

INTERFEROMETRIA MULTI-BASELINE PER MODELLI DIGITALI DEL TERRENO

G. Fornaro(*), A. Monti Guarnieri(**), A. Pauciullo(*), F. De-Zan(**)

(*) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR-IREA,

Via Diocleziano 38, 80124 Napoli, e-mail: fornaro.g@irea.cnr.it

(**) Dipartimento di Elettronica e Informazione Politecnico di Milano

Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano Italy, e-mail: monti@elet.polimi.it.

Riassunto

Si propone una tecnica innovativa per determinare modelli digitali del terreno ad elevata accuratezza combinando immagini ripetute da sistemi ad apertura sintetica. La tecnica proposta utilizza una versione sub-ottima dello stimatore a massima verosimiglianza della pendenza locale del terreno. Tale stimatore permette di sfruttare al massimo la correlazione inter-canale, eliminando al tempo stesso i contributi decorrelati. Il risultato di questa stima congiunta è decisamente migliore rispetto a quello che si otterrebbe con la semplice combinazione lineare pesata delle stime indipendenti. Si mostra come tale tecnica si possa applicare ad osservazioni ripetute del satellite europeo ENVISAT, per ottenere modelli digitali del terreno di elevata qualità.

Abstract

We propose a technique to provide interferometry by combining multiple images of the same area. This technique exploits all the images jointly and performs an optimal spectral shift pre-processing to remove most of the decorrelation for distributed targets. Its applications are mainly for DEM generation at centimetric accuracy, and for differential interferometry. The major requirement is that targets are coherent over all the images: this may be the case of current multi-pass over desert areas, or better the case of images coming from future short revisit time systems (constellations, cart-wheel, geosynchronous SAR etc.).

Introduzione

Lo sfruttamento di acquisizioni multiple da differenti angoli di vista, *multibaseline*, o con differenti frequenze centrali, si è mostrato essenziale nell'interferometria SAR per poter rimuovere i contributi troposferici e, nello stesso tempo, ottenere un elevato rapporto segnale rumore e una robusta stima del campo di fase assoluto (*Phase Unwrapping*), allo scopo di generare accurati modelli digitali del terreno (DEM).

In letteratura, sono state proposte diverse tecniche multibaseline: una combinazione ottima (a massima verosimiglianza, ML) di singoli interferogrammi assunti indipendenti è descritta in [ferretti97], poi estesa al caso multifrequenza [lombardini98], ed infine al caso di combinazione d'immagini ascendenti e discendenti, utilizzando la coerenza ed informazione a priori sul DEM [eineder05]. Queste tecniche stimano la topografia sfruttando target puntiformi, o assunti tali, ed ignorando le proprietà statistiche di bersagli distribuiti, quali la decorrelazione geometrica [zebker92]. D'altra parte è stato mostrato come, nel caso di bersaglio distribuito e pendenza costante, tale decorrelazione può essere rimossa operando un opportuno filtraggio spaziale [gatelli94]. Questo lavoro propone l'estensione di tale filtraggio al caso multibaseline: in particolare inquadra il problema nell'ambito della stima *Single Input Multiple Output*, nel quale ambito è possibile sviluppare una stima a massima verosimiglianza (ML) che fornisca la migliore stima della pendenza locale, dunque della topografia.

Modello del sistema interferometrico multi-canale

Nella figura 1 è mostrato lo schema della geometria di acquisizione multi-baseline (a sinistra), ed il modello equivalente in termini di segnali. Si abbiano N (>1) immagini complesse focalizzate provenienti da altrettante acquisizioni SAR, delle quali una viene assunta come *master* e le altre $N-1$ *slave*. Il modello equivalente della funzione di trasferimento end-to-end del sistema, dalla riflettività a terra, γ , all' i -esima immagine complessa, y_i , è ottenibile come semplice estensione del caso a singolo baseline già studiato in [fornaro02]. In particolare, assumiamo il caso monodimensionale lungo la direzione di range (il caso più critico nell'interferometria SAR), e discretizziamo il sistema utilizzando una frequenza di campionamento sufficientemente elevata.

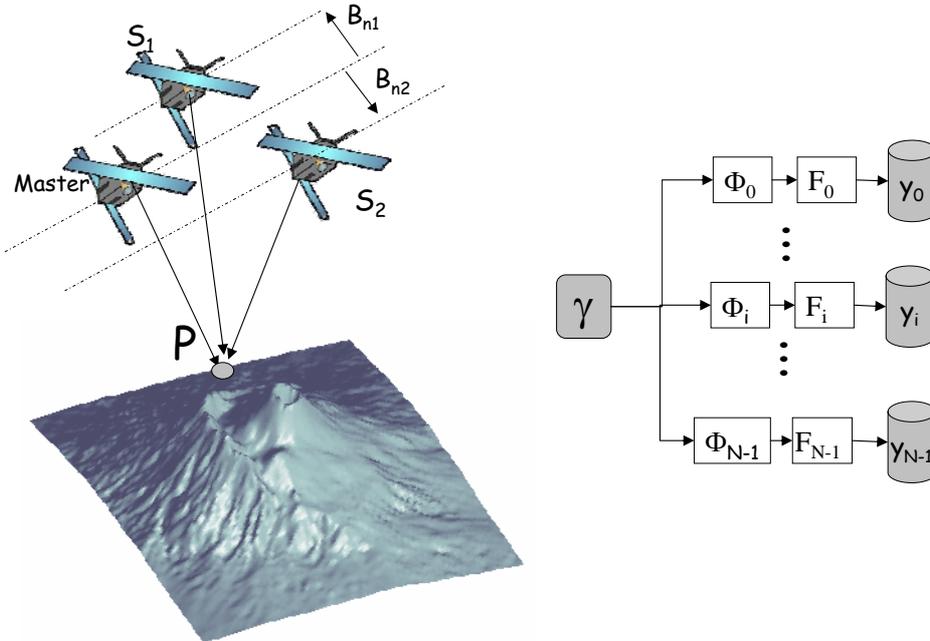


Figura 1. Schema di un sistema interferometrico multi-baseline (a sinistra), e modello equivalente (a destra).

Otteniamo la seguente formulazione matriciale:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{F}_i \Phi_i \gamma + \mathbf{w}_i = \mathbf{H}_i \gamma + \mathbf{w}_i \quad [1]$$

- il vettore colonna \mathbf{y}_i contiene M campioni di una *range-line*, dell' i -esima immagine,
- il vettore colonna γ contiene D campioni della la riflettività a terra, la matrice Φ_i è diagonale pura e contiene i termini di modulazione dovuti alla topografia, incognita,
- la matrice \mathbf{F}_i descrive la funzione di trasferimento equivalente del SAR, ed è approssimabile come una matrice di Toeplitz generata dalla risposta impulsiva di un filtro passabasso,
- il vettore colonna \mathbf{w}_i contiene M campioni di rumore che possiamo assumere gaussiano bianco, nella banda del segnale ricevuto.

Supponiamo di effettuare la stima su un terreno sufficientemente piccolo (M campioni), da poterlo approssimare come lineare. Possiamo quindi approssimare la diagonale della matrice Φ_i con il fasore complesso:

$$\phi_i(t) = \bar{\phi}_i + \left(-\omega_0 \frac{B_{ni}}{r_0 \tan(\theta - \alpha)} \right) t = \bar{\phi}_i + B_{ni} \cdot \Delta\phi \cdot t \quad [2]$$

dove il termine $\bar{\phi}_i$ è lo sfasamento dell'immagine i rispetto alla master, e varia localmente a causa di errori di baseline ed effetti topografici, mentre $\Delta\phi$ (Gradiente Normalizzato, GN) è legata alla pendenza locale del terreno e rappresenta l'incognita da determinare.

Il modello (1) è assimilabile ad un sistema SIMO, e rappresentabile in forma compatta:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}(\Delta\phi)\boldsymbol{\gamma} + \mathbf{w} \quad [3]$$

dove i vettori colonna \mathbf{y} e \mathbf{w} sono ottenuti impilando gli n vettori colonna corrispondenti ad ogni canale, e la matrice \mathbf{H} rappresenta la matrice multicanale, e dipende non linearmente dal GN incognito, $\Delta\phi$.

Stima a Massima Verosimiglianza

La stima a ML del parametro incognito $\Delta\phi$ si ottiene direttamente [dezan04]:

$$\hat{\Phi}_{ML} = \arg \max_{\Delta\phi} \log(f(\mathbf{y}; \Phi)) = \arg \max_{\Delta\phi} \left(-\mathbf{y}^* \mathbf{C}_y^{-1} \mathbf{y} + \log|\mathbf{C}_y| \right) \quad [4]$$

e richiede l'inversione, per ogni valore possibile del parametro, della matrice di covarianza del dato osservato, $\mathbf{C}_y = E[\mathbf{y}\mathbf{y}^*]$. La stima è molto accurata, fintanto che il modello assunto (terreno localmente piano) vale, ma estremamente costosa richiedendo, nel caso di precalcolo delle matrici inverse, un kernel non lineare per ogni finestra di stima. La dipendenza della matrice di covarianza dal rumore rende questo precalcolo molto oneroso. Infine, l'inversione della matrice di covarianza risulta molto instabile al crescere del numero di canali, quando questa matrice diviene marcatamente singolare.

Stima MMSE: N=2

Assumiamo per ora il sistema interferometrico tradizionale, con $N=2$ immagini (canali). La stima a massima verosimiglianza si può derivare dalla stima ai minimi quadrati, come dimostrato da S. Tebaldini in [Tebaldini2005]. La funzione di verosimiglianza tra i due canali m, n può essere ottenuta dal teorema di Bayes, sfruttando l'indipendenza del segnale ricevuto rispetto alla pendenza. La verosimiglianza da massimizzare è:

$$\begin{aligned} L_{nm} &= p(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_m | \Delta\phi) = p(\mathbf{y}_n | \mathbf{y}_m, \Delta\phi) p(\mathbf{y}_m | \Delta\phi) \\ &= p(\mathbf{y}_n | \mathbf{y}_m, \Delta\phi) \end{aligned} \quad [5]$$

e può essere assunta gaussiana con valore medio:

$$\hat{\mathbf{y}}_{n|m} = E[\mathbf{y}_n | \mathbf{y}_m, \Delta\phi] \quad [6]$$

Tale valore medio corrisponde alla stima MMSE di \mathbf{y}_n a partire da \mathbf{y}_m e già ottenuta in [fornaro02]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}}_{n|m} &= \mathbf{G}_{nm} \mathbf{y}_m \quad \mathbf{G}_{nm} = \mathbf{F} \Phi_n \Phi_m^* \mathbf{P} \\ \mathbf{P} &= \mathbf{F}^T \sigma_s^2 (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^{-1} \end{aligned} \quad [7]$$

e realizzata come mostra la figura 2.

Il calcolo della matrice di covarianza $\mathbf{C}_{n|m}$ dell'innovazione rispetto al dato \mathbf{y}_m è sviluppato in [Tebaldini2005], dove si mostra che tale matrice può essere assunta identità in una ipotesi conservativa (basso rapporto rumore segnale). Lo stimatore che ne deriva [Tebaldini2005] massimizza la seguente approssimazione della log-verosimiglianza:

$$\log(p(\mathbf{y}_n, \mathbf{y}_m | \mathfrak{G})) \equiv -\|\mathbf{y}_n - \hat{\mathbf{y}}_{nm}\|^2 - \|\mathbf{y}_m - \hat{\mathbf{y}}_{m|n}\|^2 \quad [8]$$

ottenendo lo stimatore seguente, basato sullo schema a blocchi di figura 2:

$$\hat{\Delta\phi}_{MMSE} = \arg \max_{\Delta\phi} \left\{ 2 \left| \mathbf{y}_n^* \hat{\mathbf{y}}_{n|m} + \hat{\mathbf{y}}_{m|n}^* \mathbf{y}_m \right| - \left\| \hat{\mathbf{y}}_{n|m} \right\|^2 - \left\| \hat{\mathbf{y}}_{m|n} \right\|^2 \right\} \quad [9]$$

In figura 4 .a sono mostrate le prestazioni (in termini di errore quadratico medio) dello stimatore proposto, (9), confrontate con la stima a massima verosimiglianza (4), e la tradizionale stima basata sul picco della trasformata dell'interferogramma (periodogramma), ed il limite di Cramer-Rao. Si noti come lo stimatore proposto, pur essendo computazionalmente molto più efficiente della stima ai minimi quadrati, ottiene prestazioni molto simili alla stima ML.

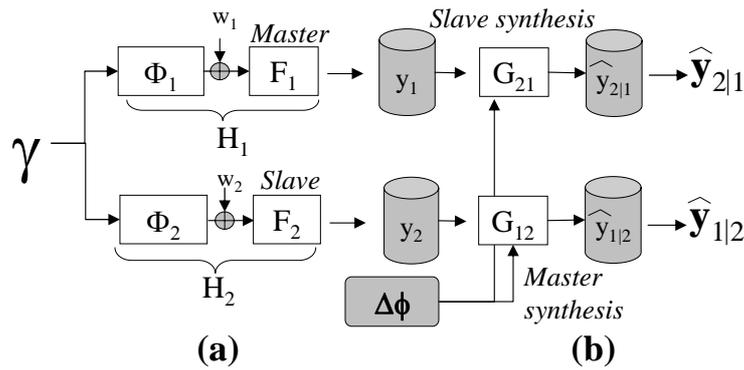


Figura 2. Stima MMSE, interferometria con $N=2$ canali. Schema a blocchi: (a) modello delle acquisizioni e (b) stimatori MMSE dei termini $y_{n|m}$.

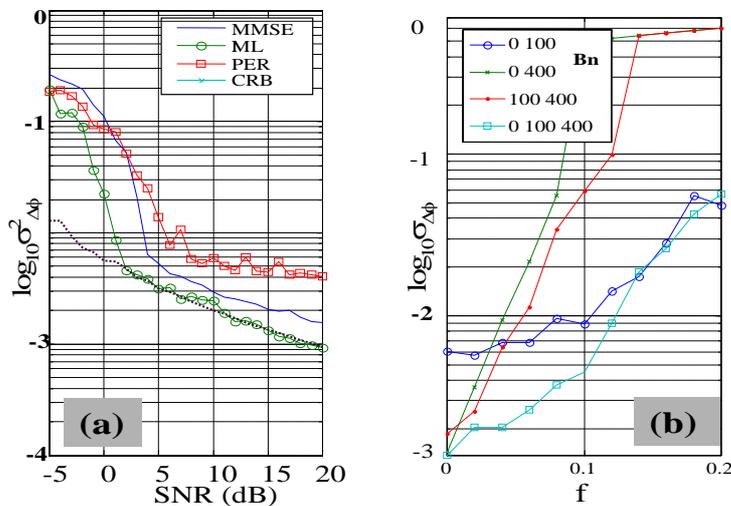


Figura 3. Errore quadratico medio (log) della stima del parametro GN, legato alla pendenza locale del terreno, misurato in base a simulazioni assumendo terreno piano. (a) Confronto tra la tecnica proposta, MMSE, la tecnica ML, e la tecnica tradizionale (periodogramma), in funzione del rapporto segnale rumore, nel caso a singolo baseline. (b) Confronto tra la stima congiunta multibaseline MMSE e le stime separate a singolo baseline MMSE, in funzione della pendenza del terreno (espressa in frequenza normalizzata).

Stima MMSE multicanale ($N>2$)

L'estensione dello stimatore MMSE al caso multicanale è onerosa sia dal punto di vista teorico che computazionale. E' possibile dimostrare che lo stimatore ML può essere espresso, nel caso in questione, come combinazione lineare di cifre di merito:

$$\Delta\phi = \arg \max_{\Delta\phi} \sum_{n=1}^N \sum_{m=n+1}^N J_{nm} \quad [10]$$

dove la singola cifra J_{nm} è ottenuta a partire dai segnali complessi y_n, y_m ed applicando un kernel che dipende da tutti i canali osservati. In prima approssimazione, trascuriamo la dipendenza dei vari termini J_{nm} da tutti i canali tranne n e m , e definiamo lo stimatore MMSE multicanale utilizzando l'espressione [10], nella quale le singole cifre di merito sono valutate come nel caso a due canali, in base alle [5-9] ed utilizzando la coerenza come peso nella combinazione lineare. Tale approssimazione tende ad essere trascurabile aumentando il numero di canali ed al crescere del rapporto segnale rumore.

Nella pratica, lo stimatore ottenuto ha prodotto risultati molto validi, in alcuni casi migliori dello

stimatore ML, a causa della sua instabilità. Un esempio delle prestazioni ottenibili con una stima MMSE è mostrato in figura 3b, dove si confronta la stima congiunta della frequenza normalizzata ottenuta da tre immagini, con tre stime separate, assumendo differenti valori di pendenza del terreno. Si noti come il metodo proposto mantenga contemporaneamente un'accuratezza migliore di quella della coppia a baseline più elevato, ed una risoluzione non ambigua per lo stesso intervallo di pendenze dell'interferogramma con il minimo baseline.

Risultati sperimentali

La tecnica sviluppata è stata applicata ad un set di dati sperimentali consistente in 6 acquisizioni ENVISAT-IM2 in una zona desertica, dunque con elevata coerenza temporale. Le acquisizioni sono riassunte nella tabella 1, e si riferiscono ad una zona vicino a Las Vegas, corrispondente al track 356.

ID	Data	B [m]	Giorni
M	25 Oct 02	0	0
S1	29 Nov 02	-237	35
S2	03 Jan 03	-322	70
S3	07 Feb 03	-255	105
S4	27 Jun 03	-400	245
S5	01 Aug 03	-544	280

Tabella 1. Data-set ENVISAT utilizzato: vaseline spaziali e temporali.

Nel realizzare la stima, è stato utilizzato un DEM SRTM (a 1 arc-sec), esclusivamente per il calcolo della coerenza a-priori, e non nella stima dei gradienti. La stima è stata ottenuta operando localmente mediante una finestra di 7 pixel, range, x 9 pixel, azimuth (corrispondente a 70 m x 50 m a terra) e lo stimatore MMSE qui proposto.

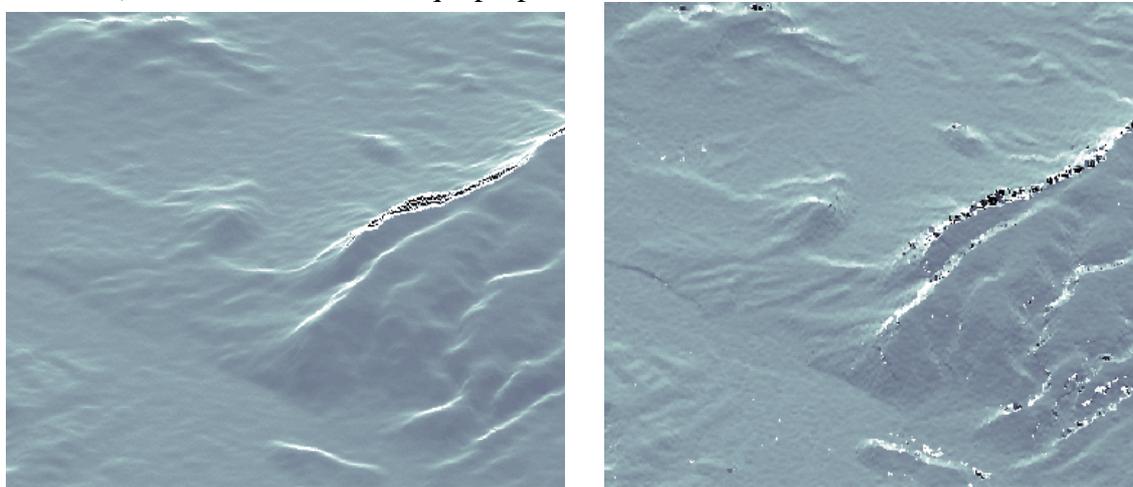


Figura 4. Gradiente in slant range relative ad un'area di 6 km (range) x 4 km (azimuth) nella zona di Las Vegas. A sinistra: misurato da un DEM SRTM proiettato nella geometria ENVISAT. A destra: stimato dalle 6 immagini ENVISAT in tabella 1.

Il risultato finale, la stima del gradiente in range, è mostrato in figura 4. Si noti l'ottimo livello di dettaglio e la copertura in pendenze, superiore a quella del sistema SRTM a causa dell'angolo di vista (fino a 67° in discesa invece che 45°). Si osservi anche una piccola percentuale di valori errati, dovuti a basso rapporto segnale rumore, e facilmente identificabili osservando il comportamento della cifra di merito complessiva.

Come esempio finale, la figura 6 riporta il modello digitale del terreno, in coordinate azimuth e slant range, ottenuto srotolando la stima dei gradienti in range ed azimuth ottenuta in base a dati

SRTM ed ENVISAT. La dinamica delle due immagini è confrontabile, mostrando come l'impiego di baseline multipli risulti efficace nella riduzione degli errori da alias di fase.

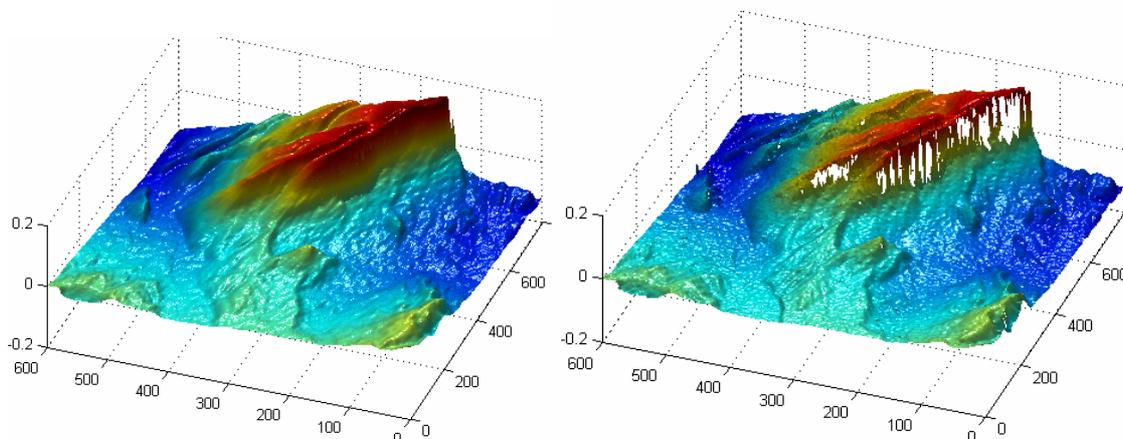


Figura 6. Esempio di DEM (in coordinate SAR), ottenuti srotolando le due stime di gradienti mostrate in figura 5, ed impiegando le stime dei gradienti in azimuth ottenute similmente.

Ringraziamenti

Si vuole ringraziare l'Ente Spaziale Europeo (ESA) per aver fornito i dati ENVISAT (cat-1 project, 3173).

Riferimenti Bibliografici

- A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, and A. Monti Guarnieri, Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction, in *Third ERS Symposium---Space at the Service of our Environment, Florence, Italy, 17--21 March 1997*, ser. ESA SP-414, 1997, pp. 1809--1820.
- F. Lombardini, "Optimal absolute phase retrieval in three-element SAR interferometry," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 1522--1524, July 1998.
- M. Eineder and N. Adam, "A maximum-likelihood estimator to simultaneously unwrap, geocode, and fuse SAR interferograms from different viewing geometries into one digital elevation model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 1, pp. 24--36, Jan. 2005.
- H. A. Zebker and J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 5, pp. 950--959, sept 1992.
- F. Gatelli, A. Monti Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C. Prati, and F. Rocca, The wavenumber shift in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, no. 4, pp. 855--865, July 1994.
- S. Tebaldini, "Stima della topografia nell'interferometria SAR multibaseline", tesi di laurea, jul. 2005.
- G. Fornaro and A. M. Guarnieri, Minimum mean square error space-varying filtering of interferometric SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 1, pp. 11--21, July 2002.
- F. De-Zan, "Stima ottima della fase nell'interferometria SAR," Master's thesis, Politecnico di Milano, July 2004.
- F. Gatelli, A. Monti Guarnieri, C. Prati, and F. Rocca, An interferometric quick-look processor, in *'FRINGE 96' workshop on ERS SAR Interferometry, Zürich, Switzerland, 30 Sep--2 October 1996*. ESA SP-406, Vol II, 1997.