

Stajališna analiza gravimetrijskih mjerenja

Željko HEĆIMOVIĆ¹ - Zagreb

SAŽETAK. U radu je obrađen problem analize gravimetrijskih mjerenja na stajalištu. Stajališna analiza omogućuje uvid u ponašanje gravimetra koristeći najelementarnije podatke mjerenja. Stajališni hod sadrži sustavni utjecaj gravimetra na mjerenja. U radu je predložena stajališna obrada i analiza triju karakterističnih primjera gravimetrijskih mjerenja na stajalištu. Stajališnom analizom procjenjuje se kvaliteta mjerenja i dobiva uvid u stabilnost mjernog sustava gravimetra. Njezinom primjenom mogu se procijeniti slučajne značajke mjerenja. Usporedbom rezultata obrade na više stajališta dobiva se uvid u stabilnost mjernog sustava u duljem vremenskom razdoblju.

Ključne riječi: stacionarni hod, transportni hod, dnevni hod, stajališni hod, sustavne i slučajne značajke mjerenja, stabilnost mjernog sustava.

1. Uvod

Na gravimetrijskom stajalištu provodimo mjerenja u više ponavljanja. Tako dobivena mjerenja međusobno se razlikuju, pa se javlja problem određivanja njihovih najvjerojatnijih vrijednosti. Mjerenja na pojedinom stajalištu traju relativno kratko te će se razlike javljati zbog kratkoperiodičnih utjecaja. Dugoperiodični utjecaji djeluju na mjerenja na stajalištu s konstantnim iznosom. O njima moramo voditi računa prilikom mjerenja koja traju dulje vrijeme ili prilikom mjerenja u više epoha. Glavni kratkoperiodični uzroci razlika mjerenja na gravimetrijskom stajalištu mogu se podijeliti:

- na promjene polja ubrzanja sile teže za vrijeme mjerenja,
- na promjene u uvjetima mjerenja,
- na instrumentalne uzroke.

Polje ubrzanja sile teže mijenja se s vremenom. Promjene su uglačane i relativno spore. Prilikom mjerenja na stajalištu najveći iznos promjena polja ubrzanja sile teže imaju Zemljini plimni valovi, koji ovise o gibanjima Mjeseca i Sunca. Kako su gibanja Mjeseca i Sunca u odnosu na Zemlju dobro poznata, taj se utjecaj može modelirati s velikom pouzdanošću. Mjerenja na pojedinom stajalištu traju relativno kratko te sve dugo periodične promjene polja ubrzanja sile teže utječu na mjerenja na stajalištu s konstantnim iznosom. Za njihovu analizu moraju se provoditi mjerenja koja traju znatno dulje od trajanja njihove periode, a da bismo ih eliminirali iz mjerenja trebamo imati empirijsko-matematički model s pomoću kojega dobivamo korekciju za stajalište u trenutku mjerenja.

Zbog relativno kratkog trajanja mjerenja na stajalištu, zanimat će nas kratkoperiodični utjecaji promjena u uvjetima mjerenja. Relativnim gravimetrima

¹ Dr. sc. Željko HEĆIMOVIĆ, Hrvatski geodetski institut, Savska c. 41/XVI, PP 19, 10144 Zagreb, e-mail: zeljko.hecimovic@hgi.hinet.hr.

Scintrex CG-3M određujemo razlike ubrzanja sile teže reda veličine 10^{-8} ms^{-2} . To je veliki zahtjev za mjerni sustav, pa i male promjene u tijeku mjerenja mogu znatno utjecati na rezultat. Utjecaj mikroseizmike jedan je od kratkoperiodičnih utjecaja koji je redovito prisutan, osobito prilikom mjerenja u blizini prometnica. Mjerni senzor Scintrex CG-3M gravimetra napravljen je od kvarca koji je vrlo osjetljiv na promjene temperature. Iako se temperatura gravimetara održava grijačima, u tijeku mjerenja može doći do kratkoperiodičnih promjena temperature koje utječu na mjerenja. Kratkoperiodičan uzrok poremećaja može biti i vjetar. On može puhati izravno u gravimetar ili može preko krošnji drveća izazivati naprezanje tla koje djeluje na mjerenja. Mjernik također može biti uzrok kratkoperiodičnih nepravilnih utjecaja koji mogu poremetiti mjerenja. Promjene u uvjetima mjerenja teško je ili nemoguće modelirati pa ih eliminiramo ili smanjujemo njihov utjecaj metodama i postupcima mjerenja.

Prilikom analiziranja instrumentalnih kratkoperiodičnih utjecaja na mjerenja treba uzeti u obzir da se svaki gravimetar ponaša na specifičan način i da se njegova svojstva mijenjaju s vremenom. Instrumentalne nestabilnosti u tijeku mjerenja imaju signifikantan utjecaj na rezultate mjerenja. Da bi se gravimetar ispravno upotrebljavao i ispravno se interpretirali rezultati mjerenja, njegov se rad mora redovito pratiti. Svojestvo kvarcnog senzora u odnosu na metalne je veći hod. Iznos je hoda signifikantan i kod kraćih mjerenja koliko traju mjerenja na jednom stajalištu. Hod gravimetra jedna je od osnovnih karakteristika stabilnosti (ili nestabilnosti) mjernog sustava gravimetra. Hod je promjena nule čitanja gravimetra s vremenom (Torge, 1989). To je klasična definicija koja sažeto, deskriptivno opisuje fenomen promjena fizikalnih svojstava mjernog senzora i nekompensiranih utjecaja na mjerenje koji se javljaju pri uporabi relativnih, mehaničkih gravimetara. U literaturi se razlikuju stacionarni, transportni i dnevni hod (Torge 1989).

Stacionarni hod podrazumijeva ponajprije utjecaj promjene fizikalnih svojstava mjernog senzora s vremenom. On se određuje na osnovi statičkog mjerenja gravimetrom u trajanju od najkraće 24 sata. Stacionarni je hod pogodan za analizu mjernog sustava gravimetra. Na stacionarni hod ne utječu mehanički šokovi koji se javljaju prilikom transporta gravimetra, a kratkoperiodični poremećaji imaju osobine šuma. Zbog toga se stacionarni hod može pouzdano odrediti.

Transportni hod podrazumijeva utjecaj transporta gravimetra na rezultate mjerenja. On signifikantno utječe na cjelokupni iznos hoda gravimetra. Pod transportnim se hodom ponajprije podrazumijevaju utjecaji mehaničkih šokova za vrijeme transporta, jer su preostali utjecaji manjega reda veličine. Međutim, pri transportu gravimetara s kvarcnim senzorom treba voditi računa o stabilnosti temperature. Transportni hod gravimetra može se izraziti kao funkcija uvjeta transporta. Tako se u Torge (1989) može naći da je preciznost mjerenih razlika ubrzanja sile teže u opadanju od $\pm 0,03 \mu\text{ms}^{-2}$ kada je gravimetar prenošen u ruci, na $\pm 0,05 \mu\text{ms}^{-2}$ kada je transportiran na dobroj cesti, na $\pm 0,09 \mu\text{ms}^{-2}$ kada je transportiran lošom cestom i na $\pm 0,18 \mu\text{ms}^{-2}$ kada je gravimetar transportiran helikopterom.

Dnevni hod određuje se na osnovi ponavljanja mjerenja na istome stajalištu za vrijeme jedne epohe mjerenja. Epoha mjerenja nije dulja od jednog dana pa je s obzirom na tu činjenicu dobio ime. Dnevni je hod rezultat stacionarnog i transportnog hoda. On je glavna veličina koja se modelira prilikom obrade gravimetrijskih mjerenja. Mjerenja jedne mjerne epohe imaju zajedničku dnevnu nulu. Dnevna nula gravimetra dinamička je veličina koja se mijenja za svaku epohu mjerenja (dan) i

eliminira se iz mjerenja korištenjem razlika mjerenja. Dnevni hod treba eliminirati iz mjerenja jer ima sustavni utjecaj na mjerenja.

Promjene polja ubrzanja sile teže za vrijeme mjerenja na stajalištu možemo pouzdano modelirati, a kratkoperiodične promjene u uvjetima mjerenja izbjegavamo metodama i postupcima mjerenja. Zbog toga u mjerenjima prevladavaju instrumentalni uzroci, koje nastojimo modelirati.

2. Matematički model stajališnog hoda

Da bi se odredio sustavni utjecaj gravimetra na mjerenja na pojedinom stajalištu modelira se stajališni hod. Pritom je korišten polinomni matematički model

$$y_i := a_1 + a_2 t_i + \dots + a_M t_i^{M-1}. \quad (1)$$

U tom su izrazu y_i mjerenja gravimetra, t_i trenutak mjerenja, a_i nepoznati parametri, a $M-1$ stupanj polinoma. Opći oblik modela (1) je

$$y(t_i) := \sum_{k=1}^M a_k T_k(t_i). \quad (2)$$

U tom su izrazu $T_1(t), \dots, T_M(t)$ funkcije varijable t . Kao mjera kvalitete opisivanja mjerenja modelom koristi se hi-kvadrat funkcija (Press i dr. 1988)

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \sum_{k=1}^M a_k T_k(t_i)}{s_i} \right)^2, \quad (3)$$

gdje je N broj mjerenja, $M-1$ stupanj polinoma, a s_i standardno odstupanje mjerenja. Određivanjem minimuma izraza (3) s obzirom na nepoznate parametre a_k definirat ćemo parametre modela s obzirom na mjerenja. Na taj način definirana je mjera odnosa između traženih parametara i mjerenja, a postupak određivanja nepoznatih parametara postaje problem višedimenzionalnog minimiziranja. Izraz (3) je minimiziran kada derivacije od χ^2 s obzirom na nepoznate parametre nestanu, tj. kad je zadovoljeno

$$0 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \sum_{k=1}^M a_k T_k(t_i)}{s_i} \right)^2 \left(\frac{\partial y(t_i; \dots, a_j, \dots)}{\partial a_j} \right), \quad j = 1, \dots, M. \quad (4)$$

Nakon deriviranja se dobije

$$0 = -2 \sum_{i=1}^N \frac{1}{s_i^2} \left(y_i - \sum_{k=1}^M a_k T_k(t_i) \right) T_j(t_i), \quad j = 1, \dots, M. \quad (5)$$

Taj izraz daje M izraza s M nepoznanica, koji se može pisati u obliku

$$\sum_{k=1}^M \alpha_{jk} a_k = \beta_j, \quad (6)$$

gdje su

$$\alpha_{jk} = \sum_{i=1}^N \frac{T_k(t_i) T_j(t_i)}{s_i^2} \quad j = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, M, \quad (7)$$

članovi matrice dimenzija M x M, a

$$\beta_j = \sum_{i=1}^N \frac{y_i T_j(t_i)}{s_i^2} \quad (8)$$

članovi su vektora dimenzija 1 x M. Nepoznate parametre dobivamo s pomoću izraza

$$a_k = \sum_{j=1}^M C_{kj} \left[\sum_{i=1}^N \frac{y_i T_j(t_i)}{s_i^2} \right], \quad (9)$$

gdje je C_{kj} inverzna matrica izraza (7). Varijancu nepoznatih parametara dobivamo s pomoću izraza

$$s^2(a_k) = s_0^2 \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M C_{kj} C_{kl} \left[\sum_{i=1}^N \frac{T_j(t_i) T_l(t_i)}{s_i^2} \right], \quad (10)$$

pri čemu je s_0^2 referentna varijanca koju dobijemo s pomoću izraza

$$s_0^2 = \frac{1}{N - M} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \sum_{k=1}^M a_k T_k(t_i)}{s_i} \right)^2. \quad (11)$$

Ovdje je N broj mjerenja na stajalištu, a M broj nepoznanica.

Primjenom prikazana matematičkog modela na mjerenja definiramo sustavni utjecaj na mjerenja, tj. stajališni hod. Odstupanja mjerenja od matematičkog modela definiraju slučajni utjecaj (šum).

Stajališnom analizom obrađuju se samo podaci na pojedinom stajalištu. Da bi smo mogli kombinirati podatke jednog stajališta s podacima drugih stajališta moramo

poznavati konstantni dio promjene za svako stajalište, a ono se određuje modeliranjem dnevnog hoda.

3. Primjeri

U nastavku su dana tri karakteristična primjera analize gravimetrijskih mjerenja na stajalištu s obzirom na ponašanje mjerenja na stajalištu. U svim je primjerima izvršeno mjerenje na stajalištu u pet ponavljanja. Duljina epohe pojedinog mjerenja bila je na sva tri stajališta 60 sekundi. Mjerenja gravimetra su u realnom vremenu popravljena za kalibracijski koeficijent gravimetra, temperaturu senzora, nagibanje gravimetra u tijeku mjerenja, a priori hod i Zemljine plimne valove.

Iz rezultata mjerenja na raspolaganju su nam i standardna odstupanja s_i za svako mjerenje y_i . Međutim, ona su pod velikim utjecajem mikroseizmike (Brčić i Seigel 1999), ne opisuju stohastičke značajke mjerenja i u pravilu su prevelika. Zbog toga u obradi nisu korištena standardna odstupanja mjerenja.

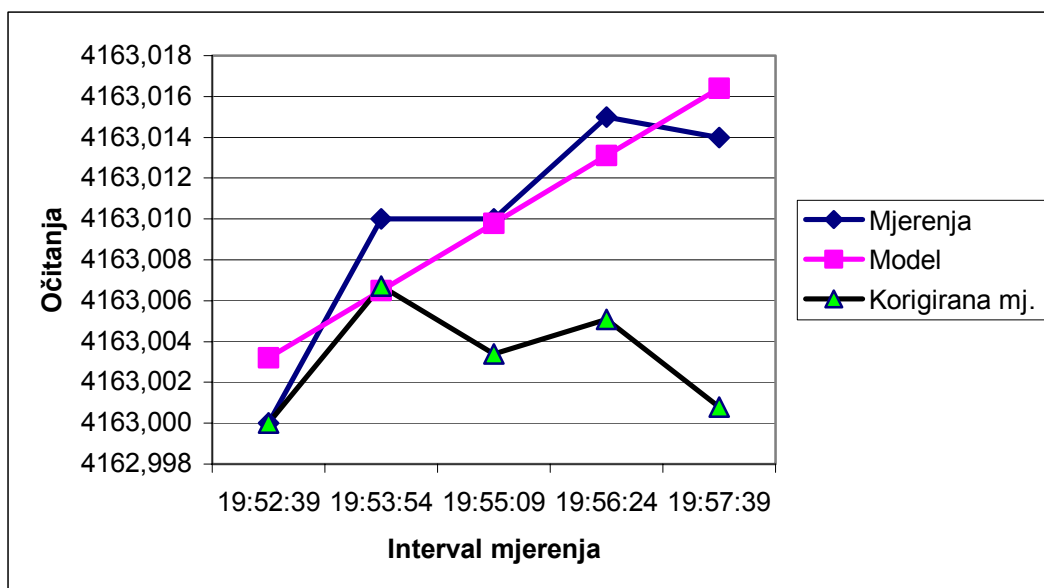
U tablici 1 dani su određeni parametri modela iz izraza (1) za sva tri stajališta. Kako je korišten linearni model, nepoznata su bila samo prva dva parametra. Parametar a_1 konstantni je dio, a parametar a_2 je hod gravimetra na stajalištu ili, kraće, stajališni hod. On je dobiven na osnovi podataka samo na jednome stajalištu. Iako je gravimetar od točke do točke nošen u rukama a uvjeti transporta su bili isti, razlika između najveće i najmanje vrijednosti hoda je više nego dvostruka. Na stajalištu 1 hod je imao najveću vrijednost i iznosio je $1,584 \mu\text{ms}^{-2}/\text{sat}$, a na stajalištu 2 je imao najmanju vrijednost i iznosio je $0,720 \mu\text{ms}^{-2}/\text{sat}$. U pet minuta mjerenja najveći hod prouzrokuje popravak $-0,132 \mu\text{ms}^{-2}$, a najmanji $-0,060 \mu\text{ms}^{-2}$.

Usporedbom hodova na sva tri stajališta možemo uočiti da je hod bio u sva tri slučaja pozitivan. Stacionarni hod korištenoga gravimetra dobiven s pomoću kontinuiranog praćenja njegova rada također je pozitivan. Stacionarni hod u razdoblju mjerenja iznosio je $0,175 \mu\text{ms}^{-2}/\text{sat}$. Iz tablice 1 može vidjeti da su hodovi na stajalištu veći od stacionarnoga hoda i imaju vrijednosti od $0,720 \mu\text{ms}^{-2}/\text{sat}$ do $1,584 \mu\text{ms}^{-2}/\text{sat}$. Veća vrijednost hoda je utjecaj transporta.

Tablica 1. Parametri i njihova standardna odstupanja za sva tri stajališta

Stajalište	a_1 [μms^{-2}]	s_{a1} [μms^{-2}]	a_2 [$\mu\text{ms}^{-2}/\text{sat}$]	s_{a2} [$\mu\text{ms}^{-2}/\text{sat}$]
1	41630,0320	0,0253	1,5840	0,4950
2	41631,5220	0,0284	0,7200	0,5563
3	41629,2020	0,0390	0,9120	0,7635

U prvome primjeru obrađena su gravimetrijska mjerenja na stajalištu 1, koja opisuju jasan uzlazni trend. Na slici 1 prikazani su mjerenja, model i korigirana mjerenja na stajalištu.



Slika 1. Mjerenja gravimetra, model i korigirana mjerenja za stajalište 1

U tablici 2 prikazana je obrada gravimetrijskih mjerenja za stajalište 1. Oznaka stajališta, mjerenja i vrijeme veličine su preuzete iz gravimetra, a ostale su veličine dobivene njihovom obradom.

Aritmetička sredina mjerenih veličina na stajalištu 1 iznosi $41630,098 \mu\text{ms}^{-2}$ i ima standardno odstupanje $0,059 \mu\text{ms}^{-2}$. Nakon stajališne obrade, sredina iznosi $41630,032 \mu\text{ms}^{-2}$ i ima pripadno standardno odstupanje $0,028 \mu\text{ms}^{-2}$. Razlika između sredina prije i nakon stajališne obrade iznosi $0,066 \mu\text{ms}^{-2}$ i značajna je veličina.

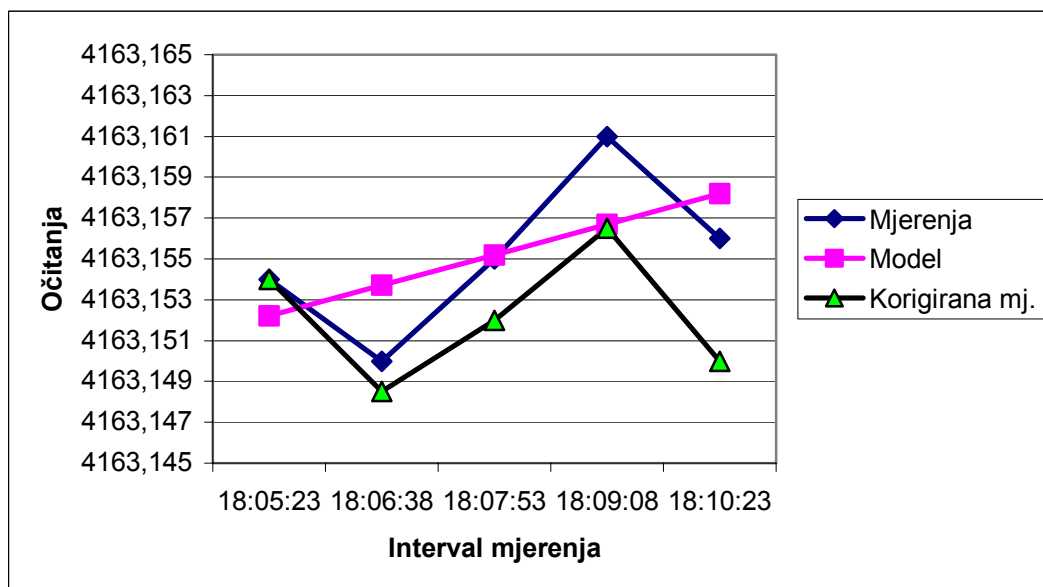
Korigirana mjerenja u tablici 2 dobivena su popravljajanjem mjerenih veličina za hod. Na taj je način uklonjen sustavni dio iz mjerenja na stajalištu. Hod se odnosi na vrijeme prvoga mjerenja, pa se i sva korigirana mjerenja odnose na epohu prvoga mjerenja. Standardna odstupanja mjerenja kod korigiranih su se mjerenja smanjila sa $0,059 \mu\text{ms}^{-2}$ na $0,028 \mu\text{ms}^{-2}$. Iz toga slijedi da korigirane vrijednosti imaju manje rasipanje oko sredine u odnosu na originalno mjerene vrijednosti. Odstupanja su dobivena na temelju razlike sredine korigiranih mjerenja i pojedinoga korigiranog mjerenja. U slučaju kada se u obradi ne koriste standardna odstupanja mjerenja, korigirane vrijednosti su centrirane i njihova je očekivana vrijednost jednaka nuli. Na osnovi njih možemo procijeniti slučajna svojstva mjerenja, tj. svojstva šuma.

Tablica 2. Obrada gravimetrijskih mjerenja za stajalište 1

Stajalište	Mjerenja	Vrijeme	Model	Korekcija za hod	Korigirana mjerenja	Odstupanja
	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	[hh:mm:ss]	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	$[\mu\text{ms}^{-2}]$
1	41630,00	19:52:39	41630,032	0,000	41630,000	0,032
1	41630,10	19:53:54	41630,065	-0,033	41630,067	-0,035
1	41630,10	19:55:09	41630,098	-0,066	41630,034	-0,002
1	41630,15	19:56:24	41630,131	-0,099	41630,051	-0,019
1	41630,14	19:57:39	41630,164	-0,132	41630,008	0,024
<i>Sredina</i>	41630,098		41630,098		41630,032	
<i>St. dev.</i>	0,059		0,052		0,028	

U drugome primjeru, na stajalištu 2, mjerenja opisuju blagi rastući trend s nepravilnim skokovima (v. sl. 2).

Iz tablice 3 se vidi da je standardno odstupanje korigiranih mjerenja manje u odnosu na standardno odstupanje mjerenja, što upućuje na manje rasipanje korigiranih mjerenja oko sredine nego što je to slučaj kod mjerenih veličina. Sredine se razlikuju za $0,030 \mu\text{ms}^{-2}$.

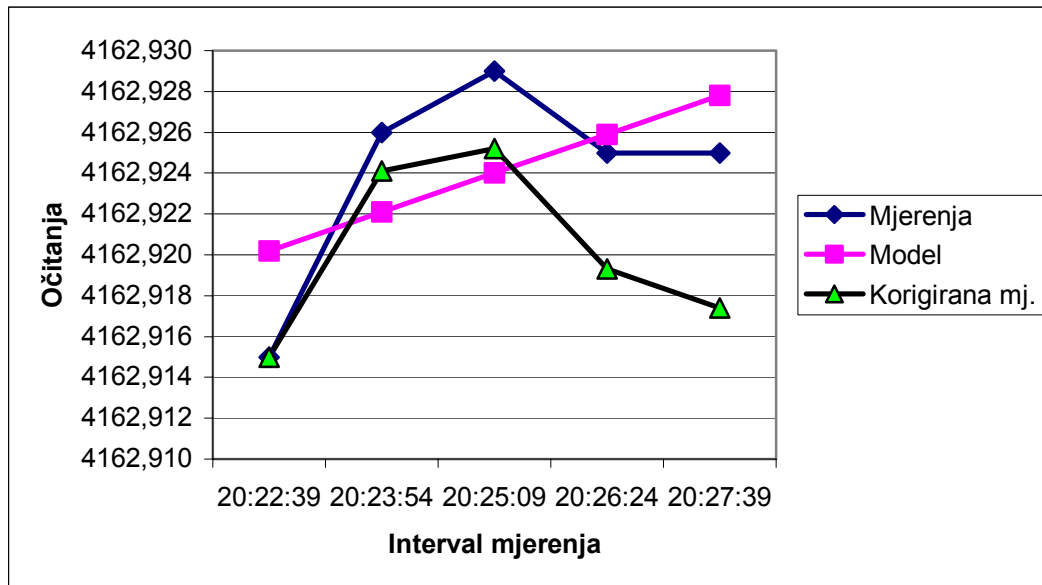


Slika 2. Mjerenja gravimetra, model i korigirana mjerenja za stajalište 2

Tablica 3. Obrada gravimetrijskih mjerenja za stajalište 2

Stajalište	Mjerenja	Vrijeme	Model	Korekcija za hod	Korigirana mjerenja	Odstupanja
	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	[hh:mm:ss]	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	$[\mu\text{ms}^{-2}]$	$[\mu\text{ms}^{-2}]$
2	41631,54	18:05:23	41631,522	0,000	41631,540	-0,018
2	41631,50	18:06:38	41631,537	-0,015	41631,485	0,037
2	41631,55	18:07:53	41631,552	-0,030	41631,520	0,002
2	41631,61	18:09:08	41631,567	-0,045	41631,565	-0,043
2	41631,56	18:10:23	41631,582	-0,060	41631,500	0,022
<i>Sredina</i>	41631,552		41631,552		41631,522	
<i>St. dev.</i>	0,040		0,024		0,032	

Mjerenja na stajalištu 3 opisuju paraboličan oblik (v. sl. 3 i tablicu 4). Paraboličan je oblik nepoželjan, pa je i taj problem najbolje riješiti povećanjem broja mjerenja na stajalištu. Treba skupiti dovoljan broj mjerenja kako bi se sa sigurnošću moglo utvrditi ponašanje gravimetra na stajalištu.



Slika 3. Mjerenja gravimetra, model i korigirana mjerenja za stajalište 3

Tablica 4. Obrada gravimetrijskih mjerenja za stajalište 3

Stajalište	Mjerenja	Vrijeme	Model	Korekcija za hod	Korigirana mjerenja	Odstupanja
	[μms ⁻²]	[hh:mm:ss]	[μms ⁻²]	[μms ⁻²]	[μms ⁻²]	[μms ⁻²]
3	41629,15	20:22:39	41629,202	0,000	41629,150	0,052
3	41629,26	20:23:54	41629,221	-0,019	41629,241	-0,039
3	41629,29	20:25:09	41629,240	-0,038	41629,252	-0,050
3	41629,25	20:26:24	41629,259	-0,057	41629,193	0,009
3	41629,25	20:27:39	41629,278	-0,076	41629,174	0,028
<i>Sredina</i>	41629,240		41629,240		41629,202	
<i>St. dev.</i>	0,053		0,030		0,044	

Mjerenja na stajalištu 3 mijenjaju se s amplitudom od 0,14 μms⁻², što je približna vrijednost koja se javlja i na drugim stajalištima. Standardno odstupanje korigiranih mjerenja nakon stajališne analize manje je u odnosu na standardno odstupanje mjerenih veličina, a sredine se razlikuju za 0,038 μms⁻².

Glavne analitičke veličine za analizu gravimetrijskih mjerenja na stajalištu su stajališni hod i standardna devijacija korigiranih mjerenja. Stajališni hod dobiven je primjenom prikazane stajališne analize na mjerenja, a to su najelementarnije korisničke informacije mjerenja gravimetrom. Stajališni hod je veličina koja se može koristiti u analizi kvalitete mjerenja i stabilnosti mjernog sustava. On za razliku od ostalih hodova naj vjernije opisuje mjerenja. Njegovom analizom dobivamo uvid u stabilnost mjernog sustava gravimetra na pojedinom stajalištu i kratko periodično ponašanje mjernog sustava. On sadrži stacionarni hod i iznos koji je u velikoj mjeri prouzročen zaostalom reakcijom mjernog sustava na mehaničke šokove za vrijeme transporta. Zbog relativno kratkog trajanja mjerenja na stajalištu ima kratkoperiodični karakter. Stajališni hod ponajprije ovisi o utjecajima vezanima uz pojedino stajalište. Naravno, u tijeku mjerenja treba računati i s kumulativnim utjecajem transporta na mjerenje.

4. Zaključci

Stajališnom analizom obrađujemo gravimetrijska mjerenja na pojedinom stajalištu. Mjerenja su obrađena na svakom stajalištu kao zasebna cjelina kako bi se izbjeglo miješanje utjecaja koji se javljaju prilikom kombiniranja mjerenja na više stajališta. Njome dobivamo sustavni utjecaj definiran stajališnim hodom i slučajni dio kao razlike mjerenja od modela.

Stajališni hod javlja se kao veličina sa specifičnostima koje nisu prisutne kod drugih hodova (stacionarni, transportni i dnevni hod). On se može primijeniti kao analitička veličina za analizu mjerenja i mjernog sustava gravimetra koja vjerno opisuje mjerenja.

Stajališna analiza omogućuje uvid u kvalitetu mjerenja i stabilnost mjernog sustava. Usporedbom stajališnih hodova na više stajališta može se procijeniti stabilnost mjernog sustava u duljem vremenskom razdoblju. Na osnovi stajališne analize možemo procijeniti slučajne značajke (šum) mjerenja.

Literatura

- Brčić, I., H. O. Seigel (1999): Recent Performance Evaluations and Applications of the Scintrex CG-3M Microgravimeter, URL:<http://www.scintrexltd.com>.
Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling (1988): Numerical recipes. Cambridge University Press, Cambridge 1988.
Torge, W. (1989): Gravimetry, Walter de Gruyter.

Analysis of the gravimetric measurements on the station

ABSTRACT: Procedure of analysis of gravimetric data on the station is given. With given procedure systematic and random part of the measurement on the station can be defined. Station drift is used to judge quality of measurements and behavior of the measurements sensor. It represents systematic influence on the station measurements. It has specific characteristics that are different in comparison to static, transportation or daily drift. Three characteristic examples of gravimetric measurements on the station are analysed. Comparing station drift on the more sites, stability of the gravimeter measurements system in the longer time period can be judged.

Key words: static drift, transportation drift, daily drift, station drift, stability of measurement system.