

**Sveučilište u Zagrebu**  
**Fakultet elektrotehnike i računarstva**  
**Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija**

# **Differential GPS**

**Seminarski rad**  
**Sustavi za praćenje i vođenje procesa**

Tomislav Gracin  
0036395590

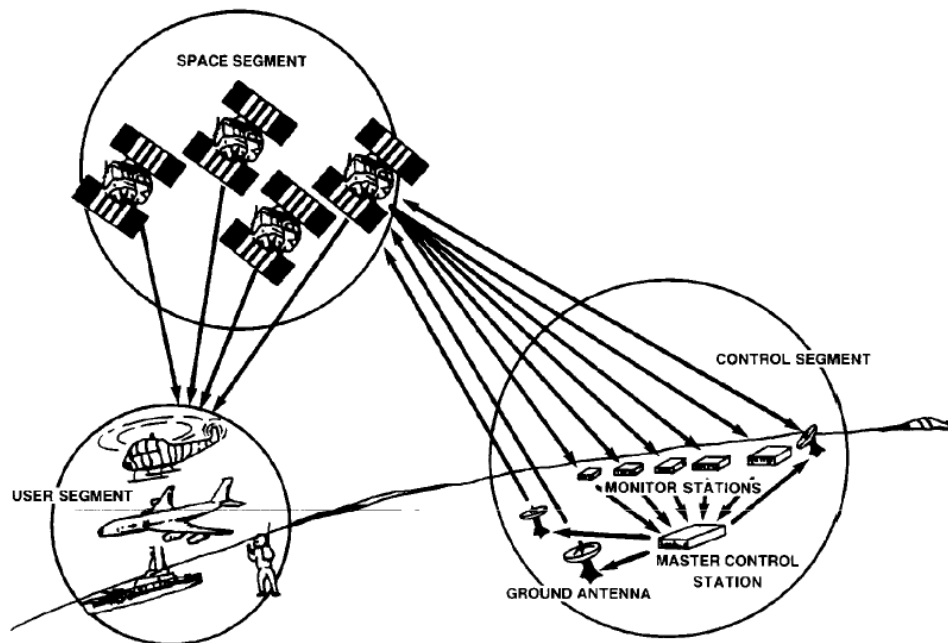
Zagreb, svibanj 2006.

## SADRŽAJ

1. Općenito o GPS sustavu.....	1
2. Teorija rada GPS sustava .....	3
3. Differential GPS.....	6

## 1. OPĆENITO O GPS SUSTAVU

GPS (engl. Global Positioning System) je radionavigacijski sustav koji omogućava korisnicima na kopnu, moru i u zraku određivanje točnog položaja, brzine i vremena 24 sata dnevno, bez obzira na vremenske uvjete, bilo gdje na svijetu.



Slika 1: Tri dijela GPS sustava.

Sustav se sastoji od tri dijela: svemirskog (engl. space), kontrolnog (engl. control) i korisničkog (engl. user) prikazanih slikom 1. Svemirski segment čine 24 satelita koji odašilju RF (engl. radio frequency) digitalnu poruku u kojoj su podaci o točnom vremenu i položaju satelita (engl. ranging codes i navigation data message). Kontrolni segment je mreža nadzornih stanica koje kontinuirano prate putanju i odstupanja odaslanog vremena pojedinih satelita, te dobivene podatke prosljeđuju GPS satelitima, koji ih dalje emitiraju korisnicima. Korisnički segment predstavljaju razni prijammnici koji temeljem podataka sa satelita određuju vrijeme i svoj položaj. Mjeri se vrijeme potrebno signalu za put satelit-prijamnik, odnosno uz pretpostavku širenja signala brzinom svjetlosti - udaljenost, a zatim se iz položaja pojedinih satelita računaju vlastiti položaj, brzina i vrijeme. Za mjerenje su potrebna barem 4 satelita (3 prostorne koordinate i vrijeme), a ukoliko je poznata jedna koordinata, npr. visina, dovoljna su 3 satelita.

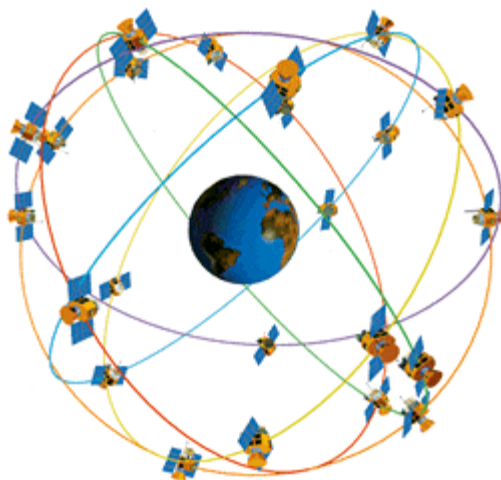
GPS je razvijen i nadgledan od strane američkog Department of Defense (DOD), a izvorno je nazvan NAVSTAR (Navigation System with Timing and Ranging).

Postoje dvije vrste usluge:

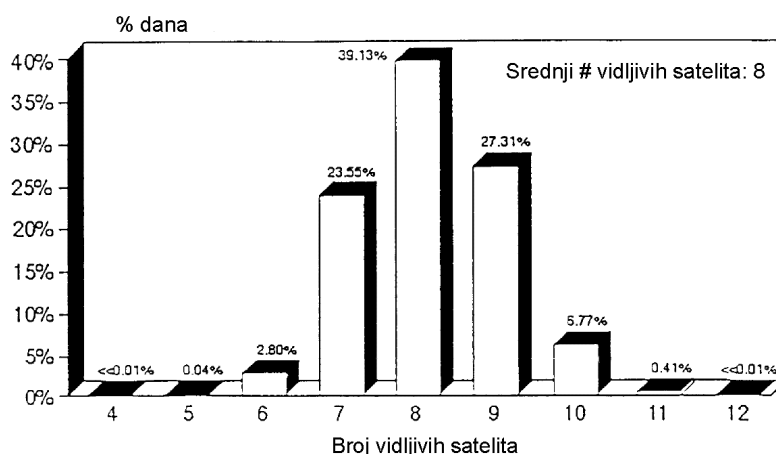
- standardna (SPS, Standard Positioning Service)
- precizna (PPS, Precise Positioning Service) koja je pristupačna samo ovlaštenim korisnicima.

## 2. TEORIJA RADA GPS SUSTAVA

**Svemirski segment** čine 24 satelita na visini od 20200 km iznad površine. Oni dva puta dnevno opisuju svoju orbitu (gledano sa Zemlje uvijek opisuju istu putanju i svakih 11 sati i 58 minuta nalaze se na istom mjestu). Sateliti su raspoređeni u 6 orbitalnih ravnina, na svakoj po 4 satelita (vidi sliku 2) s inklinacijom od  $55^\circ$ , tako da uz čist pogled k nebu tipično ima 8 do 12 istovremeno vidljivih satelita, a minimalno 5 od čega 4 imaju dobar geometrijski raspoređaj za izračun položaja (slika 3).



Slika 2: Konstelacija GPS satelita u 6 orbitalnih ravnina.



Slika 3: Kretanje broja vidljivih satelita s točke na Zemljinoj površini.

Sateliti odašilju signale na dvije frekvencije L1 (1575.42 MHz, L pojas označava raspon radiofrekvencija od 390 MHz do 1550 MHz) i L2 (1227.6 MHz), a šalje se širokopojasni

BPSK (Bi-Phase Switched keyed) digitalni signal za mjerenje udaljenosti (ranging signal) koji u sebi sadržava navigacijsku poruku (navigational message). Ranging signal se šalje na obje frekvencije (L1 i L2), ali u dva različita oblika – kao C/A kod (coarse/acquisition) na frekvenciji L1 i kao P(Y) (precision) kod na frekvencijama L1 i L2. C/A kod služi za grubo mjerenje i ima frekvenciju izmjene bitova 1.023 MHz, dok je P(Y) kod 10 puta gušći s frekvencijom izmjene bita od 10.23 MHz. Za određivanje položaja prijamnika dovoljno je primati samo jedan od ova dva koda (obično C/A), s tim da se prijamnici koji koriste P(Y) kod uvijek prvo sinhroniziraju na C/A kod jer se lakše mjeri.

P(Y) kod je pristupačan samo ovlaštenim korisnicima budući je kriptiran. Prije kriptiranja taj se kod naziva P kod, a nakon enkripcije Y kod, pa im je zajednički naziv P(Y). Njemu ima pristup američka vojska, NATO, Australian Defense Forces, U.S. Defense Mapping Agency i slične agencije uz odobrenje nositelja GPS projekta U.S. Department of Defense. Do travnja 2000. godine je i C/A kod bio namjerno kvaren čime se ograničila točnost mjerenja na 100 metara, a u literaturi se susreće pod nazivom SA (Selective Availability). Kriptiranje P koda u Y naziva se AS (Anti-Spoofing), što označava zaštitu - da korisnici koji ne poznaju kod ne bi mogli odašiljati takav signal koji bi omeo vojne prijamnike.

Za određivanje položaja bilo iz C/A ili P(Y) koda, potrebno je znati položaje pojedinih satelita, stoga se i u C/A i P(Y) kod ugrađuje ista navigacijska poruka s brzinom odašiljanja od 50 bita u sekundi, a koja se ponavlja svakih 12.5 minuta u svakom satelitu. Poruka ima dva bitna dijela - podaci o ispravnosti svih satelita u konstelaciji i njihovim grubim putanjama (Almanac) te točan položaj odašiljućeg satelita i njegovo točno vrijeme (Ephemeris). Poruka također sadrži i parametre modela ionosfere koji služe jednofrekvencijskim prijamnicima (SPS, Standard Positioning Service) za smanjenje pogreške. Almanac se prati sa Zemlje i šalje satelitima, a važeći je oko godinu dana. Ephemeris se također mjeri sa Zemlje i šalje posebno svakom satelitu njegov i to barem svaka 4 sata.

**Kontrolni segment** sa Zemlje kontinuirano mjeri točan položaj i putanju svih satelita, nadzire atomske satove u satelitima, provjerava ispravnost satelita, brine se o aktiviranju njihovog redundantnog sklopovlja, rekonfigurira satelite, računa parametre modela ionosfere, te redovito učitava Almanac, Ephemeris i ostale podatke u satelite kako bi ih ovi dalje odašiljali krajnjim korisnicima putem navigacijske poruke.

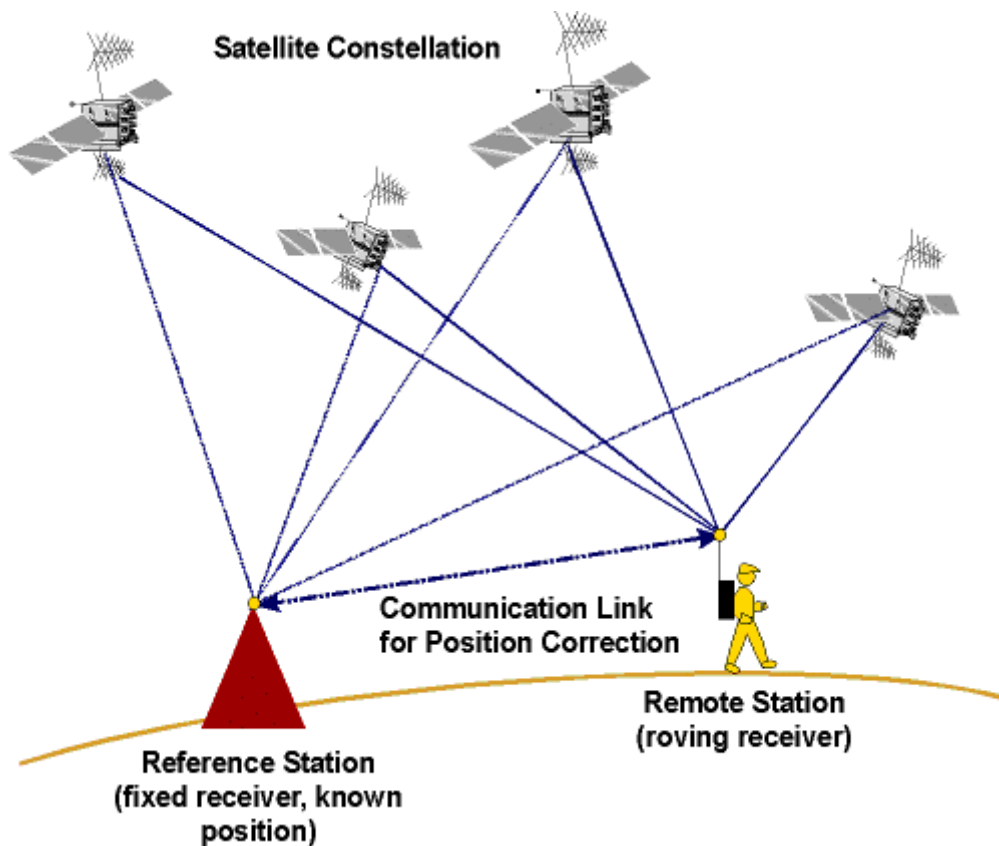
Postoji glavna kontrolna stanica (Falcon Air Force Base, Colorado, USA) i 5 nadzornih

stanica raširenih po svijetu od kojih su tri opremljene antenama za slanje podataka u satelite.

**Korisnički segment** predstavlja krajnje uređaje za mjerenje položaja, brzine i vremena. Kao što je već spomenuto, prvo se iz kašnjenja ranging signala na putu satelit-prijamnik određuje udaljenost koja definira sferu oko poznatog položaja satelita u trenutku odašiljanja (ephemeris) na kojoj se prijamnik mora nalaziti. Odredi li se ispravno takva sfera za tri satelita, njihovo je sjecište na koordinatama prijamnika (treba dakle riješiti sustav jednadžbi kojima su definirane te tri sfere). Budući da prijamnik ne zna vrijeme s dovoljnom točnošću, nastaje pogreška mjerenja udaljenosti satelit-prijamnik (jednaka za sve satelite – sateliti su opremljeni atomskim satom i održavaju se međusobno sinhronima). Stoga se izravno izmjerena udaljenost naziva pseudoudaljenost (pseudorange), čime se naznačuje postojanje zajedničke pogreške. Dobivena je dodatna varijabla u sustavu jednadžbi - pogreška prijamnikova vremena, a mjerenjem pseudoudaljenosti još jednog satelita dobiva se dodatna jednadžba koja omogućuje izračun prostornih koordinata i točnog vremena. Opisani postupak naziva se 3D fix. Ukoliko je poznata visina na kojoj se prijamnik nalazi (npr. na moru, površini kopna), dovoljno je 3 satelita za mjerenje, a takvo mjerenje se naziva 2D fix. Pritom je najčešće korišten model oblika Zemljine površine WGS-84 (World Geodetic System Reference 1984) elipsoid. GPS prijamnici često imaju i ugrađene algoritme za preračunavanje iz WGS-84 baziranih koordinata u koordinate drugih, lokalnih sustava u kojima su izrađivane mjesne karte.

### 3. DIFFERENTIAL GPS

Do pogrešaka mjerenja dolazi zbog pogreške satelitskog vremena, pogreške orbite, utjecaja ionosfere i troposfere na propagaciju signala, refleksije i ogiba signala na svome putu, zaklanjanja signala i šuma samog prijamnika. Utjecaj nekih pogrešaka može se smanjiti modeliranjem, odnosno predviđanjem njihova iznosa (npr. model ionosfere), boljim odabirom satelita koji se uzimaju u obzir pri mjerenju, drugim metodama mjerenja ili mjerenjem njihova iznosa na neki način.



Slika 4: Tipična DGPS arhitektura.

Kod diferencijske korekcije (Differential GPS - DGPS). Koristi se jedan fiksni prijamnik na točno poznatim koordinatama (base station ili reference station) koji inverznim algoritmom iz poznatih koordinata računa parametre signala kojeg bi sa satelita trebalo primiti te odašilje korekcije okolnim prijamnicima (rover) koji ih obično primjenjuju izravno na mjereni signal, još prije računanja PVT (Position, Velocity, Time) solucije. Bazne stanice za svaki vidljivi satelit mjere pogrešku odaslanog vremena i brzinu njene promjene (dovoljno je odrediti pogrešku u obliku vremena - u to su ubrojene sve otklonjive pogreške, sve dok je rover blizu



baze pa signal s pojedinog satelita podjednako griješi do baze i do rovera). Time se uspješno otklanja negdašnje namjerno kvarenje signala SA (Selective Availability), propagacijska kašnjenja signala na putu do prijamnika, pogreške satelitskog vremena, kao i većina pogrešaka orbite. Diferencijalnom korekcijom ostvariva je točnost od nekoliko metara prilikom mjerenja u pokretu, a još i bolja za stacionarne aplikacije (tablica 1 i 2).

Komponenta pogreške, tipično (po satelitu)	Standardni GPS (m)	Diferencijski GPS (m)
Vrijeme u satelitu	1.5	0
Pogreške orbite	2.5	0
Ionosfera	5.0	0.4
Troposfera	0.5	0.2
Šum u prijamniku	0.3	0.3
Višestruki put	0.6	0.6
Ukupno	10.4	1.5

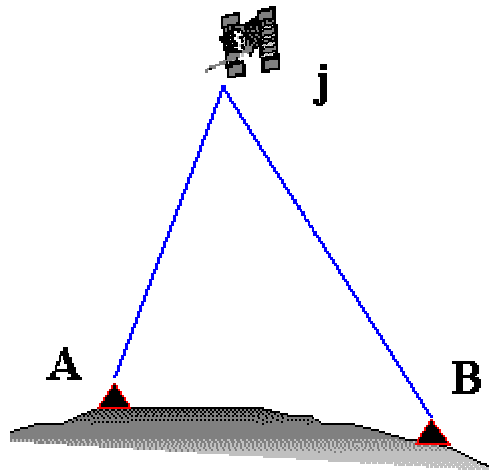
Tablica 1: Izvori grešaka GPS-a , tipičan dobitak DGPS-om.

Prisutne su i modifikacije ovog načina otklanjanja grešaka. Moguće je pohraniti mjerenja u baznoj stanici i mjerenja u prijamniku, a tek kasnije pristupiti proračunu gdje je prijamnik zapravo bio (mapiranje). Inverted DGPS se koristi kada se iz baze želi nadzirati velik broj prijamnika (javni prijevoz). Kako se ne bi u svako vozilo ugrađivao prijamnik koji podržava DGPS ulaz, u vozilu se mjere samo pseudoudaljenosti te ih se radio-vezom prosljeđuje bazi, gdje se provodi proračun i korekcija. Ovo rezultira nešto jeftinijom izvedbom u slučaju velikog broja prijamnika.

Diferencijske se korekcije provode pri mjerenju pseudoudaljenosti praćenjem koda (code-phase DGPS) i mjerenjem faze nosioca (carrier-phase DGPS). Pritom je bitno da bazna stanica vidi barem toliko satelita koliko ih vidi rover, kako bi za svaki od njih mogla poslati korekcije. Također je značajno da prilikom proračuna i bazna stanica i rover koriste iste parametre koji opisuju putanju, odnosno točan položaj satelita u trenutku mjerenja. Stoga se definira IODE (Issue of Data, Ephemeris) kao indeks korištenih Ephemeris vrijednosti, a šalju se korekcije za dva slučaja – stari i novi IODE. Ova se vrijednost u prosjeku osvježava jednom u sat vremena za svaki satelit.

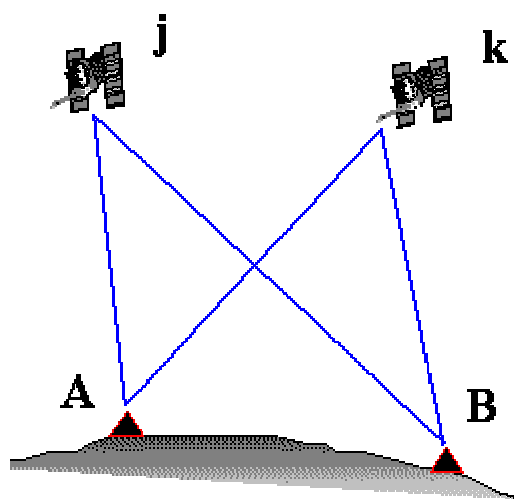
Tri su temeljne tehnike DGPS-a. Dva su prijamnika na bliskim koordinatama, a traži se njihov relativan položaj (slika 4). Signal s jednog satelita putuje određeno vrijeme do jednog

prijamnika, a malo dulje do drugoga. Odredi li se ta razlika i ona primijeni u rješavanju sustava jednačbi za izračun položaja dobiva se relativan položaj tih dvaju prijamnika (single-differencing tehnika). Ovime je otklonjena pogreška satelitskog vremena, putanje satelita i ionosfere.



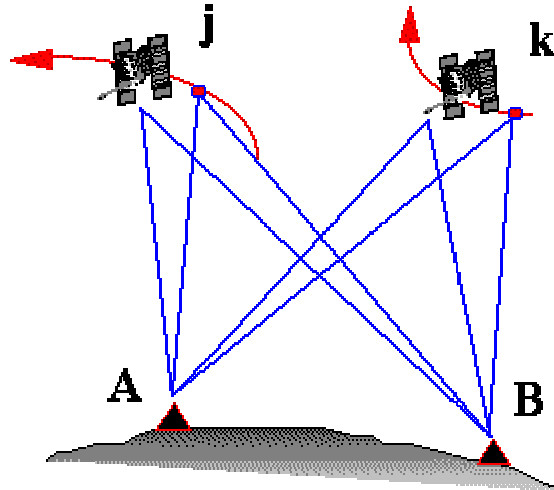
Slika 4: Skica uz opis single metode mjerenja.

Budući da prijamnici nisu savršeno međusobno sinhronizirani, pri mjerenju koliko signal dulje putuje do drugog prijamnika u odnosu na prvi nastala je pogreška ekvivalentna tom vremenskom razilaženju, ali jednaka za svaki satelit. Uz dodatni satelit, matematičkim je postupkom moguće (još prije proračuna relativne udaljenosti prijamnika) naći i otkloniti ovu grešku (double-differencing tehnika – slika 5).



Slika 5: Skica uz opis double metode mjerenja.

Ovaj se postupak koristi prije statističkog usrednjavanja u cilju nalaženja cijelog broja perioda nosioca u faznom mjerenju. Postoji i tehnika zvana triple-differencing (slika 6) koja koristeći dva uzastopna mjerenja dvaju satelita u potpunosti eliminira cjelobrojnu nesigurnost perioda nosioca (integer ambiguity) u slučaju bez privremenih gubitaka satelitskog signala.



Slika 6: Skica uz opis triple-differencing metode mjerenja.

Danas daleko najrašireniji standard (format prenošenih korekcija) za SPS DGPS je RTCM SC-104 (Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee-104), koji je prvenstveno namijenjen primjeni u stvarnom vremenu i pokriva širok spektar vrsta DGPS mjerenja. Komercijalno dostupne usluge diferencijalnih korekcija obično se odašilju kao RDS usluga pojedinih radio-stanica ili u posebnom 300 kHz-nom pojasu (samo na području Amerike). Za prijam tih korekcija potrebno je uz GPS prijammnik imati i DGPS radio-prijammnik, a postoji i velik broj GPS prijammnika s već ugrađenim takvim radiom. Ova metoda prijenosa korekcija naziva se beacon DGPS. Postoje i nekomercijalni pokušaji prijenosa ovih lokalnih korekcija putem Interneta no, kao i korekcije od radio-stanica, ne za naše područje. Ukoliko se diferencijalne korekcije prenose nekom bežičnom tehnologijom (tipično GSM), sustav se naziva WAG (Wireless Assisted GPS).

Kvaliteta korekcijskih parametara ovisi o kakvoći bazne stanice, a preostali izvori pogreške koji su neotklonjivi ovom metodom su šum prijammnika i pogreška zbog višestrukog puta signala. Što je prijammnik dalje od bazne stanice, diferencijalna korekcija postaje netočnija. Pogreške su dosta korelirane sve do udaljenosti od 250 km, ali su korekcije obično limitirane dometom odašiljača tih korekcija na oko 170 km (LADGPS, local area DGPS). Za veća područja pokrivenosti izgrađuju se mreže baznih stanica tako da prijammnik bira korekcije iz

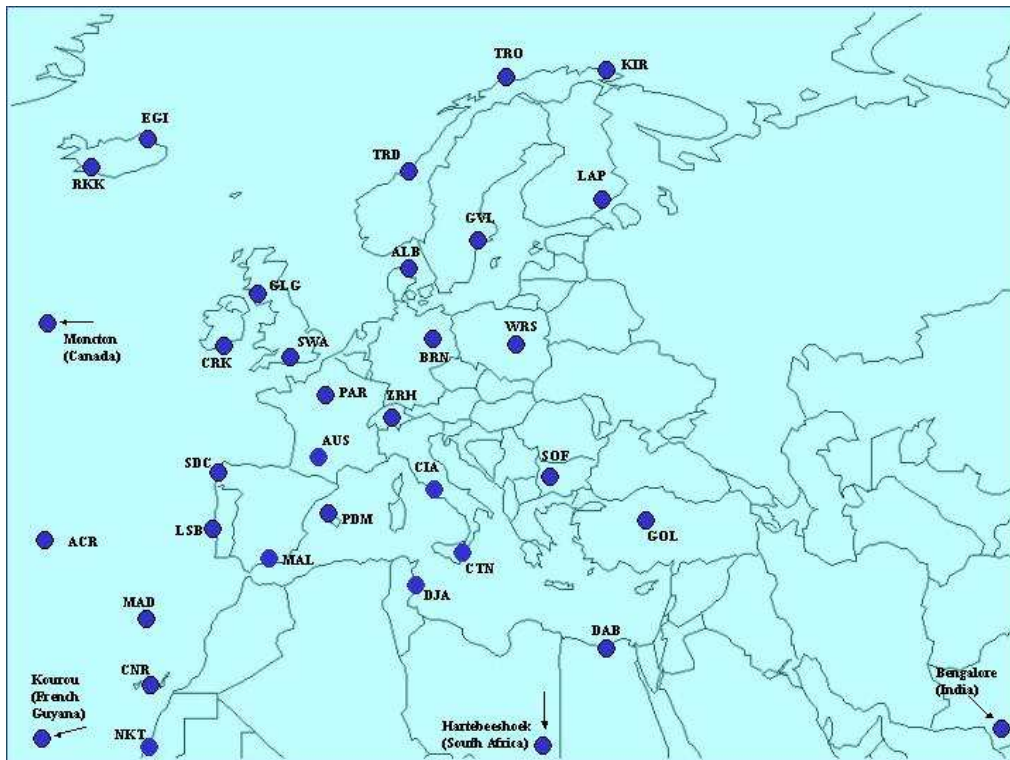
bliže stanice (WADGPS, wide area DGPS) - takvi sustavi obično odašilju korekcijske parametre pomoću satelita. Starost LADGPS korekcije kada dođe do prijamnika obično je manja od 5 sekundi, što ne utječe na njenu valjanost, a ukoliko prijamnik prestane dobivati WADGPS korekcije, koristi se zadnje primljena još oko 2 minute. Osim korekcija položaja, važna zadaća DGPS-a je poboljšavanje pouzdanosti mjerenja u smislu brze dojave mogućeg kvara (koriste li se signali samo sa GPS satelita može proći cijeli dan prije detekcije pogrešnih podataka nekoga od satelita). WADGPS sustavi ostvaruju nešto manju točnost (oko 3 m na području gdje su korekcije valjane) za razliku od onih ostvarivim LADGPS-om (do 1.5 metar oko referentne stanice), zbog toga što WADGPS ne pokriva utjecaj troposfere na kašnjenje signala (zbog njene prevelike varijabilnosti na širem području trebao bi nepraktično velik broj baznih stanica i veća brzina prijenosa korekcija).

Najpoznatiji WADGPS sustav je razvijen za područje Amerike i nosi naziv WAAS (Wide Area Augmentation System). On je predviđen za daljnje proširenje kao globalni korekcijski sustav, što je otvorilo mogućnost izgradnje kompatibilnog sustava u Europi pod nazivom EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), te u Japanu (Azija) pod nazivom MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System). Ova tri današnja WADGPS sustava obuhvaćena su pod zajedničkim nazivom SBAS (Space Based Augmentation Systems). Gruba procjena točnosti mjerenja različitim tehnikama dana je tablicom 2.

Metoda mjerenja	Procjena točnosti
Obični prijamnik, SPS	20 m
WAAS	3 m
EGNOS	1-2 m
Beacon DGPS	1-3 m
LADGPS	1 m

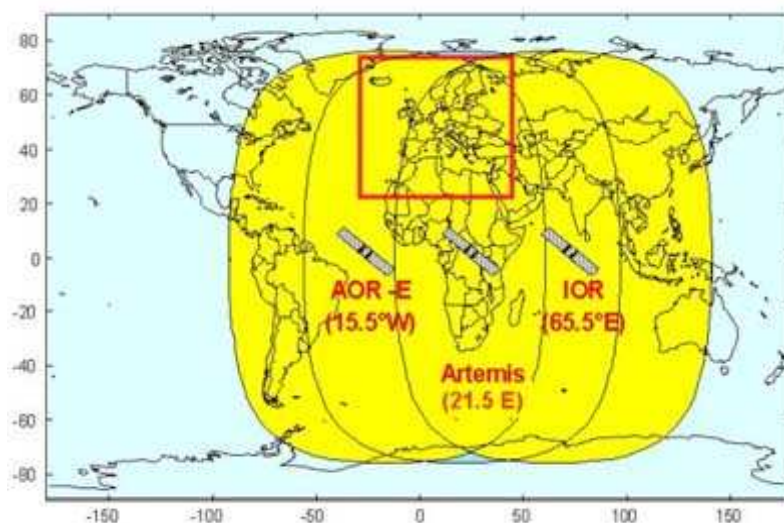
Tablica 2: Gruba procjena točnosti mjerenja različitim tehnikama.

WAAS danas ima 25 referentnih stanica (RIMS, Ranging and Integrity Monitoring Stations) diljem SAD-a, dvije centralne kontrolne stanice (MCC, Master Control Center) i dva geostacionarna satelita (GEO, Geosynchronous; GPS su MEO sateliti, Medium Earth Orbit i na njihovu putanju ne utječu gibanja atmosfere).



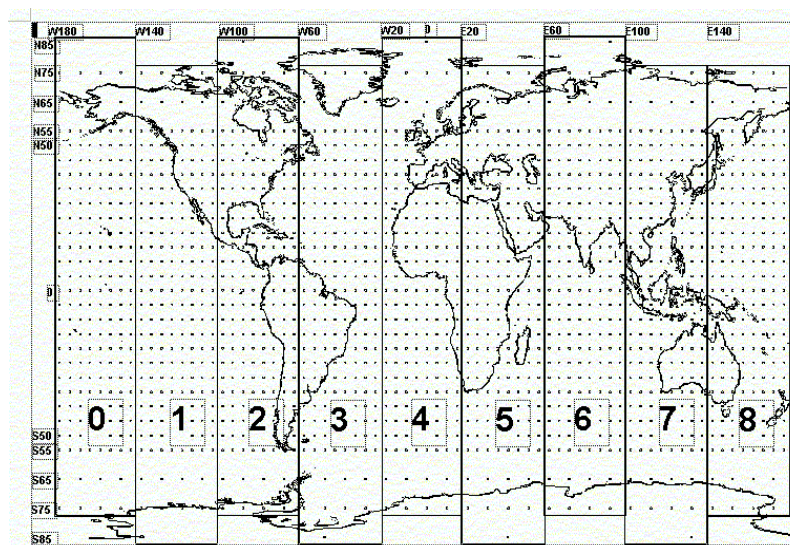
Slika 7: Referentne stanice EGNOS-a, kraj 2003. g.

EGNOS ima 34 referentne stanice, četiri centralne kontrolne stanice i tri geostacionarna satelita. ESTB (EGNOS System Test Bed) je naziv prototipa EGNOS-a koji je bio u pokusnom radu 2002. do 2004, a sada se isti naziva EGNOS-om. Za razliku od WAAS-a EGNOS daje i diferencijske korekcije za ruski GLONASS sustav, a davat će i za budući europski Galileo sustav.



Slika 8: Danas EGNOS ima 3 GEO satelita – svi odašilju iste podatke.

Princip rada SBAS-a razlikuje se od LADGPS-a. Budući da se svima šalju iste korekcije, a prijamnik sam odabire koje od korekcija treba uvažiti. Umjesto da se utjecaji svih grešaka u signalu pojedinog satelita nadomjesti sumarnom pogreškom u vremenu, preračunava se doprinos pojedinog izvora pogreške i kao takav odašilje. Pogreške satelitskog vremena i putanje zajedničke su svim točkama i odašilju se za svaki satelit posebno. Pogreška vremena se osvježava svake minute, a putanje i ionosfere svake 2 minute, s tim da vrijedi oko 6 minuta. Zbog korekcija ionosfere Zemljina je površina podijeljena na 9 pojava, a svaki pojas na 201 točku (osim 8. koji ima 200 točaka), a svaki GEO satelit pokriva dva do tri pojasa i za njih odašilje korekcije.



Slika 9: Mreža za korekcije ionosfere u SBAS sustavu.

Centralna kontrolna stanica iz podataka s referentnih stanica računa korekcije ionosfere za pojedine točke, a prijamnik linearno interpolira korekciju za svoj položaj iz korekcija prikupljenih za okolne 4 točke. Ako je ta korekcija dostupna samo za tri točke, linearno se interpolira korekcija samo ako je prijamnik unutar trokuta obuhvaćenog korekcijama, inače se korekcija ionosfere ne uvažava, a ostaju korekcije satelitskog vremena i orbite.

Signal samih SBAS satelita vrlo je sličan GPS signalu. Šalje se PRN (pseudoslučajni šum - pseudorandom noise) istog oblika na istoj frekvenciji iz istog niza Golden kodova, samo što se umjesto navigacijske poruke šalju korekcije i svježi podaci o ispravnosti konstelacije (ovaj put konstelacija uključuje i GEO satelite). Slično kao i okviri navigacijske poruke u GPS satelitu, postoje korekcije koje se brže mijenjaju i češće odašilju i one sporije naravi koji se

odašilju manjom učestalošću. Postoji 16 tipova poruke, a period ponavljanja važnih poruka je 6 sekundi. WAAS sateliti odašilju i vlastiti položaj i ranging signal te mogu poslužiti za mjerenje pseudoudaljenosti (EGNOS ne). Prijamnici prilagođeni primanju SBAS signala nazivaju se WAAS-enabled ili EGNOS-enabled prijamnicima i za razliku od beacon DGPS-a ne trebaju poseban prijamnik niskofrekventnog radio-signal. Takvi prijamnici obično imaju barem 12 kanala i standardno rade u režimu bez korekcija. Nakon što se ručno unese PRN SBAS satelita kojega se želi koristiti, prijamnik prelazi se u diferencijski mod rada tek pošto se sinhronizira na (barem jedan) SBAS satelit. U ovom modu su obično dva kanala rezervirana za primanje korekcija, te se ne mogu koristiti za prijam GPS signala. Prijamnici suglasni s dokumentom RTCA/DO-229C MOPS mogu primiti bilo koji SBAS signal.

Naziv satelita	PRN#
AOR-E	120
AOR-W	122
ARTEMIS	124
IOR-W/F5	126
MTSAT1R	129
IOR	131
POR	134
MTSAT2	137

Tablica 3: PRN brojevi današnjih SBAS satelita.

Sekundarni cilj EGNOS sustava je odašiljanje točnog vremena, što ima potencijala budući su sateliti geostacionarni i puno bliži korisniku. Vrijeme EGNOS satelita odašilje se s točnošću od 1.5 ns, a predviđeno odstupanje od GPS vremena šalje se u posebnoj poruci.

Signali s GEO satelita su vidljivi zrakoplovima i brodovima, dok je u gradskim sredinama čest problem gubitak korekcijskog signala zbog zaslanjanja malog broja stacionarnih satelita raznim preprekama. Zbog toga je ESA (European Space Agency, tvorac EGNOS-a) razvila SiSNeT (Signal In Space through the InterNET) koji korisnicima spojenim na Internet omogućuje pristup EGNOS signalu, a od 2001. godine je u testnoj fazi. Pristup korekcijama za sada je besplatan (ali uz autorizaciju koju je moguće zatražiti na [SISNeT@esa.int](mailto:SISNeT@esa.int) uz opis za čega se traži te za koju IP adresu i koji port). Osim autorizacije na SiSNeT-ov server, potreban je i SIS2DS klijent (protokol izgrađen na bazi TCP/IP-a, a optimiziran za prijenos EGNOS poruka). Poruke je zatim potrebno raspakirati, a nakon toga slijedi i aplikacija koja će ih koristiti uzimajući od GPS prijamnika samo izmjerene pseudoudaljenosti. Gotovo

rješenje za sada nije dostupno, a detaljni napuci za izradu pojedinih komponenata, kao i primjeri koda te potrebne specifikacije mogu se naći u User Interface Documentu [7]. Do sada je provedeno tek nekoliko demonstracija ove tehnologije i to koristeći GSM modem za bežičan prijenos korekcija, PDA za računanje položaja i običan GPS prijamnik za mjerenje pseudoudaljenosti. SiSNeT nije namijenjen da bi zamijenio SBAS satelite, već samo da bi povećao dostupnost njegova signala i ne može se koristiti u kritičnim aplikacijama.