

UDK 528.517.8:681.783.2:621.396.67:551.524

Izvorni znanstveni članak

## Mogućnost nezavisne kontrole duljine kalibracijske baze s pomoću GPS-a

Nikola SOLARIĆ<sup>1</sup>, Miljenko SOLARIĆ<sup>2</sup>, Đuro BARKOVIĆ<sup>3</sup>,  
Nikola ŠOŠKO<sup>4</sup> – Zagreb

*SAŽETAK.* U radu je opisana izmjera kalibracijske baze Geodetskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera s pomoću GPS-uređaja. Mjerilo se s četiri GPS-prijamnika Trimble 5700 na bazi kraj Lučkoga, te su tako određeni rasponi između stupova baze. Osim toga određene su razlike između duljina izmjerenih s 2 para GPS-uređaja i duljina baze, koje su prethodno određene preciznim elektroničkim daljinomjerom Leica TC 2003.

Kako bi se otklonio utjecaj ekscentriciteta GPS-antena, opažano je s antenom usmjerenom prema sjeveru, a i zamijenjenim mjestima GPS-antena na stajalištima. Razlika tako određenih duljina i duljina izmjerenih preciznim elektroničkim tahimetrom bila je na duljini od 100 m **0,1 mm**, na 500 m **0,3 mm**, a na 1000 m **0,1 mm**. Kao što se vidi, te su razlike duljina **vrlo male**, a do njih se došlo mjerenjem na dva potpuno nezavisna načina. To je ujedno i kontrola da su sva mjerenja pravilno izvedena. Temperatura zraka ima neznatan utjecaj na GPS-mjerenja, te su GPS-mjerenja dobra nezavisna kontrola da li je dobro izmjerena frekvencija u daljinomjeru, a i temperatura zraka i tlak zraka za vrijeme preciznih mjerenja Leicom TC 2003 na kalibracijskoj bazi. Istina je da se na GPS-mjerenja mora potrošiti mnogo više vremena nego se to mora potrošiti na mjerenja preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2003. Osim toga ta su mjerenja dobra provjera (kontrola) GPS-uređaja kao i softvera s kojim su mjerenja obrađivana, da se s njima dobivaju dobri rezultati mjerenja.

*Ključne riječi:* kalibracijska baza, GPS-mjerenja, precizni elektronički tahimetar Leica TC 2003.

<sup>1</sup> Prof. emer. dr. sc. Nikola Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, nikola.solaric@geof.hr,

<sup>2</sup> prof. dr. sc. Miljenko Solarić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, miljenko.solaric@geof.hr

<sup>3</sup> prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, djuro.barkovic@geof.hr

<sup>4</sup> Nikola Šoško, dipl. ing. geod., Geofoto, Buzinski prilaz 28, 10010 Zagreb (Buzin), Hrvatska, nikola@geofoto.hr.

## 1. Uvod

Na bazi smo najprije izmjerili duljine između stupova baze preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2003 u svim mogućim kombinacijama naprijed i natrag. Zatim smo s pomoću GPS-uređaja odrediti duljinu od 100 m, 500 m i 1000 m. Nakon toga izračunali smo razlike duljina koje smo odredili s pomoću GPS-uređaja i duljina koje smo dobili iz preciznih mjerenja preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2003. Te razlike bile su vrlo male te smo zaključili da se s pomoću GPS-a može čak kao s potpuno drugom nezavisnom metodom mjerenja kontrolirati duljina neke stranice izmjerene preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2003.

## 2. Mjerenje baze preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2003

Kalibracijska baza za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera Geodetskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu smještena je na nasipu odteretnoga kanala kraj Lučkoga u blizini Zagreba (Solarić 1992, Solarić i dr. 1992, 1998, 1999). Ona je izgrađena 1982. godine. Precizno mjerenje baze izvedeno je do sada više puta, i to:

- invarskim žicama 1984. godine (Novaković i dr. 1985),
- Mekometrom ME 3000 1986. godine,
- Mekometrom ME 5000 1988. i 1996. godine (Solarić i dr. 2001) i (Solarić i dr. 2002).

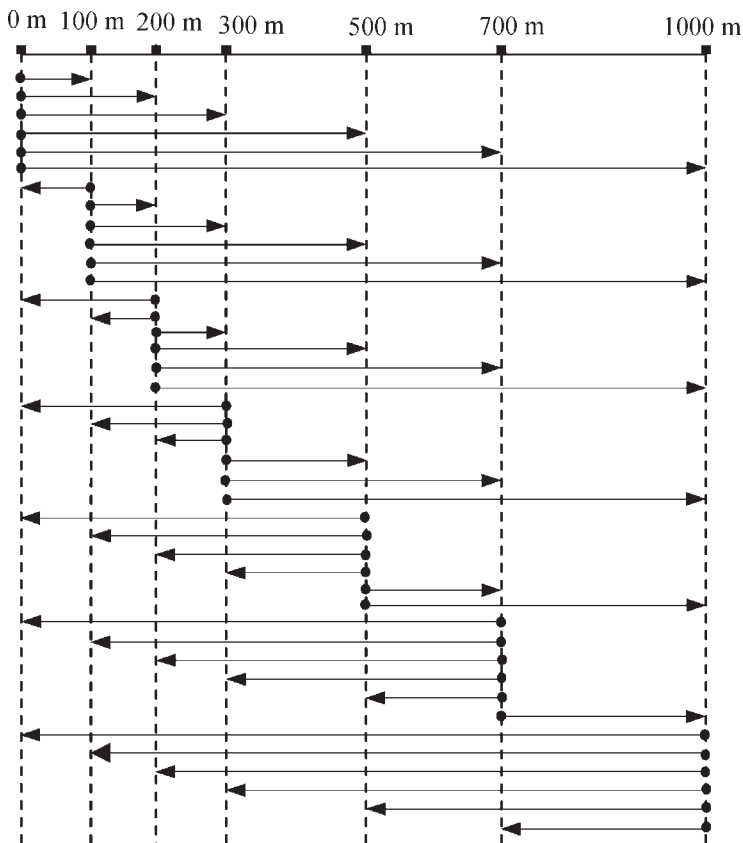
Posljednje mjerenje baze izvedeno je preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2003 16. 06. 2006. Prije izlaska na bazu s Leicom TC 2003 u laboratoriju je s pomoću GPS-uređaja kalibriran frekvencijom s preciznošću  $1:10^{-9}$  (Solarić i dr. 2004, 2003), te je izmjerena frekvencija u daljinomjeru Leica TC 2003 s pomoću uređaja iz Bonna (Schauarte i dr. 1997, 1998). Na taj način precizno je određena multiplikacijska konstanta daljinomjera. Osim toga u laboratoriju Geodetskoga fakulteta na automatiziranom komparatoru za nivelmanske letve ispitana je veličina periodijske pogreške daljinomjera u preciznom elektroničkom tahimetru Leica TC 2003.

Na bazi su mjerene sve moguće kombinacije raspona stupova između stupova 0, 100, 200, 300, 500, 700 i 1000 m naprijed i natrag s TC 2003 (slika 1). Svaka duljina mjerena je 5 puta u preciznom modu (načinu) mjerenja daljinomjera, u smjeru naprijed, a također i u smjeru natrag. Tijekom mjerenja duljina elektrooptičkim daljinomjerom mjereno je stanje zraka:

- temperatura zraka s pomoću termometra pod pločom za zaštitu od sunčanih zraka, s očitavanjem na  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- tlak zraka s pomoću tlakomjera s očitavanjem na  $0,1\text{ mbar}$  i
- vlažnost zraka s očitavanjem na  $1\%$ .

Te veličine mjerene su uz daljinomjer i uz prizmu.

Mjerenju temperature zraka posvećena je velika pozornost, te je tako mjerena temperatura zraka i elektroničkim termometrom. Poslije se temperatura izmjerena elektroničkim termometrom pokazala pogrešnom i za  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , te su ta mje-



Slika 1. Grafički prikaz kombinacija duljina koje su mjerene s pomoću preciznog elektroničkog tahimetra TC 2003 za vrijeme preciznog određivanja duljina između stupova kalibracijske baze Geodetskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

renja temperature izbačena. Do te pogreške dolazilo je vjerojatno zato što uz elektronički termometar Thommen (Meteo Station HM30) nije bio ugrađen ventilator. Tijekom mjerenja duljina preciznim elektroničkim tahimetrom Leica TC 2003 temperatura zraka bila je u području od 23 °C do 29 °C i tlak zraka oko 1003 mbar. Prosječna standardna odstupanja sredina izmjerenih raspona stupova vide se u tablici 1, a prikazana su i grafički na slici 2.

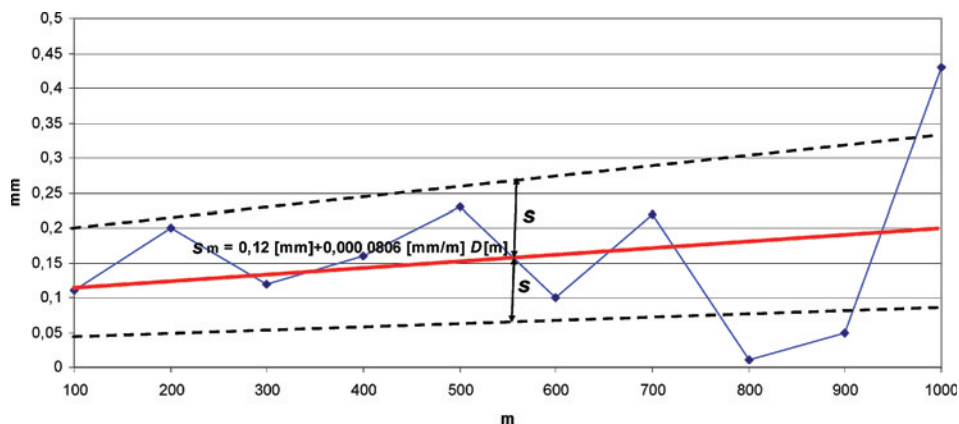
Osim toga izračunata je i jednadžba regresijskog pravca prosječnih standardnih odstupanja sredina duljina izračunatih iz mjerenja naprijed i natrag, koja glasi:

$$s_m = 0,12 \text{ [mm]} + 0,000 \text{ 0806 [mm/m]} \cdot D \text{ [m]},$$

gdje je  $D$  veličina mjerene duljine u metrima.

Tablica 1. *Prosječna standardna odstupanja sredina duljina između stupova iz mjerenja naprijed i natrag izmjerenih s pomoću TC 2003 (na udaljenostima od 100 m do 1000 m).*

Duljina $D$ [m]	Prosječna vrijednost standardnih odstupanja sredine (iz mjerenja naprijed i natrag) [mm]
100	0,11
200	0,20
300	0,12
400	0,16
500	0,23
600	0,10
700	0,22
800	0,01
900	0,05
1000	0,43

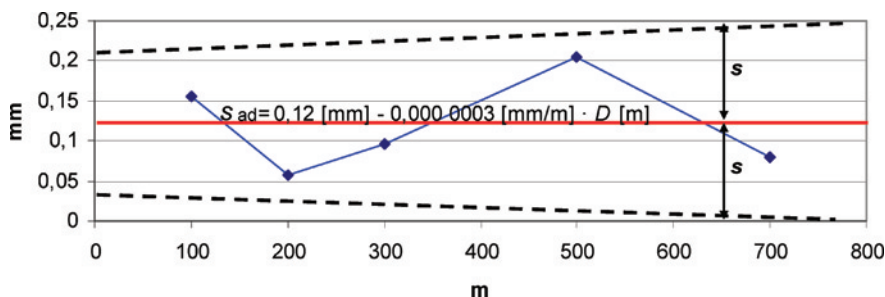


Slika 2. *Grafički prikaz prosječnih vrijednosti standardnih odstupanja sredina mjerenih duljina izmjerenih s pomoću TC 2003 (iz mjerenja naprijed i natrag) i jednadžbe regresijskog pravca:  $s_m = 0,12 \text{ [mm]} + 0,000 \text{ 0806 [mm/m]} D \text{ [m]}$ .*

Nakon izjednačenja svih izmjerenih kombinacija duljina između stupova na bazi izračunato je da su:

- standardna odstupanja sredina duljina mjerenih naprijed i natrag nakon izjednačenja duljina na bazi i jednadžba regresijskog pravca:

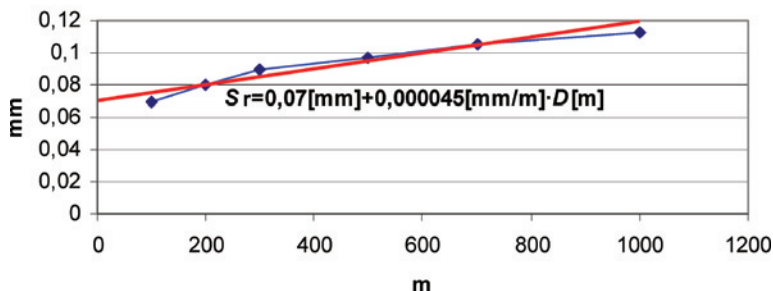
$$s_{ad} = 0,12 \text{ [mm]} - 0,000 \text{ 0003} \cdot \text{ [mm/m]} \cdot D \text{ [m]} \text{ (slika 3a),}$$



Slika 3a. Grafički prikaz standardnih odstupanja sredina duljina određene iz mjerenja naprijed i natrag s pomoću TC 2003 dobivenih nakon izjednačenja duljina na bazi, kao i jednačba regresijskog pravca:

$$s_{ad} = 0,12 [mm] - 0,000\,0003 [mm/m] \cdot D [m].$$

### Standardna odstupanja određivanja raspona stupova od prvog stupa



Slika 3b. Standardna odstupanja određenih raspona stupova od prvog stupa, kao i njihova jednačba regresijskog pravca:  $s_r = 0,07 [mm] + 0,000045 [mm/m] \cdot D [m]$ .

- standardna odstupanja određivanja raspona stupova od prvog stupa baze bila su na rasponu od 100 m **0,07** mm, a na 1000 m **0,11** mm (vidi sliku 3b) i
- adicijska korekcija daljinomjera  $a = -0,11$  mm, određena sa standardnim odstupanjem 0,09 mm.

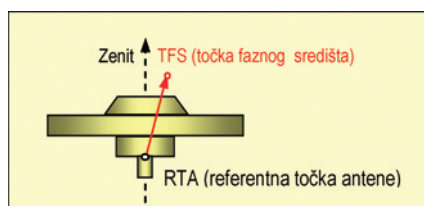
U prospektu za Leicu TC 2003 piše da ima točnost 1 mm + 1 ppm. Međutim, postignuta preciznost tim daljinomjerom na bazi za vrijeme tih mjerenja znatno je bolja, a vjerojatno i točnost, jer je izmjerena frekvencija u daljinomjeru s preciznošću boljom od  $1 \cdot 10^{-8}$ , tj. vrlo je precizno određena multiplikacijska konstanta daljinomjera. Osim toga u laboratoriju je određena i periodijska pogreška daljinomjera, a na kalibracijskoj bazi određena je i adicijska korekcija sa standardnim odstupanjem 0,09 mm. Zato je praktično na bazi nakon izjednačenja duljina postignuta približno jednaka preciznost i točnost mjerenja duljina s TC 2003 kao i određivanja raspona između stupova. Postignuta preciznost određivanja duljina između stupova baze s Leica TC 2003 samo je malo slabija od one postignute (također na našoj bazi) s Mekometrom ME 5000 1996. godine (Solarić i dr. 2001, 2002). Budući da se više ne proizvodi precizni daljinomjer Mekometar ME 5000, a

postignuta točnost s TC 2003 samo je malo slabija od točnosti Mekometrom, ponovnu kontrolu mjerenja duljina naše baze (etalona) moći ćemo izvoditi s pomoću Leice TC 2003.

Odmah na početku može se spomenuti da su već 1990. godine prije, kupnje GPS-uređaja Ashtech, na bazi Geodetskoga fakulteta u Zagrebu testirani GPS-prijamnici te tvrtke (Bilajbegović, Solarić 1991). Unatoč tome što u tom trenutku nije bila kompletna konstelacija GPS-satelita, a ni GPS-prijamnici takve kvalitete kao što su danas, pa ni softver, dobiveno je da je razlika udaljenosti između stupova 0 i 1000 m izmjerenih preciznim elektroničkim daljinomjerom Mekometar Me 5000 i GPS-prijamnicima bila samo 0,6 mm.

### 3. Točna mjerenja s pomoću GPS-a

Točnost i preciznost mjerenja GPS-om znatno je povećana zahvaljujući sve boljim konstrukcijama prijamnika i softvera. Tako se danas u točnijim mjerenjima treba računati i s ekscentricitetom GPS-antena, tj. da se referentna točka antene (RTA) (mehanička os antene) i srednji fazni centra (SFC) ne poklapaju (slika 4). Do toga dolazi jer zaostajanja primanja signala u GPS-antenama nisu ista u svim smjerovima, nego zaostajanje u anteni ovisi o smjeru iz kojih dolazi GPS-signal.



Slika 4. Definicija idealne antene.

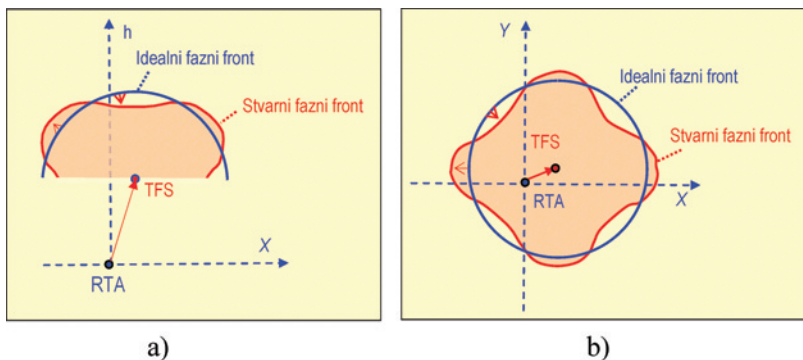
Zato kod točnijih mjerenja treba uzeti u račun i elektromagnetsko ponašanje točke primanja GPS-signala na anteni (tj. točke faznog središta – TFS). Naime, ta točka faznog središta:

*nije mehanička točka, ni stabilna, niti homogena, a niti identična za frekvencije L1 i L2.*

Tako će točka faznog središta (TFS) antene mijenjati svoj položaj s promjenom smjera primanog signala s GPS-satelita po azimutu, elongaciji i frekvenciji primanih radio valova.

U idealnom slučaju fronta faze primanih signala bila bi pravilna sfera (na slici 5 označeno plavom bojom). Međutim, u stvarnosti, ploha realnih faza primanih valova je ploha nepravilnog oblika (na slici 5 označeno crvenom bojom), koja je ovisna:

*o azimutu i o elevaciji primanih radiovalova s GPS-satelita, kao i o njihovoj frekvenciji.*



Slika 5. Definicija realne antene: a) ovisnost fazne pogreške o elevaciji (nacrt – u vertikalnoj ravnini), b) ovisnost fazne pogreške o azimutu (tlocrt – u horizontalnoj ravnini) pri elevaciji npr.  $12,5^\circ$ .

Ta ploha stvarnih faza primanih radiovalova s GPS-satelita je nepravilna, i prikazana je na slici 5 nacrtom (tj. presjekom u vertikalnoj ravnini) i tlocrtom (tj. presjekom u horizontalnoj ravnini pri elevaciji oko  $10^\circ$ ).

Nakon 1990-ih godina velik broj autora posvetio je posebnu pozornost ispitivanju ekscentričnosti GPS-antena. Tako su u radu (Görres, Cambel, Becker 2004) izloženi rezultati ispitivanja GPS-antena Leica AT303 u 5 institucija u Njemačkoj za frekvencije L1 i L2, koji nisu posve identični, ali se uglavnom podudaraju. Osim toga ispitivali su Trimblrove GPS-antene, među ostalima i antenu Trimble Zephyr Geodetic (slika 6). Taj je tip antene korišten i pri izmjeri na bazi Geodetskoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

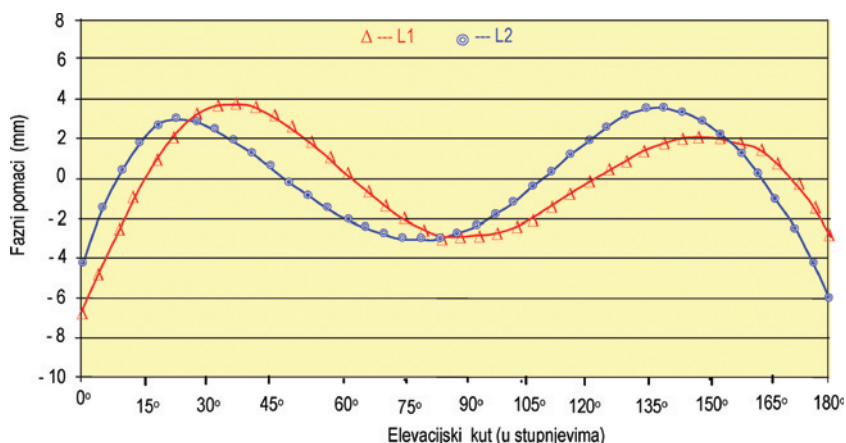


Slika 6. GPS-antena Trimble Zephyr Geodetic.

Mjerenjem su došli do podataka s pomoću kojih je na grafikonu na slici 7 prikazana ovisnost faznih pomaka o elevacijskom kutu za frekvenciju L1 i L2 GPS-antene Trimble Zephyr Geodetic. Iz toga grafikona vidi se da je pomak faze:

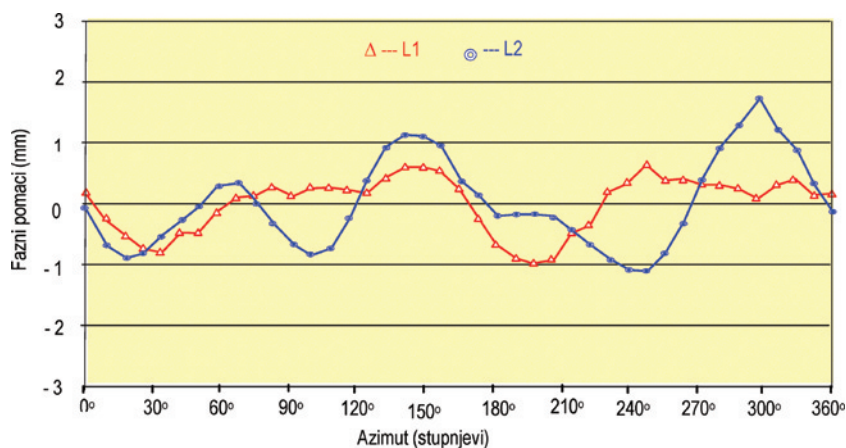
- u zenitu (tj. na elevacijskom kutu  $90^\circ$ ) za obje frekvencije oko -3 mm,
- na elevacijskoj udaljenosti oko  $30^\circ$  i  $145^\circ$  oko 2 mm do blizu 4 mm i
- na elevacijskoj udaljenosti oko  $0^\circ$  i  $180^\circ$  (tj. pri horizontu) između -7 mm i -3 mm.





Slika 7. Fazni pomaci u ovisnosti o elevaciji za frekvenciju L1 i L2 GPS-antene Trimble Zephyr Geodetic (prema Görres, Campbell, Becker 2004).

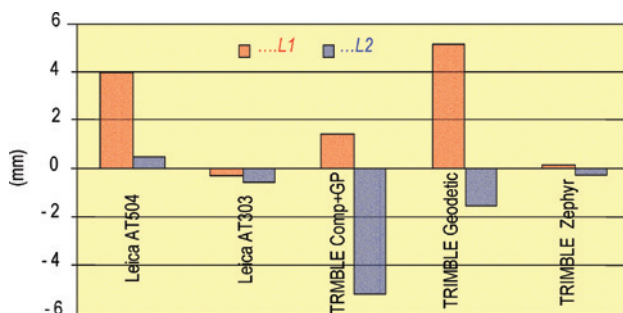
Ti su autori također došli do podataka kojima je na slici 8 iscrtan grafikom faznih pomaka u ovisnosti o azimutu na elevaciji  $12,5^\circ$  za obje frekvencije GPS-antene Trimble Zephyr Geodetic. Iz toga grafikona vidi se da su ti pomaci kreću u granicama od oko -1 mm do blizu +2 mm, ali da ih je znatno najveći broj ispod 1 mm.



Slika 8. Fazni pomaci u ovisnosti o azimutu na elevaciji  $12,5^\circ$  za frekvencije L1 i L2 GPS-antene Trimble Zephyr Geodetic (prema Görres, Campbell, Becker 2004).

U radu (Görres, Campbell, Becker 2004) izrađen je grafički prikaz (na slici 9) ostataka nakon upasavanja uzoraka za oba parametra za frekvencije L1 i L2 različitih tipova GPS-antena. Iz toga grafičkog prikaza vidi se da su ostaci za obje frekvencije antene Trimble Zephyr Geodetic najmanje i da iznose samo oko





Slika 9. Ostaci nakon prilagođavanja za frekvenciju L1 i L2 različitih tipova GPS-antena (prema Görres, Campbell, Becker 2004).

0,1 mm, a za neke druge tipove antena dosežu čak 5 mm. To dakako govori o visokoj kvaliteti GPS antena u pogledu varijacija faznog centra antena, koje smo koristili na mjerenju na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta u Zagrebu.

#### 4. Mjerenje GPS-prijamnicima na kalibracijskoj bazi za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera

Kalibracijska baza Geodetskoga fakulteta u Zagrebu nalazi se kraj Lučkog na starom nasipu odteretnoga kanala Sava-Odra, a horizont je gotovo čist i nije bilo multipath efekata tako da je za vrijeme opažanja GPS-om elevacijska maska bila 10°. Mjerenje je na frekvenciji L1 i L2.

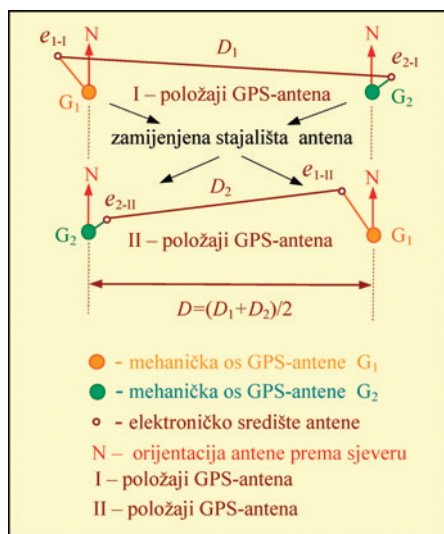
Na kalibracijskoj bazi mjereno je s 4 GPS-prijamnika Trimble 5700 i 4 antene Trimble Zephyr Geodetic, dana 02. 06. 2006. i 28. 06. 2006. U svakom položaju antene mjereno je približno 20 minuta, a interval zapisivanja podataka bio je 1 s. Na stupu 0 kalibracijske baze postavljen je jedan prijamnik iz para GPS-prijamnika s njegovom antenom usmjerenom prema sjeveru s pomoću magnetske igle. Na stup 100 postavljen je drugi GPS-prijamnik iz para, s njegovom antenom također usmjerenom prema sjeveru s pomoću magnetske igle. Nakon mjerenja GPS-ima od 20 minuta GPS-antena s prijamnicima zamijenjena su stajališta. Mjerenja su obrađena s paketom programa TGO – Trimble Geomatics Office. Tako je to učinjeno i za raspone između stupova na udaljenosti 500 m i 1000 m.

##### 4.1 Oslobođanje utjecaja srednjega faznog pomaka GPS-antena (ekscentriciteta GPS-antena) tijekom mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi

Tijekom mjerenja GPS-uređajima na kalibracijskoj bazi može se osloboditi utjecaja pomaka faznog središta GPS-antena na dva načina (u daljnjem tekstu to ćemo skraćeno zvati ekscentricitet antena):

- Jedan mogući način oslobođanja utjecaja ekscentriciteta GPS-antena sastoji se u tome da se s parom GPS-uređaja mjeri istodobno na dva stupa baze s antenama usmjerenima prema sjeveru, a zatim da se antenama zamijene stajališta i također da se orijentiraju prema sjeveru.

Izračunata srednja vrijednost duljine između stupova kalibracijske baze iz rezultata mjerenja, prije zamjene stajališta i nakon nje, bit će oslobođena utjecaja ekscentriciteta antena (slika 10). Pritom se pretpostavlja da je duljina  $D$  znatno veća od ekscentriciteta, na primjer 1:10 000 ili više.



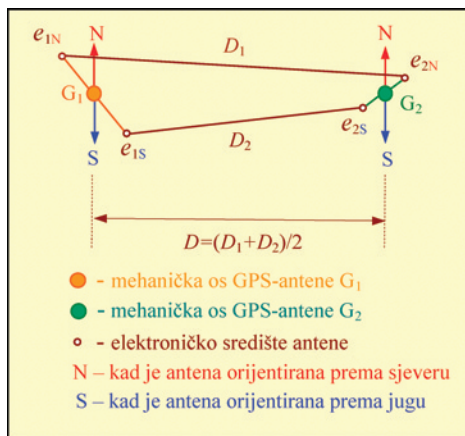
Slika 10. Poništavanje utjecaja ekscentriciteta GPS-antena, kad se zamijene stajališta antena i kad se uzme za pravu duljinu između stupova srednja vrijednost iz ta dva istodobna mjerenja.

- b) Drugi način oslobađanja utjecaja ekscentriciteta GPS-antena sastoji se u tom da se na obadva stupa baze istodobno jedanput GPS-antena usmjerenim prema sjeveru i zatim drugi put antenama usmjerenima na jug.

Izračunata srednja vrijednost duljine između stupova iz rezultata mjerenja dobivena iz mjerenja s usmjerenim GPS-antena prema sjeveru i zatim prema jugu bit će oslobođena utjecaja ekscentriciteta antena (slika 11). To je vrlo slično kao za ispitivanja poligonalnog pribora za prisilno centriranje s pomoću pomoćne točke (Solarić M. 1968). Pritom se pretpostavlja da je duljina  $D$  znatno veća od ekscentriciteta, na primjer 1:10 000 ili više. Metoda “b” ima prednost pred metodom “a” pri mjerenju u mreži, a i na bazi, jer GPS-uređaji ne trebaju mijenjati mjesta, pa je metoda jednostavnija u praktičnoj primjeni.

Kako bi se GPS-mjerenja mogla uporabiti za kontrolu duljina između stupova komparacijske baze, mora se posvetiti posebna pozornost uklanjanju pogrešaka izazvanih stvarnim pomacima faznih frontova primanih radiovalova odaslanih sa satelita uzrokovanih elevacijom, azimutom i frekvencijom.

Kako se istodobno zapisuju podaci primljenih signala s GPS-satelita na dvije točke baze (s istim tipovima antena), to će u tim trenucima pomaci faznih frontova primanih radiovalova biti približno jednaki. Naime, zbog relativno male udaljenosti između stupova kalibracijske baze bit će praktično jednake konstelacije



Slika 11. Poništavanje utjecaja ekscentriciteta antena, kad se na jednom i drugom stajalištu istodobno mjeri s GPS-antenama usmjerenima prema sjeveru i zatim usmjerenima prema jugu, te izračuna srednja vrijednost duljina između stupova iz ta dva istodobno mjerenja, na dva stajališta.

GPS-satelita iznad antena, te tako i praktično jednaki utjecaji pomaka faza na obadvije točke.

Kad po metodi “a” GPS-prijamnici i njihove antene zamijene mjesta na mjerenim stupovima baze ili se po metodi “b” promijene orijentacije GPS-antena, tada je važno da konstelacija GPS-satelita iznad njih bude približno jednaka kao u prethodnom mjerenju. Naime, u tom slučaju pomaci faza bit će u prvom i drugom mjerenju približno jednaki, te će se pogreške kompenzirati. Na taj način može se ostvariti visoka preciznost određivanja duljina između stupova kalibracijske baze.

## 4.2 Određivanje duljina raspona između stupova kalibracijske baze s pomoću GPS-a

### a) Određivanje duljine raspona između stupova na prvih 100 m s pomoću GPS-a

Na stup 0 postavljena je GPS-antena B1 (Trimble Zephyr Geodetic) orijentirana prema sjeveru, a na stup 100 GPS-antena R1 (Trimble Zephyr Geodetic) također orijentirana prema sjeveru. Opažano je istodobno 20 minuta, a zatim su zamijenjene antene na stupovima baze kao i prijamnici, te je opažano također 20 minuta.

Za 20 minuta konstelacija je malo promijenjena, a to bi odgovaralo pomaku Sunca u danu za 40 minuta, jer su ophodna vremena GPS-satelita 12 sati zvjezdanog vremena.

Nakon toga ista su takva mjerenja izvedena s antenama B2 (Trimble Zephyr Geodetic) i R2 (Trimble Zephyr Geodetic).

Račun pokazuje da je srednja vrijednost određivanja duljine između stupova baze s pomoću jednog para GPS-a sa zamijenjenom stajališta određena sa standardnim odstupanjem 1,0 mm.

Iz tablice 2. u stupcu razlika (baza-GPS) vidi se da je razlika između duljina određenih preciznim elektroničkim tahimetrom i određenih s 2 para GPS uređaja bila **0,1 mm**.

Tablica 2. *Rezultati ispitivanja GPS-a na kalibracijskoj bazi na 100 m.*

stup	stup	antena prema sjeveru	antena prema sjeveru	razlika (baza-GPS) [mm]
0	100	B1	R1	-1,0
0	100	R1	B1	-1,0
			sredina	-1,0
0	100	B2	R2	1,0
0	100	R2	B2	1,0
			sredina	1,0
Sredina od 2 para GPS-a sa zamijenjenim stajalištima GPS-a u paru i s antenama orijentiranim prema sjeveru				<b>0,1</b>

Prema tome, duljina određena s pomoću 2 para GPS-prijamnika i zamijenjenim stajalištima unutar para GPS-uređaja vrlo dobro se slaže s duljinom baze izmjerenom s TC 2003 sa standardnim odstupanjem 0,08 mm.

#### **b) Određivanje duljine raspona između stupova na prvih 500 m s pomoću GPS-a**

Na stup 0 postavljena je antena B1 orijentirana prema sjeveru, a na stup 500 antena R1 također orijentirana prema sjeveru. Opažano je istodobno po 20 minuta, a zatim su zamijenjene antene na stupovima baze kao i njihovi prijammnici, te je također mjereno 20 minuta.

Nakon toga ista su takva mjerenja izvedena s antenama B2 i R2.

Račun pokazuje da je srednja vrijednost određivanja duljine između stupova baze s pomoću jednog para GPS-a sa zamijenjenom stajališta određena sa standardnim odstupanjem 0,7 mm.

Iz tablice 3. u stupcu razlika (baza-GPS) vidi se da je razlika između duljina određenih preciznim elektroničkim tahimetrom i određenih s 2 para GPS-a uređaja bila **0,3 mm**.

Prema tome, duljina određena s pomoću 2 para GPS-prijamnika i zamijenjenim stajalištima unutar para GPS-uređaja vrlo dobro se slaže s duljinom baze izmjerenom s TC 2003 sa standardnim odstupanjem 0,10 mm.

Tablica 3. *Rezultati ispitivanja GPS-a na kalibracijskoj bazi na 500 m.*

stup	stup	antena prema sjeveru	antena prema sjeveru	razlika (baza-GPS) [mm]
0	500	B1	R1	0,8
0	500	R1	B1	-0,2
			sredina	0,3
0	500	B2	R2	-0,2
0	500	R2	B2	-1,2
			sredina	-0,7
Sredina od 2 para GPS-a sa zamijenjenim stajalištima GPS-a u paru i s antenama orijentiranim prema sjeveru				<b>0,3</b>

### c) Određivanje duljine raspona između stupova na prvih 1000 m s pomoću GPS-a

Na stup 0 postavljena je GPS-antena B1 orijentirana prema sjeveru, a na stup 1000 antena R1 također orijentirana prema sjeveru. Opažano je istodobno po 20 minuta, a zatim su zamijenjene antene na stupovima baze kao i prijammnici.

Nakon toga ista takva mjerenja izvedena su s antenama B2 i R2.

Račun pokazuje da je srednja vrijednost određivanja duljine između stupova baze s pomoću jednog para GPS-a sa zamijenjenim stajalištima određena sa standardnim odstupanjem 0,8 mm.

Iz tablice 4. u stupcu razlika (baza-GPS) vidi se da je razlika između duljina određenih preciznim elektroničkim tahimetrom i određenih s 2 para GPS uređaja bila **0,1 mm**.

Tablica 4. *Rezultati ispitivanja GPS-a na rasponu od 1000 m.*

stup	stup	antena prema sjeveru	antena prema sjeveru	razlika (baza-GPS) [mm]
0	1000	B1	R1	0,4
0	1000	R1	B1	0,4
			sredina	0,4
0	1000	B2	R2	0,4
0	1000	R2	B2	-1,6
			sredina	-0,6
Sredina od 2 para GPS-a sa zamijenjenim stajalištima GPS-a u paru i s antenama orijentiranim prema sjeveru				<b>0,1</b>

Prema tome, duljina izmjerena s pomoću 2 para GPS-prijamnika i zamijenjenim stajalištima unutar para GPS-prijamnika vrlo dobro se slaže s duljinom baze izmjerenom s TC 2003 sa standardnim odstupanjem 0,12 mm.

Može se kazati da se rezultati mjerenja duljina na kalibracijskoj bazi izmjerenih s pomoću 2 para GPS-a i preciznim elektroničkim tahimetrom TC 2003 vrlo dobro slažu, znatno bolje od 1 mm. Zato bi se moglo sigurno tvrditi da se s GPS-uređajima mogu kontrolirati duljine kalibracijske baze, ali kako bismo to potvrdili planiramo izvesti još jednu dodatnu seriju mjerenja.

Za vrijeme mjerenja na kalibracijskoj bazi s GPS-om temperatura zraka bila je između 11 °C i 34 °C, a tlak zraka oko 1002 mbara.

## 5. Zaključak

Ova ispitivanja GPS-a na kalibracijskoj bazi pokazala su, ako se na bazi mjeri s dva para GPS-uređaja, po jednoj od metoda kojom se otklanja utjecaj ekscentriciteta antena, da mjerenja s pomoću GPS-a mogu odlično poslužiti i za kontrolu duljine baze izmjerene preciznim elektrooptičkim daljinomjerom. Takva kontrola duljine baze potpuno je nezavisna, što je posebno važno za sigurnost izvođača da su mjerenja dobro izvedena i izračunata. Da ta slaganja nisu slučajna potvrdit ćemo još jednom serijom mjerenja. GPS-mjerenja vrlo malo ovise o temperaturi zraka, za razliku od elektrooptičkih daljinomjera kod kojih pogreška u mjerenju temperature zraka od 1 °C pridonosi pogrešci u računanju popravke mjerene duljine 1 mm na duljini od 1000 m. Zato je kontrola duljine baze s pomoću GPS-a dobra provjera, jer se na taj način kontrolira da li je pravilno izmjerena frekvencija u daljinomjeru i temperatura zraka za vrijeme mjerenja preciznim elektroničkim tahimetrom.

U preciznim geodetskim mrežama inženjerske geodezije u kojima se mora postići visoka preciznost od 1 mm mora horizont biti čist i ne smije biti multipath efekata i trebalo bi kao i pri mjerenju duljina na kalibracijskoj bazi postupkom usmjeravanja GPS-antena prema sjeveru i jugu osloboditi se utjecaja ekscentriciteta.

Prema tome s GPS-ima se može postići vrlo visoka preciznost određivanja duljina, ali se mora potrošiti približno dva puta više vremena na mjerenje ili čak i više od dva puta.

Mjerenje duljine elektrooptičkim daljinomjerom do približno 2 km točnije je od mjerenja GPS-om, ako je moguće izmjeriti prosječnu temperaturu zraka duž putanje svjetlosti s točnošću približno 0,3 °C. To je moguće ostvariti na terenima koji su uglavnom horizontalni ili blago nagnuti. Na terenima koji su neravni i s različitim tipom raslinja kao i na terenima gdje je djelomično voda, najčešće to nije moguće postići.

Također zahvaljujući određivanju duljine baze preciznim elektrooptičkim daljinomjerima i s pomoću GPS-a ne će se morati često izvoditi skupa međudržavna povezivanja baza u različitim zemljama i na taj način kontrolirati duljine baze.

ZAHVALA. Rad je izrađen jednim dijelom uz potporu tvrtke Geofoto i Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske, te im se zahvaljujemo. Zahvaljujemo se puno prof. dr. sc. Asimu Bilajbegoviću na izuzetno korisnim savjetima u vezi ekscentriciteta antena.

## Literatura

- Bilajbegović, A., Solarić, M. (1991): Mogućnosti i stanje GPS-tehnologije te rezultati ispitivanja prijamnika Ashtech na kalibracijskoj bazi Geodetskog fakulteta u Zagrebu, Geodetski list, br. 1–3, str. 25–33.
- Görres, B., Campbell, J., Becker, M. (2004): Absolutkalibrierung von GPS-Antennen am Geodätischen Institut Bonn, FGS-Workshopn 2004, [http://www.ANTENNE\\_2004\\_Goerres.pdf](http://www.ANTENNE_2004_Goerres.pdf).
- Mader, G. L., Spring, S.: GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey, <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/images/summary.html>.
- Menge, F., Schmitz, M. (2001): AOADM\_T Choke Ring GPS Antenna, Absolute Phase Center Variations, [http://www.ife.uni-hannover.de/~web/AOA\\_DM\\_T](http://www.ife.uni-hannover.de/~web/AOA_DM_T).
- Novaković, G., Džapo, M., Lasić, Z. (1985): Prvo mjerenje duljine kalibracijske baze Geodetskog fakulteta u Zagrebu invarskim žicama, Geodetski list, br. 10–12, 291–295.
- Schauarte, W., Faßbender, H. (1997): Anpassung der Maßstabskalibrierung auf “rechnende” EDM –Instrumente, Vermessungs und Raumordnung 59/8, 416–436.
- Schauarte, W., Faßbender, H. (1998): Gebrauchsanweisung für die vom Geodätischen Institut der Universität Bonn entwickelte optische Frequenzeinrichtung mit Photodioden-Verstärker (1–100 MHz) und einem 15 MHz-PLL-Regelkreis, Bonn.
- Solarić, M. (1968): Ispitivanje poligonalnog pribora za prisilno centriranja pomoću pomoćne točke, Geodetski list, 10–12, 193–200, Zagreb.
- Solarić, N. (1992): Kalibracijska baza za ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zbornik radova 37. međunarodni godišnji skup KOREMA, 236–241, Zagreb.
- Solarić, N., Barković, Đ. (2003): Međunarodne ISO norme za ispitivanje geodetskih elektroničkih daljinomjera i nivelmanskih letava, Zbornik savjetovanja Hrvatska normizacija i srodne djelatnosti, Cavtat 10.-12.04.2003, 475–484.
- Solarić, N., Barković, Đ., Vresk, M. (2004): Sustav za mjerenje frekvencije geodetskih elektrooptičkih daljinomjera prema međunarodnoj ISO normi 17123–4, Zbornik radova Hrvatska normizacija i srodne djelatnosti, Brijuni, 297–303.
- Solarić, N., Lapaine, M., Novaković, G. (2002): Testing the Precision of the Precise Electro-Optical Distance Meter Mekometer Me 5000 on the Calibration Baseline Zagreb, Survey Review, 2002, Vol. 36, No. 286, 612–626.
- Solarić, N., Maurer, W., Schnädelbach, K., Novaković, G. (2001): Povezivanje Münchenske i zagrebačke kalibracijske baze za ispitivanje i umjeravanje elektrooptičkih daljinomjera, Geodetski list, 55(78), 3, 177–194, Zagreb.
- Solarić, N., Novaković, G., Džapo, M., Barković, Đ., Šljivarić, M. (1999): Kalibracijska baza Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu za ispitivanje i ovjeravanje elektrooptičkih daljinomjera, Zbornik radova simpozija “Državne geodetske osnove i zemljišni geoinformacioni sustavi”, Opatija 12.-14.05.1999, 297–305.



- Solarić, N., Solarić, M., Benčić, D. (1992): Projekt i izgradnja kalibracijske baze Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Geodetski list, broj 1, 7–27, Zagreb.
- Solarić, N., Solarić, M., Špoljarić, D. (1998): Kalibracijska baza za umjeravanje i ispitivanje elektrooptičkih daljinomjera" Zbornik radova spojivost i infrastruktura, izdavač Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, 83–88, Zagreb.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Böder, V., Seeber, G. (2000): Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time, Presented at ION GPS 2000, 19–22 September, Salt Lake City, Utah, USA.

## Possibility of independent control of calibration baseline length by means of GPS

*ABSTRACT. The paper describes the measurement of the calibration baseline of the Faculty of Geodesy, University of Zagreb used for testing of electro optical distance meters by means of GPS devices. It were measured with four GPS receivers Trimble 5700 on the baseline near Lučko, and thus the distances between the baseline pillars have been determined. Apart from that, there were the differences determined between the distances measured with two pairs of GPS and of precise electronic distance meter Leica TC 2003 which were before determined.*

*In order the remove the influence of GPS-antenna eccentricity, the observations were made with the antenna directed northwards, and by replacing the positions of GPS antennas at the stations. The difference of thus determined distances and the distances measured with precise electronic tacheometer was at the distance of 100 m **0.1 mm**, at 500 m **0.3 mm**, and at 1000 m **0.1 mm**. As it can be seen, these differences are very small, and they were determined by measuring in two completely independent ways. This is at the same time the check procedure showing that the two measurements have been correctly performed, The air temperature has got slight influence on GPS measurements, and for that GPS measurements are very good independent checking procedure indicating that the frequency on distance meter has been measured correctly, as well as the air temperature and air pressured at the calibration baseline during precise measurements with Leica TC 2003. It is true that GPS measurements require much more time than the measurements with precise electronic tacheometer TC 2003. Besides, these measurements are very good checking procedure for working of GPS devices, as well as of software with witch that the measurements were processed and at the same time conformation that with them it is possible obtain good results of measurement.*

*Keywords: calibration baseline for distance meter, GPS measurements, precise electronic tacheometer Leica TC 2003.*

*Prihvaćeno: 2008-05-16*