

## MOGUĆNOSTI I STANJE GPS-TEHNOLOGIJE TE REZULTATI ISPITIVANJA PRIJEMNIKA ASHTECH NA KALIBRACIJSKOJ BAZI GEODETSKOG FAKULTETA U ZAGREBU

Asim BILAJBEGOVIĆ, Miljenko SOLARIĆ — Zagreb\*

*SAŽETAK: U ovom radu ispitivana je točnost statičke i kinematičke metode GPS-mjerenja, na osnovi usopredbe s dobivenim rezultatima MEKOMETROM ME 5000 i preciznim nivelmanom. Dobivena točnost u kinematičkom modu od  $\pm 3.92$  mm za prostorne dužine i  $\pm 1.05$  cm za visinske razlike potvrđuju perspektivnost ove metode u svim područjima geodezije. Statička metoda je pokazala izuzetno visoku točnost od 0,6 mm. Međutim, kako se radi o samo jednoj dužini (zbog ograničenog vremena raspolaganja s prijemnicima), ne može se izvući općeit zaključak o tako visokoj točnosti.*

### 1. UVOD

Danas se s pravom može konstatirati da GPS-metoda spada u osnovne metode uspostavljanja osnovnih državnih mreža i mreža u inženjerskoj geodeziji. Pojavom kinematičkog moda komercijalna upotreba GPS-tehnologije moguća je i u premjeru zemljišta, održavanju premjera, snimanju vodova, premjeru mora i rijeka, fotogrametriji za određivanje prostornih koordinata kamere u trenutku snimanja (eksponiranja) terena i sl. Na tržištu se pojavio cijeli niz proizvođača GPS-prijemnika, koji se razlikuju po tehničkim karakteristikama, kvaliteti, cijeni, težini i sl. Učestala su pitanja i dileme vodstva geodetskih poduzeća u pogledu kupovine, izbora, tehničkih karakteristika i mogućnosti pojedinih GPS-prijemnika. Zbog toga donosimo tabelarni prikaz suvremenijih GPS-prijemnika. Budući da je posebno interesantan kinematički mod, prikazana su konkretna mjerenja i postignuta točnost na bazi Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

### 2. KRATAK OPIS GLOBALNOG SISTEMA POZICIONIRANJA (GPS)

Globalni sistem pozicioniranja, s potpunim imenom NAVSTAR (Navigation System with Time and Ranging) — GPS, podijeljen je na kozmički segment, kontrolni segment i segment korisnika.

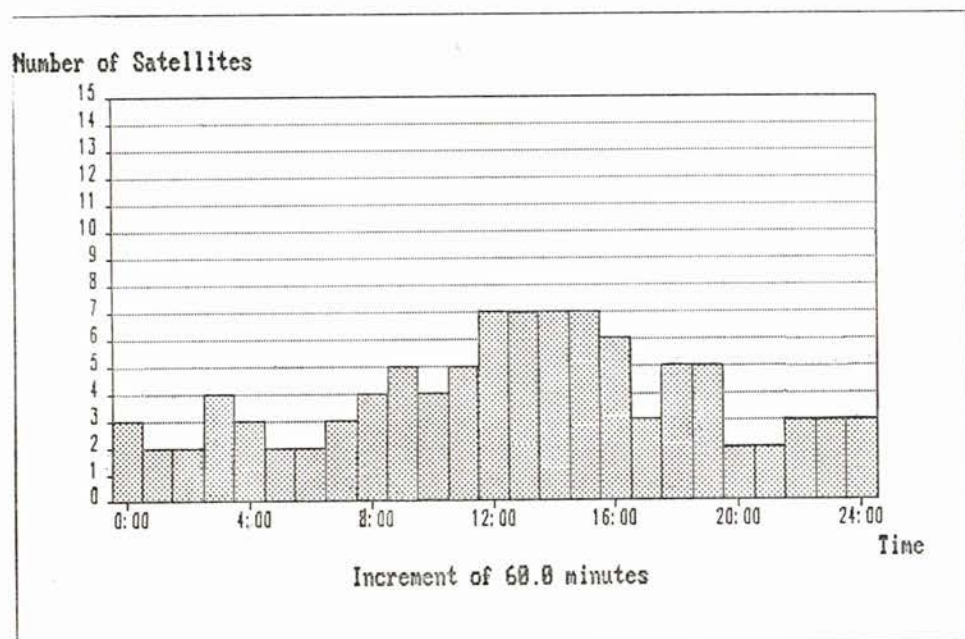
\* Prof. dr. Asim Bilajbegović, prof. dr. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26.

### 2.1. Kozmički segment

Kozmički će se segment na kraju sastojati od 18 satelita i jednog rezervnog. Masa satelita iznosi oko 850 kg, opskrbljeni su solarnim ćelijama s dvije oko 7 m<sup>2</sup> velike sunčane lepeze. Unutar tijela satelita smještena su dva cezij-ska ili rubidijska sata i jedan mikroprocesor. Operativni sateliti su ravnomjerno raspoređeni na šest putanja s razlikom u duljini ulaznih čvorišta od  $\Delta\Omega = 60^\circ$  i s nagibom putanje od  $i = 55^\circ$ .

Sideričko vrijeme obilaska satelita, po gotovo kružnoj putanji, iznosi 12 sati. Satelit se pojavljuje svakog dana ranije za 4 minute ili svakog mjeseca za oko 2 sata, zbog razlike između zvjezdanog i Sunčeva vremena. Visina satelita je oko 20200 km, a svakodnevna vidljivost pojedinog satelita iznosi 5 sati. Ravnomjernim rasporedom satelita konačno izgrađen sistem pružat će mogućnost da se u bilo koje vrijeme i na bilo kojoj točki Zemlje nalazi iznad horizonta najmanje 4 satelita.

Ovaj sistem će do 1991. osigurati trodimenzionalno pozicioniranje, određivanje brzina i kontinuirano vrijeme u svjetskom geodetskom sustavu s točnošću koja nikada do sada nije postignuta. Lansiranjem prvih šest satelita (14, 02, 16, 19, 17, 18) i kasnijim lansiranjem satelita svakih 60 dana može se predvidjeti rapidno povećanje iskorištavanja sistema. Današnja konstelacija od 15 satelita omogućava kontinuirano mjerenje vremena (bez prekida), te pozicioniranje i određivanje brzine za približno 12 sati svaki dan. Mogućnost opažanja satelita u Zagrebu za vrijeme trajanja eksperimenta daje sl. 1.



Sl. 1. Raspored satelita za vrijeme izvođenja eksperimenta (24. 05. 1990.)



### 2.1.1. Signali satelita

Oscilatori satelita proizvode osnovnu frekvenciju  $f_0 = 10,23$  MHz, čija stabilnost tokom dužeg vremena iznosi  $1 \cdot 10^{-14}$ . Cjelobrojnim multipliciranjem, tj.  $L_1 = f_0 \times 154 = 1575,42$  MHz i  $L_2 = f_0 \times 120 = 1227,60$  MHz, dobiju se frekvencije  $L_1$  i  $L_2$  u području gigaherca. Na noseće valove moduliraju se kodovi za mjerenje vremena puta signala satelita, zapravo informacije o putanji satelita i satu satelita. Modulacija se odvija tako da pri svakoj promjeni predznaka koda noseći val napravi skok u fazi za  $180^\circ$ . Za mjerenje vremena puta signala primjenjuju se dva koda, tzv. C/A (»clear acquisition«) ili S (»standard«), s frekvencijom  $f_0/10$  i vremenom ponavljanja od 1 msec i P (»precise«) kod s frekvencijom  $f_0$  i vremenom ponavljanja od 266,5 dana.

Informacije o putanji i satu satelita sadržane su u tzv. D-kodu (Daten-Code).

P-kod i D-kod modulirani su na oba noseća vala, dok je C/A-kod moduliran samo na nosećem valu  $L_1$  i fazno je pomaknut za  $90^\circ$ .

C/A-kod dostupan je i bit će dostupan svim korisnicima, dok P-kod vjerojatno neće biti dostupan za korisnike bez posebne dozvole.

## 2.2. Segment korisnika

Sam naziv dovoljno govori o biti ovog segmenta. Zapravo, pod tim se podrazumijevaju svi civilni i vojni korisnici koji primaju satelitske signale i iz njih dobivaju mjerene podatke. Naravno, prijem signala moguć je samo pomoću prijemnika. Na osnovi na tržištu izbačenih modela može se uspostaviti cijeli niz kriterija za procjenu prednosti i nedostataka pojedinih tipova instrumenata. Svaki prijemnik sadrži komponente za sakupljanje, djelimičnu obradu i prijenos mjerenih i obrađenih podataka. Za sva tri dijela postavljaju se visoki zahtjevi zbog terenskih uvjeta, i to u pogledu sigurnosti podataka mjerenja pri različitim meteorološkim uvjetima, transportabilnosti (težina, dimenzije, izvor energije, vrsta antene i sl.) i u pogledu jednostavnosti pri opsluživanju. Prijemnike razlikujemo prema vrsti antene (monopolne ili dipolne, spiralheliksne i mikrostripne), kontrolnoj jedinici, radiofrekvencijskom dijelu, odnosno mikroprocesoru, izvoru energije i vanjskoj memoriji. Svi ti dijelovi, izuzev antene, smješteni su unutar kućišta, mada neki prijemnici imaju ugrađenu antenu, npr. TRIMBLE 4000 ST.

### 2.2.1. Pregled instrumenata na tržištu

Ograničit ćemo se samo na geodetske prijemnike, koji simultano mjere faze nosećih valova na najmanje dva prijemnika, kako pri statičkoj, tako i pri kinematičkoj primjeni. Instrumente ćemo razvrstati u tri grupe: u tzv. beskodne instrumente, prijemnike s p-kodom i C/A-kodom i samo s C/A-kodom. Zbog brzog razvoja tehnologije tabelarni prikaz instrumentarija (tablica 2.2.1-1) treba shvatiti kao u ovom momentu autorima dostupnu informaciju. Autori raspoložu i cijenama pojedinih prijemnika, ali zbog korektnosti prema proizvođačima ne žele ih iznositi.

Tablica 2.1-1: Prikaz GPS-prijemnika po izboru autora

Tip	Proizvođač	Broj kanala	Mogućnost istovremenog opažanja satelita	Frekvencija	Kod	Kinetička primjena točnost	Posjeduje u Jugoslaviji ili opaska
GLS 2002	Istac Inc.	1 (3)	sve	L1, (L2)	—	—	—
TI 4100	Texas Instruments	1	4	L1, L2	P, C/A	ne	ne proizvodi se više
WM 102	Wild-Magnavox	7 (L1) 1 (L2)	6	L1, L2	P, C/A	trenutno ne, planira se	4 prijemnika
4000 SST*	Trimble	8 (L1), 8 (L2)	8	L1, L2	C/A	da, 1—2 cm	
LD-XII	Ashtech	12(L1), 12(L2)	12	L1, L2	C/A	da, 1 cm	Geodetski f.** 3 prijemnika
Wild 101	Wild-Magnavox	4	6	L1	C/A		
LG SS	Litton Aero Products	—	8	L1	C/A		
4000 ST	Trimble	8 (12)	8	L1	C/A	da, usporedljiva s statičkom	
S — XII	Ashtech	12	12	L1	C/A	da, 1 cm	
L — XII	Ashtech	12	12	L1	C/A	da, 1 cm	
Mini Ranger	Motorola Inc.	4	4	L1	C/A	da, 2 m	3 prijemnika
Mini mac model 2816AT	Litton Aero Service	—	8	L1, (L2)	C/A	da eca 1 cm	

\* Po posebno narudžbi 12 kanala.

\*\* AGG fakultet u Ljubljani je u međuvremenu nabavio 2 prijemnika.

### 2.3. Kontrolni segment

Zadaća kontrolnog segmenta jest određivanje putanje satelita, efemerida i upravljanje sistemom. Ovaj segment sastoji se od 5 stanica, i to: Colorado Springs, Hawaii, Ascensiom, Diego Garcia i Kwajalein. Koordinaciju obavlja stanica Kolorado Springs i ona se naziva Master-Control-Station (glavna kontrolna stanica). Rezultati određivanja putanje daju se korisnicima sistema u obliku efemerida, koje omogućuju računanje pozicije satelita za bilo koji vremenski trenutak. Pri tome razlikujemo: Broadcast-efemeride (ekstrapolirane na osnovi opažanja satelita) i precizne efemeride (koje se mogu dobiti naknadno). Više o tome u Hofmann-Wellenhof (1988).

## 3. REZULTAT ISPITIVANJA TOČNOSTI PRIJEMNIKA ASHTECH NA KALIBRACIJSKOJ BAZI GEODETSKOG FAKULTETA

Općenito metode mjerenja možemo podijeliti na:

— opsolutne statičke i kinematičke metode (BILAJBEGOVIĆ i ostali /1989/).

Za ispitivanje točnosti prijemnika ASHTECH imali smo na raspolaganju dva jednofrekvencijska prijemnika samo od 9 do 14 sati, 24. 05. 1990. Međutim, raspored satelita nije omogućavao opažanja prije 11 sati. Zbog toga smo se odlučili na relativna određivanja, i to:

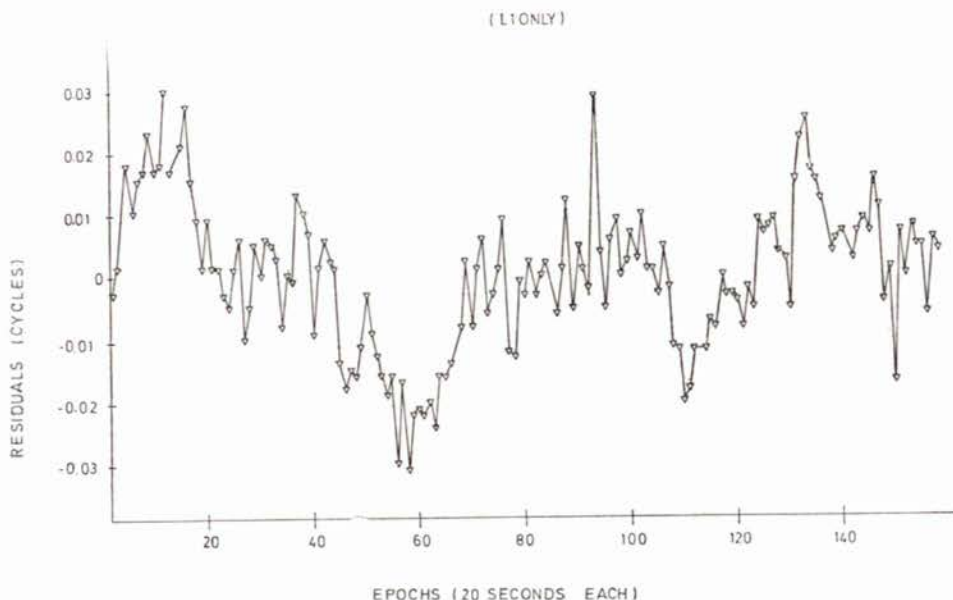
- statičkom metodom i
- kinematičkom metodom.

Baza za kalibraciju elektrooptičkih daljinomjera Geodetskog fakulteta nalazi se na nasipu sigurnosnog kanala Sava-Odra, pokraj Velike Gorice. Stupovi baze solidno su stabilizirani, termički su izolirani i završavaju s ugrađenom pločom i centralnim vijkom. Za navedena ispitivanja koristili smo se stupovima na međusobnoj udaljenosti od 100 m, i to na dijelu baze od 0 do 1000 metara. Duljinu ukupne baze i pojedinih točaka odredio je prof. dr. N. Solarić na osnovi višestrukih mjerenja MEKOMETROM ME 5000. Visinske razlike između glava centralnih vijaka stupova određene su na osnovi dvostrukog preciznog nivelmana. Postignuta točnost dužina određenih MEKOMETROM ME 5000 dana je u tablici 3.1. i kreće se u granicama od 0,0836 do 0,1345 mm, te nesumnjivo predstavlja visoko kvalitetan komparator za ispitivanje točnosti mjerenih podataka GPS prijemnika.

### 3.1. Relativna statička metoda

Relativnu statičku metodu karakterizira mirovanje prijemnika na krajnjim točkama baze i velik broj prekobrojnih mjerenja. Obično se vrijeme registracije uzima oko pola sata, a vremenski razmak uzastopnih prijema signala oko 20 sekundi. Antene prijemnika postavljene su na nultom stupu i stupu broj 10 na udaljenosti od 1000 m. Razlika između mjerenja navedene udaljenosti s MEKOMETROM ME 5000 i GPS-metodom iznosila je svega +0,6 mm. Budući da tvornica za GPS statičku metodu daje točnost od 3—5 mm  $+ 1 \cdot 10^{-6}$ , a za MEKOMETAR ME 5000  $0,2 + 0,2 \cdot 10^{-6}$ , dobivena razlika potvrđuje visoku točnost GPS-metode. Istina, vrijeme registracije iznosila je oko 50 minuta (sl. 1). Točnost metode pokazuju i popravke izmjerenih faznih raz-





Slika 2. Popravci faznih razlika izraženi u jedinicama punog kruga

lika signala na frekvenciji  $L_1$  za pojedine satelite. Za jedan od satelita, koji je bio vidljiv za cijelo vrijeme opažanja, prikazane su popravke faznih razlika nakon izjednačenja u jedinicama punog kruga (*cycles*) (sl. 1). Očito, popravke se kreću u granicama od  $-0,03$  do  $+0,03$  valne duljine. Kako valna duljina za frekvenciju  $L_1$  iznosi oko 19 cm, to znači da se popravke kreću u rasponu od  $-0,57$  do  $+0,57$  cm. Zbog toga je i postignuta tako visoka točnost. Osim toga, značajan izvor pogrešaka na kratkim dužinama jest ekscentričnost elektroničkog centra antena (3—5 mm). Neki od proizvođača, kao npr. ASHTECH, izrađuju antene s ugrađenom magnetnom iglom u svrhu orijentacije antene i smanjenja pogrešaka pri relativnim metodama određivanja. Poznata je činjenica da točnost određivanja elipsoidnih (a ne ortometrijskih visinskih razlika) visinskih razlika GPS-metodama nije tako visoka kao prostornih dužina. Točnost za većinu visokokvalitetnih prijemnika iznosi  $1 \text{ cm} + 1 \cdot 10^{-6}$ . Razlika visinskih razlika krajnjih točaka baze određena na osnovi preciznog nivelmana i GPS-mjerenja iznosila je  $-11 \text{ mm}$ . Poznato je da te visine pripadaju različitim visinskim sustavima: GPS-visine odnose se na plohu elipsoida, a visine dobivene na osnovi nivelmana odnose se na plohu geoida. Visinske razlike trebale bi u slučaju istog otklona vertikale na krajnjim točkama biti jednake.

### 3.2. Relativna kinematička metoda

Najperspektivnija metoda u primjeni GPS-prijemnika jest tzv. kinematička metoda. Karakterizira je mogućnost određivanja trajektorije pokretne antene prijemnika.

U svrhu ispitivanja točnosti ove metode koristili smo se s 10 stupova na kalibracijskoj bazi. Izabrano je trajanje mjerenja oko 1 minute po točki, s

vremenskim razmakom prijema satelitskih signala od 5 s. Znači, po svakoj točki bilo je 12 registracija, a za to vrijeme jedan od prijemnika bio je stacioniran na točki 0. Kao neophodan startni vektor primijenjen je raspon određen prethodno opisanom statičkom metodom. Za računanje razlika koordinata u odnosu na fiksno stajalište primijenjena je metoda dvostrukih faznih razlika (BILAJBEGOVIĆ i drugi /1989/), a za otkrivanje *cycle slipsa* trostruke fazne razlike (HOFMANN WELLENHOF /1988/). Prostorne dužine iz GPS-mjerenja uspoređene su s mjerenim vrijednostima MEKOMETROM ME 5000 (tablica 3.2-1). Pod pretpostavkom pravih (apsolutno točnih) vrijednosti dobive-

Tablica 3.2—1. Točnost i usporedba rezultata mjerenih MEKOMETROM ME 5000 i GPS-prijemnicima ASHTECH relativnom kinematičkom metodom

Broj stupa	Približna duljina u odnosu na multi stup	Srednja pogreška dužine određene mekometrom 5000	Razlika dužina: ME 5000 — GPS
	[m]	[mm]	[mm]
0	0	—	—
1	100	0,0835	-2,5
2	200	0,0861	+1,0
3	300	0,0895	-1,7
4	400	0,0936	+1,7
5	500	0,0979	-4,9
6	600	0,1036	-1,0
7	700	0,1096	-2,7
8	800	0,1168	-8,6
9	900	0,1258	-1,8
10	1000	0,1345	-5,6
			$\Sigma = -22,5$

nih MEKOMETROM (što potvrđuju njihove srednje pogreške) izračunana je srednja pogreška prostorne dužine određene GPS-metodom.

$$m = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n}} = \pm \sqrt{\frac{153,89}{10}} = \pm 3,92 \text{ mm} \quad (3.2.-1.)$$

Dobivena točnost od 3,92 mm je oko dva i pol puta bolja od deklarirane točnosti koju daje tvornica.

Radi ispitivanja točnosti visinskih razlika proveden je precizni nivelman i dobivene su visinske razlike između vrhova ugrađenih centralnih vijaka na stupovima. Antene GPS-prijemnika stavljene su na Wildove podložne ploče i nije se svaki put mjerio položaj podnožnih vijaka, već se za visinu antene uzela srednja vrijednost. Znači da visina antene može biti pogrešna za pomak podnožnih vijaka (oko 5 mm).

Također, kao kod statičke, tako se i kod kinematičke metode dobivaju manje točne visinske razlike u odnosu na prostorne dužine (tablica 3.2-2) Usporedbom obje metode, dobivena je točnost visinskih razlika od

Tablica 3.2—2: Usporedba visinskih razlika određenih preciznim nivelmanom i GPS-prijemnicima ASHTECH u kinematičkom modu

Stup broj	Visinska razlika iz preciznog nivelmana [m]	Visinska razlika iz GPS mjerenja u kinem. modu [m]	Razlika 1 - 2 [cm]
	1	2	3
0	+0,0721	+0,091	+1,89
1	+0,0762	+0,077	-0,08
2	+0,0624	+0,081	-1,86
3	+0,1060	+0,097	+0,90
4	+0,0772	+0,072	+0,52
5	+0,0810	+0,084	-0,30
6	+0,0872	+0,084	+0,32
7	+0,1059	+0,115	-0,91
8	+0,0785	+0,092	-1,35
9	+0,1143	+0,112	+0,23
10			$\Sigma = -0,64$

$$m = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n}} = \pm \sqrt{\frac{11,01}{10}} = \pm 1,05 \text{ cm.} \quad (3.2-2.)$$

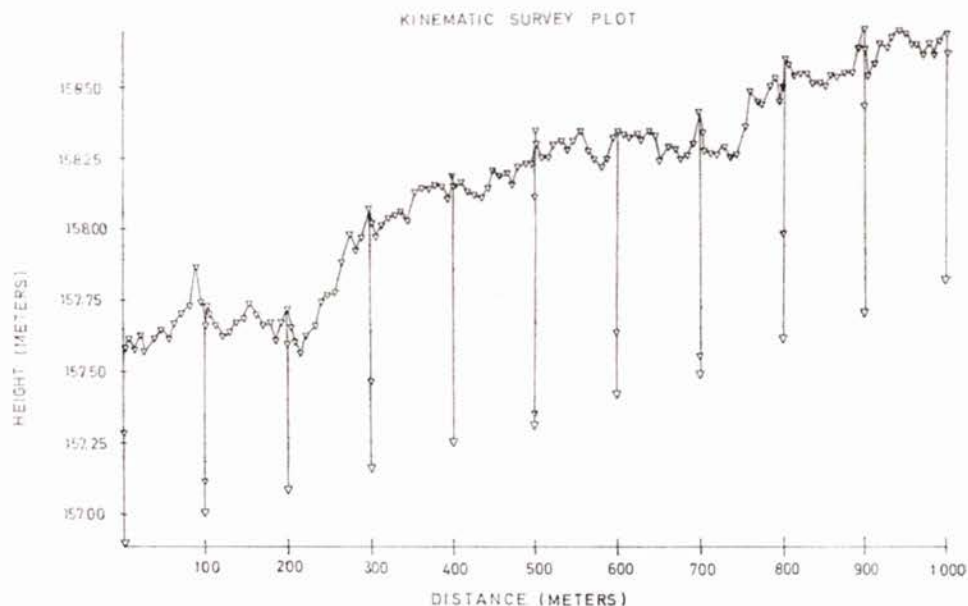
I ova je točnost u granicama deklariranim od strane tvornice. Presjek u vertikalnoj ravnini i položaj antene prilikom mjerenja na stupovima i tokom prenosa daje sl. 3.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovi provedenih ispitivanja GPS-metode na bazi za kalibraciju elektrooptičkih daljinomjera Geodetskog fakulteta može se konstatirati da je postignuta izuzetno visoka točnost, kako kinematičkom, tako i statičkom metodom.

Dok je točnost kinematičke metode 1988. godine iznosila oko 0,5 metara, na bazi je ostvarena točnost prostornih dužina od  $\pm 3,92$  mm. To upućuje na zaključak da će kinematička metoda postati u budućnosti najperspektivnija metoda u svim granama geodezije, i to zbog jednostavnosti, brzine, točnosti i ekonomičnosti.





Slika 3. Vertikalni presjek položaja antena za vrijeme izvođenja eksperimenta

## 5. ZAHVALA

Zahvaljujemo korporaciji SAGEM, osobno gospodinu dr. Cliveu De La Fuentu na ustupku GPS prijemnika, te dr. N. Solariću na ustupanju podataka mjerenja dobivenih MEKOMETROM ME 5000.

## LITERATURA

- Bilajbegović A., Solarić M., Bačić Ž., Hečimović Ž. (1989): Globalno pozicijsko određivanje — osnova i primjena, *Geodetski list*, 1989, 7—9, 231—254.
- Hofmann-Wellenhof B. und Lichtenegger H. (1988): *GPS Von der Theorie zur Praxis*, *Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischer Universität Graz*, Folge 63, seiten 1—144.
- Trimble Navigation (1990): Quote TQ 1187 University of Zagreb, Faculty of Zagreb, page 1—24.

POTENTIAL AND STATE OF GPS TECHNOLOGY, AND THE RESULTS OF  
TESTING THE ASTECH RECEIVER AT THE CALIBRATION BASE OF  
FACULTY OF GEODESY IN ZAGREB

In this paper the accuracy of static and kinematic modes is examined on the basis of a comparison with the results achieved by the MECOMETER ME-5000 and the precise leveling. The accuracy obtained in the kinematic mode was 3,92 mm for distances and 1,05 for differences of heights, which approved the prosperity of this method in all branches of geodesy. The static mode showed an extraordinary high accuracy of 0,6 mm. However, only one distance was measured (because of limited time availability of equipment), hence it is impossible to make a general conclusion that the accuracy is always so high.

Priljeno: 1990-10-11