

# Determinazione della struttura del coefficiente di attenuazione (2D) mediante osservazioni radiometriche multiple alla frequenza 23.8 GHz

A.V. Bosisio<sup>1</sup>, G. Druifuca<sup>2</sup>, D. Rovetta<sup>2</sup>, M. Tuniz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CNR/CSTS – c/o Politecnico di Milano – Dip. di Elettronica e Informazione.  
P.zza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano  
boisio@elet.polimi.it

<sup>2</sup> Politecnico di Milano – Dip. di Elettronica e Informazione  
P.zza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano

**Abstract** - This pilot work describes the retrieval of the absorption coefficient of the atmosphere through a tomographic acquisition of brightness temperatures at 23.8 GHz. A radiometer in tipping curve mode supplies a set of measurements at 12 elevation angles between 23 and 90°. Each scan has been processed to retrieve the 2D structure of the underlying atmosphere through the (x-z) values of the specific absorption coefficient. The forward model linking the atmosphere to the brightness measurements is inverted after binning in space and linearization around a reference model. The scanned vertical plan is modeled by allocating  $M$  bins spanning in both the vertical and the horizontal direction. As actual sky conditions are such that often the reference model differs significantly from the standard atmosphere, simulated annealing is used to update the reference model. The procedure and the performances of the tomographic inversion are illustrated through an example.

## 1. INTRODUZIONE

Tradizionalmente le indagini radiometriche vengono svolte con puntamento fisso al fine di restituire il contenuto colonnare di vapore d'acqua e di liquido lungo la tratta di osservazione [1,2]. L'obiettivo di questo lavoro è mostrare come, utilizzando una tecnica tomografica, è possibile ottenere, tramite misure realizzate con un radiometro a singola frequenza, un'immagine bidimensionale del coefficiente di assorbimento specifico, e quindi dello stato dell'atmosfera. Per realizzare ciò il radiometro viene utilizzato in modalità *scanning* (§2).

Il legame diretto tra lo stato dell'atmosfera e la temperatura di brillantezza osservata al suolo è espresso dall'equazione del trasporto radiativo:

$$T_B(r) = T_C e^{-t(0,r)} + \int_0^r k_a(r') T(r') e^{-t(r',r)} dr' \quad (1)$$

in cui la temperatura di brillantezza  $T_B$  dipende sia dal profilo della temperatura atmosferica  $T(r')$  che da quello del coefficiente d'assorbimento  $k_a(r')$ .  $T_C$  è il contributo di rumore del fondo cosmico. Le acquisizioni si riferiscono al piano verticale individuato dalla porzione di cielo osservata dal radiometro. La regione osservata è stata limitata a 9 km in quota e a 20 km in distanza e ricoperta da  $M$  celle rettangolari (Figura 1). Per ogni angolo di osservazione il contributo alla temperatura di brillantezza di ogni singola cella viene calcolato assumendo che le caratteristiche dell'atmosfera siano costanti nella cella stessa. Discretizzando la (1) si ottiene:

$$T_{Bi} = T_C \cdot e^{-\sum_{j=1}^M k_j \Delta r_{ij}} + \sum_{j=1}^M k_j T_j \cdot e^{-t_{ij}} \cdot \Delta r_{ij} \quad (2)$$

dove  $t_{ij} = \sum_{l=1}^{j-1} k_l \Delta r_{il}$ ;  $T_j$  e  $k_j$  sono rispettivamente la temperatura fisica [°C] e il coefficiente di attenuazione [Np/km] all'interno della cella  $j$ -esima;  $\Delta r_{ij}$  [km] è la lunghezza del raggio ad elevazione  $i$ -esima nella cella  $j$ -esima;  $\delta_{ij}$  è lo spessore ottico relativo alla cella  $j$ -esima e al raggio  $i$ -esimo.  $M$  è il

numero totale di celle; in questo esperimento  $M=39$ .

L'equazione (2), linearizzata intorno a un modello di riferimento dell'atmosfera [3], e perturbando i valori di  $k_i$  rispetto al riferimento diviene, in forma matriciale:

$$\ddot{A}T_B = T_B - T_{Bref} = G \cdot (K - K_{ref}) = G \cdot \ddot{A}K \quad (3)$$

dove  $G$  è la matrice jacobiana. I suoi elementi rappresentano il contributo delle singole celle ai singoli angoli di puntamento. L'analisi ai valori singolari (SVD) [4] mostra che solo 5 macrocelle possono essere risolte a partire dal profilo angolare dei dati di partenza (figura 1). L'autostruttura fornisce inoltre indicazioni su come delimitare le macrocelle.

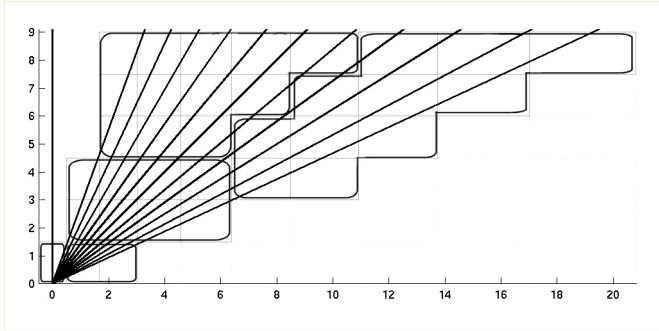


Figura 1 – I raggi rappresentano le direzioni di puntamento del radiometro. Le 39 celle elementari sono tratteggiate; le linee continue rappresentano le 5 macrocelle.

Disponendo di un radiometro dedicato le misure disponibili passerebbero da 12 a 35 e analogamente aumenterebbe il numero delle celle risolubili insieme all'interesse per questa nuova tecnica di *remote sensing*.

## 2. DESCRIZIONE DELL'ESPERIMENTO

Le misure di temperatura di brillanza sono state acquisite dal radiometro RESCOM sito presso la stazione di Spino d'Adda (a 30 km a SE di Milano) alla frequenza di 23.8 GHz.

Tale apparato è operativo a puntamento fisso e, trattandosi di un progetto pilota, non abbiamo voluto modificarne il protocollo di funzionamento. Per realizzare l'esplorazione nel piano verticale lo abbiamo utilizzato in modalità *tipping curve*, che prevede l'acquisizione di misure a 12 angoli di elevazione compresi tra 23° e 90°. Ad ogni passo angolare vengono misurati sei campioni e il valore di temperatura è la media sugli ultimi 4 campioni, al fine di eliminare gli effetti dovuti alla movimentazione dell'antenna. Il ciclo di misura richiede circa 10 minuti. Ciò è indubbiamente una delle limitazioni di questo esperimento. Potendolo utilizzare in modo *scanning*, riusciremmo ad elevare il numero di acquisizioni a 35, tenendo conto che la larghezza del fascio di antenna a  $-3dB$  è  $1,9^\circ \pm 0,1$  e che per angoli di elevazione inferiori a 20° il contributo del suolo aggiungerebbe rumore alla misura, nonostante l'efficienza del fascio sia pari al 98% a 5° dall'asse principale.

I dati analizzati sono stati acquisiti nei luglio-settembre 2000 e aprile-maggio 2002 in condizioni di atmosfera comprendenti giornate di cielo sereno, nuvoloso e pioggia lieve.

## 3. PROBLEMA INVERSO

L'auto - struttura del problema rivelata dalla SVD suggerisce la parametrizzazione del modello [5,6]. La soluzione dipende dal punto di lavoro rispetto al quale si calcola lo Jacobiano  $G$ . Se tale punto è lontano dalla soluzione reale, l'inversione linearizzata restituisce valori di temperatura  $\hat{T}_B$  la cui distanza da quelli osservati è quantificata da elevati valori del residuo minimo  $R$  ( $R = \sum_{i=1}^{12} (T_{Bi} - \hat{T}_{Bi})^2$ ).

In questo caso, lo scenario osservato si discosta troppo dal riferimento: lo jacobiano calcolato non rappresenta il processo ed il minimo ottenuto è locale alla particolare linearizzazione. La ricerca del minimo assoluto è perseguita con la tecnica di *Simulated Annealing* (SA) [7].

La procedura che abbiamo utilizzato per la restituzione della struttura orizzontale dello scenario osservato si articola nei seguenti passi: una prima inversione lineare a partire dal modello standard di riferimento

(ILS); da questa si traggono informazioni sulla struttura del problema (autovalori, autovettori,  $\mathbf{G}$ ) ed il residuo  $R$ . Successivamente, se il residuo risulta essere elevato, si effettua un'inversione non lineare a partire dal modello standard di riferimento (ISA), che restituisce il nuovo modello di riferimento. Infine, quest'ultima soluzione viene raffinata da una nuova inversione lineare (ILA). L'accorpamento delle 39 celle in 5 macrocelle rispetta la struttura verticale dell'atmosfera standard, iniettando informazione a priori nel problema.

#### 4. RISULTATI NUMERICI: UN ESEMPIO

In questa sezione presentiamo un esempio di inversione. I dati sono stati acquisiti il 25 agosto 2000 e il riferimento scelto è l'atmosfera standard [3]. La figura 2a mostra i dati di partenza e quelli ricalcolati che differiscano notevolmente ( $R = 3513 \text{ K}^2$ ). L'inversione ISA fornisce il nuovo punto di lavoro attorno al quale si ricalcola lo jacobiano  $\mathbf{G}$  per realizzare l'inversione lineare ILA. La figura 2b mostra il buon accordo tra i dati di partenza e quelli ricalcolati ( $R = 0.5 \text{ K}^2$ ). In figura 2c possiamo vedere gli stessi dati privati del riferimento.

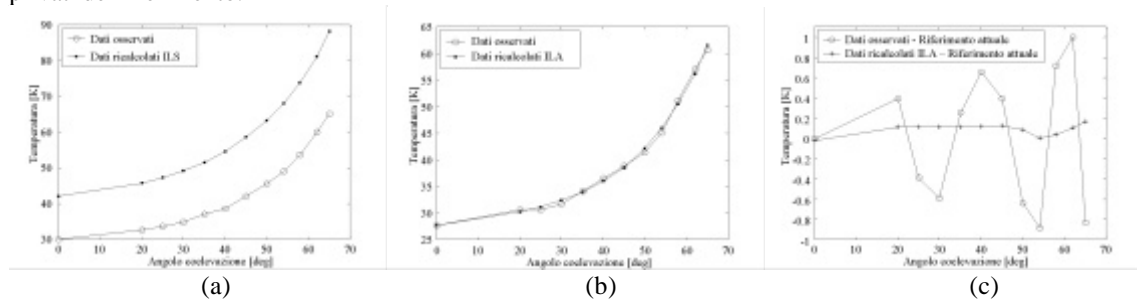


Figura 2 – a) Dati di partenza e ricalcolati dopo ILS; b) dati di partenza e ricalcolati dopo ILA; c) dati di partenza e ricalcolati dopo ILA avendo sottratto i dati ricalcolati a partire dal nuovo riferimento.

Il modello invertito risultante è mostrato in figura 3a. La struttura orizzontale è mascherata dal forte trend verticale. La figura 3b mostra appunto il trend verticale del modello invertito.

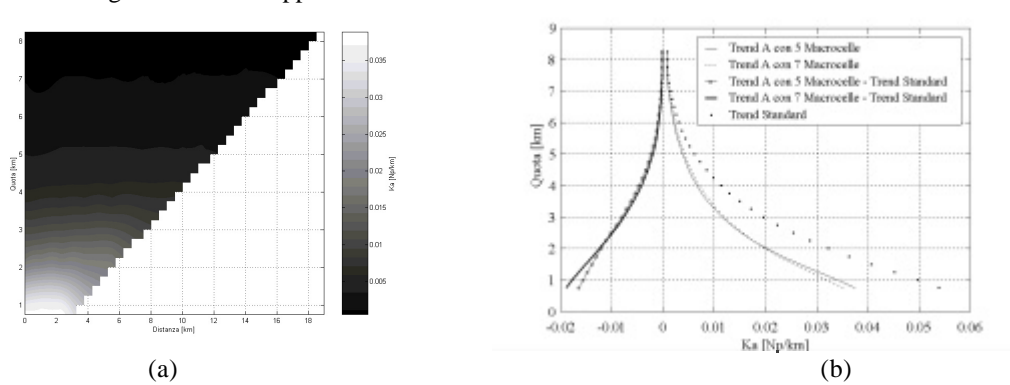


Figura 3 – a) Mappa bidimensionale del coefficiente di assorbimento ricostruito; b) trend verticale delle mappe ricostruite con 5 e 7 macrocelle.

Sottraendo il trend verticale si ottiene la struttura orizzontale rappresentata in figura 4a, restituita con la tecnica del kriging [8].

Aumentando il numero di macrocelle da 5 a 7 si ottiene la figura 4b in cui le variazioni orizzontali sono più evidenti. In questo caso, il numero di condizionamento passa da 20 per 5 macrocelle a 50 per 7 macrocelle. Ad un numero maggiore di macrocelle corrispondono numeri di condizionamento tali da esaltare l'effetto del rumore presente nei dati e introdotto dalle approssimazioni. Con 8 macrocelle il numero di condizionamento vale 150 e con 12 sale a 16000.

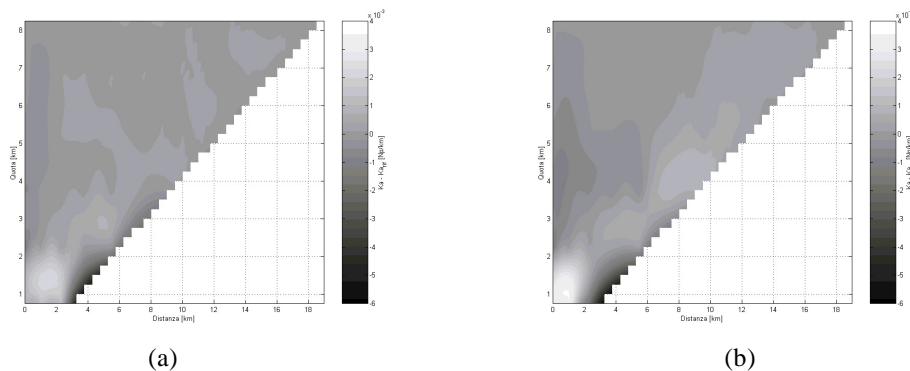


Figura 4- Struttura orizzontale a 5 (a) e a 7 (b) macrocelle.

## 5. CONCLUSIONI

Questo lavoro dimostra la possibilità di recuperare informazioni sulla struttura spaziale dell'atmosfera attraverso la restituzione tomografica di pannelli bidimensionali dell'attenuazione. I principali fattori avversi sono il predominare della variazione verticale su quella laterale (cfr. le scale delle fig. 3 e 4) e il numero limitato di proiezioni topografiche disponibili.

Miglioramenti saranno possibili con l'uso di radiometri dedicati e con tecniche di accorpamento in macrocelle più efficienti. Sarebbe opportuno poter validare questa tecnica attraverso misure indipendenti.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Decker M.T., E.R. Westwater, F.O. Giraud, "Experimental evaluation of ground-based microwave radiometric sensing of atmospheric temperature and water vapor profiles", *Journal of Applied Meteorology*, Vol.17, pp 1788-1795, Dec 1978.
- [2] Westwater E. R., J.B. Snider, M.J. Falls, "Ground-based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65 and 90 GHz", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 38, No.10, Oct 1990.
- [3] Salonen E., S. Karhu, P. Jokela, W. Zhang, S. Uppsala, H. Alamo, S. Sarkkula, "Study of propagation phenomena for low availabilities", Appendix A - Standard Atmospheres, ESTEC 8025/88/NL/PR Final report, Norwijck, The Netherlands, 1990.
- [4] Lines L., S. Treitel, "A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems", *Geophysical Prospecting*, N.32, 1984, pp 159-186.
- [5] Tuniz M., "Tomografia Radiometrica a 23.8 GHz", Tesi di Laurea, Politecnico di Milano, A.A. 2000-2001.
- [6] Bosisio A. V., G. Drufuca, M. Tuniz, "Retrieval of absorption coefficient structure (2D) from a scanning radiometer at 23.8 GHz", *Special Meeting on Microwave Remote Sensing*, Boulder (CO) USA, 5-9 Nov 2001.
- [7] Xin-Quan Ma, "A constrained global inversion method using overparametrized scheme: Application to poststack seismic data", *Geophysics*, Vol. 66, No. 2, pp 613-626, March-April 2001.
- [8] Wackernagel H., *Multivariate Geostatistics*, Springer Verlag, N.Y., 1998, ISBN 3-540-60127-9.