

UDK 528.333(497.1):629.19
528.02+528.06:629.19
Prethodno saopćenje

EPVGI 90 — IZVOĐENJE I OBRADA PODATAKA SATELITSKIH MERENJA

Branko BOŽIĆ — Beograd*

SAŽETAK: U članku se opisuje organizacija, pripreme i izvođenje satelitskih merenja u terenskim uslovima na Eksperimentalnom poligonu Vojnogeografskog instituta (skraćeno EPVGI) u cilju ispitivanja pouzdanosti rada satelitskih prijemnika i unutrašnje tačnosti dobijenih rezultata. Pouzdanost rada prijemnika ocenjena je usporedbom rastojanja merenih u različitim sekcijama. Unutrašnja tačnost dobijenih rezultata ocenjena je preko standarda srednje greške i varijans-kovarijans matrice kao veoma visoka. Helmertova transformacija je upotrebljena radi upoređenja GPS-koordinata sa koordinatama u državnoj mreži.

1. UVOD

Ovaj rad deo je šireg projekta (v. Božić, 1990), koji predviđa izvođenje terestričkih, astronomskih i satelitskih merenja u okviru Eksperimentalnog poligona Vojnogeografskog instituta (skraćena EPVGI) sa ciljem stvaranja neophodnih uslova za detaljnu analizu mogućnosti primene GPS**-tehnologije (prijemnika WM 102) prilikom izvođenja različitih tipova geodetskih zadataka.

Dinamika realizacije projekta bila je uslovljena čisto praktičnim razlozima. Naime, krajem 5. meseca, kada je počela realizacija projekta, vremenski interval pojave satelita najviše je odgovarao mogućnostima organizacije izvođenja satelitskih merenja, tako da je 23. 07. 1990. označen danom početka GPS-kampanje. S obzirom na to da su terestrička i astronomska merenja u toku, ovaj članak se bavi opisom izvođenja satelitskih merenja i analizom ponovljivosti i unutrašnje tačnosti njegovih rezultata.

2. GPS-KAMPANJA — EPVGI 90

GPS-kampanja u EPVGI 90 imala je za cilj:

- određivanje koordinata tačaka u sistemu WGS 84***,
- određivanje rastojanja između tačaka,

* Božić Branko, dipl. inž., Vojnogeografski institut, Beograd, Mije Kovačevića 5.

** GPS — skraćena za Globalni pozicijski sistem pomoću satelita NAVSTAR.

*** WGS 84 — skraćena za World Geodetic System 84 (Svjetski geodetski sistem iz 1984. godine).

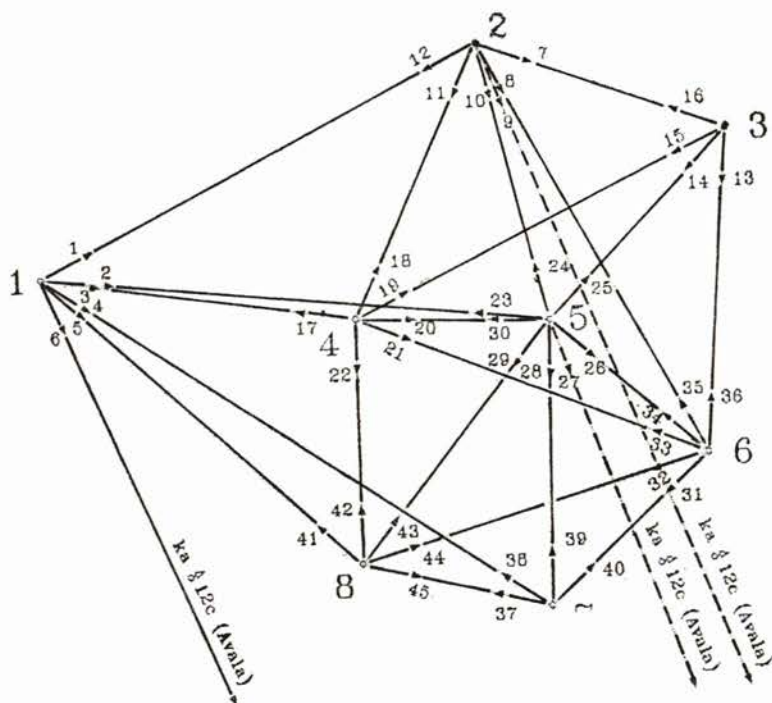
- sticanje neophodnog iskustva u radu sa GPS-prijemnicima i
- približno uklapanje satelitske mreže na referencni elipsoid (Bessel) na osnovu 3 date tačke državne mreže (1 drugog reda i 2 četvrtoeg reda) primenom Helmertove transformacije, radi određivanja približnog položaja i orijentacije referencnog elipsoida u odnosu na WGS 84.

U GPS-kampanju uključeno je 7 od ukupno 8 tačaka EPVGI 90. Osmat tačka, ili tačka broj 1 (Astronomska opservatorija), nije uključena u kampanju jer se u njenoj blizini nalazi primo-predajna antena, čije prisustvo izaziva velike smetnje prilikom prijema signala sa satelita. Merenja su izvedena sa 3 prijemnika WM 102, a obrada podataka izvršena na računaru PC uz pomoć programa PoPS (Post-processing software), verzija 3.40, primenom broadcast efemerida.

3. EKSPERIMENTALNI POLIGON VOJNOGEOGRAFSKOG INSTITUTA

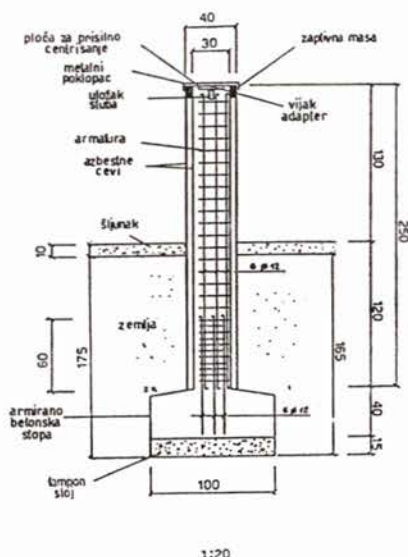
Eksperimentalni poligon Vojnogeoграфskog instituta (sl. 1) projektovan je sa ciljem stvaranja svih neophodnih preduslova za svestrano i sveobuhvatno ispitivanje svih vrsta geodetskih instrumenata i pribora, kao i najnovijih metoda merenja i obrade podataka.

Mreža sadrži 8 tačaka raspoređenih na površini od oko 35 km² geološki stabilnog terena i nalazi se na oko 10 km severoistočno od Beograda. EPVGI



Sl. 1. Skica mreže EPVGI

čine 3 novostabilizovane tačke i 5 tačaka državne mreže koje su prestabilizovane. Od ovih 5 tačaka jedna tačka je 2. reda, jedna 3. reda i 3 tačke 4. reda. Sve tačke, osim tačke 1, stabilizovane su pomoću betonskih stubova sa mogućnošću prisilnog centrisanja (sl. 2) i zaštićene metalnim poklopcima. Prosečna dužina strane iznosi oko 2900 m.



Sl. 2. Presek armiranobetonskog stupa

Do svake tačke moguće je doći terenskim vozilom. U slučaju potrebe mreža se može i proširiti, jer se sa nekih tačaka (tačke 1., 4., 5., 8.) pružaju veoma duge vizure.

4. GPS-SATELITSKA MERENJA U EPVGI 90

4.1. Priprema merenja

Izvođenju satelitskih merenja nužno je prethodila izrada plana merenja, koji ima za cilj dobijanje pouzdanih informacija o vidljivosti, upotrebljivosti i kvalitetu geometrije postojeće grupe satelita u određenom vremenskom periodu. Program PoPS predviđa dobijanje pet različitih tipova informacija radi što bolje i preciznije terenske pripreme, i to:

- izrada plana vidljivosti satelita,
- izrada plana upotrebljivosti satelita,
- izrada plana elevacije satelita,
- izrada plana azimuta satelita i
- izrada plana kvaliteta geometrije određenog broja satelita.

Koristeći se almanahom primljenim jednim prijemnikom WM 102 od 29. 06. 1990., izrađen je plan pripreme za izvođenje kampanje. Podaci su sračunati u

Tabela 1. GDOP — vrednosti

| EPVGI-Beograd 44x48' N 20x33' E | | 300 m | Mon 23 Jul 1990 | | Cut-off angle 15° All times GMT + 2 | |
|------------------------------------|------|------------------|-----------------|--------------|--|-------|
| PDOP | GDOP | Satellites above | | 15x | | |
| 06:00 | 2.0 | 3.7 | 2 | 6 9 | 16 | 18 |
| 06:10 | 2.1 | 4.1 | 2 | 6 9 | 16 | 18 |
| 06:20 | 2.1 | 4.5 | 2 | 6 9 | 16 | 18 |
| 06:30 | 2.0 | 3.1 | 2 | 6 9 11 | 16 | 18 |
| 06:40 | 2.0 | 3.5 | 2 | 6 9 11 | 16 | 18 |
| 06:50 | 2.0 | 4.0 | 2 | 6 9 11 | 16 | 18 |
| 07:00 | 2.0 | 4.6 | 2 | 6 9 11 | 16 | 18 |
| 07:10 | 2.1 | 5.0 | 2 | 6 9 11 | 16 | 18 |
| 07:20 | 2.1 | 5.0 | 2 | 6 9 11 | 16 | 18 |
| 07:30 | 1.9 | 2.7 | 2 | 6 9 11 12 | 16 | 18 |
| 07:40 | 1.8 | 2.6 | 2 | 6 9 11 12 | 16 | 18 |
| 07:50 | 1.8 | 2.9 | | 6 9 11 12 | 16 | 18 |
| 08:00 | 1.7 | 2.8 | | 6 9 11 12 | 16 | 18 |
| 08:10 | 1.2 | 2.4 | | 6 9 11 12 13 | 16 | 18 |
| 08:20 | 1.3 | 2.6 | | 6 9 11 12 13 | | 18 |
| 08:30 | 1.3 | 2.8 | | 6 9 11 12 13 | | 18 |
| 08:40 | 1.3 | 3.0 | | 6 9 11 12 13 | | 18 |
| 08:50 | 1.5 | 4.5 | | 6 9 12 13 | | 18 |
| 09:00 | 1.6 | 5.2 | | 6 9 12 13 | | 18 |
| 09:10 | 1.6 | 5.6 | | 6 9 12 13 | | 18 |
| 09:20 | 1.6 | 5.3 | | 6 9 12 13 | | 18 |
| 09:30 | 1.6 | 4.8 | | 6 9 12 13 | | 18 |
| 09:40 | 1.6 | 4.3 | | 6 9 12 13 | | 18 |
| 09:50 | 1.4 | 2.6 | | 6 9 12 13 | | 18 |
| 10:00 | 1.6 | 6.2 | | 9 12 13 | | 18 20 |
| 10:10 | 1.6 | 6.6 | | 9 12 13 | | 18 20 |
| 10:20 | 1.5 | 7.3 | | 9 12 13 | | 18 20 |
| 10:30 | 1.5 | 8.0 | | 9 12 13 | | 18 20 |
| 10:40 | 1.5 | 7.8 | | 9 12 13 | | 18 20 |
| 10:50 | 2.5 | 6.8 | | 9 12 13 | | 20 |
| 11:00 | 1.4 | 5.2 | 3 | 9 12 13 | | 20 |
| 11:10 | 1.4 | 4.4 | 3 | 9 12 13 | | 20 |
| 11:20 | 1.4 | 4.0 | 3 | 9 12 13 | | 20 |
| 11:30 | 1.4 | 3.7 | 3 | 9 12 13 | | 20 |
| 11:40 | 1.7 | 4.9 | 3 | 12 13 | | 20 |
| 11:50 | 1.7 | 5.2 | 3 | 12 13 | | 20 |
| PDOP | GDOP | Satellites above | | 15x | | |

(značenje: PDOP — Position dilution of precision)*

Na osnovu dobijenih podataka konstatovan je mogući period opažanja (od 6^h do 12^h). Međutim, polazeći od dimenzija mreže i iskustava drugih kampanja (v. Eckels 1987.) da je u radovima najviše tačnosti period od 2^h dovoljan. odlučeno je da se opažanja izvode u intervalu od 7,20 do 9,20 časova po lokalnom vremenu.

4.2. Izvođenje merenja

GPS-kampanja trajala je 4 dana, a sva opažanja su podeljena u 5 opažачkih sekcija (tabela 2).

* DOP — Skraćenica za netačnost pozicioniranja zbog geometrijskog odnosa satelita — prijemnik. Postoje različite vrste DOP-a, zavisno od parametara koji se ocenjuju. Npr. GDOP — rešava tri koordinate + stanje časovnika. PDOP — rešava samo tri koordinate (navigacija).

Tabela 2. Shema opažanja

| Tačka Dan | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|
| 23.07 | ■ | ■ | | ■ | | | |
| 24.07 | | | ■ | ■ | | | ■ |
| 26.07 | | ■ | ■ | | ■ | | |
| 26.07 | | ■ | ■ | | | ■ | |
| 27.07 | ■ | | | | ■ | | ■ |

Merenja su izvršena sa 3 prijemnika WM 102, u vremenskom intervalu (session window) od oko 2 časa opažanja. U svakoj sekciji, u toku prijema signala sa satelita uzimati su podaci o temperaturi, vlažnosti i pritisku, iako za mreže ovih dimenzija (< 100 km) to nije nužno činiti, već se preporučuje (v. PoPS Manual) primena standardnog modela atmosfere (bez merenih elemenata). Minimalni elevacioni ugao iznosio je 15°. U toku izvođenja kampanje sve su tačke okupirane najmanje 2 puta, izuzev tačke 7, na kojoj je instrument bio samo jednom postavljen (ubuduće treba izbegavati). Između operatora ostvarena je direktna radio-veza kako bi se uspostavila što bolja koordinacija i kontrola izvođenja merenja.

Radi lakšeg upravljanja instrumentima iskorišćena je mogućnost preprogramiranja prijemnika (standby mod), tako da se zadatak operatora svodio na kontrolu rada instrumenta. S obzirom na to da je u svakom prijemniku pre kampanje smešten almanah, instrumenti su vrlo brzo počeli pratiti satelit. Upotrebom instrumenata kojima je pre kampanje unet almanah štedi se oko 12,5 minuta rada na svakoj stanici, što u slučaju upotrebe interne baterije predstavlja značajnu uštedu energije.

U toku izvođenja kampanje 9 satelita je bilo u operativnom stanju i iznad 15° elevacije, i to: 2., 6., 9., 11., 12., 133., 16., 10. i 20.

5. GPS — OBRADA PODATAKA EPVGI 90

Obrada podataka satelitskih merenja izvršena je na računaru PC uz pomoć programa PoPS i obuhvatila je sledeće operacije:

- 5.1. Prenos podataka,
- 5.2. Prethodna obrada opažanja i
- 5.3. Glavna obrada opažanja.

5.1. Prenos podataka

Prenos podataka izvršen je pomoću čitača kasete MEMTEC 5450XL. Potpun prenos podataka sa kasete u PoPS obuhvata:

- prenos podataka u formi fizičkih zapisa,
- pretvaranje fizičkih zapisa u logičke, dekodiranje zapisa L2 i sabijanje podataka u odgovarajuće celine prilagođene zapisima L1.

- pregled i prikaz nekih podataka unetih na terenu,
- pripajanje podataka sa kasete odgovarajućoj oznaci (broju) tačke u kampanji,
- definisanje sekcija koje će se obrađivati i
- dekodiranje i smeštaj podataka merenja u bazu podataka kampanje, zavisno od broja tačke i sekcije kojoj pripada.

Ukupno vreme celokupnog merenja u EPVGI 90 iznosi oko 30^h.

5.2. Prethodna obrada opažanja

Podaci preneti u PoPS-u još uvek nisu u formi koja se traži u fazi glavne obrade. Namena prethodne obrade je da pripremi podatke za glavnu obradu, i to kroz sledeće korake:

- računanje parametara orbite za svaki satelit,
- određivanje parametara časovnika za svaki prijemnik,
- određivanje približnih koordinata tačaka u GPS-datumu,
- kreiranje pojedinačnih (single) faznih razlika (sa dve stanice na isti satelit) za svaki par tačaka i
- proveru i čišćenje napred kreiranog niza pojedinačnih faznih razlika od eventualnih ciklusnih skokova ili loših podataka (data screening).

Nakon uspešno izvedene gornje procedure dalji rad u fazi glavne obrade je jednostavan.

U toku prethodne obrade podataka kampanje EPVGI 90 uočen je veći broj poluciklusnih skokova, tako da se zadnji korak u prethodnoj obradi (data screening) morao ponoviti primenjujući u ponovljenom pokušaju poluciklusni (half) screening mod.

Nakon ponovljenog screeninga takođe je uočen izvestan broj loših podataka (proverom grešaka trostrukih razlika), koji je otklonjen odbacivanjem tih satelita u onim epohama u kojima su ti podaci identifikovani.

5.3. Glavna obrada opažanja

Nakon uspešno izvedene prethodne obrade i pripreme podataka prelazi se na glavnu obradu podataka opažanja, koja se sastoji od 3 dela (PoPS):

- definisanje mreže,
- izravnjanje mreže i
- kreiranje rezultata.

Definisanje mreže vrši se sa ciljem objedinjavanja svih sekcija i parova tačaka unutar svake sekcije u jedan zajednički proces izravnjanja.

Kod ovako kratkih rastojanja (< 20 km) za rešavanje nepoznatih koordinata i neodređenosti (ambiguities) uzimaju se u obzir samo opažanja L1 i L2 (v. PoPS Manual). Tačka 2 uzeta je kao fiksna, specificirajući varijanse njihovih koordinata kao 0. Pre samog izravnjanja odabrani su parametri računanja, i to:

- | | |
|-----------------------|--------------|
| — tačnost a priori | 6 mm |
| — minimalna elevacija | 15° |
| — model troposfere | Saastamoinen |

- model atmosfere standardni* (bez opažanja)
 — model jonosfere Single - layer
 — efemeride Broadcast.

Izravnanje mreže izvodi se primenom faznih merenja dvostrukih razlika (double difference phase measurements), i traje relativno kratko u odnosu na prethodne operacije.

U toku izravnanja mreže uzeto je u obzir 8120 dvostrukih razlika. Broj nepoznatih parametara iznosio je 20 (18 koordinata + 2 ambiguities), što znači da je bilo 8100 suvišnih merenja, dovoljnih za jednu kvalitetnu ocenu unutrašnje tačnosti dobijenih rezultata.

Rezultati izravnanja dati su u formi koordinata i njihovih srednjih kvadratnih grešaka (σ), rastojanja između svih tačaka i njihovih srednjih grešaka (σ) i varijans-kovarijans mtrice. Srednja kvadratna greška dvostrukih razlika iznosi 8 mm i nalazi se u granicama dozvoljenim za mreže ovih dimenzija (0—20 km. $\sigma = 0—10$ mm), (v. PoPS Manual).

Rastojanja između tačaka zajedno sa njihovim srednjim greškama dati su u tabeli 3. Podaci su raspoređeni tako što su na početku date vrednosti

Tabela 3. Međustanična rastojanja u EPVGI i njihove varijanse

| dužina | | KAMPANJA | S E K C I J A | | | | | | | | | | | | KAMPANJA | |
|--------|----|-----------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|----|---------------|----|---------------|-------|---------------|-------|---------------|--|
| od | do | 120° | σ_{mm} | 1. | σ_{mm} | 2. | σ_{mm} | 3. | σ_{mm} | 4. | σ_{mm} | 5. | σ_{mm} | 30' | σ_{mm} | |
| 2 | 3 | 2220.2844 | .3 | .2858 | .4 | | | | | | | | | .2846 | .8 | |
| | 4 | 2556.5653 | .4 | | | | | | | | | | | .5710 | 1.0 | |
| | 5 | 2381.6918 | .5 | .6914 | .7 | | | | | | | | | .6949 | 1.4 | |
| | 6 | 4120.2496 | .3 | | | | | | | | | .2486 | .3 | .2572 | 1.0 | |
| | 7 | 4854.9039 | .7 | | | | | | | | | | | .9026 | 2.1 | |
| | 8 | 4573.5186 | .5 | | | | | | | | | .5205 | .5 | .5237 | 1.1 | |
| 3 | 4 | 3542.6999 | .3 | | | | .6951 | .6 | .7000 | .4 | | | | .6979 | .6 | |
| | 5 | 2195.6589 | .3 | .6576 | .5 | | | | | | | | | .6561 | .8 | |
| | 6 | 2798.7954 | .3 | | | | .7950 | .5 | | | | | | .7988 | .8 | |
| | 7 | 4373.3541 | .7 | | | | | | .3552 | .8 | | | | .3477 | 2.3 | |
| | 8 | 4884.4434 | .4 | | | | | | | | | | | .4411 | .8 | |
| 4 | 5 | 1644.3444 | .3 | | | .3433 | .4 | | | | | | | .3440 | .6 | |
| | 6 | 3417.4140 | .3 | | | | .4121 | .4 | | | | | | .4161 | .7 | |
| | 7 | 2982.5963 | .5 | | | | | | .5965 | .5 | | | | .5900 | 1.3 | |
| | 8 | 2122.9858 | .3 | | | .9850 | .4 | | | | | | | .9852 | .7 | |
| 5 | 6 | 1973.5636 | .4 | | | | | | | | | | | .5674 | 1.0 | |
| | 7 | 2511.8025 | .7 | | | | | | | | | | | .7976 | 2.1 | |
| | 8 | 2697.9883 | .4 | | | .9850 | .6 | | | | | | | .9883 | 1.0 | |
| 6 | 7 | 2037.0963 | .6 | | | | | | | | | | | .0919 | 2.0 | |
| | 8 | 3332.9125 | .3 | | | | | | | | .9157 | .3 | | .9116 | .6 | |
| 7 | 8 | 1675.1891 | .5 | | | | | | | | | | | .1853 | 1.2 | |

* Iskustva su pokazala (v. PoPS Manual) da se unošenjem atmosferskih parametara ne poboljšava tačnost merenja kod mreža manjih dimenzija (< 100 km).

dužina nakon izravnjanja svih opažanja (120 minuta), zatim dužine dobijene izravnjanjem svake sekcije ponaosob i na kraju rezultati izravnjanja 30 minuta opažanja sa njihovim srednjim greškama.

Rezultati nakon izravnjanja cele kampanje EPVGI 90 pokazuju:

- da su sve dužine izmerene sa unutrašnjom tačnošću većom od 1 mm,
- da razlike između dužina dobijenih izravnjanjem po sekcijama i definitivno izravnatih ne prelaze 4 mm,
- da su izravnjanjem mreže, uzimajući u obzir samo prvih 30 minuta opažanja dobijena rastojanja sa unutrašnjom tačnošću većom od 3 mm, a njihova neslaganja sa definitivnim dužinama (120 minuta) ne prelaze iznos od 8 mm.

6. TRANSFORMACIJA KOORDINATA IZ SISTEMA WGS 84 U PROSTORNI SISTEM BESELOVOG ELIPSOIDA

Za transformaciju koordinata iz sistema WGS 84 u sistem pravougljih koordinata Beselovog elipsoida primenjen je Helmertov sedmoparametarski model, koji podrazumeva poznavanje 3 parametra translacije, 3 parametra rotacije i jednog faktora razmere. Za rešavanje ovog sistema od sedam nepoznatih parametara neophodno je znati položaje najmanje 3 identične tačke u oba koordinatna sistema. Pošto se nije raspolagalo homogenijim podacima, niti se znala varijans-covarijans matrica tačaka loklnog sistema određivanje transformacionih parametara učinjeno je s ciljem demonstracije postupka i dobijanja grube slike o položaju Beselovog elipsoida u odnosu na WGS 84.

Kao identične tačke uzete su tačka 2 (2. red) i tačke 4 i 7 (obe 4. reda). Koristeći se podacima o njihovim položajima u državnoj mreži, parametrima Beselovog elipsoida i podatka o odnosu geoid-elipsoid (0.25 m) za teritoriju EPVGI (v. Muminagić, 1971.) i formulama datim u literaturi (v. Eckels 1987.), sračunate su prostorne koordinate tačaka 2, 4 i 7 u odnosu na Beselov elipsoid.

Na osnovu prostornih koordinata identičnih tačaka u oba sistema, transformacionim modelom Molodensky-Badekaš dobijene su vrednosti svih sedam parametara, i to:

3 translacije:

$$\begin{array}{ll} \Delta X = - 697.961 \text{ m} & \sigma = 0.0286 \text{ m} \\ \Delta Y = 201.158 \text{ m} & \sigma = 0.0286 \text{ m} \\ \Delta Z = - 481.421 \text{ m} & \sigma = 0.0286 \text{ m} \end{array}$$

3 rotacije

$$\begin{array}{ll} \text{oko X} - 31''.554364 & \sigma = 6''.2695 \\ \text{oko Y} - 52''.208434 & \sigma = 4''.1909 \\ \text{oko Z} 40''.593538 & \sigma = 6''.9906 \end{array}$$

1 faktor razmere

$$- 45.036316 \text{ ppm} \quad \sigma = 13.7258 \text{ ppm}$$

Standard srednje greške transformisanih koordinata iznosi:

$$\sigma = 0.04949 \text{ m}$$

Pregled dobijenih rezultata, iako je ocena tačnosti izvedena na osnovu samo dva suvišna podatka, pokazuje velike rotacije između koordinatnih sistema, a njihovi visoki standardi srednjih grešaka lošu međusobnu homogenost izabranog uzorka identičnih tačaka u lokalnom sistemu sa dosta velikim faktorom razmere.

LITERATURA

- Božić, B.: Ispitivanje primene GPS tehnologije u osnovnim geodetskim radovima, rad u rukopisu, Beograd 1990.
- Eckels, R.: Surveying With GPS in Australia, Report, School of Surveying The University of New South Wales Kensington, N. S. W. 2033, Australia, 1987.
- Muminagić, A.: Ispitivanje realnog geoida u Jugoslaviji, doktorska disertacija, Zagreb 1971.
- Wild Heerbrugg: PoPS Manual, WM Satellite Survey Company, 1990.
- Wells, D.: Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, Fredericton, N. B., Canada, 1986, 1987.

EPVGI 90 — SATELLITE MEASUREMENTS AND THE COMPUTATION OF THE RESULTS

The paper describes organization of preparation and work with satellite's receivers in true field conditions on the Experimental Polygon Military Geographic Institut (EPVGI) in order to investigate reliability and internal accuracy of the results. Reliability of the results was assessed by comparing distances measured on different session. The internal precision achieved by the WM 102 and PoPS as shown by the root mean square error and variance covariance matrix is excellent. A Helmert transformation was used to compare the GPS-determined coordinates with the coordinates obtained from the local system.

Primljeno: 1990-09-21