

L'analisi dei dati GOCE: il primo modello del campo di gravità calcolato con l'approccio space-wise

F. Migliaccio (*), M. Reguzzoni (**), A. Gatti (***), F. Sansò (***)

(*) DIAR, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano

(**) Dipartimento di Geofisica della Litosfera, OGS, c/o Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como

(***) DIAR, Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como

Riassunto

Dal 29 settembre 2009 il satellite GOCE è in modalità operativa e sta inviando a terra i dati acquisiti dagli strumenti a bordo, in particolare le derivate seconde del potenziale gravitazionale osservate dal gradiometro elettrostatico e i dati di tracciamento dell'orbita raccolti dal ricevitore GPS. Il processamento basato sull'approccio space-wise sfrutta entrambe le tipologie di dati per produrre un modello globale del campo di gravità terrestre ad elevata accuratezza e risoluzione spaziale; tale modello, che contribuirà a definire un unico datum d'altezza a livello mondiale, è rappresentato dai coefficienti di uno sviluppo in serie di armoniche sferiche e dalla corrispondente matrice di covarianza dell'errore.

L'idea fondamentale alla base dell'approccio space-wise è di stimare i coefficienti armonici del potenziale gravitazionale terrestre sfruttando la sua correlazione spaziale. A tal fine, le osservazioni sono prima filtrate lungo l'orbita per ridurre il rumore fortemente correlato del gradiometro, quindi i dati filtrati sono interpolati tramite collocazione su una griglia regolare alla quota media del satellite e infine i coefficienti armonici sono stimati attraverso un'analisi armonica per integrazione. L'intera procedura viene iterata fino a raggiungere la convergenza. La matrice di covarianza dell'errore dei coefficienti stimati è ricavata applicando il metodo Monte Carlo.

In questo lavoro viene presentata la soluzione ottenuta con l'approccio space-wise a partire dai primi due mesi di dati GOCE.

Abstract

Since September 29th, 2009, GOCE is in operational mode and is delivering the data acquired by the on-board instruments, in particular the second derivatives of the gravitational potential observed by the electrostatic gradiometer and the orbit tracking data acquired by the GPS receiver. The processing based on the space-wise approach exploits both types of data to produce a global gravity field model with high accuracy and spatial resolution. Such a model, which will contribute to the definition of a unique height datum at global level, is represented by the coefficients of a spherical harmonic expansion and by the corresponding error covariance matrix.

The fundamental idea on which the space-wise approach is based is to estimate the harmonic coefficients of the Earth gravitational potential by exploiting its spatial correlation. To this aim, the observations are first filtered along the orbit in order to decrease the highly correlated noise of the gradiometer; afterwards, the filtered data are interpolated by collocation on a regular spherical grid at mean satellite altitude; finally, the harmonic coefficients are estimated by means of a harmonic analysis by integration. The whole procedure is iterated until convergence. The error covariance matrix of the estimated coefficients is derived by applying the Monte Carlo method.

In this paper the solution obtained by the space-wise approach based on the first two months of GOCE data is presented.

Introduzione

Il satellite GOCE è stato lanciato dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea) il 17 marzo 2009. Dopo un periodo iniziale dedicato ad attività quali correzioni orbitali e test di calibrazione, la missione è entrata in fase operativa il 30 settembre 2009 e da quel momento fino a luglio 2010 i dati sono stati acquisiti da terra in continuo, a parte alcuni brevi periodi di interruzione. Lo scopo principale del processamento di tali dati è la determinazione di un modello globale del campo di gravità con elevata accuratezza e risoluzione spaziale. Al tal fine, sono state implementate tre diverse strategie nell'ambito della cosiddetta High-level Processing Facility (HPF) (Rummel et al., 2004): l'approccio diretto (Bruinsma et al., 2004), l'approccio time-wise (Pail et al., 2005) e l'approccio space-wise (Migliaccio et al., 2004). Il Politecnico di Milano è responsabile dell'approccio space-wise, basato sull'idea di stimare i coefficienti del modello globale sfruttando la correlazione spaziale del campo gravitazionale terrestre. E' stata quindi sviluppata una soluzione di collocazione (Moritz, 1989) in cui la covarianza del segnale è modellata in funzione della distanza spaziale e non della distanza temporale, come invece avviene per la covarianza del rumore. In tal modo possono essere filtrati insieme dati che sono vicini nello spazio, anche se lontani nel tempo, superando i problemi connessi alla forte correlazione temporale del rumore di misura del gradiometro.

Poiché un'unica soluzione di collocazione non sarebbe computazionalmente fattibile (anche se teoricamente desiderabile) a causa della grande quantità di dati da analizzare, l'approccio space-wise è stato implementato come una procedura di collocazione a passi (Reguzzoni e Tselfes, 2009) consistente fondamentalmente in un filtraggio dei dati lungo l'orbita per ridurre il rumore di misura del gradiometro (altamente correlato nel tempo), in una interpolazione di tali dati su una griglia sferica posta alla quota media del satellite e infine in una procedura di analisi armonica per integrazione che porta alla stima dei coefficienti armonici del geo-potenziale. La procedura è iterata fino a raggiungere la convergenza. La matrice di varianza-covarianza dei coefficienti stimati è ottenuta attraverso il metodo Monte Carlo (Migliaccio et al., 2009). Nella presente comunicazione è descritta l'applicazione dell'approccio space-wise ai primi due mesi di dati GOCE acquisiti e sono presentati i risultati ottenuti.

Dati utilizzati e pre-processamento

Il periodo di tempo preso in esame per l'analisi dei dati va dal 30/10/2009, 00:57:57, al 11/01/2010, 07:38:15, e corrisponde a circa 73 giorni.

I dati in input sono i seguenti:

- gradienti di gravità;
- accelerazioni di modo comune;
- quaternioni che descrivono l'assetto del satellite;
- orbite cinematiche e corrispondenti errori di stima per la determinazione della soluzione derivante dal solo tracciamento del satellite (SST);
- orbite "reduced dynamic" per la geo-referenziazione dei gradienti di gravità;
- quaternioni che descrivono la rotazione fra il sistema di riferimento inerziale e quello terrestre;
- parametri di rotazione terrestre, effemeridi del sole e della luna e coefficienti in armoniche sferiche del modello di marea oceanica FES2004 (Lyard et al., 2006);
- modello GOCE "quick-look" del campo di gravità (Mayrhofer et al., 2010), prodotto nell'ambito dell'approccio time-wise, da usare come modello a priori;
- altri modelli del campo di gravità, in particolare EGM2008 (Pavlis et al., 2008), EIGEN_5C (Foerste et al., 2008) e ITG_GRACE2010 (Mayer-Guerr, 2006) da usare come modelli di riferimento.

I dati di output saranno rappresentati dal set dei coefficienti armonici sferici del modello di geo-potenziale stimato e dalla corrispondente matrice completa della covarianza dell'errore.

E' evidente che la qualità della soluzione che sarà ottenuta dipenderà anche da una fase iniziale di pre-processamento dedicata all'individuazione e alla correzione degli outlier e delle interruzioni nella sequenza dei dati ("data gap"). Outlier e data gap, una volta individuati, sono sostituiti o

“riempiti” con valori stimati tramite una procedura di collocazione; in particolare i dati disponibili appena prima e dopo un “gap” sono utilizzati per stimare una funzione di covarianza empirica, poi sfruttata per la predizione dei valori all’interno del “gap” (si veda (Migliaccio et al., 2010) per ulteriori dettagli).

Deve essere sottolineato il fatto che i valori così sostituiti sono poi usati solo durante il filtraggio di Wiener dei dati lungo l’orbita, quando è necessario avere una sequenza di misure continua nel tempo. Invece, durante la procedura di predizione delle griglie sferiche per collocazione (che rappresenta il cuore dell’approccio space-wise), i valori interpolati all’interno dei “gap” o per sostituire gli outlier non vengono mai utilizzati, in quanto in questo caso non è richiesto che i dati siano campionati in maniera regolare nel tempo.

Modello del campo di gravità derivato dai soli dati di tracciamento (modello SST)

La parte a bassa frequenza del campo di gravità è stimato solo dai dati di tracciamento del satellite. La procedura implementata si articola in tre passi, descritti di seguito.

- Stima del potenziale gravitazionale lungo l’orbita tramite il cosiddetto metodo di conservazione dell’energia (Visser et al., 2003). Avendo deciso di calcolare il potenziale gravitazionale dalle orbite cinematiche, è necessario stimare le velocità del satellite a partire dalle sue posizioni; questo è fatto grazie ad una interpolazione polinomiale ai minimi quadrati su finestra mobile, utilizzando le stime degli errori di posizione per pesare le osservazioni (Migliaccio et al., 2010). La determinazione del potenziale con il metodo di conservazione dell’energia richiede inoltre di rimuovere dai dati gli effetti delle forze non gravitazionali (attrito atmosferico, pressione di radiazione solare, ecc.) e delle maree.
- Predizione di una griglia di dati del potenziale su una sfera alla quota media del satellite tramite collocazione. Prima di questa operazione il segnale generato a partire da un modello a priori viene sottratto dai dati (e in seguito verrà risommato alla soluzione). In questo caso, si è scelto di usare come informazione a priori il modello “quick-look” calcolato sempre nell’ambito dell’HPF a partire dai dati GOCE. Poiché la stima di tale modello è basata anche su dati del satellite GRACE (modello EIGEN_5S), esso non può essere considerato un puro modello GOCE, e questa caratteristica verrà alla fine “ereditata” dalla soluzione space-wise.
- Stima dei coefficienti in armoniche sferiche tramite integrazione numerica. Nella Figura 1 è mostrata la stima empirica delle varianze degli errori di modello fino a grado armonico 180, calcolate rispetto al modello ITG_GRACE2010 (prodotto da soli dati GRACE e quindi, per le caratteristiche di questa missione, migliore del modello GOCE ai gradi più bassi). La figura riporta inoltre le varianze degli errori predette tramite Monte Carlo e le varianze degli errori predette per il modello ITG_GRACE2010.

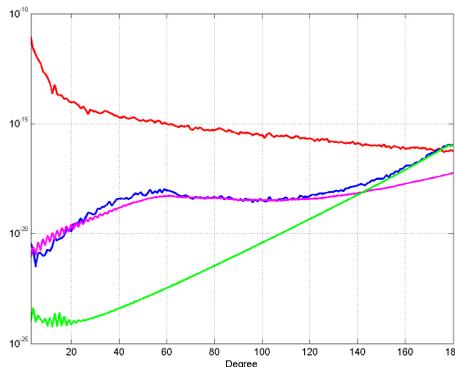


Figura 1 – Varianze empiriche degli errori del modello GOCE SST (rispetto al modello ITG_GRACE2010) in blu; varianze predette degli errori del modello GOCE SST in viola; varianze predette degli errori del modello GRACE in verde; varianze del segnale in rosso.

Modello space-wise del campo di gravità dai dati GOCE (SST + SGG)

In sintesi, la soluzione space-wise è ottenuta per le basse frequenze dal modello SST (calcolato come descritto nel paragrafo precedente), mentre per le frequenze più alte è prevalentemente derivato dai dati del gradiometro di GOCE (SGG), ai quali viene applicato un filtro di Wiener lungo l'orbita per ridurre l'elevata correlazione temporale del rumore di misura. In tal modo è possibile calcolare una griglia sferica del potenziale e della sua derivata seconda radiale alla quota media del satellite applicando un algoritmo di collocazione su aree locali di dati, il che rende la soluzione fattibile dal punto di vista computazionale. A partire dai valori predetti sulla griglia, i coefficienti armonici sono calcolati per integrazione numerica. La procedura deve essere iterata per recuperare ad ogni passo il segnale filtrato in precedenza lungo l'orbita e per correggere la rotazione fra il sistema di riferimento del gradiometro e quello locale legato al satellite.

Le varianze empiriche degli errori del modello finale space-wise sono riportate nella Figura 2, sia rispetto a ITG_GRACE2010 che rispetto a EGM2008; sono inoltre mostrate le varianze degli errori di modello predette con Monte Carlo.

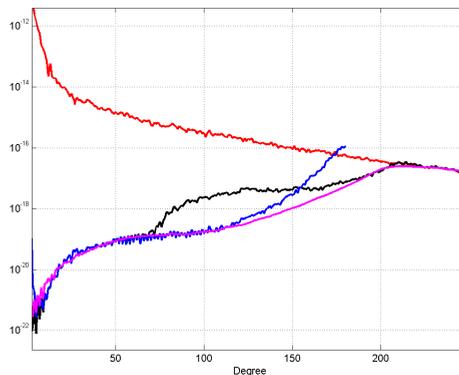


Figura 2 – Varianze empiriche degli errori di modello rispetto a ITG_GRACE2010 in blu e rispetto a EGM2008 in nero; varianze predette degli errori di modello in viola e varianze del segnale in rosso.

Le differenze fra il modello GOCE space-wise e gli altri due modelli sono praticamente le stesse fino a grado armonico 70, e sono entrambe rappresentative del vero errore perché entrambi i modelli di confronto sono basati su dati GRACE, superiori ai dati GOCE per i gradi bassi. Sopra il grado 70 le differenze rispetto a EGM2008 sono molto maggiori delle differenze rispetto a ITG_GRACE2010 e non dovrebbero essere usate per rappresentare l'errore di modello di GOCE, dal momento che EGM2008 è un modello combinato basato anche su dati a terra, nel quale gli errori dovuti ad esempio a diversi datum di altezza entrano nella soluzione. D'altro canto, sopra il grado 120 l'informazione fornita da GRACE non è più superiore alla presente soluzione derivata dai dati di GOCE, quindi le differenze fra il modello GOCE e il modello ITG_GRACE2010 sono dominate dagli errori di GRACE. Ai gradi più elevati (sopra 180) la qualità del modello EGM2008 torna ad essere superiore, quindi le differenze fra i modelli GOCE e EGM2008 sono qui rappresentative del vero errore del modello GOCE. Le varianze predette degli errori di modello sono consistenti con i ragionamenti sopra esposti e confermano che una soluzione GOCE basata su soli due mesi di dati è già superiore a una soluzione GRACE sopra il grado armonico 120 e potrebbe validamente contribuire a individuare errori dovuti ai dati di gravità a terra nei modelli combinati come EGM2008.

Queste considerazioni sono evidenziate anche dalle differenze in termini di geoidi fino a grado 150 della soluzione GOCE rispetto a EGM2008 e a ITG_GRACE2010 (mostrate nella Figura 3 e nella Figura 4). Nel caso di EGM2008 sono chiaramente visibili errori legati alla qualità dei dati di gravità

a terra usati per il calcolo del modello (si notino gli errori più elevati in Sud America, in Africa e nella regione dell'Himalaya). Nel caso di ITG_GRACE2010 il confronto è fatto fra due modelli derivati solo da dati da satellite, perciò le differenze dipendono principalmente dalla latitudine e indicano che GOCE può correggere i tipici errori a “strisce” di GRACE.

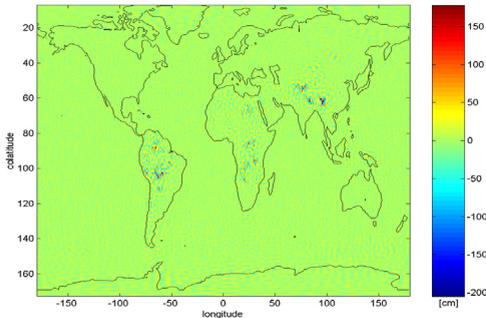


Figura 3 – Differenze in termini di geoidi della soluzione GOCE rispetto a EGM2008 fino a grado 150.

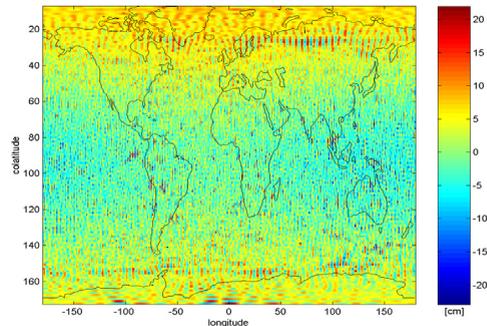


Figura 4 – Differenze in termini di geoidi della soluzione GOCE rispetto a ITG_GRACE2010 fino a grado 150.

Osservando ancora la Figura 2, il grado massimo della soluzione GOCE space-wise è stato scelto pari a 210, dove le varianze degli errori di modello raggiungono le varianze del segnale.

L'errore predetto in termini di geoidi fino a grado 200 (ovvero il requisito di missione) è mostrato nella Figura 5; questa predizione è ottenuta a partire dalla matrice di covarianza dei coefficienti stimati, calcolata con il metodo Monte Carlo utilizzando 400 campioni. Si noti che la struttura dell'errore dipende essenzialmente dalla latitudine.

Complessivamente lo scarto quadratico medio dell'errore di geoidi fino a grado 200 è di 10.86 cm, mentre quello delle anomalie di gravità è di 3.03 mgal (in entrambi i casi per l'intervallo di latitudine coperto dai dati GOCE, cioè per $|\varphi| < 83^\circ$).

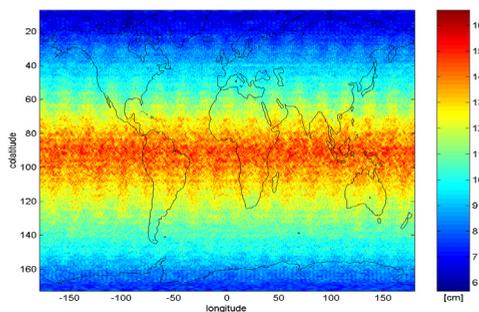


Figura 5 – Errore predetto in termini di geoidi della soluzione GOCE fino a grado armonico 200.

Conclusioni e sviluppi futuri

L'analisi dei primi due mesi dei dati GOCE ha dimostrato che l'approccio space-wise è in grado di fornire buoni risultati. Il pre-processamento dei dati (che comprende la reiezione degli outlier e il riempimento dei “gap”) costituisce un'operazione fondamentale per migliorare la qualità della soluzione. L'uso di modelli a priori per la calibrazione dell'errore e per la formazione di griglie di dati può avere effetti indiretti sulla soluzione, e questo fatto dovrà essere attentamente studiato in futuro (ad esempio, per non introdurre informazioni dovute a GRACE nel modello GOCE).

Lo schema iterativo che sfrutta l'informazione fornita dai gradienti di gravità porta in definitiva a una soluzione fino a grado armonico 210, con un errore di commissione dell'ordine di 10 cm. L'accuratezza potrà essere migliorata quando sarà disponibile un insieme più esteso di dati GOCE, mentre la struttura dell'errore dovrebbe rimanere più o meno la stessa, tenuto conto del fatto che le orbite hanno un ciclo che si ripete ogni due mesi circa. Riguardo alle attività future, la residua dipendenza della soluzione SST da modelli a priori sarà eliminata per produrre un puro modello GOCE. Naturalmente, verrà calcolata una nuova soluzione a partire da un più lungo periodo di osservazioni. Tuttavia, poiché lo schema iterativo non potrà essere applicato all'intera serie di dati per motivi computazionali, sarà necessaria una combinazione di griglie basate su sotto-insiemi di dati alla quota media del satellite. Per calcolare tale combinazione si terrà conto della covarianza dell'errore delle diverse griglie stimate. Il modello globale space-wise qui descritto, denominato GO_CONS_GCF_2_SPW, è disponibile on-line sul sito dell'International Centre for Global Earth Models (ICGEM), insieme con i modelli dell'approccio diretto, GO_CONS_GCF_2_DIR, e di quello time-wise, GO_CONS_GCF_2_TIM, vedi <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del contratto ESA 18308/04/NL/NM (GOCE HPF).

Riferimenti bibliografici

- Bruinsma S., Marty J.C. e Balmino G. (2004), "Numerical simulation of the gravity field recovery from GOCE mission data", *Proc. of the 2nd International GOCE User Workshop*, ESA SP-569.
- Lyard F., Lefevre F., Letellier T. e Francis O. (2006), "Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004", *Ocean Dynamics*, Vol. 56, N. 5-6, pp. 394-415.
- Foerste C., Flechtner F., Schmidt R., Stubenvoll R., Rothacher M., Kusche J., Neumayer H., Biancale R., Lemoine J.M., Barthelmes F., Bruinsma S., Koenig R. e Meyer U. (2008), "EIGEN-GL05C - A new global combined high-resolution GRACE-based gravity field model of the GFZ-GRGS cooperation", *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-03426.
- Mayer-Guerr T. (2006), *Gravitationsfeldbestimmung aus der Analyse kurzer Bahnbögen am Beispiel der Satellitenmissionen CHAMP und GRACE*, Dissertation, University of Bonn.
- Migliaccio F., Reguzzoni M. e 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., Sansò F. e Tselfes N. (2009), "An error model for the GOCE space-wise solution by Monte Carlo methods", *IAG Symposia*, "Observing our Changing Earth", Sideris M.G. (ed), Vol. 133, Springer-Verlag, Berlin, pp. 337-344.
- Migliaccio F., Reguzzoni M. e Tselfes N. (2010), "A simulated space-wise solution using GOCE kinematic orbits", in corso di stampa in *Bulletin of Geodesy and Geomatics*, Vol. LXIX, N. 1, 2010.
- Moritz H. (1989), *Advanced Physical Geodesy*, 2nd Edition. Wichmann Verlag. Karlsruhe.
- Pail R., Schuh W.D. e Wermuth M. (2005), "GOCE Gravity Field Processing", *IAG Symposia*, "Gravity, Geoid and Space Missions", Jekeli C., Bastos L. e Fernandes J. (eds), Vol. 129, Springer-Verlag, Berlin, pp. 36-41.
- Mayrhofer R., Pail R. e Fecher T. (2010), "Quick-look gravity field solution as part of the GOCE quality assessment", *Proc. of the ESA Living Planet Symposium*, 28 Giugno – 2 Luglio 2010, Bergen, Norvegia.
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. e Factor J.K. (2008), "An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008", presentato alla EGU General Assembly, 13–18 Aprile 2008, Vienna, Austria.
- Reguzzoni M. e 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. e Koop R. (2004), "High Level Processing Facility for GOCE: Products and Processing Strategy", *Proc. of the 2nd International GOCE User Workshop*, ESA SP-569.
- Visser P.N.A.M., Sneeuw N. e Gerlach C. (2003), "Energy integral method for gravity field determination from satellite orbit coordinates", *Journal of Geodesy*, Vol. 77, N. 3-4, pp. 207-216.