

Una nuova *Mapping Function* da dati GPS di radio occultazione per la stima dei ritardi troposferici delle reti GNSS di terra

C. Benedetto (1), F. Vespe (1), P. Sacco (2), M. Amoroso (2)

(1) Agenzia Spaziale Italiana - Centro di Geodesia Spaziale, Matera (Italy), francesco.vespe@asi.it

(2) Consorzio INNOVA, Matera (Italy), sacco@consorzio-innova.it

Riassunto

Le coordinate delle stazioni del *Global Navigation Satellite System* (di seguito GNSS) vengono stimate assieme al ritardo del segnale proveniente dal satellite, causato dalla presenza dell'atmosfera. Il ritardo troposferico (riferito anche come *Tropospheric Delay* e di seguito indicato TD) è espresso mediante il prodotto tra il ritardo che subirebbe il segnale se provenisse dallo zenith (lo *Zenith Total Delay*, di seguito indicato ZTD) e il numero di masse d'aria che il segnale attraversa prima di raggiungere il ricevitore. Quest'ultima quantità, la cosiddetta *Mapping Function* (MF), viene di solito espressa come una funzione del seno dell'angolo di elevazione. Nella catena di processamento dei dati GNSS, lo ZTD è stimato assieme alle coordinate, mentre un modello della MF è costruito separatamente, in maniera del tutto indipendente, utilizzando o profili atmosferici derivanti mediante osservazioni da pallone sonda (indicati di seguito come osservazioni RAOB) oppure da modelli climatici o di previsione meteorologica (modelli di *Numerical Weather Prediction*, indicati come NWP). Con il presente lavoro, si intende ricostruire una MF utilizzando profili atmosferici ottenuti utilizzando la tecnica di Radio Occultazione GNSS (RO-GNSS). Ad oggi, infatti, un gran numero di missioni dedicate alla RO-GNSS (e.g. COSMIC-FORMOSAT, METOP, CHAMP, GRACE e gli esperimenti italiani su OCEANSAT_2 e AQUARIOUS-SAC-D) stanno fornendo una gran mole di dati, che rendono allettante il tentativo di ricostruire una nuova MF. I risultati e l'attività di validazione della nuova "Matera" MF (di seguito MTMF) sono mostrati nel presente articolo ed ampiamente discussi.

Abstract

The coordinates of a static Global Navigation Satellite System (hereafter GNSS) station placed on the ground are estimated together with the delay suffered by the incoming satellite signals through the atmosphere. The tropospheric delay (hereafter TD) is formulated as the product of the zenith delay (hereafter ZTD) with the number of air masses crossed by the signal, expressed as a function of the sine of elevation angles, the so called mapping function (hereafter MF). In processing chain, indeed, the ZTD is estimated together with the coordinates; while the MF is modelled apart, in an independent way, by using atmospheric profiles retrieved with balloon observations (hereafter RAOB) or provided by climate or Numerical Weather Prediction (NWP) models. With the present work we plan to reconstruct the MF by using atmospheric profiles given by GNSS radio occultation observations (GNSS-RO).

Indeed, the several space missions devoted to GNSS-RO (e.g. COSMIC-FORMOSAT, METOP, CHAMP, GRACE and next Italian experiments on OCEANSAT_2 and AQUARIOUS-SAC-D) are providing a huge amount of data which makes worthwhile to be attempted the reconstruction of a

new mapping function based on such kind of data. The results and validation activities of the new "Matera" MF (hereafter MTMF) are shown and deeply discussed.

1. Introduzione

E' ben noto il contributo del *Global Navigation Satellite System* (GNSS) nel campo della ricerca atmosferica, sia per quanto concerne la climatologia sia per le previsioni meteorologiche. La capacità del sistema GNSS di fornire coordinate di un punto con livello di accuratezza dell'ordine di pochi millimetri ha reso il sistema un potente strumento per l'analisi scientifica nel campo della Geodesia, Geofisica, Fisica dell'Atmosfera, etc.. Queste applicazioni sono oggi possibili in quanto i modelli ed i metodi di stima degli errori sul segnale causati dalla presenza dell'atmosfera sono stati di molto raffinati. A causa del comportamento non-dispersivo della troposfera per un segnale GNSS, le soluzioni rivolte alla determinazione di osservazioni prive di errori troposferici e ionosferici sono ritenute particolarmente interessanti.

Il segnale GNSS arriva al ricevitore da una direzione che forma un angolo arbitrario con la direzione dello zenith. Così, la maniera più immediata di creare un modello del ritardo troposferico (TD) è di esprimere questa quantità come il prodotto tra lo *Zenith Total Delay* (ZTD) ed una *Mapping Function* (MF). Una MF, espressa come una funzione dell'angolo di elevazione E (vedi Fig.1), è essenzialmente un fattore di obliquità, che fornisce il numero di masse d'aria incontrate dal segnale che attraversa l'atmosfera. Se si assume che gli strati dell'atmosfera siano piatti, MF=1 nella direzione dello zenith, mentre MF=1/sin(E) per le altre direzioni. Tuttavia, l'assunzione di un'atmosfera-piatta non è reale e pertanto da Marini & Murray (Marini et al., 1972; Marini et al., 1973) fu proposto per la MF una funzione annidata del tipo:

$$m(E) = \frac{1}{\sin(E) + \frac{a}{\sin(E) + \frac{b}{\sin(E) + \frac{c}{\sin(E) + \dots}}}} \quad [1]$$

In passato, i coefficienti presenti nell'Eq.1 sono stati stimati utilizzando dati indipendenti quali, ad esempio, i dati RAOB ottenuti utilizzando i palloni sonda (le cosiddette *RAdiosondes OBservations*). In relazione al modello considerato, i coefficienti di una MF possono essere funzione sia di alcuni parametri atmosferici, come pressione e temperatura, sia di latitudine, longitudine, giorno dell'anno (*Day Of the Year*, di seguito DOY), topografia e/o altezza troposferica, etc. Negli ultimi tre decenni il calcolo di MF sempre più raffinate (Davis et al., 1985; Ifadis, 2003; Herring, 1992; Niell, 1996; Lanyi, 1984) ha portato a significativi miglioramenti nell'accuratezza dei risultati geodetici.

Attualmente, si è proposto di utilizzare direttamente i valori di pressione, temperatura ed umidità ottenuti utilizzando i modelli climatologici e/o meteorologici NWP (Boehm et al., 2006; Boehm et al., 2008). In ogni modo, la *Mapping Function* di Niell (di seguito NMF), funzione dei parametri altezza, latitudine e DOY, tra tutte le MF derivate da quella di Marini-Murray, si è dimostrata la più accurata. L'ultima generazione di MF, come la *Global Mapping Function* (GMF) e la *Vienna Mapping Function* (VMF) (Boehm et al., 2006; Boehm et al., 2008), basate su modelli climatologici e meteorologici NWP, lavorano su modelli alla stessa maniera della NMF.

L'obiettivo del presente lavoro è di ri-stimare i coefficienti della NMF (Niell, 1996) utilizzando la gran mole di dati proveniente dalle missioni di RO-GNSS e non più i dati RAOB e/o i profili ottenuti utilizzando i modelli. In particolare, sono stati da noi utilizzati più di 150,000 eventi di RO-

GNSS a partire dall'anno 2000, utilizzando dati da SAC-C (Alonso et al., 2000), CHAMP (Wickert et al., 2001) e COSMIC (Anthes et al., 2008). In realtà, più del 90% dei dati proviene dalla missione spaziale COSMIC, con cui è possibile ottenere circa 2000 eventi di RO al giorno. A breve, i nuovi dati ottenuti con il ricevitore GRAS GNSS-RO a bordo dei satelliti METOP/ESA ed il ricevitore italiano ROSA a bordo del satellite indiano OCEANSAT_2 si aggiungeranno a questi.

Nel presente lavoro, nel paragrafo 2 è descritto il metodo utilizzato per stimare i coefficienti della nuova MF. Nel terzo paragrafo, allo scopo di stimare lo ZTD, sono mostrati i risultati ottenuti applicando la nuova MF ad una piccola rete europea di ricevitori GPS. Infine, vengono discussi i risultati ottenuti e sono tratte alcune conclusioni.

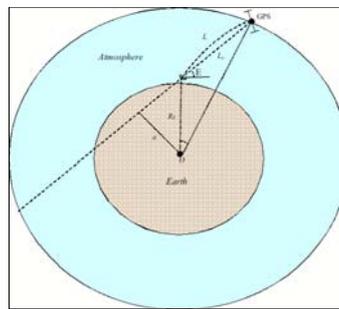


Figura 1. Illustrazione schematica della geometria di ray tracing.

2. Il calcolo della MTMF

Come è possibile dedurre da Fig.1, che mostra la geometria utilizzata per stimare la MTMF, il ritardo troposferico è dato da:

$$TD = L - L_0, \quad [2]$$

dove L è il percorso reale seguito dal segnale, la cui traiettoria è modificata dalla presenza dell'atmosfera e L_0 è il percorso geometrico che il segnale seguirebbe in assenza di questa. Per la stima di L è possibile applicare la formula di *ray-tracing*

$$L = \int_{R_E+h}^{R_{atm}} \frac{n^2(r) \cdot r}{\sqrt{n^2(r) \cdot r^2 - a^2}} dr, \quad [3]$$

dove R_E è il raggio della Terra, a è il parametro d'impatto e R_{atm} è il raggio dello strato di atmosfera attraversato dal segnale e misurato dal livello superiore del profilo acquisito mediante RO-GNSS.

In tale geometria, L_0 e l'angolo di elevazione E sono dati da

$$L_0 = \int_{R_E+h}^{R_{atm}} \frac{dr}{\sin(\epsilon)} = \frac{h}{\sin(\epsilon)} \Rightarrow E = \arcsin\left(\frac{h}{L_0}\right) = \arcsin\left(\frac{h}{\sqrt{(R_E+h)^2 + R_{atm}^2 - 2 \cdot R_{atm} \cdot (R_E+h) \cos(\Phi)}}\right), \quad [4]$$

dove l'angolo di elevazione è determinato applicando il teorema di Carnot al triangolo i cui vertici sono individuati dal satellite GPS, dal ricevitore GPS e dal centro della Terra (vedi Fig.1). L'angolo Φ , tra l'antenna del ricevitore e l'antenna del satellite GPS trasmettitore, è stimato utilizzando la tecnica di *ray-tracing*.

$$\Phi = a \int_{R_E}^{R_{atm}} \frac{1}{r \sqrt{n^2(r) \cdot r^2 - a^2}} dr. \quad [5]$$

Posto che [X] sta per "W" nel caso di componente Wet o umida del ritardo e "D" nel caso di componente Dry o secca dello stesso, è pertanto possibile applicare la seguente relazione:

$$MF_{[X]}(E) = \frac{L_{[X]} - L_0}{Z[X]D}, \quad \text{dove} \quad Z[X]D = 10^{-6} \int_{R_E+h}^{R_{\text{max}}} N_{[X]}(r) dr. \quad [6]$$

In analogia alla NMF (Niell, 1996), le variabili coinvolte nella Eq.6 sono: latitudine, altezza e DOY. Tuttavia, nella nostra formulazione è stata aggiunta la longitudine.

Utilizzando come osservabili i dati GNSS-RO, i parametri da noi determinati mediante fit ai minimi quadrati sono stati i coefficienti della MF di Marini-Murray troncata al terzo ordine (vedi Eqs.7).

$$MF_d(E) = \frac{1 + \frac{a_d}{1 + \frac{b_d}{1 + c_d}}}{\sin(E) + \frac{a_d}{\sin(E) + \frac{b_d}{\sin(E) + c_d}}} + \left(\frac{1}{\sin(E)} - \frac{1 + \frac{a_b}{1 + \frac{b_b}{1 + c_b}}}{\sin(E) + \frac{a_b}{\sin(E) + \frac{b_b}{\sin(E) + c_b}}} \right) \cdot h; \quad MF_u(E) = \frac{1 + \frac{a_u}{1 + \frac{b_u}{1 + c_u}}}{\sin(E) + \frac{a_u}{\sin(E) + \frac{b_u}{\sin(E) + c_u}}}. \quad [7]$$

In particolare, sono stati stimati: i coefficienti nel caso di componente secca, i coefficienti nel caso di componente umida, i coefficienti di Niell per l'altezza. I dati disponibili, distribuiti sull'intero globo terrestre, sono stati da noi organizzati come mostrato in Tab.1

| | |
|---|---|
| Latitude Gridding | 15° (12 gruppi) |
| Longitude Gridding | 30° (12 gruppi) |
| Nr di epoche considerate in un anno | 8 (45 giorni) |
| Nr di occultazioni/cella | ~150 |
| Strati considerati allo scopo di stimare i parametri dry come nell'Eq.7 | Fino a 2000 m con step di 400 m partendo dal livello del mare. ~50 differenti valori dell'angolo E sono stati selezionati per il fitting |

Tabella 1. Griglia globale considerata allo scopo di raggruppare i profili di RO-GNSS.

In accordo con quanto riportato in Tab.1, sono stati determinati i coefficienti della MTMF di 144 celle in 8 epoche dell'anno. Si sottolinea che nella MTMF è stata introdotta una relazione con la longitudine ed è questa la principale differenza tra la MTMF e la NMF. La Fig.2 riporta un confronto tra dry MTMF e la dry NMF.

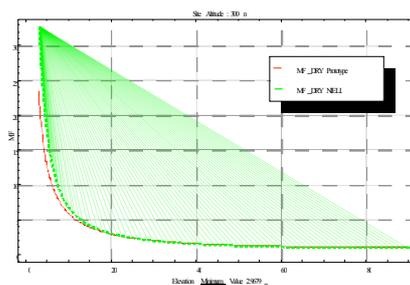


Figura 2. Un confronto tra la dry MTMF (linea rossa) e la dry MF di Niell (tratteggio in verde)

Il principale svantaggio nell'utilizzo dei dati GNSS-RO è che la maggior parte dei profili non raggiunge la superficie. Allo scopo di superare tale inconveniente, è stato effettuato un merge con i dati NCEP. Ad esempio, per quanto riguarda il profilo di rifrattività, il merge è stato eseguito applicando l'Eq.8:

$$N(h) = k(h) \cdot N(h)_{RO} + (1 - k(h)) \cdot N(h)_{NCEP} \quad [8]$$

dove h è l'altezza e $k=1$ fino al valore più basso in quota del profilo di RO-GNSS, $k=0$ per le quote inferiori a questo e vicine al suolo.

I coefficienti della MTMF per ognuna delle celle della griglia sono attualmente disponibili.

3. I risultati

Dopo aver stimato i valori dei parametri della MTMF utilizzando dati di RO-GNSS, per ognuna delle celle e delle 8 epoche considerate è stato eseguito un test operativo selezionando una rete di 8 stazioni GPS come mostrato in Fig.4.

Utilizzando poi il software BERNESE, gli ZTD delle 8 stazioni sono stati determinati assieme alle loro coordinate.

L'analisi è stata eseguita per due differenti settimane GPS: nr. 1167 – 139-145 DOY, nr. 1219 - 138-144 DOY. In Fig.5 sono riassunti i risultati ottenuti per una settimana.

I risultati mostrano che l'applicazione della nuova *mapping function* MTMF migliora il livello di precisione della soluzione di oltre il 20%.



Figura 4. La rete di stazioni GPS selezionata allo scopo di eseguire il test operativo della MTMF.

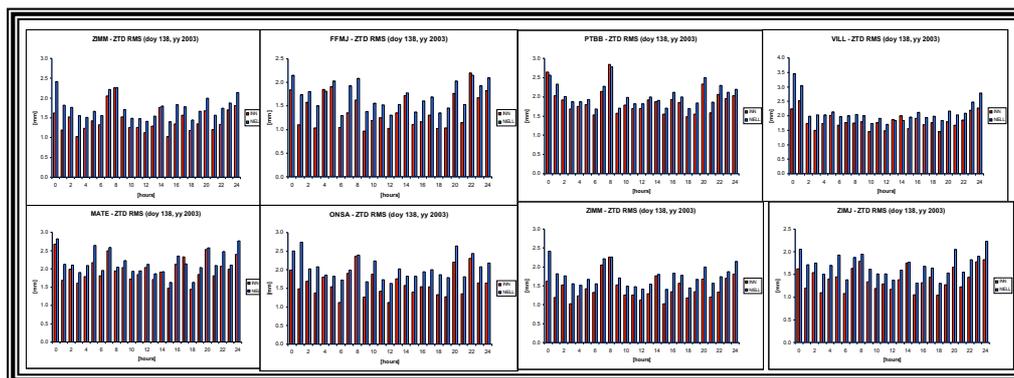


Figura 5. Le incertezze nella stima del ZTD per un giorno di ognuna delle 8 stazioni della rete selezionata. Le barre blu sono relative alle soluzioni ottenute con la MF di Niell, quelle rosse alle soluzioni ottenute con la MTMF (indicate come INN nella legenda).

4. Conclusioni

Con il presente lavoro ci si è proposto di utilizzare la gran mole di dati di RO-GNSS, attualmente disponibili, per costruire una nuova *mapping function*, la MTMF, utilizzando lo stesso approccio seguito da Niell per la determinazione della NMF (Niell, 1996). È fondamentale sottolineare che la distribuzione dei dati di RO-GNSS sulla Terra è globale ed uniforme anche sulle aree dove non è possibile ottenere profili RAOB, come sugli oceani e nell'emisfero sud. Tale vantaggio, assieme alla robusta statistica derivante dal gran numero di dati di RO-GNSS, rendono particolarmente promettente l'utilizzo della MTMF.

I coefficienti della MTMF sono stati stimati per una griglia di 144 celle e per 8 differenti epoche dell'anno. La MTMF è stata applicata ad una piccola rete europea di 8 stazioni. Le soluzioni degli ZTD per due settimane sono state determinate sia utilizzando la NMF sia la MTMF. Dai risultati si è dedotto che le soluzioni ottenute con la MTMF migliorano la stima dello ZTD di oltre il 20%.

Come passo successivo del nostro lavoro ci si è proposti di analizzare i coefficienti della MTMF, in termini di armoniche sferiche (Spherical Harmonics o SH), come già proposto in (Boeh et al., 2006)

$$a(\varphi, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{n=2} \sum_{m=0}^n P_{nm} \sin(\varphi) \cdot (C(t)_{nm} \cos(\lambda) + S(t)_{nm} \sin(\lambda)), \quad b(\varphi, \lambda, t) = \dots; \quad c(\varphi, \lambda, t) = \dots \quad [9]$$

Sono state eseguite delle verifiche allo scopo di valutare il miglior grado di SH che consenta di eseguire il fit di tutti i coefficienti della MTMF. Da Fig.6 è evidente che il 5°, che si presenta come un punto di inversione, risulta essere il migliore.

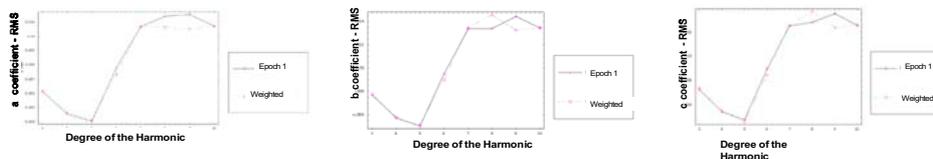


Figura 6. Test eseguito sul grado della SH per eseguire il migliore fit dei coefficienti della MTMF.

A questo seguirà un'ampia fase di validazione della nuova MTMF, confrontandone i risultati con quelli ottenuti applicando la Global MF (Boehm et al., 2006) e la Vienna MF (Boehm et al., 2008).

5. Bibliografia

- Alonso C., Hoffmann C. (2000), SAC-C mission, <http://www.conae.gov.ar/satellites/sac-c/SAC CPUBLI200208.pdf>
- Anthes R. A., Bernhardt P. A., Chen Y., Cucurull L., Dymond K. F., Ector D., Healy S. B., Ho S.P., Hunt D. C., Kuo Y.H., Liu H., Manning K., McCormick C., Meehan T. K., Randel W. J., Rocken C., Schreiner W. S., Sokolovskiy S. V., Syndergaard S., Thompson D.C., Trenberth K. E., Wee T.K., Yen N. L., Zeng Z. (2008), The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 89, Issue 3, March.
- Boehm J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh (2006), "Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 33, No. 7, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Boehm J., Kouba J., Schuh H. (2008), "Forecast Vienna Mapping Functions for real-time analysis of space geodetic observations", *Journal of Geodesy*, Springer berlin/Heidelberg.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, Rogers A. E. E, Elgered G. (1985), "Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modelling errors on estimates of baseline length", *Radio Sci.*, 20, 1593-1607.

- Herring, T. A. (1992), "Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data", In Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Netherlands Geod. Commis. Ser. 36, edited by J. C. DeMunk and T. A. Spoelstra, pp. 157-164, Ned. Comm. voor Geod., Delft.
- Ifadis, I. (2003), "The atmospheric delay of radio waves: Modeling the elevation dependence on a global scale", *Tech. Rep. 38L. Sch. Of Electrical and Comput. Eng.*, Chalmers Univ. of Techn., Gothenburg, Sweden.
- Lanyi, G. (1984), "Tropospheric delay effects in radio interferometry" *TDA Prog. Rep. 42-78, vol. April-June 1984*, pp.152-159, JPL Pasadena (CA).
- Marini, J. W. (1972), "Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile", *Radio Sci.*, 7, 223-231.
- Marini, J. W., and Murray C. W.(1973), "Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees", NASA Tech. Memo., NASA-TM-X-70555, 60 pp.
- Niell, A. E. (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, 100, 3227-3246.
- Wickert J., Reigber C., Beyerle G., König R., Marquardt C., Schmidt T., Grunwaldt L., Galas R., Meehan T. K., Melbourne W. G., Hocke K. (2001), "Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP", *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3263-3266.

