

EFFETTO DI UN ERRORE DI MODELLO DELLA MAREA TERRESTRE NEL CALCOLO DI RETI PERMANENTI GPS A SCALA REGIONALE

Ludovico BIAGI (*), Grazia PIETRANTONIO (**), Federica RIGUZZI (**)

(*) Politecnico di Milano - DIAR c/o Polo Regionale di Como, via Valleggio, 11 - 22100 Como
tel. +390313327562, fax +390313327519, e-mail: ludovico.biagi@polimi.it

(**) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione CNT, via di Vigna Murata 605 - 00143 Roma
tel. +390651860266, fax +39065041303, e-mail: pietrantonio@ingv.it

Riassunto

Attualmente il modello di marea terrestre da utilizzare nelle soluzioni di reti GPS permanenti è quello descritto nelle convenzioni IERS 2003: esso si basa sostanzialmente sul calcolo di una correzione mareale del primo ordine più alcuni altri termini funzione dello spazio e del tempo. Tale modello è implementato anche nel BERNESE, uno dei *software* scientifici per l'elaborazione di dati GPS più utilizzati al mondo; nel luglio del 2004 è stato riscontrato e corretto un *bug* nella *routine* per il calcolo della marea terrestre di tale *software*: l'errore riguarda la componente radiale, in particolare un termine del secondo ordine collegato al segnale semidiurno.

In questo lavoro è stata portata a termine un'analisi sperimentale per valutare l'impatto dell'errore nella correzione di marea del BERNESE sulle soluzioni di reti permanenti GPS a scala regionale. E' stato preso in esame un anno di dati di una rete costituita da 8 stazioni permanenti europee e sono state portate a termine due differenti elaborazioni dei dati, con la versione 4.2 del *software*, utilizzando nei due casi la stessa strategia di analisi e, rispettivamente, una volta la *routine* sbagliata e una volta quella corretta. L'analisi si è focalizzata soprattutto sugli eventuali effetti sulle serie temporali delle quote delle stazioni e delle lunghezze di base.

Abstract

At present, the tidal correction model described in the IERS 2003 Conventions should be applied in the processing of GPS permanent networks: in brief, the model involves the computation of a first order tidal correction plus some corrective terms, as functions of space and time. In the BERNESE software, one of the main scientific softwares for GPS network processing, the IERS tidal model is implemented; in July 2004, an error in the tidal correction routine was identified by one of the paper authors and corrected by the BERNESE staff: the error concerned the radial component, in particular a second order term, related to the semidiurnal tidal signal.

In this paper an experimental analysis on the error effects in the results stemming from processing of regional networks has been carried out. One year of data of a network of 8 European permanent GPS stations has been selected and two different data elaborations have been performed using the BERNESE 4.2 SW, by applying the same processing strategy and, respectively, the wrong and the right tidal correction routine. The analysis has been principally focused on the effects on the time series of station heights and baseline lengths.

Introduzione

E' ben noto che ogni corpo celeste esercita un'attrazione gravitazionale sui punti della Terra; ne deriva un potenziale gravitazionale che, come l'attrazione stessa, è funzione della distanza tra il corpo e il punto e, di conseguenza, varia sia all'interno della Terra che sulla sua superficie.

L'attrazione mareale di un corpo celeste B in un punto P della Terra è definito come la differenza tra l'attrazione gravitazionale che B esercita sul punto e quella che esercita sul centro di massa della Terra (EMC).

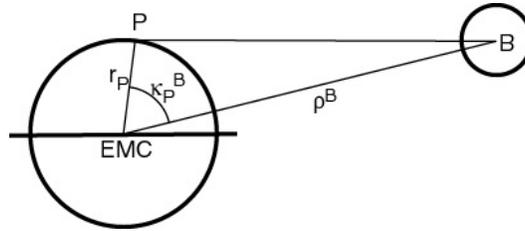


Figura 1 – La geometria del potenziale mareale.

Secondo (Vanicek, 1980), il potenziale derivante (figura 1) è:

$$W_E^B(P) = \frac{GM^B}{\rho^B} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r_p}{\rho^B} \right)^n P_n(\cos \kappa_P^B)$$

dove: G è la costante di gravitazione universale, M^B è la massa del corpo B, ρ^B è la distanza tra il corpo ed EMC, r_p è la distanza tra il punto P ed EMC, κ_P^B è l'angolo al centro tra B e P. In tutte le applicazioni geodetiche e geodinamiche si assumono significative solo le attrazioni mareali esercitate dal Sole e dalla Luna.

Le attrazioni mareali mostrano periodicità tipiche (semidiurna, diurna, mensile ed infinita) e provocano deformazioni periodiche della forma della Terra; l'effetto mareale può raggiungere valori fino ad alcuni decimetri. Ovviamente, nell'analisi delle serie temporali provenienti da osservazioni geodetiche (VLBI, SLR, GPS, ...) finalizzate alla stima di posizioni e deformazioni di lungo termine della superficie terrestre, l'effetto di marea su ogni singola stima di posizione deve essere rimosso; per questo motivo è necessario utilizzare un modello accurato di deformazione mareale nel processamento dei dati geodetici.

La risposta della forma della Terra all'attrazione mareale dipende dai numeri di Love e Shida, che esprimono lo spostamento reale in un punto come il rapporto tra la risposta di una Terra idealmente rigida e quella di una Terra idealmente fluida. Tali numeri, a causa della eterogeneità della Terra, sono funzioni complesse sia della posizione del punto che della frequenza del segnale di marea. Negli ultimi decenni sono stati compiuti grandi sforzi per modellare appropriatamente l'effetto mareale: tra gli altri menzioniamo i lavori di (Wahr, 1982, Mathews et al., 1995). Attualmente la formula suggerita per la modellazione degli effetti di marea sulla superficie terrestre è quella descritta nelle convenzioni IERS 2003 (McCarthy, Petit, 2004). Varie *routine* sono state implementate secondo tali convenzioni: tra queste la *routine* in Fortran di Veronique Dehant è gratuitamente disponibile in rete (<ftp://omaftp.oma.be/dist/astro/dehant/IERS>).

Modellazione della marea terrestre nell'elaborazione di dati GPS

Esaminiamo brevemente l'effetto di marea sulle osservazioni GPS (di codice e di fase) e la maniera di modellarlo. Consideriamo solo il termine di distanza nell'equazione di osservazione GPS, trascurando i ritardi atmosferici, gli errori di orologio, le incognite di ambiguità: per una trattazione completa si veda ad esempio (Teunissen, Kleusberg, 1998). Inoltre, consideriamo già applicate le correzioni per gli offset dei centri di fase delle antenne.

La "distanza" GPS $\rho_R^S(t)$ tra un ricevitore R ed un satellite S ad una data epoca t può essere scritta come

$$\rho_R^S(t) = \|\mathbf{x}^S(t - \tau_R^S) - \mathbf{x}_R(t)\|$$

dove $\mathbf{x}^S(t - \tau_R^S)$ è la posizione del centro di massa del satellite all'epoca di emissione $t - \tau_R^S$, $\mathbf{x}_R(t)$

è la posizione della stazione all'epoca di ricezione t .

Tenendo conto dell'effetto di marea, si può scrivere

$$\mathbf{x}_R(t) = \mathbf{x}_{0,R}(t) + \delta\mathbf{x}_{TR}(\mathbf{x}_{0,R}, t)$$

dove $\mathbf{x}_{0,R}(t)$ è la posizione “*tide free*” della stazione, $\delta\mathbf{x}_{TR}(\mathbf{x}_{0,R}, t)$ è lo spostamento dovuto all'effetto di marea nella stazione all'epoca t .

L'equazione alla distanza può essere linearizzata rispetto all'effetto di marea

$$\rho_R^S(t) = \|\mathbf{x}^S(t - \tau_R^S) - \mathbf{x}_{0,R}(t)\| + \mathbf{e}_R^S(t) \cdot \delta\mathbf{x}_{TR}(\mathbf{x}_{0,R}, t)$$

dove $\mathbf{e}_R^S(t)$ è il vettore unitario diretto dal satellite alla stazione.

Noti dei valori approssimati per la posizione della stazione ($\tilde{\mathbf{x}}_{0,R}$) e dato un modello di marea (ad esempio quello IERS2003), possiamo calcolare la relativa correzione

$$\delta\rho_{TR}^S(t) = \mathbf{e}_R^S(t) \cdot \delta\mathbf{x}_{TR}(\mathbf{x}_{0,R}, t)$$

Successivamente possiamo calcolare la distanza “*tide free*” per sottrazione

$$\rho_{0,R}^S(t) = \rho_R^S(t) - \delta\rho_{TR}^S(t) = \|\mathbf{x}^S(t - \tau_R^S) - \mathbf{x}_{0,R}(t)\|$$

Infine, un insieme di osservazioni “*tide free*” può essere compensato per stimare la posizione “*tide free*” della stazione.

Alcuni *software* di analisi dati GPS, e tra questi il BERNESE, costruiscono differenze, singole e doppie, tra osservazioni di fase. Per calcolare le differenze “*tide free*” singole e doppie, sono possibili due approcci, che forniscono gli stessi risultati finali:

- 1) calcolare le osservazioni “*tide free*” e poi differenziarle
- 2) differenziare le osservazioni e successivamente calcolare e sottrarre le correzioni mareali differenziate.

Va sottolineato che le correzioni mareali differenziate dipendono sia dalla geometria di osservazione (posizioni assolute e relative delle stazioni e dei satelliti) sia dalla differenza tra gli effetti mareali nelle stazioni. In reti locali (basi fino a circa 20 Km), le correzioni mareali differenziate sono sempre trascurabili al livello millimetrico; per basi tra 20 e 100 Km, esse possono raggiungere il centimetro; in reti regionali non sono mai trascurabili.

L'errore di modello della marea nel software BERNESE

Nel *software* BERNESE (Beutler et al., 2000, Hugentobler et al., 2005) la modellazione della marea è implementata secondo le convenzioni IERS (*subroutine* TIDE96 nella versione 4.2, TIDE2000 nella versione 5.0). Nel luglio del 2004 è stato scoperto (Biagi, e-mail personale a Urs Hugentobler, 2004), e corretto (Hugentobler, BSWMail 190, 2004, <http://www.aiub.unibe.ch/download/bswmail/>), un *bug* nella routine di modellazione, riguardante la componente radiale, in particolare un termine del secondo ordine collegato al segnale semidiurno.

Nel seguito vengono esaminati gli effetti di tale errore sulle serie temporali delle stazioni. Come primo esempio, sono state considerate le stazioni GPS permanenti di Matera e Cagliari (distanza 680 km); al fine di investigare le periodicità di lungo termine, è stato esaminato un periodo di 2 anni, dal 1/1/03 al 31/12/04. Per entrambe le stazioni sono state calcolate le correzioni mareali sbagliate e corrette, utilizzando un intervallo di un'ora. Dapprima sono stati calcolati gli effetti sulla singola stazione (errori assoluti) come differenza tra correzione mareale sbagliata e corretta: gli errori mareali assoluti hanno media nulla e mostrano due chiare periodicità, diurna ed annuale.

Nel processamento dei dati il BERNESE costruisce ed utilizza le doppie differenze: quindi solo le differenze di errori mareali influenzano i risultati finali; inoltre, tipicamente i dati GPS di reti permanenti vengono elaborati su base giornaliera al fine di stimare coordinate giornaliere. Perciò dagli errori assoluti sono state calcolate le differenze fra le due stazioni (errori relativi orari); infine, dagli errori relativi orari, sono state ricavate le loro medie quotidiane (errori relativi giornalieri). In figura 2 sono riportati gli errori relativi orari e gli errori relativi giornalieri tra Matera e Cagliari: gli errori relativi orari sono significativi al livello del millimetro; le medie giornaliere non sono nulle in

media e mostrano un chiaro segnale annuale: ciò potrebbe comportare un effetto significativo anche sulle soluzioni GPS giornaliere.

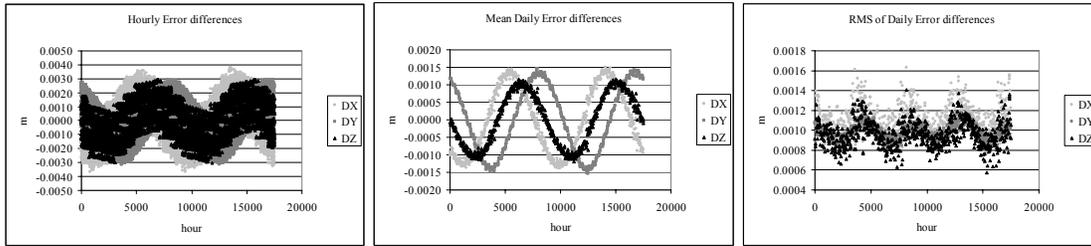


Figura 2 – Errori mareali relativi tra Matera e Cagliari. DX, DY, DZ sono le 3 componenti del vettore dell’errore relativo in coordinate cartesiane ITRF2000. A sinistra: errori relativi orari. Al centro: errori relativi giornalieri. A destra: scarti quadratici medi degli errori relativi giornalieri.

La rete test

E’ stata selezionata una rete GPS permanente (figura 3) di 8 stazioni che garantisca eterogeneità sia nella lunghezza delle basi che nel loro orientamento (tabella 1): MATE (Matera), CAGL (Cagliari), VILL (Villafranca), WTZR (Wetzell), M0SE (Roma), MEDI (Medicina), RSTO (Roseto degli Abruzzi), UNPG (Perugia).

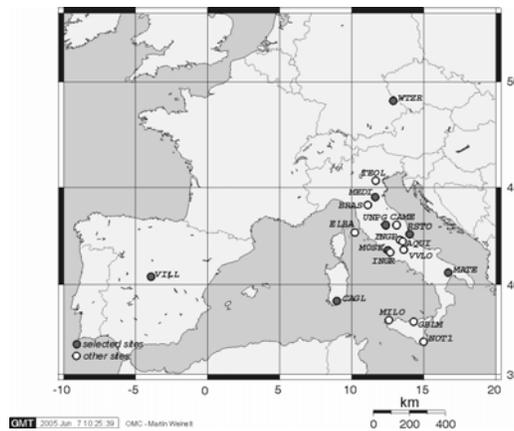


Figura 3 – La rete test.

Abbiamo preso in esame un anno di dati (1/7/03-30/6/04) e processato tali dati due volte con la versione 4.2 del BERNESE (Beutler et al., 2000). In entrambe le elaborazioni è stata adottata la stessa strategia di analisi, sono state utilizzate le effemeridi finali IGS, i parametri di rotazione terrestre forniti dallo IERS, ed è stata vincolata la stazione MATE alle sue coordinate ITRF2000 propagate giornalmente, elaborando quindi tutte le *baseline* a partire da MATE. Nella prima elaborazione dei dati è stato adottato il modello di correzione mareale sbagliato, nella seconda quello corretto e si sono poi analizzate le differenze nei risultati.

Inizialmente focalizziamo l’attenzione sugli effetti sulle stime delle coordinate: le differenze mostrano in questo caso un chiaro segnale annuale, la cui ampiezza è funzione della lunghezza delle basi considerate ed è dell’ordine di 10^{-9} . Gli errori orizzontali sono tipicamente orientati lungo la direzione della base: ciò lascia immaginare un probabile effetto di scala sulle lunghezze di base che sarà analizzato in seguito. Per la maggior parte delle stazioni gli errori orizzontali e verticali sono dello stesso ordine di grandezza, tranne che per WTZR che mostra errori verticali significativamente inferiori.

In figura 4 sono riportate le differenze tra stime di coordinate con marea corretta e sbagliata per alcune stazioni rappresentative di diverse classi di distanza da MATE.

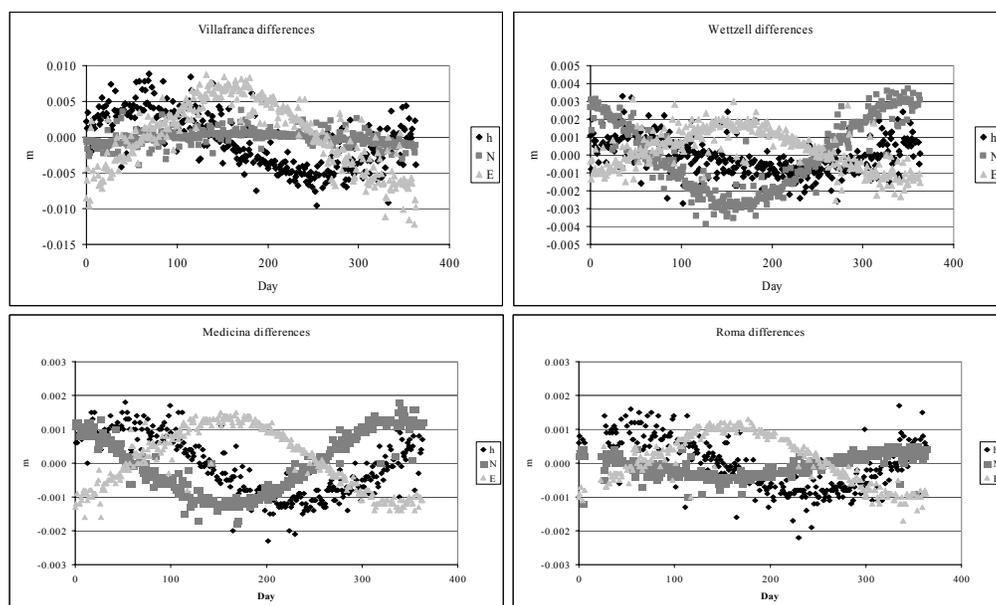


Figura 4 – Alcuni esempi dell'effetto dell'errore mareale sulle stime giornaliere ottenute con il BERNESE: 4 stazioni a distanze diverse dalla stazione di riferimento MATE.

Va sottolineato che gli errori mareali sono trascurabili rispetto alla dispersione delle soluzioni giornaliere: un esempio è dato in figura 5 (sinistra); inoltre il valor medio degli errori su un anno non è significativamente diverso da zero. Tuttavia, a causa della periodicità degli errori mareali, è possibile prevedere che essi abbiano effetti su stime di coordinate e velocità effettuate su periodi inferiori all'anno.

Anche per quanto riguarda le lunghezze di base (figure 5 e 6, tabella 1) le differenze non sono significative rispetto alla dispersione delle stime giornaliere; i trend stimati su base annuale nei due casi (marea corretta e marea sbagliata) non differiscono significativamente (test di Fisher su coefficienti angolari e intercette delle rette al livello di significatività sia del 5 che dell'1%); comunque, gli effetti degli errori mareali sono caratterizzati da un segnale annuale di ampiezza relativa 5×10^{-9} .

Infine, va notato che esiste un ritardo temporale di circa 2.5 mesi tra i segnali di quota e di lunghezza di base.

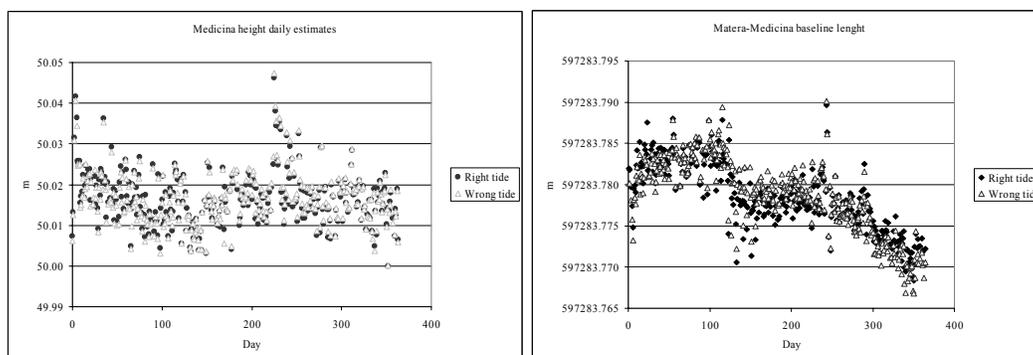


Figura 5 – Stime giornaliere della quota di MEDI e della distanza MATE-MEDI.

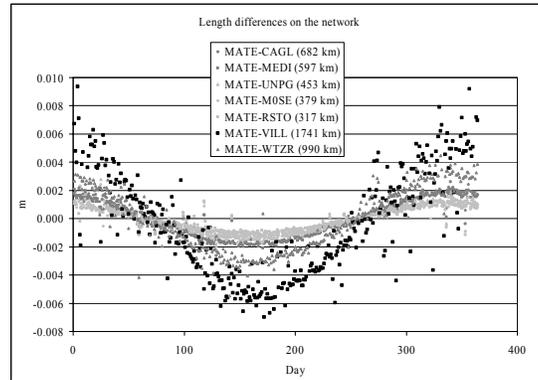


Figura 6 – Differenze tra lunghezze di base stimate con la marea corretta e con quella sbagliata.

| | L (km) | A (°) | Dh (m) | E (mm) | σ (mm) | m (mm) | M (mm) |
|-----------|--------|-------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| MATE-RSTO | 317 | 306 | 433 | -0.1 | 0.7 | -1.8 | 2.4 |
| MATE-MOSE | 379 | 286 | 415 | -0.1 | 0.8 | -2.0 | 2.3 |
| MATE-UNPG | 453 | 300 | 185 | 0.1 | 1.0 | -2.2 | 2.8 |
| MATE-MEDI | 597 | 307 | 486 | 0.0 | 1.3 | -2.6 | 2.6 |
| MATE-CAGL | 682 | 259 | 297 | 0.6 | 1.2 | -2.3 | 3.5 |
| MATE-WTZR | 990 | 336 | 124 | -0.1 | 2.2 | -5.5 | 4.5 |
| MATE-VILL | 1741 | 270 | 112 | -0.4 | 3.8 | -7.0 | 10.5 |

Tabella 1 – Caratteristiche delle basi scelte (L: distanza, A: azimuth della base; Dh: differenza di quota tra le stazioni) ed effetti dell'errore mareale sulle distanze giornaliere stimate con il BERNESE (E: errore medio, σ : deviazione standard degli errori, m: minimo; M: massimo).

Conclusioni

Nel luglio del 2004 è stato scoperto un *bug* nella *routine* per il calcolo dell'effetto mareale del *software* BERNESE. Nelle soluzioni giornaliere di reti permanenti regionali tale *bug* ha introdotto errori sulle stime di quote e lunghezze di base non significativi rispetto alla dispersione delle stime stesse; inoltre gli errori sono nulli in media su un anno. Tuttavia tali errori mostrano un'elevata correlazione temporale; in particolare è presente un effetto con chiara periodicità annuale, sulle stime di quote e lunghezze di base, dell'ordine di 5×10^{-9} .

Bibliografia

- Beutler G., Brockmann E., Dach R., Fridez P., Gurtner W., Hugentobler U., Johnson J., Mervart L., Rothacher M., Schaer S., Springer T., Weber R. (2000), *Bernese Software 4.2*, Astronomical Institute, University of Berne.
- Hugentobler U., Dach R., Fridez P. (2005), *Bernese GPS Software 5.0, Draft*, Astronomical Institute, University of Berne.
- Mathews P. M., Buffett B. A., Shapiro I. I. (1995), Love numbers for a rotating spheroidal Earth: new definitions and numerical values, *Geophysical Research Letters*, 22.
- McCarthy D. D., Petit G. eds. (2004), *IERS Conventions (2003)*. IERS Technical Note No. 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Teunissen P. J. G., Kleusberg A., eds (1998), *GPS for Geodesy*, 2nd edition, Springer Verlag Berlin.
- Vanicek P. (1980), *Tidal Corrections to Geodetic Quantities*, NOAA Technical Report, NOS 83 NGS 14, US Department of Commerce, Rockville, Maryland.
- Wahr J. M. (1982), Computing tides, mutations and tidally induced variations in the Earth rotation rate for a rotating, elliptical Earth, in *Geodesy and Global Geodynamics*, Moritz H, Sunkel H. eds, *Mittlungen der geodatischen Institute der Technischen Universität, Folge 41*, Graz.