

UDK 629.783:550.831:551.461.6
Pregledni znanstveni članak

Satelitska misija Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE)

Željko HEĆIMOVIĆ¹, Tomislav BAŠIĆ²

SAŽETAK. Satelitska misija GOCE dio je nove generacije programa ESA-e s temom istraživanja Zemlje. GOCE će biti prva misija satelitske gradiometrije gravitacijskog polja Zemlje (SGG). Sofisticirani troosni elektrostatički gradiometar i niska putanja GOCE satelita omogućit će razlučivanje slabih signala Zemljina gravitacijskog polja, a inklinacija putanje GOCE satelita od 96,5° osigurat će gotovo globalnu pokrivenost podacima. GOCE veličine za modeliranje gravitacijskog polja elementi su SGG tenzora i SST poremećaja putanje GOCE satelita. Dobivat će se GOCE globalni geoidi s nepouzdanošću od 1 cm i anomalije ubrzanja sile teže s nepouzdanošću od 1 mGal u rezoluciji od 100 km. Misija ima interdisciplinarni karakter i očekuje se doprinos u područjima: geofizike, geodezije, oceanografije, čvrste Zemlje, glaciologije, i dr. Doprinos misije GOCE geodeziji očekuje se osobito na području: GPS nivelmana, inercijalnih navigacijskih sustava, u definiranju globalnoga visinskog sustava i modeliranju putanje satelita.

Ključne riječi: satelitska misija GOCE, satelitska gradiometrija, troosni elektrostatički gradiometar, SGG tenzor, SST mjerenja.

1. Uvod

European Space Agency (ESA) otvorila je novi ciklus programa satelitskih misija s temom istraživanja Zemlje. Satelitske misije ESA-e podijeljene su na dva glavna programa:

- *Earth Exploration Missions* – istraživačko-demonstrativne misije kojima su cilj napredne spoznaje različitih procesa u geosustavu,
- *Earth Watch Missions* – misije koje se odnose na specifične zahtjeve iz područja nadgledanja Zemlje.

¹ Doc. dr. sc. Željko HEĆIMOVIĆ, Av. M. Držića 76, 10000 Zagreb, zeljko.hecimovic@zg.htnet.hr.

² Prof. dr. sc. Tomislav BAŠIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, tbasic@geof.hr.

Devet satelitskih misija bilo je predloženo za potencijalne kandidate Earth Explorer Missions programa. Misija GOCE odabrana je 1999. godine kao prva misija tog programa, kao dio potprograma The Living Planet Programme kojemu je cilj proučavanje geosustava (Rebhan i dr. 2000). Strategija je potprograma korištenje vremenski kraćih, jeftinijih, tematski ciljanih misija koje će omogućiti jednostavniji i fleksibilniji pristup problematici nadgledanja i premjera Zemlje iz svemira. Ciljevi misija bit će fokusirani na potrebe korisnika u javnom i privatnom sektoru. Takva organizacija i ciljevi misija javljaju se zbog sve većih zahtjeva za brzim i specijaliziranim informacijama kako bi se čim prije moglo reagirati na probleme vezane uz okoliš. Primjena novih satelitskih tehnologija omogućuje nove spoznaje i razvoj više područja vezanih uz geosustav, a njihova primjena postala je svakodnevna potreba pri rješavanju širokog spektra praktičnih zadataka. U tablici 1 dan je pregled važnijih aktivnih satelitskih misija.

Tablica 1. *Važnije aktivne satelitske misije za oceanografiju, geodeziju, glaciologiju i proučavanje čvrste Zemlje (Rummel 2003)*

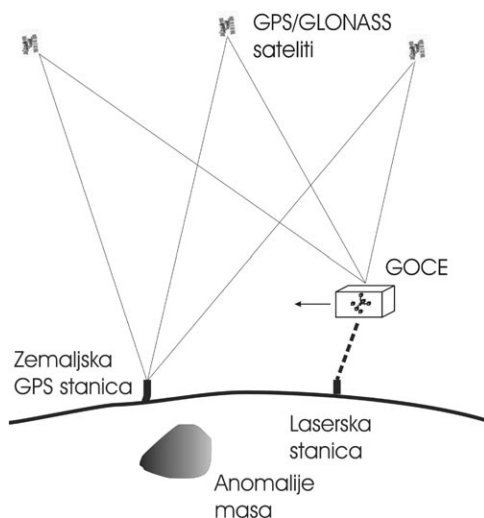
<i>Misija</i>	<i>Voditelj misije</i>	<i>Primarni interes misije</i>	<i>Trajanje misije</i>
CHAMP	Njemačka	gravitacija, magnetizam, atmosfera	2000. – 2005.
GRACE	SAD, Njemačka	gravitacija (stacionarno i vremenski promjenjivo polje), atmosfera	2002. – 2007.
GOCE	ESA	gravitacija (stacionarno polje velike rezolucije)	2006. – 2008.
TOPEX/POSEIDON	SAD, Francuska	oceanska altimetrija	1992. – 2004.
Jason-1	SAD, Francuska	oceanska altimetrija	2001. – 2006.
ICESAT	SAD	altimetrija leda	2003. – 2008.
CRYOSAT	ESA	altimetrija leda	2004. – 2007.
ERS-2	ESA	altimetrija, klima, okoliš	1995. – 2005.
ENVISAT	ESA	altimetrija, klima, okoliš	2002. – 2007.
TerraSAR-X	Njemačka	SAR, INSAR, atmosfera	2005. – 2010.
LAGEOS-1 & 2	SAD	referentni sustavi, gravitacija	1975. –
GPS	SAD	navigacija, pozicioniranje, određivanje putanje, prijenos vremena, rotacija Zemlje,...	1978. –
GALILEO	EU, ESA	navigacija, pozicioniranje	2008. –

Raspoloživi modeli globalnoga gravitacijskog polja Zemlje velike rezolucije dobiveni su primjenom podataka iz više satelitskih misija i terestričkih podataka. Na taj način koriste se nehomogeni podaci s obzirom na gustoću i kvalitetu. Oni se odnose na različite visinske datume. Terestrički podaci (anomalije ubrzanja sile teže, otkloni vertikalna, GPS/nivelmanske undulacije, modeli reljefa i dr.) odnose se na nacionalne visinske referentne okvire koji su tradicionalno definirani primjenom ma-

reografskih mjerenja. Referentne plohe visinskih sustava globalno odstupaju ± 2 m (Rapp i Balasubramania 1992), a preliminarna razlika između hrvatskog visinskog datuma i United European Levelling Network (UELN) iznosi $-0,33$ m (Sacher i dr. 1999). Nekonzistentnost datuma nacionalnih i regionalnih visinskih sustava postao je ograničavajući faktor za povećanja kvalitete globalnih geopotencijalnih modela Zemljina gravitacijskog polja. Misija GOCE omogućiti će dobivanje globalnoga geopotencijalnog modela velike rezolucije primjenom homogenih, gotovo globalnih podataka (Wermuth 2001).

2. Satelitska misija Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE)

GOCE je prva satelitska misija programa ESA-e posvećena Zemljinu gravitacijskom polju. Ona ima dužu povijest razvoja u projektima Consortium for Investigations in Gravity Anomalies Research (CIGAR) I – IV (Sünkel 2002). Tematska su područja te misije: geodezija, geofizika, oceanografija, čvrsta Zemlja, glaciologija i dr. Kao tehnika mjerenja ona će se koristiti satelitskom gradiometrijom gravitacijskog polja Zemlje (Satellite Gravity Gradiometry, SGG) i praćenjima satelit-satelit (Satellite-to-satellite tracking, SST). SGG mjerenja provodit će se s pomoću troosnoga gradiometra za mjerenje drugih derivacija potencijala gravitacijskog polja. Dobivat će se gradiometrijska mjerenja u sva tri smjera prostora. To je prva primjena gradiometrije gravitacijskog polja u satelitskoj misiji. SGG mjerenja davat će lokalne karakteristike gravitacijskog polja u putanji satelita, a SST mjerenja, koja uključuju određivanje realne putanje satelita s pomoću radionavigacijskih sustava GPS/GLONASS, davat će poremećaje realne u odnosu na nominalnu putanju. SGG i SST su GOCE mjerenja koja će se koristiti za modeliranje gravitacijskog polja (Johannessen 1999). Na slici 1 prikazana je konfiguracija misije GOCE.



Slika 1. Konfiguracija misije GOCE

Satelitske metode nadgledanja i proučavanja Zemlje služe se mjerenjima koja se odnose na površinu Zemlje. Na osnovi tih informacija ne mogu se pouzdano interpretirati procesi unutar Zemlje. Gravitaciju uzrokuju mase u unutrašnjosti Zemlje te se na osnovi nje može procijeniti njihovo stanje i gibanje te modelirati procesi u kojima sudjeluju. Nepoznavanje Zemljina gravitacijskog polja s odgovarajućom pouzdanošću postao je ograničavajući čimbenik za razvoj više područja i za pouzdano rješavanje niza praktičnih problema. To je razlog zašto se u posljednje vrijeme znatno povećao interes za satelitske misije s temom proučavanja Zemljina gravitacijskog polja.

Glavni je cilj misije GOCE dobivanje modela statičkoga gravitacijskog polja Zemlje velike rezolucije (ESA 2000). Vrlo kvalitetna mjerenja gravitacijskog polja omogućit će bolje razumijevanje procesa unutar Zemlje, na njoj i izvan nje.

GOCE model Zemljina gravitacijskog polja koristit će se u multidisciplinarnu svrhu za dobivanje:

- novih spoznaja o fizici Zemljine unutrašnjosti uključujući geodinamiku litosfere i sastav plašta,
- preciznoga globalnog modela geoida koji će se u kombinaciji s altimetrijskim mjerenjima koristiti za modeliranje apsolutnih oceanskih struja i prijenosa topline,
- modela debljine polarnog leda primjenom podataka o topografiji čvrstog tla i mjerenja visine leda primjenom satelitske altimetrije,
- vrlo kvalitetnoga globalnoga referentnog sustava visina koji će služiti kao referentna ploha za proučavanje topografskih procesa.

Sva ta istraživanja pridonijet će studiji globalne promjene razine oceana.

Glavni proizvodi misije GOCE koji će se koristiti u drugim znanstvenim područjima su globalni geoid i anomalije ubrzanja sile teže velike rezolucije. Zahtjevi u pogledu rezultata GOCE misije, s obzirom na pojedina znanstvena područja (Rebhan i dr. 2000) su:

Geodezija:

- GPS nivelman: nepouzdanost visina 1 cm, prostorna razlučivost 100–1000 km,
- definiranje globalnog visinskog sustava: nepouzdanost visina 1 cm, prostorna razlučivost 100–20 000 km,
- inercijalni navigacijski sustavi: nepouzdanost približno 1–5 mGal,³ prostorna razlučivost 100–1000 km,
- putanje satelita: nepouzdanost približno 1–3 mGal, prostorna razlučivost 100–1000 km.

Čvrsta Zemlja:

- gustoća litosfere i gornjeg plašta: nepouzdanost 1–2 mGal, prostorna razlučivost 100 km,
- kontinentalna litosfera, sedimentna osnova: nepouzdanost 1–2 mGal, prostorna razlučivost 50–100 km,
- kontinentalna litosfera, tektonska gibanja: nepouzdanost 1–2 mGal, prostorna razlučivost 100–500 km,

³Veza tradicionalnih miligal [mGal] i službenih jedinica metar kroz sekundu na kvadrat [mqs^{-2}] je 1 mGal = 10^{-5} mqs^{-2} .

- kontinentalna litosfera, seizmički rizik: nepouzdanost 1 mGal, prostorna razlučivost 100 km,
- oceanska litosfera, seizmički rizik: nepouzdanost 0,5–1 mGal, prostorna razlučivost 100–200 km.

Oceanografija:

- kratka skala: nepouzdanost 1–2 cm, prostorna razlučivost 100 km,
- skala bazena: nepouzdanost oko 0,1 cm, prostorna razlučivost 1000 km.

Ledeni pokrivač:

- čvrsta osnova: nepouzdanost 1–5 mGal, prostorna razlučivost 50–100 km,
- vertikalno gibanje leda: nepouzdanost 2 cm, prostorna razlučivost 100–1000 km.

Gradiometrijska mjerenja koja će osigurati misija GOCE omogućit će kvalitetnije modeliranje Zemljina oblika nego što to omogućuju trenutačno raspoloživi podaci. Podaci misija CHAMP i GRACE omogućuju modeliranje gravitacijskog signala topografije (Hećimović i Bašić 2004a, Hećimović i dr. 2004). Problem određivanja Zemljina oblika temeljni je problem geodezije te će GOCE znatno utjecati na rješavanje više zadataka u geodeziji, od kojih su najvažniji:

- Dobivanje kvalitetnijeg modela Zemljina oblika. Očekuje se dobivanje globalnoga geoida s nepouzdanošću od 1 cm u prostornoj razlučivosti od 100 km. GOCE modeli sfernih harmonika bit će razvijeni do reda i stupnja 200 i više. Globalni geopotencijalni modeli dobiveni na osnovi samo satelitskih mjerenja, prije pojave modela CHAMP i GRACE, razvijani su maksimalno do reda i stupnja 72 (Hećimović i Bašić 2002).
- Definiranje novoga standarda primjene GPS nivelmana kojim bi se zamijenio klasični geometrijski nivelman. GPS-om se mogu dobiti vrlo kvalitetne elipsoidne visine. Da bi se s pomoću njih dobile ortometrijske visine, geoid treba poznavati s odgovarajućom pouzdanošću. Od GOCE modela očekuje se znatan doprinos u tom području.
- Unificiranje visinskih sustava na globalnoj razini sa centimetarskom pouzdanošću.
- Odvajanje inercijalnog signala i gravitacijskog signala pri inercijalnoj navigaciji. Žiroskop i akcelerometar osnovni su senzori inercijalnog sustava (Inertial Measuring Unit, IMU), koji se montiraju na pomičnu platformu. Akcelerometar mjeri ubrzanja na osnovi kojih se dobiju brzine i razlike položaja, a promjene orijentacije pomične platforme registriraju se žiroskopom. Akcelerometar mjeri ubrzanja koja su rezultanta ubrzanja pomične platforme i gravitacijskog ubrzanja. Ako se gravitacijsko ubrzanje ne može odkloniti iz mjerenja sa zadovoljavajućom pouzdanošću, nit ubrzanja gibanja pomične platforme ne mogu se pouzdano procijeniti.
- Pouzdanije određivanje putanje Zemljinih umjetnih satelita (ZUS). Poboľšani model Zemljina gravitacijskog polja omogućit će bolje modeliranje poremećaja putanje i bolje razumijevanje uzroka poremećaja putanje. To će osobito utjecati na kvalitetnije modeliranje putanje niskotećih satelita. Novi model omogućit će bolje odvajanje poremećaja zbog anomalnosti statičkoga gravitacijskog polja i ostalih poremećajnih sila.

Signal Zemljina gravitacijskog polja slabi s povećanjem visine te putanja satelita mora biti čim niža. Međutim, na manjim su visinama poremećajne sile veće (u

prvom redu trenje zraka) te dolazi do jačeg usporavanja satelita i bržega gubljenja visine satelita. Jakost gravitacijskog polja, osjetljivost mjernog senzora, željeno trajanje misije i opadanje visine satelita glavni su utjecaji koji se optimiraju pri odabiru visine putanje satelita u svrhu prikupljanja podataka o gravitacijskom polju. Visina niskoletećih satelita korigira se dodatnim uključivanjem mlaznica da bi se produjilo trajanje misije.

Dana 23. studenoga 2001. godine potpisan je ugovor između ESA-e i Alenia Spazio o izradi dizajnu, razvoju, testiranju i operacijama prije i nakon lansiranja te o podršci pri kalibraciji misije GOCE. Vrijednost je ugovora 149 milijuna EUR (Earth Observation Quarterly 2002). GOCE projekt podijeljen je na: razdoblje A (lipanj 1998. – lipanj 1999), razdoblje B (prosinac 2000. – prosinac 2001), razdoblje C/D (siječanj 2002. – srpanj 2005). Zbog kašnjenja u realizaciji došlo je do produženja rokova. Zato je predviđeno lansiranje GOCE satelita u 2005. godini odgođeno za početak 2006. godine.

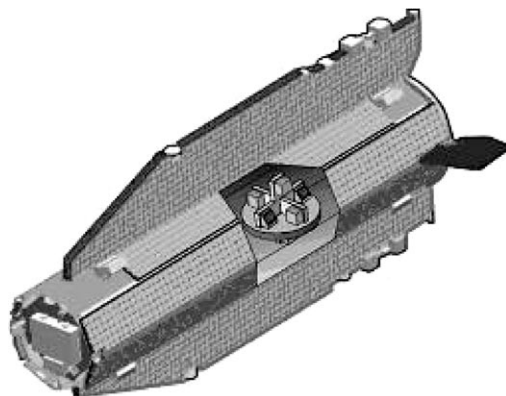
U realizaciji projekta sudjeluje više tvrtki. Važnije su: Alenia Spazia, Astrium GmbH, Alcatel Space Industries i ONERA. Tvrtka Alenia Spazia vodila je A razdoblje projekta. U tom je razdoblju izrađeno više studija koje su uključivale: simulaciju GOCE mjerenja, pripremu za obradbu podataka, procjenu utjecaja GOCE misije na studije cirkulacije oceana, probleme u geodeziji, praćenje razine oceana i regionalne tektoničke studije.

3. Zemaljski segment, satelit, instrumenti i putanja misije GOCE

Zemaljski segment misije GOCE nalazi se u postaji Kiruna (Švedska), a podijeljen je na:

- komandni dio i odjel za prikupljanje podataka,
- kontrolni dio misije i satelita,
- dio za obradbu i arhiviranje podataka.

Satelit ima oblik ortogonalne prizme duljine 4 m i promjera 0,90 m (v. sl. 2). Ukupna mu je duljina 5,02 m, a raspon duž fiksnih krila 2,20 m. Da bi se smanjio utjecaj



Slika 2. GOCE satelit (URL 1)

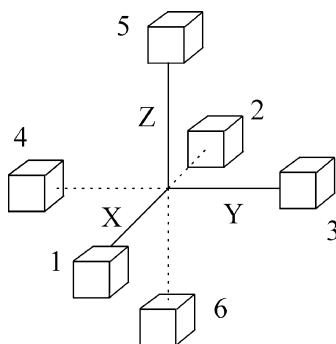
vanjskih sila, satelit je dizajniran simetrično tako da ima malen promjer u smjeru leta. Površina je poprečnog presjeka satelita oko $0,9 \text{ m}^2$.

Planirano je trajanje misije 20 mjeseci (nominalno) uz mogućnost produljenja do 30 mjeseci. Masa za lansiranje iznosit će 980 kg, od toga je 194 kg masa instrumenata. Planirana je visina putanje između 250 i 270 km. Inklinacija je putanje $96,5^\circ$, te samo polarni predjeli radijusa 700 km neće biti prekriveni putanjom. Putanja je približno kružna (ekscentricitet $< 0,001$), što će osigurati homogenost mjerenja s obzirom na visinu putanje. Putanja je sinkronizirana sa Suncem, a orijentacija satelita bit će održavana s obzirom na Zemlju (Ditmar i Klees 2002).

Iako je putanja zbog svoje male visine sinkronizirana sa Suncem GOCE satelit imat će dva razdoblja ulaska u sjenu Zemlje (eklipse) (Johannessen 1999). Razdoblje duže eklipse ponavljat će se 135 dana. Utjecaj eklipse na misiju GOCE važan je zbog velikih termičkih promjena kroz koje satelit prolazi i zbog nemogućnosti prikupljanja Sunčeve energije za stvaranje potrebne električne energije dok je satelit u sjeni. Misija je dizajnirana tako da se mjerenja provode kontinuirano dok je satelit u razdoblju kraće eklipse, a kada uđe u razdoblje duljih eklipsa GOCE satelit bit će stavljen u stanje mirovanja (hibernacije). Također su lansiranje i početak mjerenja dizajnirani s obzirom na taj utjecaj. Zbog njega je razdoblje mjerenja ograničeno na šest mjeseci, a vrijeme je kalibracije, nakon izlaska iz stanja mirovanja, 1,5 mjesec.

Glavni su instrumenti misije GOCE:

- *Electrostatic Gravity Gradiometer* (EGG) osnovni je GOCE senzor. Izradila ga je tvrtka ONERA⁴. Sastoji se od kapacitativnih akcelerometara pričvršćenih na dijamantsku konfiguraciju na ultrastabilnoj karbonskoj strukturi (v. sl. 3). Duljina je baza između parova mjernih masa $0,5 \text{ m}$. Mjeri se utjecaj gravitacijskog polja na mjerne mase na krajevima baza. Svaki gradiometar mjeri napon koji je potreban da se mjerna masa održi centriranom između elektroda. Prati



Slika 3. Shema troosnoga gradiometra

⁴ Tvrtka ONERA ima dugogodišnje iskustvo u izradbi akcelerometara za satelitske misije. Počela je 1962. godine izradbom CACTUS akcelerometra. Taj akcelerometar primjenjivao se u satelitskim mjerenjima od 1975. do 1979. godine i dobivena je rezolucija od 10^{-10} g . Sljedeći akcelerometar bio je GRADIO, koji se temeljio na elektrostatičkoj kompenzaciji mjerne mase čije je gibanje mjereno s pomoću kapacitativnog senzora visoke rezolucije. Više od 20 godina primjenjuje se taj mjerni princip. Od 1980. godine akcelerometri se proučavaju s obzirom na primjenu u satelitskoj gradiometriji gravitacijskog polja, najprije kao dio GRADIO projekta, a za Aristoteles ESA misiju. ASTRE akcelerometar testiran je u nekoliko Space Shuttle misija, STAR akcelerometar izrađen je za potrebe misije CHAMP, a SuperSTAR za misiju GRACE (Johannessen 1999).

se kapacitativni napon između mase i elektroda. Tri gradiometrijske poluge postavljene su međusobno okomito: duž putanje (along-track), poprijeko u odnosu na putanju (cross-track) i okomito na prethodna dva smjera. Koristit će se razlike mjerenja napona akcelerometrijskog para za svaku od tri prostorne osi. Primjena razlika ima prednost jer se poremećajne sile koje djeluju na satelit kompenziraju. Šum akcelerometra izražen je u tradicionalnim i službenim jedinicama⁵ $< 3 \text{ mE} = 3 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-2}$. Gradiometrom se dobivaju informacije o stacionarnom gravitacijskom polju. Veličine za modeliranje gravitacijskog polja koje će se dobivati primjenom troosnog elektrostatičkoga gradiometra bit će druge derivacije gravitacijskog potencijala, tj. elementi SGG tenzora. Taj instrument dat će visokofrekventne informacije o gravitacijskom polju, što će omogućiti dobivanje modela gravitacijskog polja vrlo velike rezolucije.

- *Prijamnik signala globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS)* dat će poremećaje putanje GOCE satelita. GNSS prijamnik prikupljat će pseudo-udaljenosti između GOCE satelita i GPS/GLONASS satelita što će se koristiti za dobivanje realne putanje. Usporedbom realne i nominalne putanje dobit će se SST veličine za modeliranje gravitacijskog polja. Za ta mjerenja koristi se satelit kao senzor i dat će, s obzirom na SGG mjerenja, podatke o uglačanom gravitacijskom polju nižih rezolucija.
- *Laserski retroreflektor (LRR)* sastoji se od deveterokutne prizme. Isti model koristio se u misijama ERS i ENVISAT. Prizma će biti pričvršćena s donje strane kako bi se omogućila laserska mjerenja Zemlja-GOCE satelit. Laserskim će se mjerenjima neovisno određivati GOCE putanja s centimetarskom pouzdanošću. Ona će služiti za provjeru kvalitete određivanja putanje GPS/GLONASS.
- *Standard Radiation Environment Monitor (SREM)* provodit će mjerenja ionizirajućeg zračenja u okolini satelita. Razlog je primjene tih mjerenja osjetljivost gradiometra na električna pražnjenja. SREM mjerenja primjenjivat će se za dobivanje korelacije GOCE mjerenja s obzirom na tok elektrona i protona u okolini satelita. Ova će se mjerenja provoditi u području osjetljivosti gradiometra.
- *Kontrolu visine i putanje* GOCE satelita osiguravaju GPS/GLONASS prijamnik i star kamera.
- *Električna energija* bit će osigurana primjenom kolektora Sunčeve energije na GOCE satelitu koji osiguravaju snagu od 1,3 kW iz 19 Ah NiCd baterija.
- *Komunikacija* sa zemaljskom postajom u Kiruni provodit će se S-bandom. Podaci će se prebacivati maksimalnom brzinom od 1 Mbit/s.

4. Mjerenja

GOCE misija primjenjivat će dvije osnovne tehnike mjerenja za prikupljanje podataka:

- satelitska gradiometrija (satellite gravity gradiometry, SGG),
- praćenje visoki-niski satelit-satelit (high-low satellite-to-satellite tracking, SST).

⁵ Službena jedinica za tenzor gravitacijskog polja recipročna je vrijednost kvadrata sekunde [s^{-2}]. Veza službene jedinice i tradicionalne miliEötvös [mE] jedinice je $1 \text{ mE} = 10^{-12} \text{ s}^{-2}$.

SGG mjerenja davat će komponente SGG tenzora u lokalnom referentnom okviru putanje satelita, a SST mjerenja dobit će se kao vremenski osrednjena rezidualna ubrzanja GOCE satelita dobivena na osnovi razlika između realnih i referentnih putanja. Primarne su nepoznanice koeficijenti sfernih harmonika do 200 reda i stupnja i više. Tehnika mjerenja SST primjenjuje se u aktivnim satelitskim misijama CHAMP i GRACE (Hećimović i Bašić 2004b, Hećimović i Bašić 2004c) i postoje iskustva u obradbi te vrste informacija. Međutim, SGG je nova tehnika mjerenja i podaci te vrste do sada nisu bili na raspolaganju. SGG mjerenjima dobivat će se elementi SGG tenzora kao veličine za modeliranje Zemljina gravitacijskog polja. SGG mjerenja, za razliku od SST mjerenja, sadržavat će finiji signal (veće frekvencije) gravitacijskog polja. Zbog toga se s pomoću SGG mjerenja mogu razviti globalni modeli Zemljina gravitacijskog polja do većeg stupnja i reda sfernih harmonika. Veće frekvencije signala Zemljina gravitacijskog polja u SGG mjerenjima omogućit će modeliranje finije strukture gravitacijskog polja u kojem će slabi gravitacijski signal prouzrokovan topografijom i anomalijama gustoće doći jače do izražaja.

Komponente tenzora gravitacijskog polja mjerit će se u lokalnom referentnom okviru putanje satelita (Local Orbital Reference Frame, LORF). Ishodište tog referentnog okvira smješteno je u središtu masa satelita. Os X usmjerena je u smjeru trenutačnog vektora brzine satelita, smjer osi Y koincidirat će s trenutačnim kutnim momentom putanje, a os Z bit će orijentirana tako da definira desni referentni okvir. Pri obradbi simuliranih GOCE podataka neki se autori koriste modificiranom definicijom referentnog okvira u kojoj je os Z usmjerena u radijalnom smjeru suprotno od središta Zemlje, os X leži u ravnini putanje, ortogonalna je na os Z i približno će (zbog malih ekcentriciteta putanje) koincidirati s vektorom brzine, a os Y okomita je na njih i definira desni koordinatni okvir. Taj referentni okvir naziva se referentni okvir putanje s obzirom na smjer prema Zemlji (Earth-Pointing Orbital Frame, EPOF). Prednost je EPOF-a što je os Z definirana u smjeru radijalne komponente u kojem se gravitacijsko polje najviše mijenja te se modeliranjem promjene polja u smjeru osi Z modelira gotovo cijelo polje.

GOCE satelitska gradiometrijska mjerenja prikupljat će druge derivacije potencijala gravitacijskog polja, tj. elemente SGG tenzora (Karrer 2000). SGG tenzor ima oblik

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \begin{bmatrix} V_{XX} & V_{XY} & V_{XZ} \\ V_{YX} & V_{YY} & V_{YZ} \\ V_{ZX} & V_{ZY} & V_{ZZ} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

On je simetričan ($V_{XY} = V_{YX}$, $V_{XZ} = V_{ZX}$, $V_{YZ} = V_{ZY}$). Dijagonalni elementi V_{XX} , V_{YY} , V_{ZZ} zadovoljavaju Laplaceovu diferencijalnu jednadžbu

$$\Delta V = V_{XX} + V_{YY} + V_{ZZ} = 0, \quad (2)$$

zbog koje je:

$$-V_{ZZ} = V_{XX} + V_{YY}. \quad (3)$$

Zbog toga matrica (1) ima samo pet međusobno neovisnih članova.

GOCE akcelerometar kalibriran je na Zemlji. Pri zemaljskoj kalibraciji, gravitacijsko polje kompenzirano je jakim električnim poljem. Posljedica je toga da je za svaki akcelerometrijski par po jedan smjer manje osjetljiv (v. sl. 3).

Očekuje se da će se komponente tenzora dobivati, izražene u tradicionalnim jedinicama, s nepouzdanošću od približno $2mE/\sqrt{Hz}$. Mjerenja će se provoditi s učestalošću od 0,005 Hz i 0,1 Hz. Vrijednosti elemenata tenzora u putanji GOCE satelita iznosit će oko $V_{zz} \approx 2800 E$, $V_{xx} \approx V_{yy} \approx 1400 E$, $V_{xz} \approx 10 E$ i $V_{yz} \approx V_{xy} \approx 0$.

Negravitacijske sile koje djeluju na satelit (npr. trenje zraka) imaju isti utjecaj na sve akcelerometre te se poništavaju primjenom razlika mjerenja između akcelerometrijskih parova. Međutim, zbog rotacija GOCE satelita javlja se korelacija između komponenti tenzora (Koop i dr. 2000). Zbog toga komponente SGG tenzora neće biti međusobno neovisno mjerene veličine, već će biti korelirane s obzirom na centrifugalna i kutna ubrzanja satelita.

SGG mjerenja imaju potencijal znatnog poboljšanja kvalitete globalnih geopotencijalnih modela te se u više geodetskih središta intenzivno razvijaju matematički modeli i programska podrška za njihovu obradbu.

5. Proizvodi podataka i usluge misije GOCE

Proizvodi podataka misije GOCE odnose se na Zemljino gravitacijsko polje. Tri su glavna proizvoda podataka:

- druge derivacije gravitacijskog potencijala u putanji GOCE satelita,
- undulacije geoida,
- anomalije ubrzanja sile teže.

Sirovi podaci gradiometra izlazni su naponi kako ih mjere akcelerometri. Transfer funkcija transformira mjerene napone akcelerometara u elemente SGG tenzora. Na SGG mjerenja utjecat će linearna i kutna ubrzanja GOCE satelita te će se za obradbu koristiti dodatni podaci:

- kalibracije u putanji,
- visine satelita,
- kutni poremećaji putanje,
- linearni poremećaji putanje.

Proizvodi podataka misije GOCE bit će podijeljeni na skupine:

- sirovi satelitski podaci,
- razina 0: proizvodi podataka sadržavat će GOCE mjerenja kronološki kako su prikupljena uključujući i dodatne informacije (temperaturu, korekcije putanje, ...),
- razina 1a: proizvodi podataka sadržavat će vremenske serije mjerenja sa svim dodatnim informacijama i pridruženim kalibracijskim podacima,
- razina 1b: proizvodi podataka sadržavat će potpune serije korigiranih i kalibriranih podataka,
- razina 2: proizvodi podataka sadržavat će globalni model potencijala Zemljina gravitacijskog polja u obliku koeficijenata sfernih harmonika, globalni model geoida, globalnu mrežu anomalija ubrzanja sile teže koje će se odnositi na fizi-

čku površinu Zemlje te kao dodatak procjenu kvalitete podataka i regionalne modele geoida,

- razina 3: proizvodi podataka sadržavat će rezultate obradbe koji će se dobiti kao proizvodi znanstvenih studija o čvrstoj Zemlji, cirkulaciji oceana, geodetskim studijama, dinamici gibanja leda i promjenama razine oceana.

Postupak obradbe od razine 0 do razine 2 sofisticiran je i odvijać će se u više koraka (Koop i Gruber 2002, Gruber 2002). Sirovi podaci sadržavat će mjerenja instrumentata zajedno s kalibracijom, vremenom, visinom, podacima o kontroli visine i putanje te ostale podatke kao što je temperatura. Predobrađeni podaci bit će spremljeni kao podaci razine 1a. Oni će biti na raspolaganju od nekoliko dana do jednog tjedna nakon što će biti proizvedeni, a koristit će se za dobivanje podataka razine 1b, koji će biti u Zemaljski fiksnoj i satelitskom referentnoj okviri. Kalibrirana i korigirana SST mjerenja i pozicije satelita misije GOCE bit će dane u Zemaljski fiksnoj referentnoj okviri. Oni će još sadržavati: linearne i kutne vektore ubrzanja, podatke o korekcijama putanje, satelitsku visinu, kutne brzine i centrifugalna ubrzanja. Podaci iz razina 1a i 1b koristit će se za dobivanje razine 2 proizvoda podataka, koji su glavni proizvodi misije GOCE. Njima će se služiti najveći broj korisnika i bit će polazne veličine za daljnje studije.

Kao podršku misiji GOCE, International GPS Service (IGS) provodit će posebnu obradbu GPS i GLONASS podataka. To će osobito utjecati na kvalitetu SST mjerenja.

Među glavnim su proizvodima misije GOCE su koeficijenti razvoja gravitacijskog potencijala u sferne harmonike. U literaturi se može naći više vrijednosti do kojeg stupnja i reda će se razvijati GOCE model sfernih harmonika. Vrijednosti se kreću od stupnja i reda 200 do 300. Maksimalan stupanj i red razvoja koji se može dobiti primjenom GOCE mjerenja ovisit će o kvaliteti realnih GOCE mjerenja.

6. Zaključak

GOCE je prva od misija nove generacije programa satelitskih misija ESA-e s temom istraživanja Zemlje. Njezino je tematsko područje Zemljino gravitacijsko polje. Glavni je instrument misije troosni elektrostatički gradiometar kojim će se dobivati elementi SGG tenzora, a primjenom GPS/GLONASS mjerenja dobivat će se SST mjerenja. SGG i SST mjerenja su GOCE mjerenja koja će se primjenjivati za modeliranje Zemljina gravitacijskog polja. Ona će tvoriti homogenu, gotovo globalno polje podataka Zemljina gravitacijskog signala velike rezolucije. Glavni su proizvodi podataka misije GOCE druge derivacije potencijala u putanji satelita, geoidne undulacije i anomalije ubrzanja sile teže na fizičkoj površini Zemlje. Geoid će se dobiti s nepouzdanošću od 1 cm, a anomalije ubrzanja sile teže od 1 mGal u rezoluciji od 100 km. GOCE će utjecati na razvoj više disciplina, među kojima su najvažnije: geofizika, geodezija, oceanografija, glaciologija i proučavanje čvrste Zemlje. Doprinos misije GOCE geodeziji očekuje se osobito na području GPS nivelmana, inercijalnih navigacijskih sustava, u definiranju globalnoga visinskog sustava i modeliranju putanje satelita.

Literatura

- Bašić, T., Hećimović, Ž. (2004): Latest Geoid Determinations for the Republic of Croatia. IAG International Symposium – Gravity, Geoid and Space Missions – GGSM2004, Porto, Portugal, from August 30th to September 3rd, 2004.
- Ditmar, P., Klees, R. (2002): A Method to Compute the Earth's Gravity Field from SGG/SST data to be Acquired by the GOCE Satellite. Delft University Press, Delft.
- Earth Observation Quarterly (2002): The world according to GOME. Earth Observation Quarterly, January 2002.
- ESA (2000): GOCE Mission Requirements Document. ESTEC, GO-RS-ESA-SY-0001, Noordwijk.
- Gruber, T. (2002): GOCE Preparation of GOCE Level 1 to Level 2 Data Processing. ESTEC Contract No. 14986/00/NL/DC, GOCE Software Requirements Document, München.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2002): Globalni geopotencijalni modeli na teritoriju Hrvatske. Geodetski list, God. 57 (80), broj 2, str. 73–89, Zagreb 2003.
- Hećimović, Ž., Barišić, B., Grgić, I. (2004): European Vertical Reference Network (EUVN) considering CHAMP and GRACE-gravity models. Symposium of the IAG Subcommission for Europe. European Reference Frame – EUREF 2004, Bratislava, Slovakia, 2 – 5 June 2004.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004a): Comparison of CHAMP and GRACE geoid models with Croatian HRG2000 geoid. 1st General Assembly European Geosciences Union (EGU), Nice, France, from 25 – 30 April 2004.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004b): Satelitska misija CHallenging MInisatellite PAayload (CHAMP). Geodetski list. God 59(82), broj 2, str. 129–147. Zagreb, lipanj 2005.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004c): Satelitska misija GRavity REcoveRY and CLimate EXperiment (GRACE). Prihvaćeno za objavljivanje u Geodetskom listu.
- Hećimović, Ž., Bašić, T. (2004d): Modeling of topographic effect on gravity field parameters in Croatia. IAG International Symposium – Gravity, Geoid and Space Missions – GGSM2004, Porto, Portugal, from August 30th to September 3rd, 2004.
- Johannessen, J. A. (1999): Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission. Reports for Mission Selection, ESA SP – 1233(1), Noordwijk.
- Karrer, M. (2000): Schwerefeldbestimmung aus Satellitengradiometrie. Technische Universität München, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, München.
- Koop, R., Gruber, T. (2002): GOCE Preparation of GOCE Level 1 to Level 2 Data Processing. ESTEC Contract No. 1486/00/NL/DC, GOCE Architecture Design Document, Preliminary Draft.
- Koop, R., Visser, P., Klees, R. (2000): Detailed scientific Data Processing Approach. From Eotvos to mGal, Study Team 1 – Workpackage 2, ESA Draft Final report, Graz.
- Rapp, R. H., Balasubramania, N. (1992): A Conceptual Formulation of a World Height System. The Ohio State University, Department of Geodetic Science and Surveying, Rep. No. 421.
- Rebhan, H., Aguirre, M., Johannessen, J. (2000): The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer Mission – GOCE. Earth Observation Quarterly, N°66.

- Rummel, R. (2003): Advanced Space Technology. U: Heck, B., Hornik, H. i Rummel R. (Eds.) (2003): National report of Federal Republic of Germany on the geodetic activities in the years 1999. – 2003. XXIII General Assembly of the International Union for Geodesy and Geophysics (IUGG) 2003 in Sapporo/Japan, München.
- Sacher, M., Ihde, J., Seeger, H. (1999): Preliminary Transformation Relations between National European Height Systems and the United European Levelling Network (UELN). Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Prague, 2 – 5 June 1999, 80 – 86.
- Sünkel, H. (2002): From Eötvös to milligal +. ESA Final Report, ESA/ESTEC Contract No. 14287/00/NL/DC, Graz.
- URL 1: GOCE Satellite. European Space Agency GOCE. <http://www.goce-projektbue-ro.de/> (19. 01. 2004.).
- Wermuth, M. (2001): Global Spherical Harmonic Analysis of GOCE – SGG Measurements with a Full Normal Equation System. Technische Universität München, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, München.

Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE) satellite mission

ABSTRACT. Satellite mission GOCE is a part of the new generation of ESA satellite program with Earth exploration topics. The goal of the mission is global, high resolution model of Earth gravity field. GOCE is the first satellite gravity gradiometry (SGG) mission. Sophisticated three axes gravity gradiometer in low orbit will give high frequency Earth gravity field information, and inclination of 96,5° will insure almost global coverage of data. GOCE gravity field modelling data will be elements of SGG tensor and SST disturbances of GOCE satellite orbit. GOCE data will give global geoid with 1 cm uncertainty and gravity anomalies with 1 mGal uncertainty in 100 km resolution. GOCE mission has interdisciplinary character and the main influences are expected in oceanography, geodesy, solid Earth and glaciology. GOCE will influence development of geodesy in: GPS levelling, unification of global heights, inertial navigation and modelling of satellite orbits.

Key words: GOCE satellite mission, satellite gravity gradiometry, electrostatic gravity gradiometer, SGG tensor, SST measurements.