

UDK 528.48:629.19
Pregledni članak

RAZMATRANJE MOGUĆNOSTI PRIMENE GPS-a U INŽENJERSKOJ GEODEZIJI

Toša NINKOV — Beograd*

SAŽETAK: U radu se daje kratki prikaz stanja GPS-tehnologije i ukazuje na očekivane revolucionarne promene u vezi sa njenom primenom. Brz razvoj elektronike, povećanje tačnosti i pada cena prijemnika i ostalog pratećeg hardvera i softvera eliminisaće za nekoliko godina mnoge klasične metodologije rada u geodeziji. Prikazom rezultata praktičnih merenja diferencijalnom metodom dve dužine (10 km i 2 m) ukazuje se na moguću primenu GPS-merenja i u inženjerskoj geodeziji.

1. UVODNA RAZMATRANJA

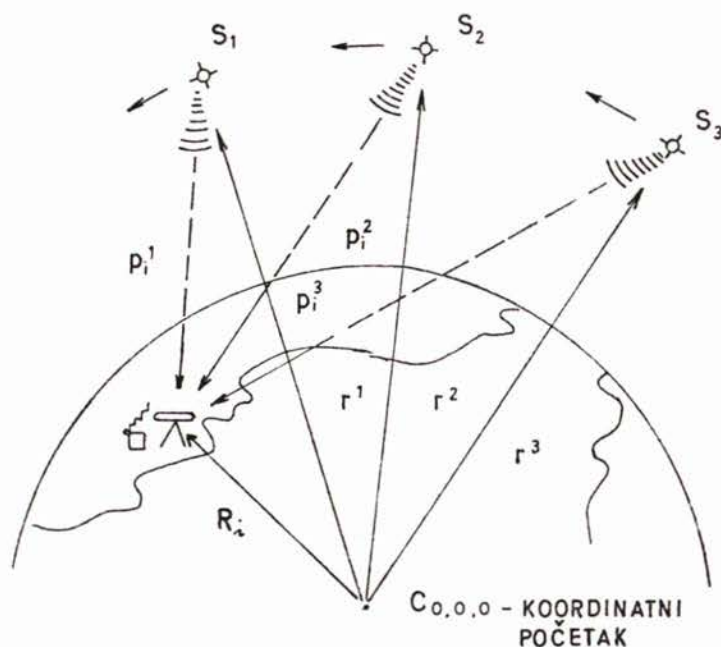
Opšti sistem za pozicioniranje GPS-a (GLOBAL POSITIONING SYSTEM) jeste revolucionarna tehnologija koja će omogućiti veoma precizno pozicioniranje (određivanje prostornih koordinata) na fizičkoj površini Zemlje i u prostoru oko nje. Sistem se sastoji od tri segmenta međusobno povezana u celinu. Ti su segmenti:

1. *Vasionski segment* sastoji se od 18 radnih i izvesnog broja rezervnih satelita (dosada je u orbitu izbačeno 7—8 eksperimentalnih), koji će biti u punoj radnoj sposobnosti već 1992. godine. Sateliti će se kretati u 6 orbitalnih ravni, na visini od 20200 km i obezbeđivaće, bilo gde na Zemlji, i u svakom trenutku, prijem signala od bar 4 satelita, koliko je neophodno za određivanje položaja te tačke u odgovarajućem koordinatnom sistemu. Verovatno će se kao kooordinatni sistem usvojiti opšti sistem Zemlje (Conventional Terrestrial System — X, Y osa u ravni ekvatora, Z — upravna na njih, X — osa u ravni Greenwichskog meridijana).

2. *Kontrolni segment* sastoji se od nekoliko zemaljskih stanica kojima se upravlja radom satelita, vrše korekcije njihovih putanja i određuju njihove tačne putanje — efemeride u svakom trenutku vremena.

* Doc. dr Toša Ninkov, Energoprojekt-Hidroinženjering, 11070 Beograd, Bulevar Lenjina 12

3. *Korisnički segment* sastoji se od prijemnika sa opremom koji prima i obrađuje signale sa satelita. Određivanje prostornih koordinata prijemnika bazira se na prostornom lučnom presecanju sa tri satelita (sl. 1)



Sl. 1. Shematski prikaz (r_i , p_i , R_i — su vektori)

Poznato: r^1, r^2, r^3 , meri se p_i^1, p_i^2, p_i^3 , traži se: R , Osnovna jednačina

$$\|r^j - R_i\| = p_i^j \quad j = 1, 2, 3, 4$$

i — broj merenja u intervalu t .

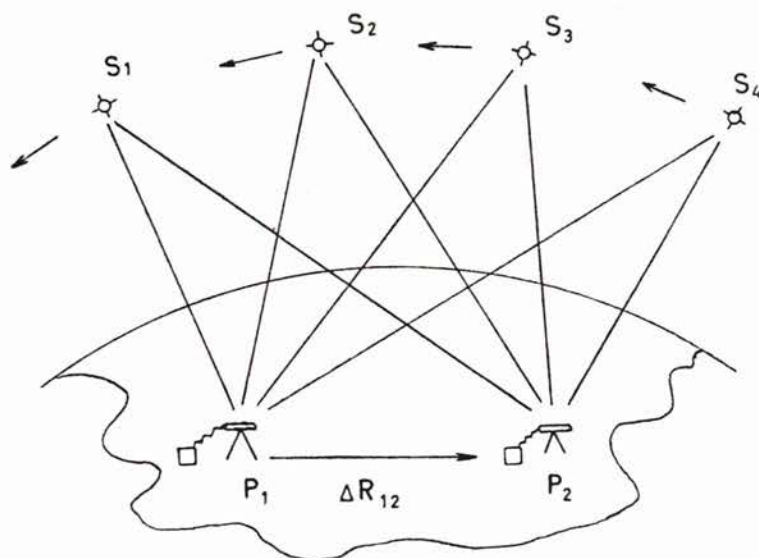
Rastojanje između antene prijemnika i satelita meri se na osnovu određivanja vremena za koje radiotalas pređe to rastojanje.

Budući da se to vreme ne može precizno odrediti (prijemnik nema dovoljno tačan sat u sebi), to se za eliminaciju nepoznate Δt koristi prijem signala sa četvrtog satelita. Signali se kontinuirano primaju sa sva četiri satelita izvesno vreme (dovoljno 15—30 min.), a na osnovu primljenih podataka mogu se sračunati koordinate (X, Y, Z) stanice.

Za primenu GPS-a u mrežama inženjerske geodezije od daleko je većeg interesa relativno pozicioniranje, koje je shematski prikazano na sl. 2. U tom se slučaju sa dva ili više prijemnika primaju istovremeno signali sa istih satelita, što kasnije omogućuje da se dobije traženo rastojanje između tačaka P_1 i P_2 .

Osnovne jednačine

$$R_1 = r^j - c^j p_1^j$$



Sl. 2. Shematski prikaz relativnog pozicioniranja

$$R_2 = r^j - e_2^j p_2^j$$

$$\Delta R_{12} = R_2 - R_1$$

$$\Delta R_{12} = e_2^j p_2^j - e_1^j p_1^j$$

Budući da su rastojanja između tačaka P_1 i P_2 relativno mala, $D < 10-20$ km, to se, zbog prolaska radiotalasa kroz praktično istu sredinu, razlikom vektora $R_2 - R_1$ eliminiše velik deo atmosferskog uticaja na rezultate merenja. Zbog toga se savremenijim GPS-prijemnicima (naprimjer Makrometar II^{T/1}) primenom relativnog pozicioniranja postiže zapanjujuća tačnost od 10^{-7} za dužine od 10-20 km. Da ne bude zabune, to je tačnost od $\pm 1-2$ mm, po sve tri ose, na rastojanju od 10-20 km, i ona je na više mesta praktično realizovana ([3], [4], [5]). Ta tačnost u svakom slučaju zadovoljava mnogo zahteva tačnosti u mrežama inženjerske geodezije i o tome se mora voditi računa.

Napred su navedeni samo osnovni principi rada GPS-sistema kako bi čitalac koji se ne bavi tom problematikom u nastavku bolje sagledao moguće primene te nove tehnologije. Detaljno izučavanje te problematike spada u domen satelitske i više geodezije.

2. GPS-PRIJEMNICI, PROIZVODNJA, CENE

Geodete u svetu veoma se intenzivno bave problemima GPS-tehnologije i njene primene u geodeziji. U knjizi [1] dat je veoma upečatljiv prikaz očekivanog razvoja primene GPS-a u tehnicima, pa i u geodeziji, u narednom periodu. Prikazaće se neki od pokazatelja sa ciljem da se ukaže na urgentnost povezivanja naše struke za tu novu tehnologiju.

POKAZATELJI TAČNOSTI

Tabela 1

METODA MERENJA		POJEDINAČNO ODREĐIVANJE		RELATIVNO ODREĐIVANJE	
		1986.	1990.*	1986.	1990.*
PSEUDO RANGE	MANJA TAČNOST Manje tačne efemeride	± 50 m	± 50 m	± 8 mm	± 5 m
	VEĆA TAČNOST Tačnije efemeride	± 20 m	± 5 m	± 5 mm	± 3 m
FAZNE RAZLIKE	ANTENA NEPOKRETNAST**	—	—	1 ppm	0,01 ppm**
	ANTENA POKRETNAST***	—	—	10 cm	< 10 cm

Ostale karakteristike (sadašnje i očekivane) date su u tabeli 2.

Tabela 2

	1986.	1990.	IDEALNO
Cena u USD	20.000—300.000	5000—20.000	10
Težina	5 kg — 300 kg	nošenje u ruci	zanemarljive težine
Izvor energije	spoljni izvor ili akumulator	akumulator	baterija od sata
Vreme merenja	10—60 min.	1—15 min.	milisec.
Tačnost	1 ppm (10 cm) (1—2 cm)	0.01 ppm	1 mm

U tabeli br. 3 će se dati prikaz najčešće upotrebljivanih prijemnika sa nekoliko karakteristika.

Tabelom nisu obuhvaćeni svi proizvođači upotrebljivanih prijemnika. Potrebno je napomenuti da su navedene cene važile za 1986. godinu i da su sada verovatno daleko niže, a prijemnici precizniji, što samo povećava mogućnosti njihove nabavke. To podrazumeva i neophodnost što hitnije obuke geodetskih stručnjaka, kako u procesu školovanja (uključujući sve nivoe), tako i onih koji su u aktivnoj službi.

* očekivane vrednosti

** obezbeđuje primenu u inženjerskoj geodeziji

*** obezbeđuje primenu u fotogrametriji

Tabela 3

Prijemnik	Proizvođač	Primena	SOF-TVER	Cena l.k. USD
WM102	Wild Magnavox comp. Switzerland	Relativno pozicioniranje	DA	90.000
LORAN-GPS 10X	TRIMBLE NAVIGATION, USA	Spora dinamička navigacija	DA	25.000
4000S-Surveyer	TRIMBLE NAVIGATION, USA	Relativno pozicioniranje	DA	44.000
TI 4100 NAVSTAR	TEXAS INST. INC. USA	Relativno pozicioniranje	DA	120.000
SEL GPS	STANDAR ELEKTRIC LORENZ SR NEMAČKA	Dinamička navigacija	?	1989 <5000
SERCEL-FRANCE	SERCEL-FRANCE CANADA	Dinamička navigacija	DA	67.500
COLLINS NAVCORE I™	ROCKWELL LNT. USA	Navigacija, relativno pozicioniranje	DA	18.000
PRACLA-SEISMOS PS-8400	PRACLA SEISMOS, BRD	Navigacija, relativno pozicioniranje	DA	1987
NORSTAR 1000	NORSTAR INSTR. CANADA	Pojedinačno i relativno statičko i dinamičko pozicioniranje	DA	55.000
EAGLE-MINI RANGER	MOTOROLA INC. USA	Pojedinačno i relativno statičko i dinamičko pozicioniranje	DA	19.000
MX 4400	MAGNAVOX USA	Pozicioniranje na moru, vodi i u vazduhu	DA	20.000
MACROMETER II™	LITTON AERO. SERVIS USA	Precizno relativno pozicioniranje	DA	120.000
JLR-4000	JAPAN RADIV. CORP. JAPAN	Spora dinamička navigacija	DA	27.000
ISTAC. M-2002	ISTAC. INC. USA	Precizno relativno pozicioniranje	DA	57.000

3. MERENJA DUŽINA GPS-PRIJEMNICIMA*

Ukratko će se prikazati osnovni postupci merenja dužina diferencijalnom metodom sa dva prijemnika TRIMBLE na bazi Univerziteta NEW CASTLE.

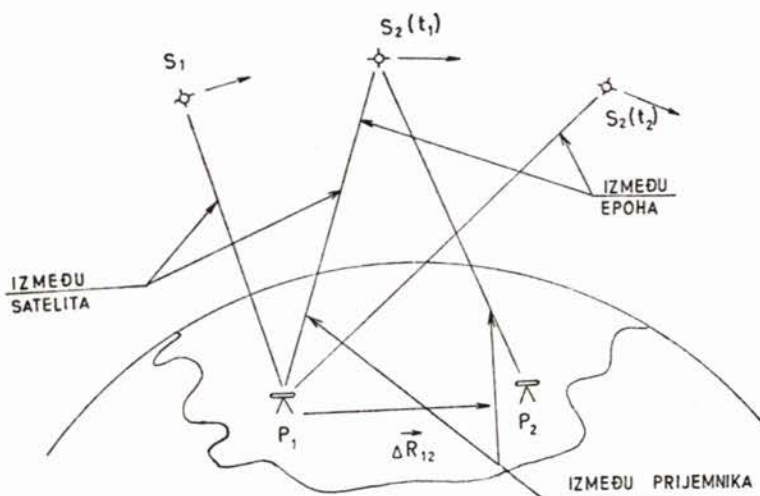
Prva faza sastoji se u izboru vremena u kojem su moguća opažanja na teritoriji gde se želi odrediti neka dužina. Za to se upotrebljavaju posebni pro-

* Merenja realizovana na bazi Univerziteta New Castle za vreme autorovog studentskog boravka.

grami (u ovom slučaju GPS-ALERT), koji se dobijaju od proizvođača. Ulazni su podaci datum željenog opažanja i približne geografske koordinate gradilišta. Kao izlaz dobijaju se informacije o vremenu kada će koji od satelita moći da se »vizira« sa antenom prijemnika (da primi signale sa satelita) ukoliko se unapred definiše minimalni vertikalni ugao satelita iznad stanice. Kao vreme u kojem će se vršiti merenja (projekat opažanja) uzima se interval u kojem se mogu primati signali od bar 4 satelita. Sa trenutnom konstelacijom satelita na skoro celoj površini zemlje moguće je svaki dan vršiti merenja 3—4 sata. Primenjeni program ima još mogućnost da od više od 4 satelita koji prolaze iznad stanice odabere i predloži ona 4 koja daju najbolju geometriju (najbolje preseke) jer se time obezbeđuje najbolja moguća tačnost. Mora se napomenuti da je uticaj geometrije (bar prema iskustvima iz New Castlea) u ovom slučaju manji nego kod konvencionalnih mreža.

Sledeća faza je postavljanje antena na krajeve baza, povezivanje sa prijemnikom, priprema prijemnika za rad jedinstvenim operacijama (slično pripremi složenijeg videorekordera za snimanje) i čeka se nailazak satelita. Prijem podataka i njihova kontrola vrši se prema utvrđenim postupcima potpuno automatizovano (sa signalisanjem izvesnih odstupanja od utvrđene procedure) i on se neće opisivati jer je kod raznih proizvođača različit. Proces merenja traje 15—30 min. Za to vreme primi se velik broj signala sa svakog od 4 satelita, a svi se podaci registruju na odgovarajuće magnetne medijume (obično diskete).

Sledeća je operacija numerička obrada prikupljenih podataka. Ona se sastoji od jedne vrste posrednog izravnjanja jer se za malen broj nepoznatih (koordinate tačaka gde su antene) dobija velik broj rešenja. Svaki komplet signala sa sva 4 satelita daje jedno rešenje. Za obradu se takođe primenjuje programski paket što ga proizvođač opreme daje zajedno sa prijemnicima. Cela numerička obrada izvodi se na personalnom računaru.



Sl. 3. Linearne kombinacije opažanja

Prilikom obrade podataka relativnog pozicioniranja moguća su različita rešenja sračunavanja vektora R_{12} . Bez dubljeg ulaženja u teorijska razmatranja na sl. 3 će se prikazati različite kombinacije diferencijalnog pozicioniranja.

Koristeći se svim mogućim kombinacijama, moguće je pri obradi koristiti se pojedinačnim, dvostrukim ili trostrukim razlikama trostruko relativno određivanima. Programom su te mogućnosti predviđene, i u zavisnosti od izabrane kombinacije dobijaju se različiti rezultati. Nažalost, dosadašnja iskustva nisu dala odgovor na pitanje kojom se kombinacijom za obradu treba koristiti. Zbog toga se uglavnom preporučuje pre početka merenja dužina GPS-opremom da se ona »kalibriše« na nekoj od prethodno određenih baza na tom području.

Tabela 4

METODA OBRADJE	$P_1 - P_2 = 10846.52^{(*)}$		$P_1 - P_3 = 1.583^{(*)}$	
	Izravnata P_1P_2	m_1	izravnata P_1P_3	m_1
Trostruke razl.	10846.841 m	± 0.116 m	1.535 m	± 1.90 m
Dvostruke razl.	10846.622 m	± 0.055 m	1.617 m	± 0.010 m
Dvostruke razl. $P_1 =$ fiksno	10846.473 m	± 0.023 m	1.580 m	± 0.003 m

U tabeli 4 prikazani su rezultati merenja i ocene tačnosti iz procesa iriravanja dve različite dužine (10 km i 1.5 m) koje su realizovane pomoću iste opreme u toku jedne večeri.

Analiziranjem dobijenih rezultata mogu se izvesti različiti zaključci, i oni će ovom prilikom, uglavnom zbog malog broja praktičnih merenja i relativno starih i već prilično amortizovanih prijemnika, izostati.

Ukoliko bi se ovakva merenja relativnog pozicioniranja sprovela u celoj mreži nekog velikog inženjersko-tehničkog objekta (dugi tuneli, velika gradilišta itd.), tada bi se moglo pristupiti 3D izravnanju tih podataka. Na taj bi se način veoma brzo, efikasno i dovoljno tačno dobile prostorne koordinate. Takvih radova je već bilo i dobijeni su zapanjujuće dobri rezultati. U zborniku radova [4] realizovano je više test-mreža sa tačnošću prostornih koordinata (mreže su sa stranama 3—5 km) od oko $\pm \sigma_x \approx \pm \sigma_y \approx \pm \sigma_z \approx \pm 3$ mm. Geodetski odsek Univerziteta New Castle će u junu mesecu realizovati prvo kontrolno merenje (nulto merenje) u progušćenoj trigonometrijskoj mreži Grčke sa projektovanom tačnošću od 10^{-7} za pojedine dužine. Cilj projekta je da se otkriju pravci i veličine pomeranja Zemljine kore na tom delu Grčke.

4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Cilj je ovog rada bio da na neki način upozna našu stručnu javnost sa mogućom primenom GPS-tehnologije u inženjerskoj geodeziji. Ona jeste nova i složena, ali je njena primena relativno laka i omogućava uspešno rešavanje pojedinih problema koji su se javljali u svakodnevnoj praksi. Rešavanje mreža

* dužine izmerene geodetskim metodama

velikih inženjersko-tehničkih objekata, određivanje pomeranje Zemljine kore zbog izgradnje velikih akumulacija, deformaciona merenja itd. u velikoj će meri biti olakšani primenom GPS-tehnologije. Ona daje velike mogućnosti veloj geodeziji i trebalo bi problemu njenog uvođenja u svakodnevnu praksu posvetiti posebnu pažnju. Posebno delikatan zadatak imaju obrazovne institucije (svih nivoa), koje treba da osposobe kadrove za primenu nove revolucionarne tehnologije.

LITERATURA

- [1] Wells, D.: Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates 1986.
- [2] King, R. W.; Masters, E. G.; Rizos, C.; Stolz, A.; Collins, J.: Surveying with Global Positioning System, Dummlers Verlag, Bonn 1987.
- [3] Ashenazi, V.: Seminar on the global positioning system, Univ. of Nottingham — Depart. of Civil Engineering, April 1988.
- [4] INTERNACIONALNI SIMPOSIUM: Global positioning systems, Queensland, Gold Coast, October 1988.
- [5] Cross, P. A.: Project of densification networks in Greece, University of New Casstle, 1989.

CONSIDERATION OF POSSIBILITIES OF GPS APLICATION IN ENGINEERING SURVEYING

The paper deals with the state of GPS technology pointing out the expected substantial changes resulting from its application. On the basis of the results of measurement of two distances (10 km and 2m) by differential method, the possibility of application of the GPS measurements in engineering surveying is emphasized.

Primljeno: 1989-12-22