

Utilizzo dei dati della missione GOCE per la stima del geoide locale sul territorio della Regione Piemonte

F. Migliaccio (*), M. Reguzzoni (**), N. Tselfes (**)

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

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

Riassunto

Il lancio del satellite GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) è previsto per il 2008 dal cosmodromo di Plesetsk (Russia). Si tratterà della prima missione di gradiometria da satellite, progettata dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea), con l'obiettivo di determinare il campo di gravità terrestre con elevata accuratezza e risoluzione spaziale. Il principale strumento a bordo del satellite GOCE sarà un gradiometro triassiale, in grado di misurare le derivate seconde del potenziale gravitazionale.

Una più accurata modellizzazione del campo di gravità avrà diverse e notevoli ricadute non solo in geodesia, ma anche nell'ambito della geofisica della terra solida e dell'oceanografia. A livello locale saranno possibili miglioramenti nei calcoli per la stima del geoide e di altre quantità legate al campo della gravità.

La possibilità di raggiungere quest'ultimo obiettivo è stato verificato nel corso di un esperimento riguardante un ambito territoriale corrispondente ad un'area centrata sulla Regione Piemonte. La simulazione delle osservazioni GOCE (corrispondente a un periodo di due mesi di misure) è stata realizzata sulla base di uno scenario realistico per quanto riguarda le caratteristiche del *noise* di misura, la risoluzione spaziale e la frequenza di osservazione.

Il risultato numerico dell'integrazione dei dati a terra con le informazioni fornite da GOCE mostra un miglioramento di un ordine di grandezza nell'accuratezza del geoide locale, dovuto principalmente alla miglior stima delle componenti a bassa frequenza.

Abstract

The launch of the GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) satellite is foreseen for the year 2008 from the cosmodrome of Plesetsk (Russia). It will be the first satellite gravity mission, designed by the European Space Agency (ESA) with the aim of determining the gravity field of the Earth with high accuracy and spatial resolution. The main instrument on board GOCE will be a tri-axial gradiometer which will supply measures of the second derivatives of the gravitational potential.

A more accurate modelling of the gravity field will have several and remarkable consequences not only in geodesy, but also in the fields of solid earth geophysics and of oceanography. At a local level, improvements are expected in the estimate of the geoid and of other quantities connected with the gravity field.

The possibility to reach this goal has been verified with an experiment regarding the territory of North-Western Italy corresponding to an area centered around Region Piemonte. The simulation of GOCE data (corresponding to a time span of two months) has been performed on the basis of a

realistic scenario for the characteristics of measurement noise, spatial resolution and observation frequency.

The numerical results of the integration of ground data with the information given by GOCE shows an improvement of one order of magnitude in the accuracy of the local geoid, mainly due to the better estimate of the low-frequency components.

La missione GOCE e il suo contributo alla geodesia e alla geofisica

La missione di geodesia spaziale GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer), progettata dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea) sarà lanciata nel 2008 dal cosmodromo di Plesetsk (Russia). Lo scopo di questa missione è la misura del campo della gravità terrestre e la produzione di un nuovo modello globale di geoidi con accuratezza e risoluzione spaziale elevate (ESA, 1999).

Lo strumento principale a bordo di GOCE sarà un gradiometro triassiale composto da tre accelerometri disposti a coppie su tre assi perpendicolari; esso misurerà le derivate seconde del potenziale gravitazionale terrestre (i cosiddetti gradienti della gravità) lungo l'orbita del satellite.

Altre informazioni sul campo della gravità saranno ottenute dal tracciamento dell'orbita del satellite per mezzo di un ricevitore GPS. Inoltre, per derivare il miglior modello possibile di campo della gravità si dovrà tenere conto anche degli effetti dovuti alle accelerazioni non gravitazionali sull'orbita (drag atmosferico, pressione di radiazione solare, albedo, ecc.).

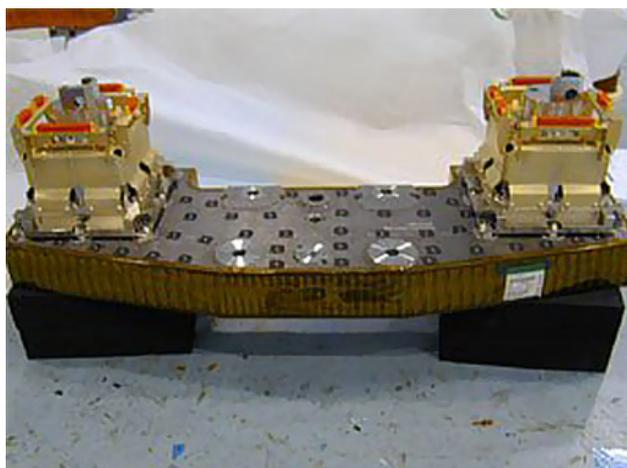


Figura 1 – Coppia di accelerometri triassiali di GOCE

E' noto che il geoido è usato come superficie di riferimento per le applicazioni cartografiche e geodetiche. Questo non è però l'unico punto di interesse della missione. Infatti un modello preciso del geoido terrestre è cruciale per poter derivare misure accurate della circolazione oceanica, delle variazioni del livello dei mari e delle calotte polari, nonché della dinamica dei ghiacci terrestri. Si aggiunga che una migliore conoscenza delle anomalie di gravità potrà contribuire ad una migliore conoscenza dell'interno della Terra e dei fenomeni che li hanno origine (si pensi alla fisica e alla dinamica di fenomeni quali vulcanesimo e terremoti).

Infine (ed è quello che ci interessa nel presente articolo) l'integrazione dei dati GOCE con dati geodetici provenienti da misure a terra si può dimostrare di fondamentale importanza per ottenere una migliore conoscenza del campo di gravità della terra in una zona specifica (calcolo del geoido locale e di altri funzionali del campo di gravità a livello locale).

La possibilità di raggiungere questo obiettivo è stato verificato nel corso di un esperimento riguardante un ambito territoriale corrispondente all'area compresa fra $43^\circ \leq \varphi \leq 47^\circ$, $6^\circ \leq \lambda \leq 10^\circ$,

centrata sulla Regione Piemonte. In quest'area i dati di gravità a terra (anomalie di gravità “*free air*” provenienti da ENI e NIMA) presentano in generale un'elevata densità (corrispondente in media a $1' \times 1'$), tuttavia vi sono ancora delle zone sulle Alpi che sono caratterizzate da una scarsa copertura. Per questo motivo la combinazione di questi dati con le osservazioni gradiometriche fornite da GOCE può risultare particolarmente efficace nella stima del geode locale.

Campo di gravità e geode della Regione Piemonte

A partire dal 2005 il Politecnico di Milano (Sezione Rilevamento del DIAR) ha collaborato con la Protezione Civile del Piemonte e con Altec S.p.A. in un progetto basato sull'idea che la realizzazione di mappe gravimetriche più accurate, congiuntamente al modello digitale del terreno (Rodriguez et al., 2005) relativo all'area di interesse, possano contribuire a sviluppare un modello geofisico volto ad approfondire le conoscenze in merito agli studi tettonici, alle faglie e alla sismica. Il database delle anomalie *free air* già disponibili e citato più sopra è stato utilizzato (Barzaghi et al., 2007) per stimare l'ondulazione del geode applicando la tecnica detta *fast collocation* (Bottoni e Barzaghi, 1993), si veda la Figura 2. La bontà della stima eseguita è stata verificata confrontando i valori ottenuti su un insieme di circa 300 punti con quelli calcolati (nei corrispondenti punti) a partire da misure di livellazione/GPS. Le differenze mostrano una deviazione standard dell'ordine di 10 cm.

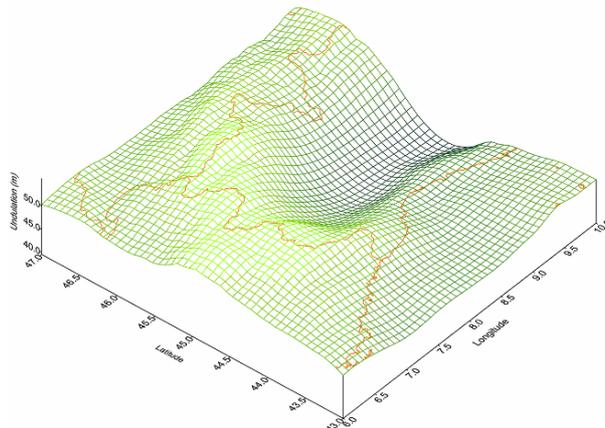


Figura 2 – Ondulazione del geode (in metri) nell'area nord-occidentale dell'Italia (Barzaghi et al., 2007)

Impatto dei dati GOCE sulla stima locale del geode per il Piemonte

Lo studio sull'impatto dell'integrazione dei dati GOCE con dati di gravità a terra è stato svolto sulla base di una simulazione realistica, cioè rappresentata da dati che hanno le stesse caratteristiche di rumore di misura, risoluzione spaziale e frequenza di quelli attesi dalla missione vera e propria. In particolare, sono stati simulati 2 mesi di missione, con la frequenza di 1 Hz; l'orbita è stata calcolata dal modello EGM96 (Lemoine et al., 1998) fino a *degree* 200; le derivate seconde radiali sono state simulate dal modello EGM96 fino a *degree* 360 e dal modello GPM98 (Wenzel, 1998) da *degree* 361 a 720 per modellizzare anche le più alte frequenze del campo di gravità. A queste osservazioni gradiometriche è stato aggiunto un *noise* colorato con deviazione standard di 5 mE.

Un miglioramento nella stima del geode può essere ottenuto sia utilizzando il nuovo modello globale stimato a partire dalle osservazioni GOCE, sia sfruttando direttamente la disponibilità di nuovi dati, nello specifico le derivate seconde radiali del potenziale gravitazionale.

Nel primo caso, si è verificato che il modello globale ottenuto dai dati GOCE simulati dà luogo a un miglioramento di accuratezza a livello locale di quasi un ordine di grandezza, con la deviazione standard che diminuisce da $10 \div 15$ cm a $2 \div 3$ cm. Ciò è essenzialmente dovuto al fatto che il modello globale di GOCE dovrebbe presentare una più bassa varianza dell'errore per le lunghezze d'onda corrispondenti ai gradi inferiori a 200, rispetto ai modelli globali attualmente utilizzati come EGM96 (si veda la Figura 3). In effetti, questo sarà il contributo principale di GOCE alla modellazione locale del campo di gravità, dal momento che gli errori nelle lunghezze d'onda "lunghe" non possono essere corretti dai dati locali di gravità (Maggi et al., 2006).

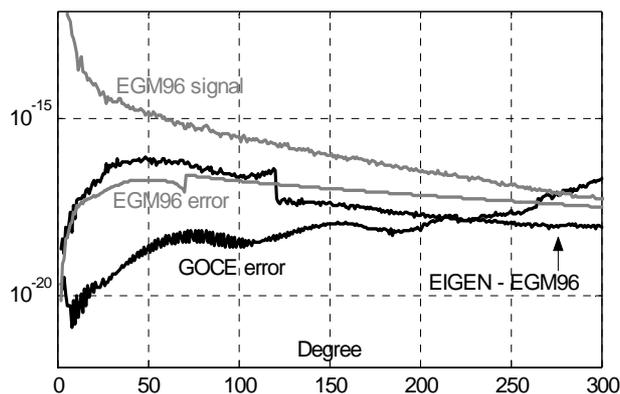


Figura 3 – Degree variances del segnale e dell'errore per i modelli EGM96, GOCE e EIGEN

Nel secondo caso delineato sopra (sfruttamento delle derivate seconde misurate dal gradiometro) le anomalie di gravità a terra e le derivate seconde misurate all'altezza del satellite sono state usate come input in una procedura di stima tramite collocazione, mentre l'output era rappresentato dall'ondulazione del geoide.

Al fine di combinare dati tra loro consistenti, ovvero riferiti allo stesso campo, anche le anomalie di gravità a terra sono state simulate, utilizzando ancora i modelli EGM96 e GPM98, aggiungendo un rumore bianco caratterizzato da una deviazione standard di 6 mGal, ma mantenendo la posizione geografica delle osservazioni reali. Come consuetudine in un approccio di collocazione, ai vari funzionali sono state sottratte le componenti a bassa frequenza di un modello globale diverso da quello usato per la simulazione: nel caso specifico è stato usato come modello di riferimento quello ottenuto dai dati GOCE tramite il cosiddetto approccio space-wise (Migliaccio et al., 2004) fino a grado e ordine 200.

Sono stati considerati tre casi: 1) predizione usando solo valori di Δg , 2) predizione usando solo T_{rr} , 3) predizione usando entrambi i funzionali.

I valori di ondulazione del geoide predetti sono stati confrontati con i valori "veri" simulati. I risultati sono riportati nella Tabella 4, dove a fini di confronto si riportano anche i risultati ottenuti utilizzando come modello di riferimento EIGEN_CG03C (Reigber et al., 2006) fino a grado e ordine 360.

Si vede immediatamente che anche nel caso in cui vengano usati i soli valori di anomalia di gravità, il modello GOCE porta a risultati migliori rispetto al caso in cui si usi come riferimento un modello come EIGEN_CG03C, grazie alla migliore modellizzazione dei *degree* inferiori a 200.

Se poi si combinano i dati di T_{rr} misurati lungo l'orbita del satellite nell'area tra $41^\circ \leq \varphi \leq 49^\circ$ e $4^\circ \leq \lambda \leq 11^\circ$, il risultato migliora ulteriormente, in quanto queste misure contengono una informazione locale aggiuntiva rispetto al modello globale GOCE.

Se infine si usano, insieme ai dati di anomalia di gravità, dati di T_{rr} che siano stati grigliati, allora la soluzione migliora ulteriormente in quanto i dati grigliati presentano un'accuratezza migliore rispetto ai dati lungo orbita.

Nella Figura 5 è riportata la distribuzione spaziale degli errori empirici nelle ondulazioni del geoidi stimate tramite la collocazione, mettendo a confronto il risultato che si ottiene usando solo dati di Δg con il risultato che si ottiene usando sia Δg che T_{rr} .

Caso	Modello	Dati utilizzati	Dev. St. empirica	Errore predetto
	EIGEN	Δg	11.6	10.1
1)	GOCE	Δg	2.7	2.9
2)	GOCE	$\Delta g + T_{rr}$	2.4	2.3
3)	GOCE	$\Delta g + \text{grid } T_{rr}$	1.7	1.7

Tabella 4 – Modello di riferimento, dati utilizzati, deviazione standard empirica rispetto al “geoidi vero” ed errore predetto per i tre diversi casi studiati

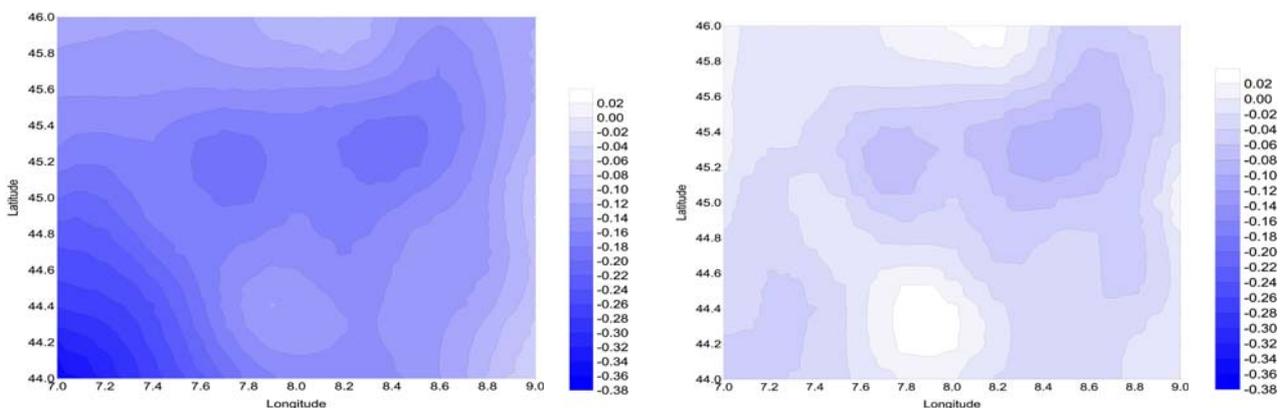


Figura 5 – Distribuzione spaziale degli errori empirici nelle ondulazioni del geoidi (in cm): a sinistra usando solo Δg , a destra usando Δg and T_{rr} lungo traccia

Conclusioni

Ci si attende che il modello globale del campo di gravità che sarà ottenuto dai dati GOCE sia caratterizzato da un'elevata qualità e che la corrispondente informazione a bassa frequenza si riveli molto utile nelle procedure di stima locale del campo della gravità.

I risultati presentati in questo articolo, basati su dati simulati, confermano la possibilità di utilizzare tale modello nelle applicazioni locali e mostrano come le osservazioni gradiometriche acquisite sopra l'area di interesse possano ulteriormente contribuire a migliorare la stima di funzionali locali del campo di gravità.

In particolare nei casi presentati si è verificato che grazie all'integrazione dei dati GOCE nella procedura di stima del geoidi locale è possibile ottenere un miglioramento di accuratezza di un ordine di grandezza, passando da una deviazione standard di circa 10 cm a valori di circa 2 cm.

References

Barzaghi R., Conte R., Falletti G., Maggi A., Martino M., Migliaccio F., Reguzzoni M., Sansò F., Solitro F., Tselfes N. (2007), “Exploitation of GOCE data for a local estimate of gravity field and geoid in the Piemonte area (northern Italy)”. *Proc. of the 3rd International GOCE User Workshop*, 6-8 November 2006, Frascati, Italy, ESA SP-627, ISBN 92-9092-938-3, ISSN 1609-0-042X.

Bottoni G., Barzaghi R. (1993), “Fast Collocation”. *Bulletin Geodesique*, vol. 67, n. 2, Springer-Verlag.

ESA (1999), *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission*, ESA SP-1233 (1) - ESA Publication Division, c/o ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.

Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R. (1998), “The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96” - *NASA Report TP-1998-206861*, Goddard Space Flight Center.

Maggi A., Migliaccio F., Reguzzoni M., Tselfes N. (2006), “Combination of Ground Gravimetry and GOCE Data for Local Geoid Determination: a Simulation Study”, *Proc. of the 1st International Symposium of IGFS*, 28 August - 1 September 2006, Istanbul, Turkey.

Migliaccio F., Reguzzoni M., Sansò F. (2004), “Space-wise approach to satellite gravity field determination in the presence of coloured noise” - *Journal of Geodesy*, 78, pp. 304-313.

Moritz H. (1989), *Advanced Physical Geodesy*, Wichmann, Karlsruhe.

Reigber C., Schwintzer P., Stubenvoll R., Schmidt R., Flechtner F., Meyer U., König R., Neumayer H., Förste Ch., Barthelmes F., Zhu S.Y., Balmino G., Biancale R., Lemoine J.M., Meixner H., Raimondo J.C. (2006), “A High Resolution Global Gravity Field Model Combining CHAMP and GRACE Satellite Mission and Surface Data: EIGEN_cg01c” - *Scientific Technical Report STR06/07*.

Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. (2005), “An Assessment of the SRTM Topographic products” - *Technical Report JPL D-31639*, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.

Rummel R., Gruber Th., Koop R. (2004), “High Level Processing Facility for GOCE: Products and Processing Strategy”, *Proc. of 2nd International GOCE User Workshop*, 8-10 March 2004, Frascati, Italy, ISBN 92-9092-880-8, ISSN 1609-042X.

Wackernagel H. (1995), *Multivariate geostatistics* – Springer Verlag.

Wenzel G. (1998), “Ultra high degree geopotential models GPM98A, B and C to degree 1800” - Submitted to Proceedings Joint Meeting of the International Gravity Commission and International Geoid Commission, September 7 -12, Trieste 1998. *Bollettino di Geofisica teorica ed applicata*.

Ringraziamenti

Il lavoro presentato è stato svolto nell’ambito del progetto “GOCE Data for Civil Protection” (Altec S.p.A., Protezione Civile della Regione Piemonte, Politecnico di Milano).

Il presente articolo riprende il contenuto di due lavori già presentati in ambito internazionale: (Maggi et al., 2006), (Barzaghi et al., 2007). Gli Autori intendono ringraziare tutti i co-autori degli articoli citati.