

S. Naod, Lj. Brajović, O. Odalović, M. Malović, G. Todorović, and R. Gospavić, 'Gravitacioni gradiometri koji se koriste u satelitskim misijama - princip rada i merne karakteristike', in Zbornik radova / Kongres metrologa 2015, Zlatibor, 12.-15. oktobar 2015. godine, Beograd, 2015, vol. sesija7, rad No.3.

GRAVITACIONI GRADIOMETRI KOJI SE KORISTE U SATELITSKIM MISIJAMA - PRINCIP RADA I MERNE KARAKTERISTIKE

Sofija Naod, Ljiljana Brajović, Oleg Odalović, Miodrag Malović, Goran Todorović, Radovan Gospavić

Ključne reči: Elektrostatički akcelerometar, gradiometar, GOCE

KRATAK SADRŽAJ

Elektrostatički gravitacioni gradiometar (GG) je osnovni instrument koji se u okviru ESA GOCE satelitske misije koristi za merenje Zemljinog gravitacionog polja sa velikom tačnošću. On se sastoji od tri para troaksijalnih elektrostatičkih akcelerometara (EA) postavljenih u stabilnu dijamantsku konfiguraciju. Ovi EA su usavršene verzija sličnih, koji su se koristili u okviru misija GRACE i CHAMP, a njihove dodatno poboljšane verzije se već razvijaju za buduće satelitske i svemirske misije. U ovom radu je opisan princip rada EA i GG, pokazana je zavisnost izlaznih podataka od jačine gravitacionog polja, ali i od ostalih ne gravitacionih uticaja. Prikazane su merne karakteristike i uzroci koji utiču na mernu nesigurnost ovih instrumenata.

GRAVITY GRADIOMETERS APPLIED IN SATELLITE MISSIONS - WORKING PRINCIPLE AND MEASURING CHARACTERISTICS

Keywords: electrostatic accelerometer, gravity gradiometer, GOCE

ABSTRACT

Electrostatic gravity gradiometer (GG) is the fundamental instrument of ESA GOCE satellite mission for highly precision Earth gravity gradient measurements. It consists of six tri-axis electrostatic accelerometers (EA) arranged in stable diamond configuration. These EA are improved version of the previously used in CHAMP and GRACE missions and they are base for the new ones that are under investigation for future space missions. The working principles of EA is explained. Their outputs dependence of gravitational field is derived as well as the influence of non-gravitational forces. Measuring performance and influences on the uncertainty of these instruments are presented.

UVOD

Određivanje spoljašnjeg gravitacionog polja Zemlje zadatak je geodezije i drugih srodnih nauka. Satelitska gradiometrija jedna je od tehnika koja služi tom cilju, a zasniva se na merenju gradijenta gravitacionog ubrzanja. Sateliti koji se kreću po niskoj, približno kružnoj i približno polarnoj putanji poseduju instrumente kojima se meri promena gravitacionog ubrzanja. Kako vektor gravitacionog ubrzanja predstavlja prvi izvod gravitacionog potencijala, gradijenti gravitacije predstavljaju druge izvode gravitacionog potencijala. Senzor koji meri druge izvode gravitacionog potencijala, odnosno promenu gravitacionog ubrzanja naziva se gradiometar. Tenzor koji formiraju drugi izvodi gravitacionog potencijala naziva se tenzor gradijenta gravitacije.

Dok se satelit kreće po orbiti na njega deluju gravitacione i negravitacione sile. U gravitacione sile spadaju dejstvo gravitacionog polja Zemlje, Meseca, Sunca i drugih nebeskih tela. Ove sile mogu biti predstavljene tenzorom gradijenta gravitacije. U negravitacione sile spadaju otpor preostale atmosfere, pritisak elektromagnetnog zračenja i solarnog vetra, Koriolisova sila, kao i sile izazvane rotacijom satelita. Negravitacioni efekti su kod satelita sa niskom orbitom dosta izraženi, pa je akcelerometar značajan instrument kod tih satelita, jer se njime određuju negravitacione sile.

Princip rada gravitacionih gradiometara (GG) zasniva se na diferencijalnoj akcelerometriji koja podrazumeva merenje ubrzanja u dve bliske tačke. Ubrzanje se meri akcelerometrima, a promena gravitacionog ubrzanja dobija se iz razlike dve vrednosti ubrzanja. Iako koncept satelitske gradiometrije postoji više od 50 godina [1], GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*) je prva satelitska misija koja je koristila GG.

Glavni cilj GOCE misije je određivanje gravitacionog polja Zemlje koje se zasniva na merenjima GG. Na taj način moguće je:

- određivanje anomalija gravitacionog polja sa tačnošću od 1 mgal tj. 10^{-5} ms^{-2} .
- određivanje geoida sa tačnošću od 1-2 cm.
- ostvariti prostorna rezoluciju merenja gravitacionog polja bolju od 100 km.

Pored satelitske gradiometrije satelit koristi i metod međusatelitskog praćenja. Gradiometrom se dobijaju kratkotalasne informacije gravitacionog polja na osnovu kojih se modelira stacionarno gravitaciono polje visoke rezolucije, dok GPS/GNSS prijemnik služi za određivanje preciznog položaja satelita i računanje poremećaja orbite na osnovu čega se modeliraju dugotalasne karakteristike gravitacionog polja. Elektrostatički GG koji je korišćen u satelitskoj misiji GOCE sastoji se od elektrostatičkih akcelerometara (EA) koji se nazivaju GRADIO i izradila ga je ONERA (*Office National d'Etudes et de Recherches Aéropatiales*). Elektrostatički akcelerometri od kojih se on sastoji su poboljšane verzije STAR (*Spatial Triaxial Accelerometer for Research*) i SuperSTAR akcelerometra koje je izradila takođe ONERA, a koji su korišćeni u satelitskim misijama CHAMP (*CHALLENGING Minisatellite Payload*) i GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), a deo su NASA projekta satelitske gradiometrije. U okviru ove dve misije EA su postavljani na dva bliska satelita i na osnovu položaja satelita i merenih ubrzanja je određivan gradijent gravitacionog polja [2].

Rad EA od kojih se sastoji gradiometar, zasniva se na merenju sile koja je potrebna da bi se merna masa (MM) održala u centru kućišta i na taj način nema pokretnih komponenti.

Akcelerometri u okviru GOCE misije se u usavršenim varijantama predlažu za korišćenje u budućim svemirskim misijama gde je potrebna manja masa, veća osetljivost i tačnost i eliminisanje uticaja pojedinih negravitacionih efekata na satelit.

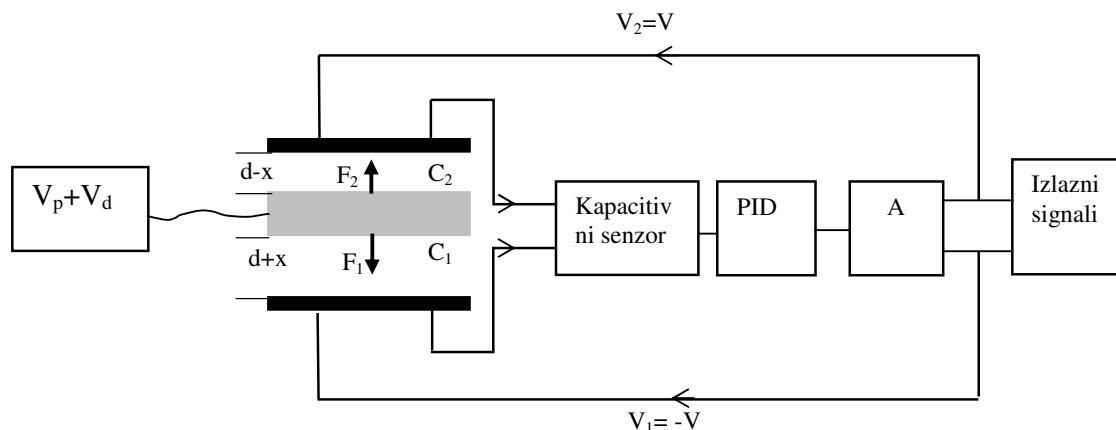
U ovom radu će detaljno biti opisan princip rada i merne karakteristike EA i GG koji se koristi u GOCE misiji. Poznavanje veličina koje utiču na tačnost i osetljivost ovih instrumenata omogućava da se

pogodnom obradom mernih rezultata dobiju podaci o promenama gravitacionog polja Zemlje sa velikomom tačnošću što je od interesa za primenu rezultata GOCE misije u velikom broju naučnih oblasti.

ELEKTROSTATIČKI AKCELEROMETAR

Princip rada jednoosnog elektrostatickog akcelometra

Troaksijalni akcelometar GRADIO se zasniva na principu lebdenja MM unutar senzorskog kućišta. Osnovni princip rada EA će biti opisan na osnovu jednoosnog akcelometra [3], [4]. Na Slici 1 je prikazana blok šema jednoosnog EA.



Slika 1. Blok šema jednoosnog elektrostatickog akcelometra

Merna masa je postavljena između dve pravougaone elektrode, na koje se redom dovode naponi $V_1 = +V$ i $V_2 = -V$. Merna masa je povezana na napon V_t koji je jednak zbiru jednosmernog polarizacionog napona V_p i prostoperiodičnog napona $V_d(t)$ tj.

$$V_t = V_p + V_d(t) \quad (1)$$

Frekvencija napona V_d je 100kHz i ona je suviše visoka da može da utiče na kretanje MM. Nominalni položaj MM je u sredini između elektroda kada je njeno rastojanje od obe elektrode jednako d , pa je $x=0$. Između ploča kondenzatora i površina merne mase javljaju se električne sile intenziteta F_1 i F_2 . Pretpostavlja se da su naponi V i V_t pozitivni. Između površina merne mase i elektroda sa obe strane formiraju se kondenzatore kapacitivnosti C_1 i C_2 . Kada je MM u položaju $x=0$ ove kapacitivnosti su jednake. Kapacitivni detektor koji radi po principu diferencijalnog kapacitivnog mosta se koristi za merenje odstupanja MM od nominalnog položaja tj. veličine x . Kada se pod dejstvom spoljašnjih sila MM izvede iz svog nominalnog položaja, izlaznim signalom sa kapacitivnog mosta se preko povratne sprege kontroliše napon V i vraća i održava MM nepokretnom u nominalnom položaju. Povratna sprega sadrži PID regulator.

Jednačina kretanja merne mase se može izraziti preko razlike električnih sila koje u okviru ovih kondenzatora deluju na mernu masu. Prema Kulonovom zakonu imamo da je sila između ploča kondenzatora data kao

$$F_{ci} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 A E_i^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 A \left(\frac{U_i}{s_i} \right)^2 \quad \text{za } i=1,2 \quad (2)$$

gde su ε_0 – dielektrična konstanta vakuuma, A - površina elektroda, tj merne mase, E_i -električno polje unutar kondenzatora, U_i -napon između ploča kondenzatora i s_i -rastojanje između ploča kondenzatora, gde je $i=1$ ili 2 . Veza između napona i električnog polja unutar kondenzatora je uvedena pod pretpostavkom da je polje unutar kondenzatora homogeno.

Pošto je privlačna sila u polju E_1 suprotnog smera od privlačne sile u polju E_2 ukupna kapacitivna (električna) sila koja deluje na mernu masu je

$$F_c = \frac{1}{2} \varepsilon_0 S (E_1^2 - E_2^2) \quad (3)$$

Ako ce u jednačinu (3) zameni da je $U_1 = V - (V_p + V_d(t))$, $U_2 = (V_p + V_d(t)) - (-V)$, $s_1 = d - x$, i $s_2 = d + x$, dobija se

$$F_c = \frac{1}{2} \varepsilon_0 S \left(\frac{V^2 - 2VV_t + V_t^2}{(d-x)^2} - \frac{V^2 + 2VV_t + V_t^2}{(d+x)^2} \right) \quad (4a)$$

Zbog visoke frekvencije napona V_d određuje se usrednjena sila u nekom vremenskom interval, koja se može predstaviti izrazom

$$\hat{F}_c = \frac{1}{2} \varepsilon_0 S \left(\frac{V^2 - 2VV_p + \hat{V}_t^2}{(d-x)^2} - \frac{V^2 + 2VV_p + \hat{V}_t^2}{(d+x)^2} \right) \quad (4b)$$

gde je \hat{V}_t usrednjena vrednost V_t tokom tog vremenskog intervala jednaka $\hat{V}_t = V_p^2 V_p^2 + \hat{V}_d^2$, a \hat{V}_d je srednja kvadratna vrednost napona V_d .

Jednačina (4b) je nelinearna funkcija od V i x , ali za $x=0$ ona postaje linerna funkcija od V . Razvojem u red u okolini $x=0$ tj. za male vrednosti x/d , uz zanemarivanje članova višeg reda jednačina (4b) postaje

$$\hat{F}_c(V, x) = \frac{2 \varepsilon_0 S}{d^2} (VV_p - \frac{x}{d} \hat{V}_t^2) \quad (5)$$

Napon V se kontroliše i meri preko povratne sprege sa PID kontrolerom, pa je jednakost

$$V(x) = K_{PID} \omega_0^2 \left(\frac{\dot{x}}{\omega_d} + x + \omega_i \int_0^t x dt \right) \quad (6)$$

gde su : K_{PID} ukupno pojačanje PID kontrolera, ω_0 -sopsvena učestanost kontrolera ω -karakteristična učestanost integratora, ω_i - karakteristična učestanost diferencijatora.

Kada se EA izlaže nekoj spoljašnjoj sili F_{ext} koja je rezultanta gravitacionih i nekonzervativnih sila koje deluju na satelit, kontrolni napon V se podešava tako da je MM u svom nominalnom položaju. Na nju deluju i električne sile unutar akcelometra i spoljašnje sile pa je jednačina njenog kretanja

$$M\ddot{x} = F_{ext} + F_c(V(x), x) \quad (7)$$

Uvođenjem jednačina (5) i (6) u (7) dobija se relativno ubrzanje merne mase u odnosu na kućište kao

$$\ddot{x} = -\frac{2 \varepsilon_0 S V_p}{Md^2} K_{PID} \omega_0^2 \left(\frac{\dot{x}}{\omega_d} + x + \omega_i \int_0^t x dt \right) + \frac{2 \varepsilon_0 S \hat{V}_t^2}{Md^3} x + \frac{F_{ext}}{M} \quad (8)$$

Zbog održavanja merne mase nepokretnom $\ddot{x} \approx 0$, pa je $0 \approx \frac{F_c}{M} + \frac{F_{ext}}{M}$, tj. $0 \approx \frac{F_c}{M} + \frac{F_{ext}}{M}$.

Veličina koja se meri na akcelometru je kontrolni napon koji se dovodi na MM da bi ona bila u nominalnom položaju. Odstupanje x od ravnotežnog položaja je veoma malo, pa jednačina (8) postaje

$$\frac{F_c}{M} \approx -\frac{2 \varepsilon_0 S V_p}{Md^2} K_{PID} \omega_0^2 \left(\frac{\dot{x}}{\omega_d} + x + \omega_i \int_0^t x dt \right) = -\frac{2 \varepsilon_0 S V_p}{Md^2} V(x) = -\frac{F_{ext}}{M} \quad (9)$$

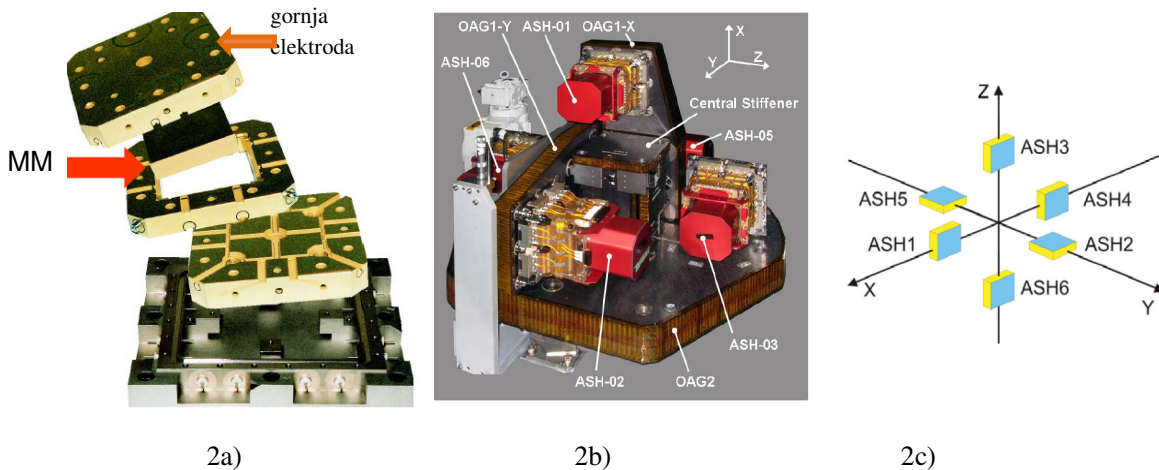
tj.

$$\frac{F_{ext}}{M} = a \approx G_{el} \cdot V(x) \quad (10)$$

G_{el} je elektrostatičko pojačanje tj. konstanta srazmernosti kojom treba pomnožiti kontrolni napon da bi se izražavao kao relativno ubrzanje MM u odnosu na electrode pod dejstvom spoljašnjih sila. Na osnovu jednačine (9) se vidi da njegova vrednost zavisi od mase i dimenzija MM, od nominalne dimenzije procepa i polarizacionog napona. Izvedena jednačina predstavlja statički model akcelometra.

Struktura i karakteristike GRADIO akcelometra

Merna masa GRADIO akcelometra je pravougaonog oblika dimenzija 4cmx4cmx1cm napravljena je od legure platina-rodijum (Pt-Rh), teška 320 g i može slobodno da se kreće unutar kućišta koje je napravljeno od ULE (Ultra Low Expansion Silica Glass) ploča u koje je ugravirano i prevučeno zlatom 8 pari elektroda. Kontrolisanim naponima koji se dovode na ove electrode, kao i na MM, omogućava se da se ona ne pomera u odnosu na kućište [5]. Ovi naponi predstavljaju i izlazne veličine EA. Oblik MM omogućava da se EA testira na Zemlji, tako što se dovođenjem visokog napona na njegove najveće površine vrši kompenzacija težine MM tj. ona lebdi. Na slici 2a je predstavljena MM i kućište EA. Na slici 2b) je predstavljen gradiometar i njegova orijentacija u odnosu na koordinate vezane za satelit. Šest EA koji su označeni sa ASH-i (i=1 do 6) postavljeni su simetrično u odnosu na centar mase gradiometra, što je šematski prikazano na slici 2c). Od 8 pari elektroda, četiri para se koriste za Y-Z translaciono kretanje MM i za Φ rotaciju (oko x-ose), a četiri para za preostalu translaciju duž X-ose i Θ - Ψ rotacije (tj. rotacije oko Y i Z ose). Odgovarajućim kombinacijama signala sa ovih osam kanala se određuje šest translacionih i rotacionih stepeni slobode MM.



Slika 2. a) Struktura akcelometra b) struktura gradiometra c) orijentacija akcelometara

Kada se MM nalazi u sredini kućišta postoji uzak procep između njene i površina elektroda. U pravcu y i z osa EA (koje su paralelne dužim stranicama MM) on je jednak 299 μ m, a u pravcu x ose 32 μ m.

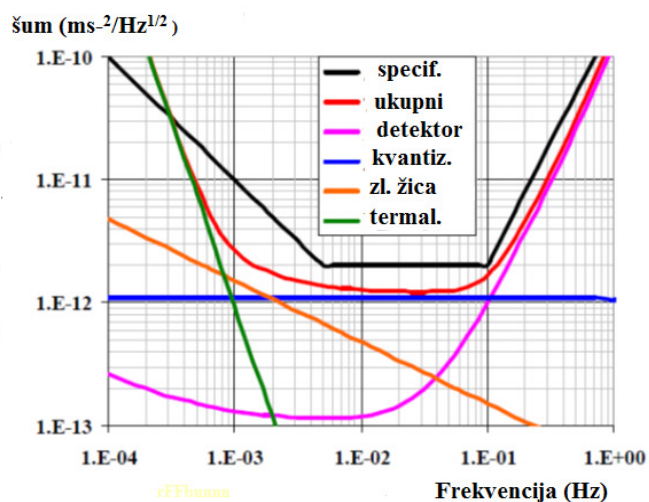
Detekcija položaja MM vrši se preko merenja razlika kapacitivnosti između MM i odgovarajućih elektroda. Merni kapacitini mostovi koji se za to koriste rade na frekvenciji od 100kHz, a aktuator koji vrši kontrolu napona na senzoru da bi se kontrolisao položaj MM radi na 1024Hz. U jezgru postoje mehanički odstoynici kako bi se sprečio direktan kontakt MM i elektroda kućišta, najmanje rastojanje MM i kućišta duž x ose iznosi 15 μ m, a duž y i z osa po 30 μ m. Ovim se minimiziraju udari na MM usled vibracija tokom lansiranja satelita i za vreme testiranja. Jedina mehanička veza između MM i kućišta je zlatna žica debljine 5 μ m koja omogućava polarizaciju MM.

Što se tiče osetljivosti i tačnosti postoje dva načina rada ovih EA i to akvizicioni i naučni. Polarizacioni napon V_p , se može birati između 27V u akvizicionom i 7,5V u naučnom načinu. Prostoperiodični napon V_d ima frekvenciju 100kHz i praktično predstavlja noseći signal pri određivanju kapacitivnosti senzora i omogućava lock-in detekciju kretanja MM, ima efektivnu vrednost 1,3V u akvizicionom. a 7,6V u naučnom načinu. Akvizicioni način omogućava detektovanje većeg opsega položaja MM, ali nema optimalnu rezoluciju. Odabrani V_p uspešno pokreće MM ka centru kućišta u svim mogućim slučajevima spoljašnjeg ubrzanja i početnog položaja MM. Naučni merni način daje visoku rezoluciju detektovanog signala i tako omogućava da senzor radi sa maksimalnom osetljivošću kada je satelit u orbiti.

Merne karakteristike akcelometara u okviru gradiometra

Merne karakteristike EA se definišu preko opsega u kojima može da se primenjuje u amplitudsko-frekventnom domenu. U GOCE misiji frekventni opseg je posebno izabran između 5mHz i 100mHz i cilj pri izradi je bio smanjenje i optimizovanje šuma različitog porekla u ovom opsegu. Najvažnije komponente u ukupnom šumu su: šum detektora, šum usled napajanja MM preko žice, kvantizacioni šum AD konvertora i šum usled fluktuacije temperature. Na slici 3 su predstavljene zavisnosti spektralnih snaga posebnih tipova šuma, ukupnog šuma koji unosi EA i specifičanog maksimalnog šuma izraženi preko rezolucije merenog ubrzanja.

Šum koji nastaje u elektronskom kolu detektora zbog kontrolne petlje raste sa frekvencijom. Korišćenjem kontakta sa MM preko zlatne žice prečnika 5 μ m je omogućeno da se u kontrolnoj petlji stvara usled ovog kontakta šum znatno manji od dozvoljenog. Kvantizacioni šum je takođe značajno ispod dozvoljenog i



Slika 3. Spektralna karakteristika različitih tipova šuma ASH3

nije ograničavajući uzrok, jer je korak kvantizacije znatno ispod nivoa projektovanog šuma instrumenta. Iako gradiometar ima temperatursku kontrolu i uspostavljen je visok vakuum u kućištu EA, varijacije temperature dovode do pojave šuma na niskim frekvencijama, pretežno zbog radiometarskog efekta usled razlike temperatura spoljašnjih površina MM [5].

U tabeli 1 su dati nivoi šuma na graničnim frekvencijama mernog opsega za sve akcelometre po najvažnijim osama. Ako je opseg merenog ubrzanja $\pm 6,5 \times 10^{-6} \text{ms}^{-2}$, u naučnom modu dobija se dinamički opseg signala veći od $3 \cdot 10^6$. Ovo pokazuje veliko poboljšanje u odnosu na EA u CHAMP I GRACE misijama koji su imali opseg šuma od $3,0 \times 10^{-9} \text{ms}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ do $1,0 \times 10^{-10} \text{ms}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ [5].

Tabela 1 Nivoi šuma pojedinih osa akceleratora na granicama frekventnog opsega

	Šum ($\text{ms}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$)	
	na $f=5\text{mHz}$	na $f=100\text{ mHz}$
Specificirani maks. nivo	$2,04 \cdot 10^{-12}$	$2,04 \cdot 10^{-12}$
ASH-01 (X)	$1.42 \cdot 10^{-12}$	$2.02 \cdot 10^{-12}$
ASH-04 (X)	$1.52 \cdot 10^{-12}$	$1.90 \cdot 10^{-12}$
ASH-02 (Y)	$1.49 \cdot 10^{-12}$	$1.87 \cdot 10^{-12}$
ASH-05 (Y)	$1.44 \cdot 10^{-12}$	$1.75 \cdot 10^{-12}$
ASH-03 (Z)	$1.38 \cdot 10^{-12}$	$1.67 \cdot 10^{-12}$
ASH-06 (Z)	$1.50 \cdot 10^{-12}$	$1.78 \cdot 10^{-12}$

Nelinerna zavisnost ubrzanja od napona na akceleratoru

Jednačina (10) daje linearnu vezu merenog ubrzanja i napona na elektrodama EA zbog uvođenja aproksimacija. Ako se u merenju napon računaju i napon šuma kao i napon izlazu sa EA pri ubrzanju jednakom nula, a koji postoji usled nesavršenosti izrade akceleratora i ako se ne

primeni aproksimacija izraza (4b) samo prvim članom razvoja, izraz za mereno ubrzanje u pravcu neke ose (x, y ili z) od napona sa EA za tu osu može da se napiše kao

$$a_i = G_i(1 + K_{1,i})V_i + (K_{2,i})G_i^2 V_i^2 + n_i + b_i \quad (12)$$

U izrazu (12) n_i je napon šuma, $K_{1,i}$ je merna nesigurnost određivanja G_{ei} . Kvadratni faktor $K_{2,i}$ je posledica nesimetrije elektroda i upotrebljenih elektronskih komponenti, pa se napadne tačke elektrostatičkih sila i geometrijski centar akceleratora idealno ne poklapaju. Zbog toga se javlja merna nesigurnost sistematskog tipa (bias) što je uneto kao član b_i u (8). Pri kalibraciji akceleratora na Zemlji se zato određuju $K_{1,i}$ i $K_{2,i}$ i to zahvaljujući mogućnosti lebdenja MM. Pored ovih grešaka pojedinih EA, određuju se slični parametri i za parove akceleratora koji leže na istoj osi, kako bi se eliminisali uticaji nepoklapanja njihovih osa i odstupanja njihovog rastojanja od nominalnog.

PRINCIP RADA ELEKTROSTATIČKOG GRADIOMETRA

Elektrostatički GG u okviru GOCE misije sastoji se od tri para EA. Tri ose EGG međusobno su normalne, a centar troosnog sistema poklapa se sa centrom mase gradiometra, kako je prikazano na slici 2b). Ovakva dijamantska konfiguracija akceleratora pričvršćena je na ultrastabilnu karbonsku strukturu. Rastojanje između dva akceleratora na jednoj osi iznosi 0,5m.

Ako se sa a obeleži ubrzanje MM u odnosu na kućište usled spoljašnjih sila kod idealnog EA primenjeni napon V je funkcija tog ubrzanja, što se predstavlja izrazom

$$V = F \cdot a \quad (11)$$

i predstavlja drugačije napisanu jednačinu (10).

Izmereno relativno ubrzanje određeno je razlikom ubrzanja kućišta i ubrzanja MM.

$$a_{\text{mereno}} = a_{\text{kućišta}} - a_{\text{merne mase}} \quad (12)$$

Ukoliko se posmatra satelit u orbiti, mora se uzeti u obzir i rotacija akceleratora u odnosu na centar mase satelita, kao i rotacija samog satelita, pa je model relativnog ubrzanja merne mase dat jednačinom kretanja:

$$a_{mereno} = -([U] - [\Omega]^2 - [\dot{\Omega}]) \cdot R_i + 2[\Omega] \cdot \dot{R}_i + D - S_i - M_i \quad (13)$$

Matrica $[U]$ je tenzor gravitacionog gradijenta:

$$[U] = \begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{yz} & U_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Članovi matrice $[\Omega]$ su ugaone brzine, dok su članovi matrice $[\dot{\Omega}]$ ugaona ubrzanja:

$$[\Omega] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}, \quad [\dot{\Omega}] = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Komponenta $[U]R_i$ predstavlja relativno ubrzanje merne mase i kućišta, gde je R_i vektor položaja centra mase satelita i akcelerometra. $[\Omega]^2 R_i$ je centrifugalno ubrzanje MM, dok je $[\dot{\Omega}]R_i$ linearno ubrzanje MM usled rotacije satelita. Koriolisovo ubrzanje dato je sa $2[\Omega] \cdot \dot{R}_i$. Ubrzanje satelita usled ostalih negravitacionih sila (otpor preostale atmosfere, pritisak elektromagnetnog zračenja i dr.) predstavlja komponenta D , dok je ubrzanje usled gravitacione sile samog satelita S_i . Ubrzanje koje proizvodi magnetno polje dato je sa M_i .

Kada se posmatraju merenja akcelerometara u paru, mogu se na osnovu šest izmerenih vrednosti spoljašnjeg ubrzanja izvesti tri usrednjene (*common mode*) vrednosti ubrzanja a_c^{ij} i tri diferencijalne (*differential mode*) vrednosti ubrzanja a_d^{ij} . Ako se sa a_i obeleži ubrzanje izmereno na i-tom (ASH-i) akcelerometru onda se vrednosti dobijene kombinacijom merenih ubrzanja sa i-tog i j-tog akcelerometra koji leže na istoj osi predstavljaju kao

$$a_c^{ij} = \frac{1}{2}(a_i + a_j) \quad (15)$$

$$a_d^{ij} = \frac{1}{2}(a_i - a_j) \quad (16)$$

gde (i,j) predstavljaju parove (1,4), (2,5) i (3,6). Imajući u vidu model relativnog ubrzanja prikazan izrazom (13) dobija se:

$$a_c^{ij} = D \quad (17)$$

$$a_d^{ij} = -([U] - [\Omega]^2 - [\dot{\Omega}]) \cdot \overline{R}_{ij} \quad (18)$$

Jednačine pokazuju da ukoliko se posmatra zbir merenja dva akcelerometra na jednoj osi dobija se ubrzanje izazvano negravitacionim uticajim, dok se informacije o gravitacionom i inercijalnom ubrzanju dobijaju na osnovu njihove razlike. Na taj način se *common mode* koristi za merenje negravitacionog uticaja koje deluje na mernu masu, a samim tim i na satelit. Taj podatak koristi sistem za kontrolu visine koji eliminiše negravitacione sile i vraća satelit u orbitu. S druge strane, *differential mode* merenja služi za dobijanje gravitacionog gradijenta duž posmatrane ose. S obzirom da ovo merenje sadrži i ugaono ubrzanje, koriste se i poprečna diferencijalna merenja.

ELEKTROSTATIČKI AKCELEROMETRI I GRADIOMETRI U BUDUĆIM SVEMIRSKIM MISIJAMA

GOCE misija je prva kod koje se koristi GG i predstavlja osnov za buduće zasnovane na sličnoj instrumentaciji. Predviđa se da se rezolucija merenja spusti do $0,7\text{mE/Hz}^{-1}$, čemu bi posebno doprinela bolja kontrola visine satelita i smanjenje uticaja otpora vazduha. Jedna od unapređenih verzija, pod nazivom GAP (*Gravity Advanced Package*) se sastoji od EA sa MM u obliku kocke koji se postavlja na platformu koja rotira pomoću piezoelektričnog motora veoma tačno kontrolisanom ugaonom brzinom [7]. Ovakva konfiguracija omogućava da se pri obradi signala razdvoje uticaji koji potiču od ubrzanja MM i oni koji su posledica merne nesigurnosti sistematskog tipa. Dosada postignuta tačnost ovog EA bez rotacione platforme je nešto lošija od GRADIO akcelerometra, ali se uz rotacionu platform očekuje tačnost merenja ubrzanja od 1pm/s^2 [8]. Svemirska misija MICROSCOPE koja se planira od 2016. godine se pak bazira na diferencijalnom senzoru od dva koaksijalna EA cilindrične simetrije čije su MM od različitih materijala. Parovi ovakvih EA koji leže na istoj osi formiraju gradiometre za koje se očekuje da će postizati tačnost reda 10^{-15} pri planiranom pokušaju merenja razlike između gravitacione i inercijalne mase pri interplanetarnim letovima [9].

ZAKLJUČAK

U okviru CHAMP i GRACE misija merenje gravitacionog ubrzanja i njegovih gradijenata je vršeno pomoću elektrostatičkih akcelerometara koji su zbog nepokretne merne mase i približno linearne zavisnosti izlaznog napona od ubrzanja veoma pogodan za satelitske i svemirske misije. Optimizovanjem njihovih karakteristika i povezivanjem šest EA u stabilnu dijamantsku strukturu ostvaren je dugo planirani cilj, konstrukcija gradiometra sa velikom rezolucijom merenja ubrzanja od $2 \cdot 10^{-12} \text{ms}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ u okviru GOCE misije. Poznavanje detaljnog principa rada EA i gradiometra na bazi njih, kao i pratećih elektronskih kola omogućava podešavanje osetljivost merenja i optimizovanje uzroka šuma. Usrednjavanjem merenih ubrzanja MM duž iste ose mogu se odrediti negravitacioni, a oduzimanjem gravitacioni i inercioni uticaji. Na bazi iskustva GOCE misije razvijaju se novi akcelerometri i gradiometri manje mase i za red do dva veće rezolucije za primene u interplanetarnim misijama.

LITERATURA

- [1] G. Balmino, F. Barlier, A. Bernard, C. Bouzet, G. Riviere, J. Runavot, *Gradio:Project proposal for satellite gradiometry*, NASA TM-76796, 1981.

- [2] P. Touboul, E. Willemenot, B. Foulon, V. Josselin, *Accelerometers for CHAMP, GRACE and GOCE, space missions: synergy and evolution*, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata vol. 40 (3-4), p. 321-327., 1999.
- [3] P. Touboul, , B. Foulon, E. Willemenot, *Electrostatic Space Accelerometers for Present and Future Missions*, Acta Astronautica, Vol.45 (10), p. 605-617,1999.
- [4] B. Frommknecht, H. Oberndorfer, F. Flechtner, R. Schmidt, *Integrated sensor analysis for GRACE – development and validation*, Advances in Geosciences 1, p. 57–63., 2003.
- [5] J. Marque, B. Christophe, F. Liorzou, G. Bodovillé, B. Foulon, J. Guérard, V. Lebat, *The Ultra Sensitive Accelerometers of the ESA GOCE Mission*, 59th International Astronautical Congress, GLASGOW 29 septembre-3 octobre, 2008.
- [6] V. Josselin, E.Willemenot, P. Touboul, *Digital electronics for electrostatic accelerometers interest for high resolution and in-orbit calibration*, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata 40(3-4), p. 483-486., 1999.
- [7] B. Lenoir, A.Lévy, B. Foulona, B. Lamine, B. Christophe, S. Reynaud, *Electrostatic accelerometer with bias rejection for gravitationand Solar System physics*, Advances in Space Research 48, p. 1248-1257., 2011.
- [8] B. Lenoir, B. Christophe, S. Reynaud, *Unbiased acceleration measurements with an electrostatic accelerometer on a rotating platform*, Advances in Space Research 51, 188-197., 2012.
- [9] D. Hudson, R. Chhun, P. Touboul, *Development status of the differential accelerometer for the MICROSCOPE mission*, Advances in Space Research 39, p. 307–314., 2007.