

20 godina od prvih GPS merenja u Srbiji - kampanja EPVGI90

Dr STEVAN RADOJČIĆ, Vojnogeografski institut, Beograd,
prof. dr BRANKO BOŽIĆ, Građevinski fakultet, Beograd

Pregledni rad
UDC:528.8(497.11)

U radu su opisana merenja i prikazani rezultati prve GPS kampanje u Srbiji, koju je krajem jula 1990. godine preduzeo Vojnogeografski institut iz Beograda na svom Eksperimentalnom poligonu. Formalno uzevši, prva GPS merenja u Srbiji Vojnogeografski institut je izvršio u krugu oko svoje zgrade još u martu iste godine, ali u okviru obuke za rad sa tek nabavljenim dvofrekvencijskim GPS prijemnicima WM102 koji su korišćeni u kampanji EPVGI90. Kampanja EPVGI90 je bila prvi "pravi" geodetski zadatak realizovan korišćenjem GPS tehnologije.

Ključne reči: Istorija, GPS, Vojnogeografski institut, Eksperimentalni poligon

1. UVOD

Prva GPS merenja u Srbiji izvršio je Vojnogeografski institut (VGI) iz Beograda, u periodu od 23. do 27. jula 1990. godine, u okviru kampanje EPVGI90.

Merenja su izvršena na tačkama nešto ranije uspostavljenog Eksperimentalnog poligona Vojnogeografskog instituta (EPVGI), kao deo šireg projekta ispitivanja mogućnosti primene GPS tehnologije u osnovnim i drugim geodetskim radovima, koji je, osim satelitskih merenja, predviđao i visokoprecizna uglovna, linearna (dužine i visinske razlike) i astronomska merenja [1].

Za merenja su korišćena tri dvofrekvencijska GPS prijemnika WM102 (Wild-Magnavox 102).

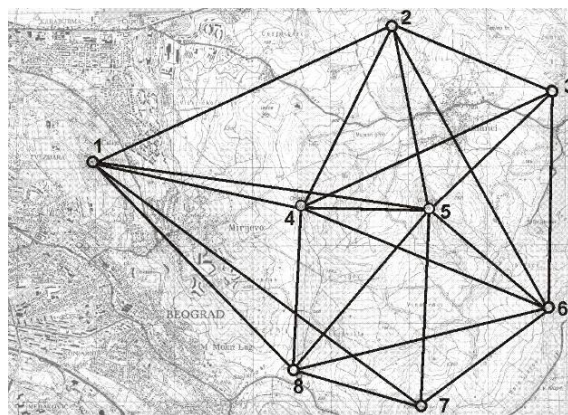
2. EKSPERIMENTALNI POLIGON VGI

Eksperimentalni poligon Vojnogeografskog instituta je projektovan i uspostavljen 1989/90. god. sa ciljem stvaranja osnove za svestrano ispitivanje geodetskih instrumenata i metoda koji se koriste kod visokopreciznih geodetskih merenja, prvenstveno radi ocenjivanja preciznosti i tačnosti korišćenih instrumenata i sagledavanja mogućnosti unapređenja primenjenih metoda merenja i postupaka obrade rezultata [2].

Osnovni zahtevi pri projektovanju su bili da se poligon mora nalaziti u relativnoj blizini VGI (ali izvan urbanizovanog područja i na geološki stabilnom terenu), da treba da ima do deset tačaka raspoređenih na različitim rastojanjima i sa različitim visinama, da veći deo tačaka pripada državnoj trigonometrijskoj

mreži i da se na svaku tačku može doći terenskim vozilom.

Izbor je pao na područje severoistočno od Beograda, udaljeno svega nekoliko kilometara od zgrade VGI, na području između Astronomske opservatorije na Zvezdari i manastira "Sveti Stefan" u selu Slanci (slika 1), gde je odabrano osam tačaka, od kojih 5 pripada državnoj trigonometrijskoj mreži (tri tačke 4. reda i po jedna 2. i 3. reda).



Slika 1 – Eksperimentalni poligon VGI

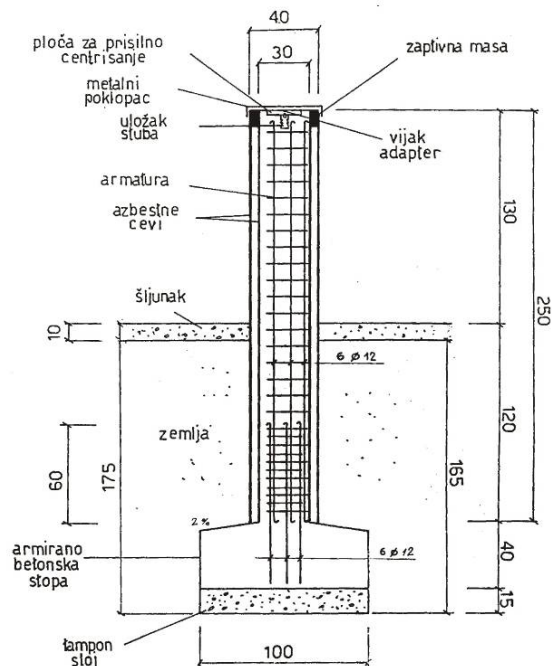
Najveća dužina strane iznosi oko 5.200 m, a najkraća 1.600 m; visine tačaka se nalaze između 156 m i 279 m (maksimalna razlika visina 123 m).

Sve tačke su stabilizovane betonskim stubovima sa uređajima za prisilno centrisanje. Tačka 1 se po tipu stuba razlikuje od ostalih stubova - radi se o tački na kuli Astronomske opservatorije na Zvezdari koja je već bila stabilisana stubom i kojoj je samo ugrađen uređaj za prisilno centrisanje; sve ostale tačke su stabilizovane (a postojeće prestabilizovane) stubovima čiji se presek daje na slici 2. Stub se sastoji od dve

Adresa autora: Prof. dr Branko Božić, Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, Beograd

Rad primljen: 01. 07. 2010.

koncentrične cevi, unutrašnjeg prečnika 30 cm koja je ispunjena armaturom i zalivena betonom i spoljne, prečnika 40 cm koja štiti unutrašnju cev od uticaja sredine. Cevi su postavljene vertikalno, tako da iznad zemlje vire oko 1,3 m, a pod zemljom, na dubini oko 1,2 m se oslanjaju na armirano-betonsku stopu.



Slika 2 – Presek stuba EPVGI

2. PRIJEMNIK WM102

Krajem 80-tih godina prošlog veka, Vojno-geografski institut je nabavio četiri GPS prijemnika WM102, modela koji je na tržište plasiran 1987. godine, kao rezultat zajedničke saradnje švajcarskog Wilda i američkog Magnavoxa, tačnije kao nadogradnja prethodnog, jednofrekvencijskog modela WM101.

WM102 (slika 3) je dvofrekvencijski, osmokanalni prijemnik (7 kanala za L1 i 1 kanal za L2 frekvenciju) sa mogućnošću praćenja do šest satelita istovremeno. U trenutku nabavke bio je jedan od retkih prijemnika koji je osim C/A koda primao i P kod.

Satelitski signali se beleže na magnetnu traku formata standardne audio kasete, na koju se može zabeležiti 8 sati podataka, ako je prijemnik svo vreme primao oba signala sa šest satelita. Podaci snimljeni na kasetu prenose se u računar pomoću posebnog čitača, Memtec 5450 XL.

Prijemnik je težak 17,9 kg i nalazi se u robusnom, hermetički zatvorenom kućištu koje dizajniranom za rad u ekstremnim vremenskim uslovima (od -40°C do $+55^{\circ}\text{C}$) i transport pod još ekstremnijim uslovima.



Slika 3 – GPS prijemnik WM102I

Napaja ga izmenjiva 12 V niki-kadmijumska baterija koja omogućuje oko 2,5 do 4 časa rada.

Antena je eksterna, sa kablom dužine 10 m koji se, sa odgovarajućim pojačivačima, može produžiti na maksimalno 45 m. I ona je dizajnirana za rad pod ekstremnim uslovima eksploatacije (od -40°C do $+70^{\circ}\text{C}$), otporna na udarce, vibracije, vodu i promenu vazdušnog pritiska kao i prijemnik. Napaja se baterijom prijemnika, preko istog kabla kojim se primljeni signali šalju prijemniku.

Deklarisana tačnost WM102 iznosi $5\text{mm} + 1 \cdot 10^{-6} D$ mm, gde je D - rastojanje izraženo u metrima.

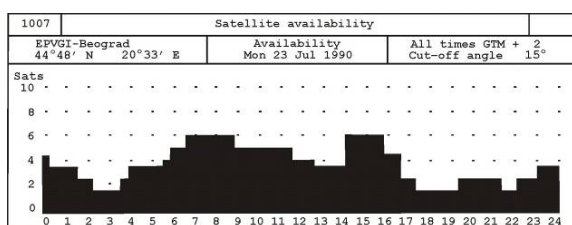
Uz prijemnik se isporučuje programski paket PoPS (**PostProcessing Software**) koji služi za planiranje merenja, obradu signala, izravnjanje mreže (do 10 tačaka istovremeno) i transformaciju koordinata iz globalnog datuma u lokalni i obrnuto.

3. PLANIRANJE I REALIZACIJA MERENJA

Osnovni cilj GPS kampanje je bila provera osposobljenosti lica za planiranje, realizaciju, obradu i interpretaciju rezultata GPS merenja. Dopunski ciljevi su bili sticanje poverenja u novu tehnologiju i prikupljanje opažačkog materijala kojim se mogu testirati mogućnosti isporučenog softvera za naknadnu obradu podataka. S tim u vezi, planirana su i tokom septembra i oktobra 1990. realizovana i terestrička merenja - nivelman visoke tačnosti, merenje uglova Šrajberovom metodom teodolitom Wild T2000 i merenje dužina elektrooptičkim daljinomerima Wild Di5 i Di20. I ovi radovi su imali slične ciljeve, jer su preduzeti neposredno po stabilizaciji stubova za opažanje, pre njihovog sleganja.

Planom GPS merenja [4] definisana su sva organizacijska i stručna pitanja značajna za realizaciju kampanje, od sastava ekipe do načina obrade signala i izravnjanja mreže.

Na osnovu analize broja satelita sa elevacijom većom od 15° (slika 4) i kvaliteta njihove geometrije (GDOP ≤ 6 , slika 5), planirano je da se u periodu od 23. do 27. jula 1990. godine svakoga dana primaju signali u po jednoj sesiji trajanja 2 časa, od 7:20 do 9:20 [4]. Tim vremenskim intervalom je obuhvaćen jedini period u toku 24 časa kada se iznad horizonta nalazio maksimalan broj satelita (šest). Treba podsetiti da 1990. godine sistem još uvek nije bio uspostavljen u potpunosti i da su u intervalu od 0:00 do 24:00 časa postojala svega dva ili tri perioda kada se iznad horizonta nalazilo četiri, pet ili maksimalno šest satelita, u ukupnom trajanju od svega desetak časova.



Slika 4 – Raspoloživost satelita sa elevacijom $>15^\circ$

U trenutku kada su pripreme već odmakle, jedan prijemnik (#149) je prestao da radi i vraćen je proizvođaču na popravku, tako da je kampanja EPVGI90 realizovana sa tri WM102 prijemnika.

EPVGI-Beograd		Availability		All times GMT + 2	
44°48' N	20°33' E	Mon 23 Jul 1990	300 m	Cut-off angle	15°
PDDP	GDOP	Satellites above	15°		
06:00	2.0	3.7	2	6	9
06:10	2.1	4.1	2	6	9
06:20	2.1	4.5	2	6	9
06:30	2.0	3.1	2	6	9
06:40	2.0	3.5	2	6	9
06:50	2.0	4.0	2	6	9
07:00	2.0	4.6	2	6	9
07:10	2.1	5.0	2	6	9
07:20	2.1	5.0	2	6	9
07:30	1.9	2.7	2	6	9
07:40	1.8	2.6	2	6	9
07:50	1.8	2.9	2	6	9
08:00	1.7	2.8	2	6	9
08:10	1.2	2.4	2	6	9
08:20	1.3	2.6	2	6	9
08:30	1.3	2.8	2	6	9
08:40	1.3	3.0	2	6	9
08:50	1.5	4.5	2	6	9
09:00	1.6	5.2	2	6	9
09:10	1.6	5.6	2	6	9
09:20	1.6	5.3	2	6	9
09:30	1.6	4.8	2	6	9
09:40	1.6	4.3	2	6	9
09:50	1.4	2.6	2	6	9
10:00	1.6	6.2	2	6	9
10:10	1.6	6.6	2	6	9
10:20	1.5	7.3	2	6	9
10:30	1.5	8.0	2	6	9
10:40	1.5	7.8	2	6	9
10:50	2.5	6.8	2	6	9
11:00	1.4	5.2	3	6	9
11:10	1.4	4.4	3	6	9
11:20	1.4	4.0	3	6	9
11:30	1.4	3.7	3	6	9
11:40	1.7	4.9	3	6	9
11:50	1.7	5.2	3	6	9

Slika 5 – Kvalitet geometrije raspoloživih satelita

U tabeli 1 je prikazan plan posjedanja tačaka po sesijama. Tačka 1 (kula Astronomske opservatorije) nije posjedana jer se na njoj nalazile brojne antene što ju je činilo nepodesnom za prijem GPS signala. Naknadno, 5. oktobra 1990. godine, izvršena su GPS merenja i na ovoj tački, u sesiji u kojoj su posjednute i tačke 2 i 7, takođe u trajanju od dva časa.

Tabela 1 – Plan opažanja po sesijama

Dan	Tačka							
	2	3	4	5	6	7	8	
23. jul	■			■				
24. jul			■	■			■	
25. jul		■	■		■			
26. jul		■	■			■		
27. jul	■				■		■	

Naravno, ekipa je pre realizacije merenja prošla potpunu obuku za rad na terenu i u potpunosti ovladala prijemnikom i ostalom opremom potrebnom za terenski rad. S tim u vezi, merenja izvršena u kampanji EPVGI90 nisu, formalno uzevši, prva GPS merenja u Srbiji uopšte - u okviru obuke koja je preduzeta u krugu zgrade Vojnogeografskog instituta, GPS signali su primani i obrađivani još od marta 1990. godine - ali kampanja EPVGI90 predstavlja prvo korišćenje GPS tehnologije u funkciji realizacije geodetskog zadatka.

Neposredno pre realizacije kampanje, sredinom jula 1990. godine, u prijemnike je učitani aktuelni almanah, čime je vreme rada u prvoj sesiji skraćeno za oko 12 minuta, koliko prijemniku treba da ažurira almanah.

Merenja su realizovali:

1. major mr Branko Božić, dipl.geod.inž.
2. kapetan Stevan Radojčić
3. Zoran Milosavljević, dipl.geod.inž. i
4. Dušan Mičijević, dipl.geod.inž.

Tokom kampanje signali su primani sa ukupno devet GPS satelita sa elevacijom većom od 15° , i to sateliti: 2, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 16 i 20. Sve antene su na tačkama orijentisane na jednak način. Tačke koje su posjedane više puta, posjedane su uvek drugim prijemnicima (tj. antenama) i izvršiocima.

I pored toga što se pri obradi GPS signala u tzv. *malim mrežama* (mrežama sa stranama kraćim od 50 km, kakva je i EPVGI) obično koristi standardni model atmosfere, ipak su tokom svake sesije (na njenom početku, u sredini i na kraju) mereni atmosferski parametri (pritisak, temperatura i vlažnost), kako bi se došlo do podataka potrebnih za određene eksperimente i probe. Takođe, radi kasnijih analiza beležene su sve poruke koje su prijemnici prijavljivali tokom rada, zajedno sa trenutkom prikazivanja.

Rad operatera na terenu je bio potpuno koordinisan, jer je bila obezbeđena odgovarajuća radio-veza.

4. OBRADA PODATAKA

Obrada podataka GPS merenja je izvršena sa sledećim parametrima modela izravnjanja:

- tačnost apriori	6 mm
- minimalna elevacija	15°
- troposferski model	Saastmojnen
- jonosferski model	standardni
- efemeride	broadcast

Pri obradi su parametri modela izravnjanja varirani u najrazličitijim kombinacijama: korišćeni su različite vrednosti za minimalnu elevaciju, drugi modeli troposfere i jonosfere (uključujući i podatke o atmosferi uzete tokom kampanje), obrada je vršena korišćenjem samo L1, samo L2 i oba (L1 i L2) signala, itd. Time su proverena (i potvrđena) tuđa iskustva i saznanja do kojih se došlo praćenjem odgovarajuće literature (da se u malim mrežama dobijaju bolji rezultati kada se koristi samo L1 signal i kada se ne koriste mereni parametri atmosfere, da je za naše područje najbolje koristiti Saastmojnenov model troposfere, da je deklarisanu tačnost GPS merenja prijemnikom WM102 moguće ostvariti i sa duplo kraćim merenjima, itd) i stekla dodatna sigurnost u softver za obradu i izravnjanje i njegove mogućnosti.

Pošto PoPS zahteva da pri izravnjanju koordinate jedne od tačaka budu fiksne, kao date su uzete koordinate tačke 2 dobijene navigacionim rešenjem. Formirano je ukupno 8.120 dvostrukih razlika faznih merenja, a broj nepoznatih je iznosio 20 – 18 koordinata za 6 tačaka + 2 neodređenosti (ambiguity) – što znači da je ocena unutrašnje tačnosti merenja izvedena na osnovu 8.100 suvišnih merenja.

Rezultati izravnjanja su dati u formi koordinata i njihovih empirijskih standarda, rastojanja između tačaka u svim kombinacijama i njihovih empirijskih standarda, kao i varijans-kovarijans matrice. Empirijski standard dvostrukih razlika iznosi 8 mm, što je unutar granica dozvoljenih za mreže sa rastojanjima manjim od 20 km koje navodi proizvođač ($\sigma_{\max} = 10$ mm). Istovremeno, sva rastojanja među tačkama su određena sa unutrašnjom tačnošću boljom od 0,8 mm, a razlike dužina dobijenih izravnjanjem po sesijama i definitivno izravnatih ne prelaze 4 mm. Kada je u oktobru 1990. godine u obradu uključena i sesija kojom je mreži priključena tačka 1, empirijski standard je uvećan na $\sigma = 10$ mm, a i ostali pokazatelji su bili nešto lošiji (mada u dozvoljenim granicama), što je potvrdilo pretpostavku da neka od antena na tački 1 utiče na prijem GPS signala, mada ne u meri kako se pretpostavljalo.

U okviru obrade podataka, izvršena je i transformacija koordinata iz WGS84 u lokalni datum. Pri-

menjena je Helmertova 7-parametarska transformacija [6] koja je dala sledeće rezultate za:

tri translacije:

$\Delta X = -689,744$ m	$\sigma = 0,031$ m
$\Delta Y = 187,741$ m	$\sigma = 0,031$ m
$\Delta Z = -482,952$ m	$\sigma = 0,031$ m

tri rotacije:

oko X - ose = 5",279884	$\sigma = 0",3236$
oko Y - ose = -1",881271	$\sigma = 0",3939$
oko Z - ose = -10",546190	$\sigma = 0",3132$

faktor razmere:

0,324182 ppm	$\sigma = 1,2882$ ppm.
--------------	------------------------

Iako su u ovom slučaju broj tačaka za transformaciju i mala površina na kojoj su raspoređene bili nepodesni za dobro određivanje parametara transformacije između globalnog i lokalnog datuma, prikazani rezultati predstavljaju prvo određivanje parametara transformacije između jednog globalnog datuma i našeg nacionalnog datuma na teritoriji Srbije.

Neka kasnija, daleko potpunija i kompleksnija određivanja datumskih parametara dala su slične vrednosti parametara translacije (npr. [7] i [8]).

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Kampanjom EPVGI90 Vojnogeografski institut je potvrdio svoju pionirsku ulogu u primeni novih tehnologija u geodeziji i srodnim disciplinama - u ovom slučaju, u primeni GPS tehnologije - koju je imao tokom celog 20. veka na teritoriji ne samo Srbije, već i Jugoslavije.

Međutim, značaj ove kampanje se time ne iscrpljuje. Iskustva i saznanja do kojih se došlo tokom ovih merenja, a posebno rezultati upoređenja GPS merenja i odgovarajućih terestričkih merenja koja su preduzeta u toku iste godine, stvorili su odličnu osnovu za sve širu primenu GPS tehnologije u rešavanju geodetskih zadataka u nadležnosti VGI. Kampanja EPVGI90 je trasirala formu i sadržaj svih ostalih GPS kampanja koje je VGI preduzimao sa prijemnicima WM102. Uz stalno prikazivanje ostvarenih rezultata i propagiranje mogućnosti korišćenja GPS tehnologije i prednosti koje ima nad klasičnim tehnologijama u određenim okolnostima, Vojnogeografski institut je postao promotor GPS-a u Srbiji i zauzeo vodeću ulogu u njezovoj primeni u geodeziji u Srbiji.

Lica koja su planirala i realizovala kampanju EPVGI90 i dalje su aktivna u našoj geodetskoj službi. Iako su u međuvremenu skoro svi otišli iz VGI na druga radna mesta, ovo iskustvo je determiniralo njihov dalji razvoj u struci. Dvojica su doktorirala u

oblasti GPS, a treći se u magistarskom i doktorskom radu obilno koristio rezultatima različitih GPS merenja.

LITERATURA

- [1] Božić, B.: Ispitivanje primene GPS tehnologije u osnovnim geodetskim radovima, Vojnogeografski institut, Beograd, 1991, 237 s. (p).
- [2] Božić, B.: Eksperimentalni poligon Vojnogeografskog instituta, Zbornik radova, Vojnogeografski institut, Beograd, 192, p. 67-73, 1996.
- [3] Božić, B., Radojčić, S.: Analiza horizontalne položajne tačnosti digitalne topografske karte 1:50000 izdanja Vojnogeografskog instituta, Tehnika – Naše građevinarstvo, Beograd, Savez inženjera Srbije i Crne Gore, vol 63, br. 2, str. 1-7.
- [4] Elaborat EPVGI, Vojnogeografski institut: Arhiv geodetske dokumentacije (Inv. br. 2035), Beograd, 1992, 30 s. (p).
- [5] Božić, B.: EPVGI90 - izvođenje i obrada podataka satelitskih merenja, Geodetski list 1-3, SGIGJ, Zagreb, 112, p. 15-24, 1991.
- [6] Božić, B.: Globalni pozicioni sistem - Analiza metode merenja i neki rezultati njegove primene u Eksperimentalnom poligonu Vojnogeografskog instituta (EPVGI), Geodetska služba 62, Republički geodetski zavod, 72, p. 7-17, 1992.
- [7] Radojčić, S.: Obrada GPS kampanje EPVGI94, Zbornik radova, Vojnogeografski institut, Beograd, 192, p. 75-82, 1996.
- [8] Radojčić, S.: Tehnički izveštaj o obradi merenja u Artiljerijskoj GPS mreži, Vojnogeografski institut, Beograd, 1998, 55 s. (p)

SUMMARY

TWENTY YEARS FROM THE FIRST GPS MEASUREMENTS IN SERBIA - CAMPAIGN EPVGI90

This paper describes measurements and shows the results of the first GPS campaign taken in Serbia, realised by Military Geographical Institute from Belgrade in July 1990, within its Experimental geodetic network. As a matter of fact, the Military Geographical Institute obtained its first GPS measurements nearby its building in March 1990, during the training with WM102 receivers, but the EPVGI90 campaign was the first "real" geodetic task accomplished by GPS technology in Serbia.

Key words: History, GPS, Military Geographical Institute, Experimental network