

GOCE: stato della missione e possibili applicazioni

Federica Migliaccio (*), Mirko Reguzzoni (**), Fernando Sansò (***)

(*) DIIAR - Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano,
tel. 02 23996507, fax. 02 23996530, federica.migliaccio@polimi.it

(**) OGS - c/o Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como - Via Valleggio, 11 - 22100 Como,
tel. 031 3327526, fax. 031 3327519, mirko@geomatica.como.polimi.it

(***) DIIAR - Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como - Via Valleggio, 11 - 22100 Como,
tel. 031 3327518, fax. 031 3327519, fernando.sanso@polimi.it

Riassunto

Il satellite GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) è stato lanciato con successo il 17 marzo 2009 dal cosmodromo di Plesetsk (Russia). Si tratta della prima missione di gradiometria da satellite, progettata dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea), con l'obiettivo di determinare un nuovo modello del campo di gravità terrestre. Le fasi di test dei diversi strumenti a bordo hanno fornito risultati molto promettenti e all'inizio dell'autunno 2009 la missione entrerà in fase operativa.

La combinazione di osservazioni di tracciamento GPS e di misure gradiometriche permetterà di modellizzare il campo di gravità terrestre (e quindi di avere un nuovo modello globale di geoide) con elevata accuratezza e risoluzione spaziale, con diverse e notevoli ricadute non solo in geodesia, ma anche nell'ambito della geofisica della terra solida e dell'oceanografia. Inoltre, a livello locale saranno possibili miglioramenti nei calcoli per la stima del geoide e di altre quantità legate al campo di gravità.

Il Politecnico di Milano partecipa all'analisi dei dati GOCE, insieme ad altri gruppi di ricerca a livello europeo, all'interno della cosiddetta HPF (*High-level Processing Facility*), il cui obiettivo finale è proprio quello di determinare il nuovo modello GOCE della gravità. Questo modello e gli altri dati processati dall'HPF, come per esempio le orbite del satellite, verranno in seguito distribuiti da ESA agli utenti, che li sfrutteranno per applicazioni scientifiche. In particolare, il Politecnico di Milano è capofila del consorzio GOCE-Italy che mira all'interpretazione dei dati GOCE per fini geologici, geofisici ed oceanografici nel territorio italiano.

Lo scopo del presente lavoro è quello di informare sullo stato operativo della missione e di presentare una rassegna dei dati che saranno resi disponibili agli utenti con le modalità stabilite dall'ESA.

Abstract

The GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) satellite has been successfully launched on March 17, 2009 from the Plesetsk (Russia) cosmodrome. It represents the first satellite gradiometry mission, designed by the European Space Agency (ESA) in order to determine a new model of the Earth gravity field. The testing phases for the different instruments on board have given very promising results, and starting from autumn 2009 the mission will enter its operational phase.

The combination of GPS tracking data and gradiometric measurements will allow to model the gravity field (and so to obtain an updated global geoid model) with high accuracy and spatial resolution, with several remarkable advantages not only for geodesy, but also for solid-Earth geophysics and for oceanography. Besides, at local level it will be possible to enhance the computations of the geoid and of other quantities related to the gravity field.

The Politecnico di Milano researchers participate to the analysis of the GOCE data, together with other research groups at European level, within the so-called HPF (High-level Processing Facility): the final goal is to determine the GOCE gravity model which, with other data (such as the satellite orbits) processed by the HPF, will be afterwards distributed to the scientific users who will exploit them for the applications of interest. In particular the Politecnico di Milano is also involved in the GOCE-Italy consortium, aiming at the interpretation of GOCE data for geological, geophysical and oceanographic purposes in the Italian area.

The aim of this paper is to share information on the status of the mission and to present an overview of the products which will be delivered to the users according to the conditions defined by ESA.

Stato operativo della missione GOCE

GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) è la prima missione di gradiometria da satellite, progettata dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e lanciata con successo lo scorso 17 marzo 2009 dal cosmodromo russo di Plesetsk. Il satellite sta volando su un'orbita a bassa quota (circa 255 km), circolare, quasi polare (inclinazione di circa 96.7°); la sua posizione viene continuamente rilevata attraverso un ricevitore GPS di qualità geodetica. La missione avrà una durata di almeno 20 mesi, con la cosiddetta "prima fase operativa", della durata di 6 mesi, attiva dal settembre 2009.

Il principale strumento a bordo del satellite è un gradiometro triassiale (si veda la Figura 1) costituito da tre coppie di accelerometri elettrostatici disposte su una terna ortogonale e montate su una struttura ultra stabile al carbonio; il gradiometro è in grado di misurare le derivate seconde del potenziale gravitazionale lungo l'orbita, cioè i cosiddetti "gradienti gravitazionali". Un'altra informazione sul campo gravitazionale può essere ottenuta dai dati di tracciamento dell'orbita tramite il ricevitore GPS posto a bordo del satellite, in combinazione con la misura delle forze non gravitazionali derivata dalle accelerazioni di modo comune del gradiometro. I due tipi di osservazioni che abbiamo descritto sono tra di loro complementari: infatti i gradienti gravitazionali forniscono informazione soprattutto ai gradi elevati dello sviluppo in armoniche sferiche, ovvero i dettagli ad alta frequenza del campo, mentre il tracciamento dell'orbita del satellite permette di stimare con maggiore accuratezza i gradi bassi, ovvero il comportamento a bassa frequenza.



Figura 1 - Lo strumento principale a bordo di GOCE è un gradiometro triassiale; qui è presentata una vista dello strumento assemblato (immagine ESA)

“High-level Processing Facility” (HPF) per l’analisi dei dati GOCE

Al fine di analizzare i dati provenienti da questa missione sono state sviluppate tre differenti metodologie, tutte finalizzate alla stima di un modello globale del campo gravitazionale: l’approccio diretto (sviluppato presso il CNES, Agenzia Spaziale Francese, e il centro GFZ di Potsdam), l’approccio time-wise (sviluppato presso le Università di Graz, di Bonn e di Monaco) e l’approccio space-wise (sviluppato presso il Politecnico di Milano e l’Università di Copenhagen).

L'approccio "space-wise", studiato e implementato nell'arco degli ultimi venti anni, consiste sostanzialmente nello stimare il modello globale del campo gravitazionale risolvendo un problema al contorno su una sfera di riferimento all'altezza media del satellite. In altre parole, prima si riportano su un grigliato sferico le osservazioni raccolte lungo orbita, sfruttando la correlazione spaziale del campo tramite un algoritmo di collocazione; successivamente si stimano i coefficienti del modello globale di geoidi tramite integrazione numerica.



Figura 2 - GOCE nella "clean room" presso la sede ESA ESTEC di Noordwijk (Olanda) durante una delle numerose fasi di testing prima del lancio (foto ESA)

Il fatto di avere a disposizione a livello europeo tre diverse metodologie per l'analisi dati e l'intrinseca complessità di una missione di questo tipo hanno portato alla convinzione che fosse utile fare convergere le conoscenze scientifiche in un consorzio fondato nel 2001. Il consorzio EGG-C (*European GOCE Gravity Consortium*) coinvolge le seguenti dieci università e centri di ricerca in tutta Europa:

- Institute of Astronomical and Physical Geodesy, Università Tecnica di Monaco, Germania;
- Institute of Theoretical Geodesy, Università di Bonn, Germania;
- Institute of Geodesy, Università Tecnica di Graz, Austria;
- Institute for Earth-Oriented Space Research, Università Tecnica di Delft, Olanda;
- Astronomical Institute, Università di Berna, Svizzera;
- DIIAR, Sezione Rilevamento, Politecnico di Milano, Italia;
- Department of Geophysics, Università di Copenhagen, Danimarca;
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Tolosa, Francia;
- GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam, Germania;
- National Institute for Space Research (SRON), Utrecht, Olanda.

I dieci gruppi lavorano in stretta collaborazione, ciascuno con compiti ben definiti e con la finalità comune di produrre il migliore modello globale di geoidi a partire dai dati GOCE.

Il consorzio EGG-C ha iniziato ad elaborare i dati inviati dal satellite pochi giorni dopo il lancio e terminerà il suo lavoro solo diversi mesi dopo che le attività di misura dei dati saranno completate (presumibilmente verso la fine del 2011). In questi primi mesi trascorsi dal momento del lancio, le attività del consorzio EGG-C sono consistite sostanzialmente in operazioni di screening e analisi dei dati inviati a terra da GOCE, il che ha permesso di fare alcune valutazioni preliminari sulla bontà delle misure del gradiometro e del ricevitore GPS.



Figura 3 - La torre di lancio del cosmodromo di Plesetsk (Russia), che si trova a circa 800 km a nord di Mosca nella regione di Arcangelo; all'interno della torre è posizionato il lanciatore Rockot (foto ESA)

Dati GOCE per applicazioni scientifiche e attività a livello italiano

Sono molto numerosi i campi di applicazione che beneficeranno dei dati provenienti dalla missione GOCE. In sintesi, elenchiamo i principali:

- Oceanografia: sarà possibile migliorare gli studi sulla circolazione oceanica (correnti marine), sul trasporto di calore, sull'espansione termica degli oceani, sul riscaldamento globale;
- Geofisica: sono previsti avanzamenti nello studio della distribuzione delle masse all'interno della superficie terrestre e nella determinazione della dinamica dello spostamento delle placche continentali;
- Glaciologia: possibili applicazioni saranno rappresentate dalla determinazione dello spessore dei ghiacci e dell'influenza sui cambiamenti del livello degli oceani a lungo termine;
- Geodesia: si avranno benefici nell'unificazione del datum di altezza, nella stima dei geoidi locali, nella navigazione di precisione tramite l'uso di modelli di gravità più accurati.

A livello nazionale italiano, le attività collegate a GOCE hanno dato luogo nel 2007 alla formazione del consorzio GOCE-Italy, di cui è capofila il Politecnico di Milano. L'obiettivo primario è l'interpretazione dei dati GOCE per fini geologici, geofisici e oceanografici nello specifico del

territorio italiano. Il consorzio si pone anche obiettivi di carattere geodetico come la combinazione del modello finale derivato da GOCE con un modello derivato da GRACE e con dati di gravità a terra. Del consorzio GOCE-Italy fanno parte le seguenti unità:

- DIIAR, Sezione Rilevamento, Politecnico di Milano;
- Centro di Geodesia Spaziale, ASI, Matera;
- Dipartimento di Oceanografia, OGS, Trieste;
- Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Trieste;
- Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio", Università degli Studi di Milano;
- Dipartimento di Astronomia, Università degli Studi di Padova;
- Advanced Logistics Technology Engineering Center (ALTEC), Torino;
- Galileian Plus, Roma.

Gradienti di gravità		
EGG_NOM_2_	Gradienti di gravità nel sistema di riferimento del gradiometro (GRF): <ul style="list-style-type: none"> • gradienti di gravità calibrati e corretti; • correzioni dovute a variazioni temporali; • flag per gli outlier/data gap e corrispondenti dati ricalcolati; • stima dell'errore dei gradienti di gravità. 	Latenza: 2 settimane
EGG_TRF_2_	Gradienti di gravità nel sistema di riferimento orbitale locale (LNOF): <ul style="list-style-type: none"> • gradienti di gravità calibrati e corretti, incluse le correzioni per le variazioni temporali; • flag per gli outlier/data gap e corrispondenti dati ricalcolati; • stima dell'errore dei gradienti di gravità. 	Latenza: 1 mese
Orbite GOCE		
SST_PSO_2_	"Precise Science Orbits" (PSO): <ul style="list-style-type: none"> • posizioni di tipo "reduced-dynamic" e cinematico; • matrici di rotazione fra IRF e EFRF (sistemi di riferimento inerziale e terrestre); • varianze e covarianze per gli errori di stima delle posizioni cinematiche; • report di qualità per le PSO. 	Latenza: 4 settimane
Modello GOCE di campo della gravità		
EGM_GOC_2_	Modello finale GOCE del campo di gravità: <ul style="list-style-type: none"> • serie di coefficienti di armoniche sferiche, ed errori di stima; • griglie di ondulazioni del geoide, anomalie di gravità e deviazioni della verticale; • propagazione degli errori di stima in termini di ondulazioni del geoide; • report di qualità per il modello GOCE del campo di gravità. 	Latenza: 6 mesi
EGM_GVC_2_	Matrice di varianza-covarianza degli errori di stima dei coefficienti dello sviluppo in armoniche sferiche del modello finale GOCE del campo di gravità.	Latenza: 6 mesi
SST_AUX_2_	Variazioni temporali del campo di gravità dovute a variazioni di massa non mareali; serie temporali (6 ore) di armoniche sferiche.	Latenza: 2 settimane

Tabella 4 - Prodotti finali di Livello 2 che saranno disponibili alla comunità degli utenti GOCE

In generale le applicazioni scientifiche saranno basate sui cosiddetti dati GOCE di “Livello 2”, che corrispondono a una sequenza di successive operazioni di processamento definita da ESA come segue:

- Livello 0: dati grezzi misurati dagli strumenti a bordo del satellite;
- Livello 1: dati strumentali calibrati;
- Livello 2: modello globale del campo di gravità terrestre (in termini di coefficienti dello sviluppo in serie di armoniche sferiche e relativa matrice di covarianza dell'errore di stima) e altri dati derivati dall'analisi dei dati di Livello 1;
- Livello 3: prodotti derivati (applicazioni in geofisica, geodesia, oceanografia, ecc.).

In particolare, durante il Livello 2 verranno generati sia prodotti intermedi (che contengono risultati necessari per completare le analisi dati corrispondenti a questo stesso livello, e che ESA non prevede di distribuire agli utenti) che prodotti finali, i quali saranno poi disponibili per la distribuzione alla comunità scientifica (si veda la Tabella 4).

A partire dal momento in cui ESA inizierà a distribuire i dati finali, questi avranno latenze che dipenderanno dalla disponibilità dei dati di Livello 1 da parte del PDS (Payload Data Segment), che li distribuisce all'HPF. I dati preprocessati e calibrati del gradiometro saranno disponibili con una latenza di due settimane, mentre le orbite precise con una latenza di quattro settimane. Questi prodotti rappresentano i principali dati di input per il calcolo dei modelli del campo di gravità. Si prevede che i gradienti di gravità trasformati in un sistema di riferimento solidale con la terra (Earth-fixed) saranno disponibili dopo circa un mese, mentre saranno necessari almeno sei mesi dopo il completamento di ogni fase operativa della missione, perché il modello di campo sia disponibile.

Tutti i prodotti GOCE di Livello 2 saranno accessibili alla comunità degli utenti via l'interfaccia “user service” di GOCE, in formato XML in modo da migliorare la leggibilità dei dati. Inoltre, verrà fornita agli utenti la necessaria documentazione per la corretta interpretazione e utilizzazione dei dati.

Riferimenti bibliografici

- ESA (1999). “Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission”. ESA SP-1233 (1). ESA Publication Division, c/o ESTEC, Noordwijk, Olanda.
- Maggi A., Migliaccio F., Reguzzoni M., Tselfes N. (2006). “Combination of Ground Gravimetry and GOCE Data for Local Geoid Determination: a Simulation Study”, *Atti del 1° “International Symposium of IGFS”*, 28 Agosto - 1 Settembre 2006, Istanbul, Turchia, pp. 1-6.
- Migliaccio F., Reguzzoni M., Sansò F. (2004). “Space-wise approach to satellite gravity field determination in the presence of coloured noise”. *Journal of Geodesy*, Vol. 78, N. 4-5, pp. 304-313.
- Migliaccio F., Reguzzoni M., Tselfes N. (2005). “La missione GOCE e l'approccio space-wise all'analisi dei dati gradiometrici”, *Atti della 9ª Conferenza Nazionale ASITA*, 15-18 Novembre 2005, Catania, Vol. II, pp. 1523-1528.
- Migliaccio F., Reguzzoni M., Tselfes N. (2007). “Utilizzo dei dati della missione GOCE per la stima del geoide locale sul territorio della Regione Piemonte”. *Atti della 11ª Conferenza Nazionale ASITA*, 6-9 Novembre 2007, Torino, Vol. II, pp. 1549-1554.
- Reguzzoni M., Tselfes N. (2009). “Optimal multi-step collocation: application to the space-wise approach for GOCE data analysis”. *Journal of Geodesy*, Vol. 83, N. 1, pp. 13-29.
- Rummel R., Gruber T., Koop R. (2004). “High Level Processing Facility for GOCE: Products and Processing Strategy”, *Atti del 2° “International GOCE User Workshop”*, 8-10 Marzo 2004, Frascati, Italia, ISBN 92-9092-880-8, ISSN 1609-042X.

Siti web

- <http://www.esa.int/goce>
<http://geomatica.como.polimi.it/elab/goce/>
<http://www.diiar.polimi.it/ril/progetto.asp?id=1>