosti, pa će zbog toga njegovi signali i servisi biti bolji nego kod GPS. Izjava predsednika SAD Bila Klintonu iz 2000. godine: „Odluka o prekidu Selective Availability je zadnja mera u nastojanju da GPS bude dostupan civilima i komercijalnim korisnicima širom sveta. Taj porast u tačnosti omogućice pojavljivanje novih GPS aplikacija i nastaviće se poboljšanje života ljudi širom sveta“ [9], nije proizašla iz brige za dostupnošću GPS svim korisnicima već iz čvrstog stava Evropske unije da razvije Galileo. Nakon te izjave usledili su i konkretni koraci u modernizaciji GPS, a danas se politika SAD prema GPS temelji na paralelnom praćenju razvoja sistema Galileo, kao i drugih globalnih navigacijskih satelitskih sistema. Naime, Kina je 2002. godine zatražila dozvolu za frekvencije za svoj globalni navigacijski satelitski sistem, pod imenom „COMPASS“. Indija radi na svom sistemu pokrenutim pod imenom „IND-SAT“ i takođe je zatražila dozvolu za frekvencije.

## Program modernizacije GPS

Modernizacija sistema se sprovodila u više pravaca od kojih su najvažniji: ukidanje selektivnog pristupa, modernizacija satelita, modernizacija signala, modernizacija kontrolnog segmenta, poboljšanje prijemnika, poboljšanje programa i povećanje tačnosti.

### *Ukidanje selektivnog pristupa*

Prvi i najvažniji korak u poboljšanju tačnosti GPS svakako je bila odluka američkog predsjednika Bila Klintonu o ukidanju S/A, 2. maja 2000. godine. Iako se ovaj korak ne bi mogao ubrojati u modernizaciju sistema, razmatran je jer je zahvaljujući njemu napravljen veliki pomak u pogledu garantovane tačnosti GPS za civilne korisnike koja je odmah povećana sa tadašnjih 30 do 100 m na oko 10 do 20 metara.

Cilj modernizacije GPS, nakon ukidanja SA, je dalje poboljšanje tačnosti pozicioniranja, navigacije, orijentacije, određivanja brzine i vremena za civilne i vojne korisnike širom sveta.

### *Modernizacija satelita*

Do sada je modernizirano 12 Blok IIR u Blok IIR-M<sup>4</sup> satelite, zbog brže dostupnosti M-koda na frekvencijama L<sub>1</sub> i L<sub>2</sub> i civilnog koda na frekvenciji L<sub>1</sub>. Uprkos tome, nemoguće je dodati frekvenciju L<sub>5</sub> na Blok IIR-M satelite, pa se teži rešenju tog problema.

Blok IIF<sup>5</sup> sateliti bi trebali biti peta generacija GPS satelita kod kojih će se nastaviti s civilnim signalom na L<sub>1</sub>. Takođe, pojačaće se i M-kod na frekvencijama L<sub>1</sub> i L<sub>2</sub> radi boljeg prijema signala. Civilnim strukturama društva će najpre biti dostupan novi signal na L<sub>2</sub>, a posle će biti dodat i novi civilni kod na frekvenciju L<sub>5</sub>. Prva lansiranja Blok IIF satelita počela su 2005. godine.

Blok IIF sateliti sadržaće poboljšanja, koja će omogućiti veću autonomnost satelita, kao i dodatne mogućnosti slanja signala.

Prednosti nove generacije satelita:

- navigacijska tačnost se zadržava 6 meseci bez podrške sa Zemlje, a time je bojazan o ometanju komunikacija kontrolnih stanica sa satelitima minimalna,

<sup>4</sup> M – military: vojni.

<sup>5</sup> F – follow on: slediti.

- sateliti su opremljeni opremom koja će omogućiti prenos podataka između satelita radi povećanja samostalnosti sistema,
- samo jedno osvežavanje informacijama satelita mesečno umesto više puta dnevno,
- redukovaće se potreba za prekomorskim kontrolnim stanicama i
- postigla bi se veća navigacijska tačnost.

Blok III sateliti trebali bi biti najnovija generacija GPS satelita, a njihovo lansiranje bi trebalo početi 2010. godine, a realnija opcija je 2012. godina.

### *Modernizacija signala*

Dalji važan korak u modernizaciji GPS uključuje uvođenje dva nova civilna signala. Civilni signal  $L_2 = 1227,60$  MHz, predviđen je za implementaciju na Blok IIF satelite. Za drugi civilni signal koji će biti smešten uz sadašnji vojni signal, početna operativna sposobnost IOC<sup>6</sup> je dostignuta 2008. godine, a puna operativna sposobnost FOC<sup>7</sup> će biti dostignuta verovatno do 2010. godine.

Treći civilni signal biće smešten unutar dela spektra koji je internacionalno dodeljen za aeronautičke radionavigacijske servise, tj.  $L_5 = 1176,45$  MHz, a prvo lansiranje satelita sa ugrađenim signalom je realizovano 2005. godine. Signal je prilagođen za potrebe aplikacija koje su važne za sigurnost života ljudi, kao što je civilno vazduhoplovstvo. Za novi civilni signal na  $L_5$ , IOC će biti postignut do 2012. godine, a FOC do 2015. godine. Biće uvedena dva nova koda na frekvenciju  $L_5$ :  $I_5$  (I-in-phase) i  $Q_5$  (Q-quadrature) [10].

Uvođenjem nove frekvencije  $L_5$ , modernizovani GPS signal ima sledeću strukturu (slika 6):

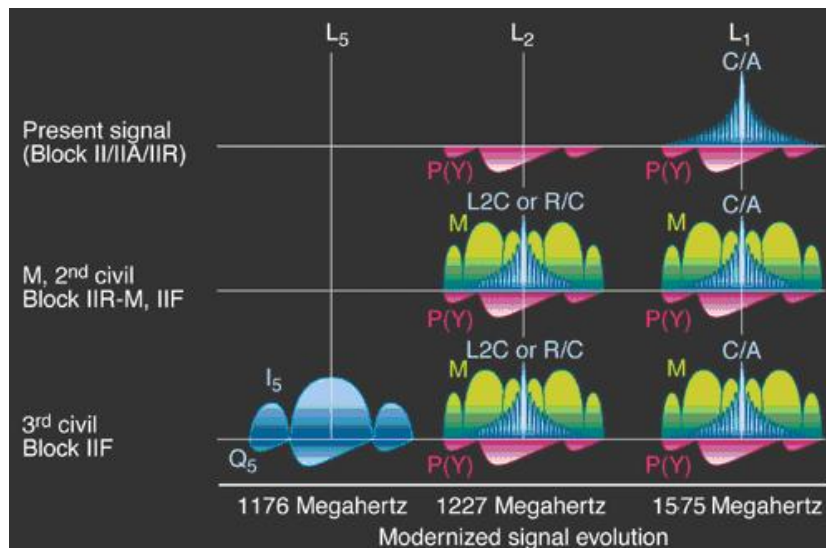
- $L_1$ : C/A; P/Y; M
- $L_2$ : C/A; P/Y; M
- $L_5$ :  $I_5$ ;  $Q_5$ .

Pri tom će civilni signali biti:

- $L_1$ : C/A
- $L_2$ : C/A
- $L_5$ : novi kod.

<sup>6</sup> IOC – Initial Operational Capability – početna operativna sposobnost.

<sup>7</sup> FOC – Full Operational Capability – puna operativna sposobnost.



Slika 6 – Struktura modernizovanih signala [10]

Kada budu kombinovani sa sadašnjim civilnim signalom na 1575,42 MHz, novi signali će znatno poboljšati pouzdanost GPS za civilne korisnike i omogućiti besprekorno određivanje visoke položajne tačnosti u realnom vremenu na čitavoj površini Zemlje.

### *Modernizacija kontrolnog segmenta*

Modernizacija kontrolnog segmenta realizovaće se postavljanjem novih prijemnih stanica i novim tehnikama obrade radi reduciranja grešaka vezanih za određivanje položaja i vremena. Povećaće se tačnost određivanja orbita samih satelita, što će dovesti do povećanja tačnosti određivanja bilo koje komponente sistema. Realizovaće se dodatno postavljanje velike antene, kombinovane sa promenama nužnim u operacionalizaciji kontrolnog segmenta.

### *Poboljšanje prijemnika*

Rezolucija prijemnika poboljšaće se na 0,1% talasne dužine, ili bolje. Proizvodnja višekanalnih prijemnika sa 36 i više kanala (merenje svih kombinacija opažanja  $L_1$  i  $L_2$ ) postaće rutina. Problemi višestrukog puta signala znatno će se smanjiti konstrukcijom prijemnika sa zaštitama kako bi uticaj bio sveden na najmanju moguću meru. Masa i veličina prijemnika će se smanjiti, a poboljšaće se svojstva svih komponenti: smanjiti antene, poboljš-

šati radiofrekvencijski (RF) deo, bežična komunikacija korisnika sa prijemnikom daljinskim upravljačem i dr. Veličina prijemnika će se smanjiti na optimalnu veličinu što će za posledicu imati praktičniju primenu.

Bitno je napomenuti da će u budućnosti cena GPS prijemnika imati samo stalni trend pada.

### *Poboljšanje programa*

Korišćenjem sve bržih mikroprocesora i optimizacijom algoritama u programskim paketima ubrzaće se proračun merenja. Najveći prostor za poboljšanje kvaliteta rada programa je u razvijanju tehnika uklanjanja cycle slipa i određivanja ambiguiteta.<sup>8</sup>

U budućnosti se može očekivati širenje primene RTK (Real Time Kinematic) sistema, tj. da će se vektori svih tipova merenja obrađivati u realnom vremenu, na licu mesta u prijemniku (*processing softver*). Real-time kinematic (RTK) GPS – predstavlja vrlo preciznu tehniku, koja postiže centimetarsku tačnost merenjem ugla faze nosećeg signala. Udaljenost prijemnika od satelita se izražava celim brojem perioda plus racionalni deo talasne dužine, izražen faznim uglom. Tehnika RTK GPS zahteva lokalnu baznu stanicu u krugu od 5 km i najmanje 5 satelita da bi se dobila centimetarska tačnost. Postoji mogućnost pripremanja RTK GPS referentnog signala koristeći mrežu baznih stanica tako da korisnik ne mora kupiti drugi prijemnik kao baznu stanicu, već se može pretplatiti na referentni signal. Gledano iz praktičnih i ekonomskih razloga to je optimalno rešenje proračuna za većinu merenja.

### *Povećanje tačnosti*

Korisnika sistema zanima koliko će modernizacija GPS uticati na tačnost pozicioniranja, navigacije, orijentacije i određivanja brzine i vremena.

U tabeli 3 prikazan je uticaj modernizacije GPS u budućnosti na horizontalnu tačnost apsolutnog pozicioniranja i kretanja u realnom vremenu.

Tabela 3

Horizontalna tačnost apsolutnog pozicioniranja za servise SPS i PPS

Nivo servisa	Horizontalna tačnost apsolutnog pozicioniranja, 95%[m]
SPS sa 2 ili više kodirana civilna signala – C/A-kod na L2 i/ili L5	8,5
SPS i PPS s Accuracy Improvement Initiative	6,0

Izvor: Obrada autora na osnovu podataka [9] i [10].

<sup>8</sup> Cycle slip-celobrojna promena fazne višeznačnosti (ambiguiteta) prilikom prekida ili ometanja GPS signala.

Tačnost kretanja u realnom vremenu - procena za budućnost:

- $L_1$  kod i nosač,
- $L_2$  kod i nosač,
- $L_5$  kod i nosač,
- radioveza za podatke,
- mogućnost rada do udaljenosti 100 i više km,
- tačnost 2 cm i bolja i
- brže pronalaženje prekinutih signala (npr. ispod mostova, u gradovima i dr.).

Tačnost određivanja visina biće na nivou nekoliko centimetara ili bolja.

## Generacija modernizacije sistema – GPS III

GPS III najnovija je (treća) generacija modernizacije GPS, koja je po odobrenju Kongresa SAD počela 2000. godine.

Njene karakteristike su [9], [10]:

- u svako doba u orbiti će biti 30 do 32 satelita dostupna korisnicima, a bili bi raspoređeni u tri orbitalne ravni sa po deset satelita,
- snaga predajnih signala sa satelita bila bi povećana za 500 W, zbog čega se uvodi još jedan (četvrti) solarni panel za napajanje,
- posredovaće implementiran M-kod na frekvencije  $L_1$  i  $L_2$  jače snage nego do sada,
- druga civilna frekvencija ( $L_2$ : C/A) je na raspolaganju počevši sa Blok IIF satelitima, koji su lansirani u 2003. godini,
- treća frekvencija, koja sadrži civilni signal  $L_5$ , je implementirana na Blok IIF satelite, koji su lansirani u 2005. godini,
- prenos signala je mnogo jači,
- povećana je real-time tačnost na 1 m,
- prva lansiranja GPS Blok III satelita počćeće oko 2010. godine,
- IOC sistema biće postignut do 2016. godine i
- očekuje se da će FOC sistema biti postignut do 2018. godine.

Sadašnja modernizacija GPS zadržava konstelaciju do 2010. godine. Nova generacija satelita i nova zemaljska kontrolna svojstva biće razvijeni za korištenje nakon 2010. godine do najkasnije 2030. godine.

Predloženi nivo tačnosti GPS III i dostupnost signala pronađen je u poboljšanjima koja je moguće izvesti potpunom modernizacijom Blok II konstelacije i kontrolnog segmenta.

Predloženi program kasni nekoliko godina, tako da se realizacija pojedinih faza modernizacije pomera, a glavni razlozi su neočekivano dugi vek trajanja sadašnjih GPS satelita i nedostatak novčanih sredstava.

Naučni vojni savet odbrane SAD predložio je plan defanzivnih mera zaštite GPS od dejstva protivnika do 2020. godine. Te mere bi obuhvatile formiranje novog prostornog rasporeda (konstelacije) satelita, povećanje

jačine signala koje zrače sateliti, postavljanje novih adaptivnih antena, poboljšanje korisničkih prijemnika, predikciju uticaja poremećaja i scintilacije (fluktuacije) jonosfere pri prostiranju predajnih signala satelita.

## Zaključak

Kao što je danas teško zamisliti život bez organizacije vremena, tako će u budućnosti biti imperativ poznavanje precizne pozicije korisnika na Zemlji.

Danas sistem GPS ima važnu ulogu, kao globalni mrežni časovnik, za definisanje tačnog vremena, tj. za sinhronizaciju vremena miliona računara širom sveta pri razmeni informacija. U budućnosti će još više proširiti svoju primenu u različitim aspektima ljudskog života u geodeziji, geodinamici, navigaciji, svemirskim istraživanjima, vojnim potrebama, geofizici, poljoprivredi, šumarstvu, hidrologiji, ekologiji, meteorologiji, arheologiji, biologiji, geologiji i drugim naučnim disciplinama. Prijemnike GPS koriste inženjeri različitih struka (elektrotehnika, mašinstvo, geodezija, šumarstvo, agronomija, vodoprivreda itd.) čiji je posao vezan za terenski rad. Osim stručne i profesionalne upotrebe u raznim područjima nauke i tehnike i navigaciji, GPS je našao široku primenu i u svakodnevnom životu. Upotrebljava se u saobraćaju (putnom, železničkom, pomorskom, rečnom i vazduhoplovnom), u sportu (nautika, padobranstvo, planinarenje, biciklizam i sl.), a sve češće se GPS prijemnici ugrađuju i u automobile kao deo sistema za navigaciju i praćenje.

Osim stalnog praćenja sistema i održavanja deklarisanе tačnosti, planiraju se i izvide dalja usavršavanja GPS sistema, prvenstveno na planu smanjenja osetljivosti na smetnje i na povećanju osnovne tačnosti. Nakon uvođenja signala za civilnu upotrebu-L<sub>5</sub>, osnovna greška sistema će se, bez primene dodatnih tehnika, spustiti ispod 10 metara.

Nove mogućnosti, kao i one koje se ne mogu sagledati, iniciraće razvoj novih aplikacija za GPS i daljnje širenje brzo rastućeg tržišta GPS opreme i servise širom sveta. Neposredno širenje primene GPS očekuje se u navigaciji na vodi, kopnu i u vazduhu, gde će uspostavljanje DGPS mreža omogućiti pouzdanu navigaciju uz primenu jednostavnih i jeftinih prijemnika, a najskuplji deo biće veza.

U 21. veku informacija se traži odmah i na licu mesta, a pritom je ključna integracija sistema GPS sa drugim sistemima ili sa više njih.

## Literatura

[1] Marjanov, M., *Satelitski sistem za globalno pozicioniranje – GPS*, Vojnotehnički glasnik, Beograd, 4–5/2000.

[2] Tirnanić, S., Bursać, S., *Satelitska radio-navigacija letelica*, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 2001.

- [3] Ćurčić, J., Šoškić, S., *Pozicioni satelitski sistemi*, Vojna akademija, radni materijal, Beograd, 2005.
- [4] ERD: <http://www.gps.oma.be>, januar 2009.
- [5] ERD: <http://www.montana.edu/places/gps>, januar 2009.
- [6] ERD: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps>, januar 2009.
- [7] ERD: <http://www.kowoma.de/en/gps/gps>, januar 2009.
- [8] Gavrić, M., Martinov, M., *Postupci i tačnost primene GPS u poljoprivredi*, Savremena poljoprivredna tehnika, Vol. 32, No. 1–2, p. 1–131, Novi Sad, januar 2006.
- [9] ERD: <http://www.navcen.uscg.gov/gps/modernization>, januar 2009.
- [10] ERD: <http://www.schwanenwerder.de/.../GPS/modernization>, januar 2009.

#### ACCURACY AND MODERNIZATION OF THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM

##### *Summary:*

*The development and the present concept of the Global Positioning System (GPS) are presented clearly. There is also a short description of the basic operation principle and of the main GPS characteristics given, as well as its accuracy. The present accuracy of the system is mostly appropriate for orientation, nautical navigation, land navigation and aero navigation; however, for many other activities better accuracy is required. The article analyses methods to improve the characteristics of the satellite positioning system so as to comply with more stringent safety demands. The paper gives a clear overview of the development of a GPS modernization program up to the year 2030.*

*Key words: GPS, errors, accuracy, modernization.*

Datum prijema članka: 10. 03. 2009.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 17. 04. 2009.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 27. 04. 2009.