

INVERSIONE DI MISURE GPS EFFETTUATE DA TERRA PER IL RETRIEVAL DEL PROFILO DI INDICE DI RIFRAZIONE ATMOSFERICO

R. Notarpietro, M. Zambotto, M. Gabella, G. Perona

Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino
Tel.: 011-5644623 Fax: 011-5647959 e-mail: rnp@polito.it

Abstract

A theoretical technique for the characterization of atmospheric profiles is presented. The adoption of a Newton-based optimisation procedure has allowed us to invert the simulations of GPS signal times-of-flight, centre-angles and arrival-angles received at low elevation angles from a ground-based receiver, in order to retrieve the atmospheric refraction index profile. As far as the effective measurements of the arrival-angle are concerned, an interferometric technique, based on phase measurements performed by two GPS receivers, is proposed. The retrieved profiles are in good agreement (in terms of relative errors) with the reference ones.

INTRODUZIONE

La possibilità di caratterizzare il profilo dell'indice di rifrazione atmosferico attraverso misure di fase del segnale GPS venne verificata fin dal 1995, quando ebbe inizio l'esperimento GPS-MET [Melbourne et al., 1994]. Con questo esperimento venne infatti dimostrata l'efficacia di una metodologia di inversione analitica (inversione di Abel) applicata indirettamente alle misure di eccesso di fase ottenibili da un ricevitore posto a bordo di un satellite in orbita bassa (LEO), in condizioni di radio occultamento rispetto al trasmettitore.

La stessa tecnica non è però utilizzabile per invertire le misure condotte sul segnale GPS ricevuto a terra. Considerando infatti la geometria riportata nella fig. 1, è facile vedere come non sia possibile applicare l'inversione di Abel al problema in esame [Notarpietro et al., 2002]. Per poter caratterizzare il profilo dell'indice di rifrazione in queste condizioni, è quindi necessario utilizzare un approccio completamente differente (simile a quello adottato da Ruggiero and Caputo [1998]), basato sulla minimizzazione di una particolare funzione di costo mediante un algoritmo di ottimizzazione. La tecnica proposta è stata verificata sulla base di dati simulati: gli osservabili GPS necessari per l'algoritmo proposto sono stati simulati per uno specifico profilo di indice di rifrazione, che l'algoritmo di ottimizzazione cerca di ricavare partendo da un profilo differente.

OSSERVABILI GPS E METODOLOGIA DI INVERSIONE

Nell'ipotesi di atmosfera distribuita a simmetria sferica, per ogni traiettoria seguita dal segnale è possibile formulare la dipendenza integrale del tempo di volo del segnale T o dell'angolo al centro Θ sotto cui è vista la traiettoria (vedi fig. 1) dal profilo di indice di rifrazione $n(r)$ e dall'angolo di arrivo reale del segnale ϑ_{real} :

$$T(n(r), \vartheta_{\text{real}}) = \frac{1}{c} \int_{R_t}^{R_t + h_G} \frac{n(r)}{\sqrt{1 - \left(\frac{n(R_t) R_t \sin \vartheta_{\text{real}}}{n(r) r} \right)^2}} dr; \quad \Theta(n(r), \vartheta_{\text{real}}) = \int_{R_t}^{R_t + h_G} \frac{1}{r \sqrt{\left(\frac{n(r) r}{n(R_t) R_t \sin \vartheta_{\text{real}}} \right)^2 - 1}} dr \quad (1)$$

vanno poste le antenne deve essere quella distanza per la quale la differenza $\delta\Delta\Phi$ tra le differenze di fase valutate per l'angolo di arrivo reale ($\Delta\Phi_{\text{real}}$) e per un ipotetico segnale proveniente da un angolo pari a ϑ_{geom} ($\Delta\Phi_{\text{geom}}$) sia una quantità misurabile e inferiore a 2π (in modo da evitare ambiguità). Nella fig. 2 è riportato un esempio dei valori assunti dalla $\delta\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\text{geom}} - \Delta\Phi_{\text{real}}$ in funzione dell'angolo ϑ_{geom} e per vari valori di L , nel caso in cui l'atmosfera sia rappresentata dal modello di luglio delle *Air Force Reference Atmospheres* [Jursa, 1985], valido per le medie latitudini.

RISULTATI

Supponendo di considerare come atmosfera di riferimento il modello di luglio delle *Air Force Reference Atmospheres* valido per le medie latitudini in assenza di vapor d'acqua, abbiamo simulato gli osservabili GPS per valori dell'angolo di arrivo ϑ_{real} compresi tra $\approx 90^\circ$ e 53° oppure 39° , in modo da poter disporre di 37 o di 51 coppie di tempi di volo e angoli al centro. Utilizzando come *first guess profile* \mathbf{n}_0 il profilo di indice di rifrazione definito dalla *U.S. Standard Atmosphere, 1976* [NOAA et al., 1976] (valido globalmente), i corrispondenti profili \mathbf{n}_{retr} ottenuti in seguito all'applicazione della procedura di inversione descritta sono in buon accordo con quello utilizzato per simulare gli osservabili. Per entrambi i casi, nella fig. 3 è riportato il profilo dell'errore relativo in termini di rifrattività, che si mantiene sempre inferiore a $\pm 0.5\%$ (± 1 unità di rifrattività) entro i primi 10 km di quota, ad eccezione di alcuni valori di rifrattività che caratterizzano i primi strati atmosferici, ricavati con un errore che comunque rimane inferiore a $\pm 1.5\%$ (± 3.5 unità di rifrattività).

Utilizzando invece il modello di gennaio delle *Air Force Reference Atmospheres* per simulare gli osservabili (40 coppie), i risultati denotano un retrieval meno efficace nel caso in cui si consideri lo stesso *first guess* del caso precedente (fig. 4). Considerando invece un profilo di partenza più simile nei primi strati a quello che si vuole ricavare (quello utilizzato è il modello esponenziale descritto da Kirchengast [1999]), si ottiene un accordo migliore (fig. 5). Questo conferma una problematica ben nota nell'ambito dei problemi inversi relativi al *sounding* atmosferico: la criticità del profilo di *first-guess*.

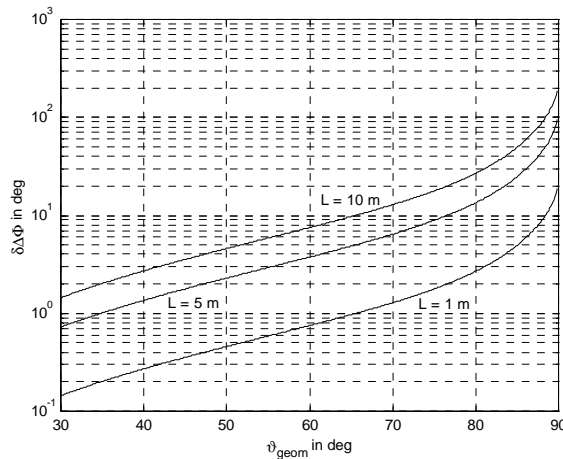


Fig. 2 – Valori assunti dalla differenza delle differenze di fase $\delta\Delta\Phi$ in funzione dell'angolo ϑ_{geom} e della distanza tra le due antenne L , simulati per l'atmosfera di luglio.

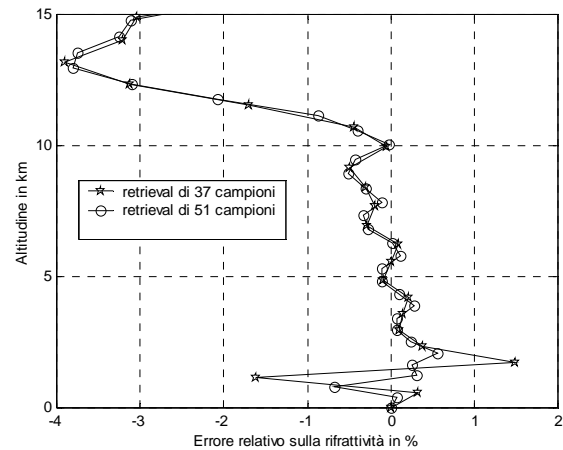


Fig. 3 – Profilo dell'errore relativo in termini di rifrattività, ottenuto nel retrieval dell'atmosfera di luglio (partendo dalla *U.S. Standard Atmosphere*).

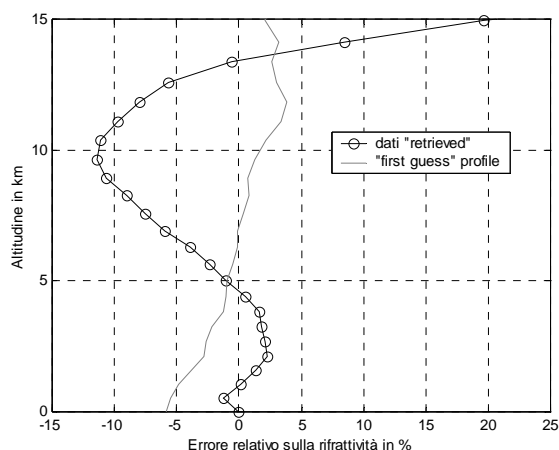


Fig. 4 – Profilo dell'errore relativo in termini di rifrattività, ottenuto nel retrieval dell'atmosfera di gennaio (partendo dalla *U.S. Standard Atmosphere*)

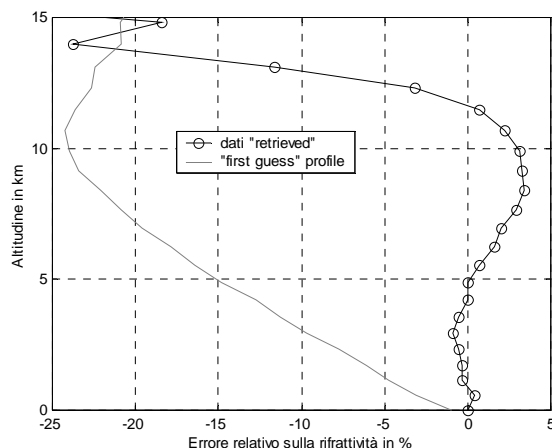


Fig. 5 – Profilo dell'errore relativo in termini di rifrattività, ottenuto nel retrieval dell'atmosfera di gennaio (partendo da un modello atmosferico esponenziale)

CONCLUSIONI

In questo articolo sono stati presentati i primi risultati dell'applicazione di una tecnica per il retrieval dei profili di indice di rifrazione atmosferico, basata sull'inversione di misure GPS effettuate da terra. Sebbene la metodologia proposta sia stata verificata solo su dati simulati, i risultati ottenuti sembrano promettenti, specialmente per quel che riguarda la caratterizzazione dei primi strati atmosferici. In futuro verrà necessariamente svolta un'analisi di sensibilità per valutarne le prestazioni, seguita da una campagna di misure atta a verificarne l'applicabilità in condizioni reali.

BIBLIOGRAFIA

- Dennis J. E. and Schnabel R. B., *Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, 1983.
- Gill P. E., Murray W. and Wright M. H., *Practical Optimization*, Academic Press, London, 1981.
- Jursa A. S., *Handbook of geophysical and the space environment*, Air Force Geophysical Laboratory, U. S. Air Force, 1985.
- Kirchengast G., A simple analytical atmospheric model for radio occultation applications, *ESA/ESTEC Tech. Rep.*, No. 9/1999, 1999.
- Melbourne W. G. et al., The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring, *JPL publication*, 94-18, 1994.
- NOAA - NASA - U. S. Air Force, *U. S. Standard Atmosphere*, 1976, Washington D.C., 1976.
- Notarpietro R., Gabella M. and Perona G., Inversion of ground-based GPS measurements for the remote sensing of atmosphere, *paper presented at the COST 716 Workshop: exploitation of ground-based GPS for meteorology*. Potsdam, Germany, 2002.
- Ruggiero V. and Caputo M., Atmospheric models from GPS data, *Il nuovo Cimento*, 21, 177-187, 1998.