

Compensazione del ritardo di fase indotto dallo strato Troposferico in applicazioni di interferometria SAR

Francesco Falabella^{1,2,3}, Carmine Serio¹, Angela Perrone³, Guido Masiello¹, Tony Alfredo Stabile³, Antonio Pepe²

1. Università degli Studi della Basilicata (UNIBAS), Scuola di Ingegneria, 85100 Potenza, Italia; {francesco.falabella@unibas.it}
2. Istituto per il rilevamento elettromagnetico dell'ambiente (IREA) - Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), 80124 Napoli, Italia;
3. Istituto di metodologie per l'analisi ambientale (IMAA) - Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), 85050 Tito Scalo (PZ), Italia.

ABSTRACT

Nel telerilevamento ambientale a microonde una delle maggiori problematiche da affrontare è identificabile nella corretta discriminazione degli effetti atmosferici nelle misure telerilevate. È ben noto che nelle comunicazioni satellite-terra le onde elettromagnetiche (EM) sono influenzate dal contenuto atmosferico, e se ci avvaliamo delle coordinate polari al fine di caratterizzare un'onda elettromagnetica si può concludere che la fase delle onde elettromagnetiche (EM) rice-trasmesse è affetta da una componente di ritardo attribuibile direttamente all'interazione che avviene tra le onde EM e le particelle presenti nello strato atmosferico attraversato. Nei sistemi RADAR ad Apertura Sintetica (SAR) [1] la stima e la compensazione della componente atmosferica nelle immagini SAR complesse è da sempre un problema di grande interesse all'interno della comunità scientifica, ed in maggior modo quando si adottano approcci di tipo SAR Interferometrici [1] al fine di mappare le deformazioni del suolo terrestre. L'interferometria SAR [1] consiste nel far interferire due o più acquisizioni SAR complesse (riguardanti la stessa scena ma acquisite ad istanti temporali differenti) al fine di estrarre la fase interferometrica, che è direttamente relazionabile al cammino sensore-bersaglio a terra che le onde EM percorrono. Nello specifico, nei sistemi SAR da terra per la compensazione atmosferica si considerano soltanto gli effetti dati dallo strato troposferico in quanto normalmente si mappano frane, terremoti localizzati, ponti, dighe, altri target di interesse, i quali però sono influenzati esclusivamente dallo strato atmosferico più basso.

Il presente studio ha l'obiettivo di presentare le principali tecniche di stima e compensazione delle componenti atmosferiche. Inoltre, si propone una tecnica che ha l'obiettivo di stimare e compensare gli effetti troposferici presenti negli interferogrammi SAR generati a partire da acquisizioni di sistemi SAR da terra. La stima atmosferica proposta sfrutta delle tecniche basate sulla trasformata di Fourier "short-term" discreta [2], grazie alle quali è possibile individuare all'interno di un segnale complesso le componenti spettrali che caratterizzano il disturbo troposferico.

COMPENSAZIONE DEL RITARDO DI FASE ATMOSFERICO IN INTERFEROGRAMMI SAR

Di notevole importanza è la corretta compensazione del ritardo di fase atmosferico in applicazioni di interferometria SAR differenziale al fine di escludere effetti di disturbo atmosferico nel calcolo delle serie storiche di deformazione del suolo terrestre. Nel caso satellitare tale disturbo viene generalmente compensato attraverso l'uso combinato di filtraggi nello spazio e nel tempo [3], o attraverso l'uso di modelli meteorologici [4]. Differentemente, quando sono impiegati sistemi SAR da terra (GB-SAR) la compensazione atmosferica è solitamente effettuata con tecniche diverse dal caso precedente. Tale differenziazione è dovuta principalmente allo strato atmosferico in cui l'onda elettromagnetica si propaga, e se nel caso satellitare sono coinvolti tutti gli strati atmosferici, nel caso di sistema GB-SAR esclusivamente lo strato più basso dell'atmosfera è interessato, vale a dire lo strato Troposferico. Le tecniche GB-SAR presenti in letteratura si basano principalmente sulla stima del ritardo di fase atmosferico partendo dalla conoscenza completa della fase interferometrica [5], vale a dire che la fase non è confinata nel suo intervallo di definizione $[-\pi, +\pi]$. Tale processo prende il nome di phase-unwrapping [1], [5], e in quanto tale problematica non ammette una soluzione esatta, la stima atmosferica fatta su questi dati potrebbe essere viziata dagli errori di unwrapping, i quali sono frutto di un errato processo di phase-unwrapping. Differentemente, la tecnica da noi proposta in questo poster mira alla compensazione del ritardo di fase atmosferico, attraverso un approccio a trasformata di Fourier "short-time" discreta [2], utilizzando come punto di partenza esclusivamente dati interferometrici wrapped, vale a dire dati confinati nel loro intervallo di definizione $[-\pi, +\pi]$, evitando in tale modo qualsiasi tipo di errore introdotto dalla possibile procedura di phase-unwrapping utilizzata.

METODO PROPOSTO E RISULTATI SPERIMENTALI

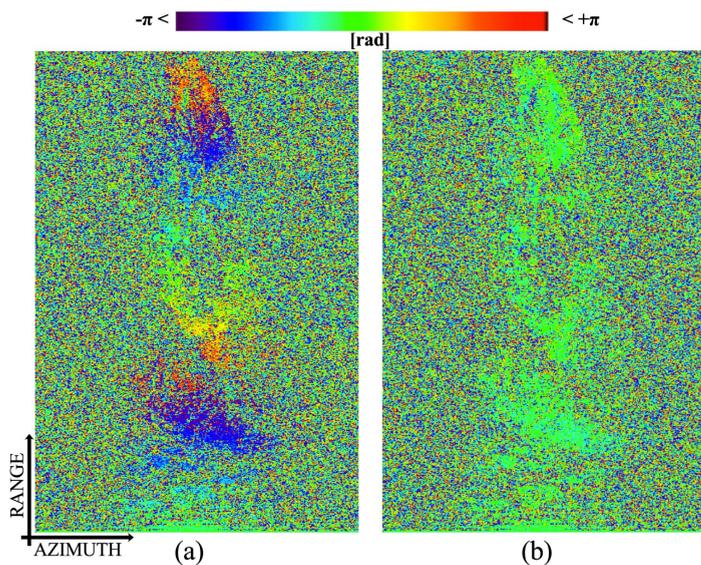


Fig. 1. Compensazione del ritardo di fase troposferico in un'interferogramma GB-SAR IBIS-L [8] riguardante il paese di Montescaglioso (MT), generato tra le coppie di immagini SAR acquisite in data 13.12.2013 e 14.12.2013. (a) Originale (b) Compensato.

COMPENSAZIONE SPETTRALE

Si può dimostrare dopo un'opportuna trattazione matematica, sfruttando inoltre i principi della teoria dei segnali deterministici ed aleatori, che la quantità espressa nell'equazione (4) è assimilabile in prima approssimazione ad una tipologia di segnale ben noto nelle comunicazioni satellitari e più in generale nell'ambito delle telecomunicazioni. Questo segnale prende il nome di *chirp*, e corrisponde ad una forma d'onda linearmente modulata in frequenza. Questa tipologia di segnali può essere analizzata nel dominio delle frequenze attraverso delle apposite trasformate di Fourier a tempo breve [2], le quali permettono di rilevare il contributo spettrale del segnale dato in input. La metodologia proposta si basa proprio su questo tipo di analisi frequenziale, e permette di stimare la componente di ritardo di fase atmosferica, modellata in (4) e poi assimilata ad una forma d'onda di tipo *chirp* tramite la seguente trasformata di Fourier adattiva a tempo breve:

$$ASTFT_w(r, f; x) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(x, \hat{r}) g(r - \hat{r}) \exp(-j2\pi f \cdot \hat{r}) \cdot d\hat{r} \quad (5)$$

dove $w(x, \hat{r})$ rappresenta il segnale di fase totale interferometrico, ove al suo interno è contenuto il segnale di ritardo di fase troposferico modellato come in (4) ed assimilato al tipo *chirp*. Inoltre, $g(r - \hat{r})$ è una finestra di filtraggio adattiva, f rappresenta la frequenza, ed infine (r, x) è una generica coordinata radar nel quale si sta eseguendo l'analisi spettrale. Tracciando per ogni punto della scena investigata la frequenza a massimo picco, rilevata tramite la (5), è possibile ricostruire il segnale relativo al ritardo di fase troposferico e rimuoverlo dall'interferogramma wrapped GB-SAR considerato. La Fig. (1) mostra un'applicazione del metodo proposto, e specificatamente in Fig.1(a) è mostrato l'interferogramma GB-SAR affetto dal ritardo di fase troposferico, mentre in Fig.1(b) è mostrato il medesimo interferogramma ma dopo l'applicazione della metodologia proposta. Si può notare come la fase troposferica presente in Fig.1(a) sia stata rimossa nell'interferogramma in Fig.1(b), evidenziando l'efficacia della tecnica di compensazione.

MODELLAZIONE FISICA

Dal punto di vista fisico possiamo relazionare il ritardo di fase troposferico all'indice di rifrazione n del mezzo in cui l'onda EM si propaga [6]. Si può per tanto esprimere tale indice di rifrazione attraverso la rifrattività come segue:

$$N(\vec{r}) = [n(\vec{r}) - 1] \cdot 10^6 \quad (1)$$

dove \vec{r} è il vettore che descrive la propagazione elettromagnetica nello spazio. In quanto la rifrattività ha un comportamento variante sia nello spazio che nel tempo, esprimiamo la relazione in (1) avvalendoci della formula semi empirica di Debye come segue:

$$N(p, T, H) = \frac{77.6}{T} \cdot \left(p + 4,810 \cdot \frac{p_w(T, H)}{T} \right) \quad (2)$$

dove p è la pressione totale (in millibars), T è la temperatura (in kelvin), H è l'umidità relativa percentuale, p_w è la pressione parziale del vapore acqueo (in millibars), la quale a sua volta è calcolata avvalendoci della formula di Magnus-Tetens [7]. Dalla relazione (2) si evince come ogni variazione dei tre parametri fisici portino ad diverso valore di rifrattività per il target osservato. In quanto le aree spaziali tipicamente osservate con sensori di tipo SAR terrestre sono limitate, e raggiungono solitamente estensioni dell'ordine 500x1000 m., si può approssimare la (2) con seguente relazione lineare:

$$N(h) \approx N_s - N_s \cdot \frac{h}{H} \quad (3)$$

dove la rifrattività ora è in funzione della quota h a cui il target di interesse è posto, con N_s la rifrattività superficiale di riferimento, ed H la quota standard di riferimento. Per quantificare il contributo totale di ritardo troposferico introdotto su ogni interferogramma GB-SAR, la relazione in (3) va integrata su tutto il percorso in cui l'onda EM si propaga. Va ricordato che un interferogramma SAR è il prodotto complesso-coniugato di due immagini SAR raccolte a due epoche temporali differenti, e quindi l'integrazione del contributo in (3) va calcolata per i due istanti temporali coinvolti, e va inoltre effettuata per tutti i punti presenti nella scena. Dopo opportuni, e semplici, calcoli matematici possiamo esprimere il ritardo di fase troposferico che interessa un interferogramma GB-SAR nel seguente modo:

$$\Delta\Psi_{am}(\vec{r}; t_1, t_2) = 10^{-6} \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r \cdot \Delta N(\vec{r}, t_1, t_2) \quad (4)$$

dove è esplicitata la dipendenza dai due istanti temporali t_1 e t_2 , e dal vettore di propagazione \vec{r} . Inoltre r è il modulo del vettore di propagazione, λ è la lunghezza d'onda utilizzata in trasmissione del radar, e $\Delta N(\vec{r}, t_1, t_2)$ è la differenza delle rifrattività modellate come nella (3) ad i due istanti temporali di riferimento e per il vettore di propagazione preso in considerazione.

Riferimenti

- [1] J. C. Curlander and R. N. McDonough, Synthetic aperture radar: systems and signal processing. New York: Wiley, 1991.
- [2] L. Cohen, "Time-frequency distributions-a review," Proc. IEEE, vol. 77, no. 7, pp. 941-981, Jul. 1989, doi: 10.1109/5.30749.
- [3] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 39, no. 1, pp. 8-20, Jan. 2001, doi: 10.1109/36.898661.
- [4] F. Onn and H. A. Zebker, "Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network," J. Geophys. Res. Solid Earth, vol. 111, no. B9, 2006.
- [5] R. Bamler and P. Hartl, "Synthetic aperture radar interferometry," Inverse Probl., vol. 14, no. 4, pp. R1-R54, Aug. 1998, doi: 10.1088/0266-5611/14/4/001.
- [6] N. Blaunstein and C. Christodoulou, Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [7] F. W. Murray, "On the Computation of Saturation Vapor Pressure," J. Appl. Meteorol., vol. 6, no. 1, pp. 203-204, Feb. 1967.
- [8] S. Rödelsperger, G. Läufer, C. Gerstenecker, and M. Becker, "Monitoring of displacements with ground-based microwave interferometry: IBIS-S and IBIS-L," J. Appl. Geod., vol. 4, no. 1, pp. 41-54, Jun. 2010.