

# INTERFEROMETRIA SCANSAR PER STIME A LARGA SCALA DI CAMBIAMENTI E SUBSIDENZE

P. Guccione(\*), C. Cafforio(\*), A. Monti Guarnieri(\*\*),

(\*) Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica – Politecnico di Bari, via E. Orabona 4, 70125 Bari.  
Tel +390805963448, fax. +390805963448. E-mail: [guccione@poliba.it](mailto:guccione@poliba.it), [cafforio@poliba.it](mailto:cafforio@poliba.it)

(\*\*) Dipartimento di Elettronica ed Informazione – Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133  
Milano. Tel +390223993446. E-mail: [monti@elet.polimi.it](mailto:monti@elet.polimi.it)

## Riassunto

L'ESA ha recentemente aggiunto un nuovo prodotto alla lista dei prodotti ENVISAT ASAR: il *Single Look Complex Wide Swath*. Questo prodotto contiene dati ScanSAR a media risoluzione focalizzati in modo da preservare il contenuto di fase e su un *grid* di campionamento comune. L'immagine ottenuta è in grado di coprire un'area di 400km in range e fino a 400 in azimuth, in dipendenza della durata di acquisizione. La risoluzione in range è quella di un SAR tradizionale, mentre quella in azimuth è più bassa, a causa delle caratteristiche dell'acquisizione del sistema ScanSAR (Holzer et al., 2002).

Le applicazioni di questo prodotto sono principalmente l'interferometria, la misura della velocità del sistema onda-vento su oceano e il controllo del territorio su vasta scala (rilevamento di versamenti di olio in mare, scivolamenti di faglie e così via). (Gabriel et al., 1988)

Questo articolo espone le condizioni alle quali devono soddisfare le coppie di immagini per ottenere interferogrammi di buona qualità e i principi base dell'interferometria differenziale ScanSAR.

## Abstract

Recently ESA has added a new product in the ENVISAT ASAR product list: the ASAR Wide Swath Single Look Complex (ASA\_WSS product). This product contains the ScanSAR medium resolution (Wide Swath) phase preserving data, focused on a coherent grid.

The image is able to cover an area that is large 400km in range and up to 400km in azimuth, depending on the length of the acquisition. While range resolution can be compared to that of a traditional SAR, azimuth resolution is lower, because of the peculiarity of the scanning SAR acquisition system (Holzer et al., 2002).

The intended applications of this product are interferometry, wave-wind speed measures and large scale monitoring (oil spills detection, landslides, subsidences). (Gabriel et al., 1988)

This paper details the processing step necessary to get complex multilook ScanSAR differential interferograms, together with the constraints that the WSS stereo pair must obey.

## Introduzione

Lo ScanSAR è un SAR che permette di ottenere una copertura del terreno più larga mediante commutazione periodica del puntamento d'antenna in range. Questa acquisizione produce un più largo *swath*, a spese della risoluzione in azimuth.

Le varie modalità ScanSAR sono state inizialmente motivate da applicazioni radiometriche; successivamente si è proposto lo sviluppo di un prodotto complesso, dato che test sperimentali avevano dimostrato la potenziale utilità di questa modalità anche in altre applicazioni, in particolare l'interferometria ScanSAR, pensata per applicazioni che richiedono monitoraggio frequente di disastri naturali su larga scala o misurazione delle deformazioni di una superficie topografica o per il tracciamento di mappe digitali del terreno.

Tuttavia l'uso di dati ScanSAR per applicazioni coerenti è complicato dalla limitata estensione in banda in azimuth e dalle proprietà spazio-varianti. Per esempio una coppia interferometrica che produca un interferogramma ScanSAR di buona qualità richiede non solo una parallasse (distanza tra le orbite) non troppo grande, ma anche che il supporto spettrale delle due immagini in azimuth si sovrapponga.

Come conseguenza si ha che lo sfruttamento dei dati ScanSAR per applicazioni coerenti è molto sensibile all'accuratezza delle informazioni temporali e dalla disponibilità di orbite precise.

In questo articolo si espongono le condizioni per ottenere interferogrammi ScanSAR di buona qualità; inoltre i risultati sperimentali riportati mostrano che l'inclusione di un prodotto ScanSAR complesso nella lista dei prodotti ENVISAT ESA disponibili è pienamente giustificata.

### **La geometria del sistema ScanSAR**

Il sensore ScanSAR è fondamentalmente un sensore SAR con un'acquisizione di dati discontinua. Esso acquisisce per brevi intervalli (detti '*burst*') di estensione  $T_D$  e cambia ciclicamente il puntamento in elevazione dell'antenna, scandendo tutti i sub-swaths (fino a cinque per l'ASAR in modalità Wide Swath). Il tempo che l'antenna impiega per completare il ciclo è detto tempo di ripetizione ( $T_R$ ) e deve essere meno del tempo che impiega l'antenna a coprire la traccia lasciata a terra dal suo fascio lungo l'azimuth (detto impronta a terra,  $T_F$ , o *footprint time*), in modo da assicurare continuità alla scena acquisita. La continuità in range è invece assicurata dalla parziale sovrapposizione degli *swath* adiacenti.

Poichè un bersaglio a terra è visto in bursts consecutivi, il numero di volte che questo accade è detto numero di *looks*; questo numero è uguale al rapporto tra il footprint time e il tempo di ripetizione. Per l'ASAR WS questo valore è all'incirca 3 (non è in generale un numero intero) e dipende dal numero di sub-swaths e dalla durata di un burst. Il numero di looks influenza la risoluzione in azimuth ma anche l'effetto di modulazione dell'ampiezza in azimuth (sui dati focalizzati), nota come *scalloping*.

### **Le proprietà spettrali del sistema ScanSAR**

L'eco di un ritorno da terra per lo ScanSAR (come per il SAR) deriva dall'intero footprint d'antenna; i ritorni dai differenti bersagli hanno tuttavia differenti spostamenti Doppler a causa dell'angolo di visuale. In particolare i ritorni dello stesso bersaglio visti in bursts differenti avranno posizioni angolari differenti e quindi differenti frequenze Doppler.

La focalizzazione (come per un sistema SAR tradizionale) è la correlazione dei dati con la storia Doppler in azimuth; questa operazione ridistribuisce le eco lungo le coordinate azimuth, concordemente con il loro contenuto spettrale. È quindi un'operazione tempo-invariante che non cambia le proprietà spettrali del segnale. (Wong et al., 1997; Lanari et al., 1998).

I ritorni di tutti i bersagli visti all'interno di un footprint d'antenna spazzano tutta la banda Doppler  $\sim |f_R|T_F$  (dove  $f_R$  è la pendenza Doppler). Tuttavia il singolo bersaglio è visto in modo discontinuo, e quindi la banda che esso occupa è soltanto  $|f_R|T_D$ , centrata attorno ad una frequenza che dipende dall'angolo di visuale (rispetto al punto di minima distanza). Per fare un confronto, nel SAR l'acquisizione è continua in azimuth e quindi tutti i bersagli generano risposte spettrali simili. Il sistema è quindi tempo invariante e il supporto spettrale copre tutta la banda spazzata, indipendentemente dalla posizione lungo l'orbita.

Il look complesso, ottenuto focalizzando i dati di ciascun burst è un'immagine radar che copre tutta l'estensione di un footprint d'antenna. Nei dati focalizzati ogni bersaglio è piazzato correttamente nella sua posizione temporale lungo l'orbita e di ritardo per il range, ma il suo contenuto spettrale dipende dall'angolo di acquisizione. Quindi i looks prodotti da bursts contigui si sovrappongono temporalmente (cioè guardano posizioni comuni a terra) ma sono spettralmente disgiunti.

### Immagazzinamento dei dati per il prodotto Single Look Complex

Ogni bersaglio in un'immagine complessa ScanSAR ha una risposta che spazia tutta la banda Doppler. Conseguentemente il campionamento in azimuth è scelto opportunamente. Tuttavia dopo la focalizzazione la banda utile, cioè quella effettivamente occupata dal singolo bersaglio, è ridotta notevolmente (sebbene sia tempo-variante). È allora pensabile di ridurre anche la frequenza di campionamento dopo focalizzazione senza degrado del segnale.

A questo punto sono possibili due metodi di immagazzinamento dei dati focalizzati. Se si lascia la frequenza di campionamento originaria allora i look complessi possono essere sommati (concordemente sulle zone comuni). Si deve prestare attenzione al fatto che il campionamento in azimuth è differente per i vari bursts e che i bursts non sono acquisiti in modo sincrono; un ricampionamento su una griglia comune è quindi necessaria. Questa scelta evita di memorizzare le informazioni di uno stesso bersaglio più volte nei vari looks, ma richiede una frequenza di campionamento più elevata di quello che la risoluzione in azimuth suggerirebbe (vedi fig. 1a) (Holzer et al. 2002).

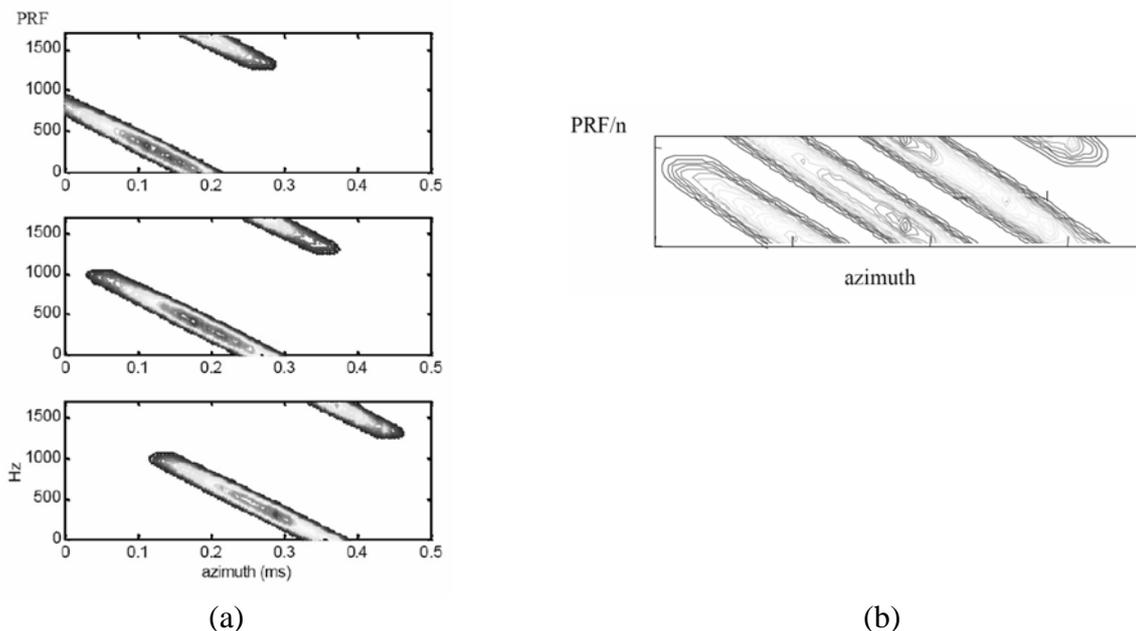


Fig. 1. (a) Un plot a iso-contorni del diagramma tempo-frequenza relativo a tre look contigui. In caso di storage dei dati 'multiple burst' i look sono sommati insieme e il loro contenuto spettrale rimane disgiunto. (b) Nel caso di sottocampionamento lo spettro si ripiega, ma se i looks sono memorizzati singolarmente non vi è aliasing. Il valore  $n$  rappresenta il fattore di sottocampionamento applicato ai dati.

Il secondo metodo consiste invece nel mantenere isolati i singoli looks; in questo modo la frequenza di campionamento può essere abbassata di molto. Il sottocampionamento produrrà un ripiegamento dello spettro, ma l'aliasing è comunque evitato e quindi è possibile mantenere inalterata l'informazione di partenza. I singoli looks quindi vanno sottocampionati ma immagazzinati individualmente (*single burst* contro il *multiple burst* precedente).

Questa seconda strategia non richiede esplicitamente l'adozione di una griglia di ricampionamento comune. Tuttavia per semplificare molte delle applicazioni successive è utile ricampionare i dati su un grid di uscita comune.

Questo metodo risulta molto più compatto, dato che un sottocampionamento tipico di un fattore 10 (riduzione del volume dei dati di 10) è migliore del guadagno che si ha nella somma coerente dei looks (la somma dei looks riduce di circa 3 volte il volume dei dati).

## Interferometria ScanSAR/ScanSAR

I look complessi ScanSAR possono essere combinati con altre immagini radar complesse (SAR o ScanSAR) per ottenere interferogrammi. I campioni di una coppia interferometrica devono essere registrati spazialmente; tuttavia anche il contenuto spettrale deve essere limitato alla banda comune, dato che la differenza di fase è significativa solo quando si confrontano sinusoidi della stessa frequenza (Guarnieri et al. 2003; Guarnieri et al. 1999). Prerequisiti per buoni interferogrammi sono inoltre bassi valori di parallasse e di separazione temporale delle acquisizioni della coppia.

L'uso dei dati ScanSAR implica anche un filtraggio spazio variante nella limitazione a banda comune (Guarnieri et al., 1996; Bamler et al., 1988). Tuttavia la condizione più stringente rimane la verifica della sincronicità nell'acquisizione.

Gli interferogrammi a media risoluzione soffrono molto della decorrelazione di volume; all'aumentare delle dimensioni della cella di risoluzione le eco di più bersagli di altezze differenti si sommano riducendo il rapporto segnale rumore dell'immagine. Tuttavia la decorrelazione di volume può essere grandemente ridotta utilizzando accurate mappe digitali di elevazione del terreno, DEM. (Gabriel et al. 1988, Guarnieri et al. 1999).

L'interferometria differenziale si può pensare come una combinazione di un interferogramma ottenuto da due immagini registrate e delle frange sintetiche ottenute nello stesso riferimento spaziale a partire da un DEM. Questa combinazione permette di rimuovere una grande parte della topografia (e quindi anche la fase corrispondente dell'interferogramma è rimosso); questo lascia soltanto le frange residue, che rappresentano l'informazione che il DEM non è stato in grado di fornire (cambiamenti nella topografia o effetti atmosferici). Il DEM quindi prova e *stimare e sottrarre l'alias*.

Quando due immagini ScanSAR sono combinate si deve verificare innanzitutto la condizione sulla sincronicità dei *pattern* di acquisizione. Infatti, poiché entrambe le immagini hanno un supporto spettrale spazio variante è possibile che, sebbene perfettamente a registro, le due immagini non abbiano alcun termine spettrale in comune e questo darebbe un interferogramma fatto di puro rumore. In fig. 2 si illustra quanto detto per una coppia interferometrica per la quale esiste una sincronizzazione parziale (e quindi in grado di produrre frange interferometriche). Si noti inoltre che le parti significative dello spettro si possono confrontare solo se la differenza dei centroidi Doppler non è troppo elevata.

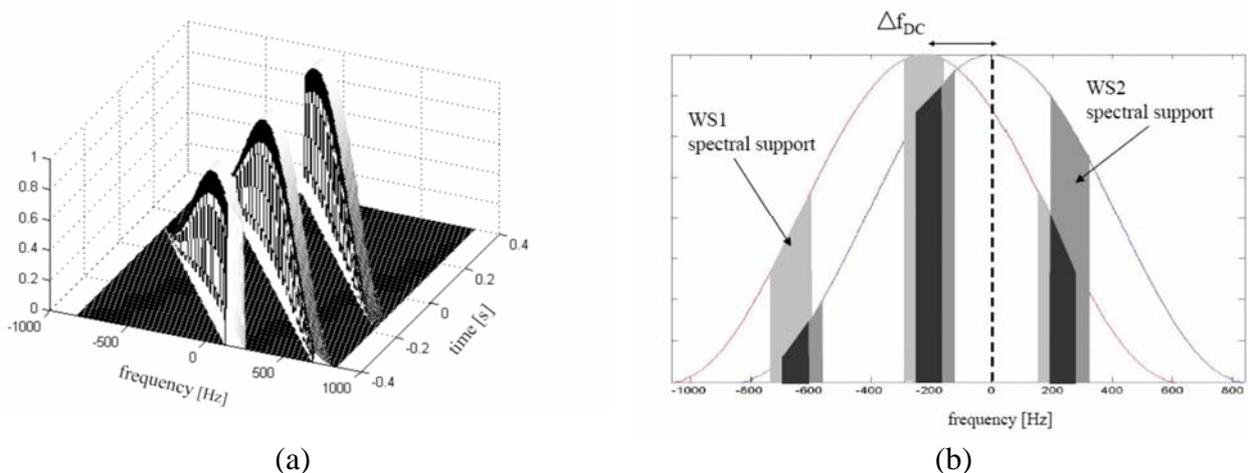


Fig. 2. (a) Il diagramma tempo-frequenza di dati ScanSAR. (b) Un taglio del diagramma in (a) fatto ad un dato tempo in azimuth, per due immagini WS. La parziale sovrapposizione (e quindi la presenza di una banda comune) è identificata dalle differenti tonalità di grigio

Se si suppone che l'acquisizione avvenga in modo perfettamente casuale, allora la probabilità che i pattern di acquisizione si sovrappongano per un data percentuale della banda in azimuth vale:

$$P(\text{overlap} > \alpha) = (1 - \alpha) \cdot \frac{2T_D}{T_R} \quad [1]$$

dove  $\alpha$  è la percentuale minima di sovrapposizione richiesta, rispetto alla banda ( $\alpha \geq 0.1$  è utilizzato normalmente per ottenere interferogrammi significativi).

La verifica di questa condizione è critica, dato che la durata di un burst può essere una frazione piccola del periodo di ripetizione. Per l'ASAR WS, con 5 sub swaths  $T_D$  è tipicamente 1/20 di  $T_R$ . Se si suppone  $\alpha = 0.1$  e si usano i parametri tipici dell'ASAR WS, si ottiene una percentuale di successi per la [1] del 28-34% (al variare degli sub swaths).

Ovviamente per altri sensori, come il RADARSAT nella modalità ScanSAR Narrow Mode (Holzer et al., 2002) la sincronizzazione dei pattern non è un problema, dato che la percentuale dei successi si avvicina al 100%.

Il criterio utilizzato per identificare una coppia interferometrica utile è di confrontare il tempo di inizio di un burst di un'immagine con il corrispondente tempo dell'altra. Questa operazione è risultata molto accurata nel caso del sensore ASAR, dato che le orbite ottenute dal sistema DORIS hanno dimostrato essere molto precise, al tal punto che anche la registrazione delle immagini non ha mai richiesto operazioni successive di *autofocus* (Holzer et al., 2002).

### Risultati sperimentali

Per provare le potenzialità dell'interferometria ScanSAR WS furono scelte inizialmente immagini su un'area molto piatta (così da far pesare poco la topografia) in Olanda. Tuttavia, sebbene alcuni risultati erano di media qualità si constatò che l'eccessiva distanza temporale nell'acquisizione o di parallasse produceva cattivi interferogrammi, soprattutto in zone molto ricche di vegetazione.

Test successivi furono eseguiti su una regione deserta dell'Algeria (il *plateau* Tademait). Qui si ottennero 3 coppie buone su 10 totali (5 *datasets*), anche se due di queste con alte parallassi. La stabilità atmosferica e le caratteristiche territorio, insieme ad un'adeguata separazione di parallasse diedero luogo ad un buon interferogramma, con alti valori di coerenza stimata.

	19-gen-2003	21-set-2003	8-feb-2004	14-mar-2004	18-apr-2004	23-mag-2004	27-giu-2004	
	<b>077</b>	<b>04640</b>	<b>08147</b>	<b>10151</b>	<b>10652</b>	<b>11153</b>	<b>11654</b>	<b>12155</b>
19-gen-2003	<b>04640</b>		<b>38-51%</b>	<b>30-27%</b>	<b>6-18%</b>	<b>0%</b>	<b>83-78%</b>	<b>0%</b>
21-set-2003	<b>08147</b>	<b>315-302 / 245</b>		<b>92-76%</b>	<b>67%</b>	<b>0%</b>	<b>55-72%</b>	<b>0%</b>
8-feb-2004	<b>10151</b>	<b>175-185 / 385</b>	<b>139-118 / 140</b>		<b>75-91%</b>	<b>0%</b>	<b>45-47%</b>	<b>0%</b>
14-mar-2004	<b>10652</b>	<b>701-688 / 420</b>	<b>387-385 / 175</b>	<b>512-491 / 35</b>		<b>0%</b>	<b>23-39%</b>	<b>0%</b>
18-apr-2004	<b>11153</b>	<b>413-418 / 455</b>	<b>100-123 / 210</b>	<b>241-235 / 70</b>	<b>289-275 / 35</b>		<b>0%</b>	<b>67-88%</b>
23-mag-2004	<b>11654</b>	<b>471-464 / 490</b>	<b>157-163 / 245</b>	<b>288-273 / 105</b>	<b>231-224 / 70</b>	<b>60-56 / 35</b>		<b>0%</b>
27-giu-2004	<b>12155</b>	<b>303-301 / 525</b>	<b>618-604 / 280</b>	<b>501-510 / 140</b>	<b>1005-990 / 105</b>	<b>716-720 / 70</b>	<b>774-766 / 35</b>	

(a)

	4-feb-2003	2-set-2003	30-mar-2004	8-giu-2004	13-lug-2004	
	<b>306</b>	<b>04869</b>	<b>07875</b>	<b>10881</b>	<b>11883</b>	<b>12384</b>
4-feb-2003	<b>04869</b>		<b>92-86%</b>	<b>73-80%</b>	<b>90-98%</b>	<b>32-48%</b>
2-set-2003	<b>07875</b>	<b>151-154 / 210</b>		<b>66-67%</b>	<b>82-88%</b>	<b>23-33%</b>
30-mar-2004	<b>10881</b>	<b>653-639 / 420</b>	<b>488-505 / 210</b>		<b>84-79%</b>	<b>57-66%</b>
8-giu-2004	<b>11883</b>	<b>241-245 / 490</b>	<b>86-88 / 280</b>	<b>418-400 / 70</b>		<b>41-45%</b>
13-lug-2004	<b>12384</b>	<b>181-171 / 525</b>	<b>331-322 / 315</b>	<b>836-810 / 105</b>	<b>418-411 / 35</b>	

(b)

Tabella 3. (a) Le 21 possibili combinazioni dell'acquisizione WS su BAM, Iran (orbita relativa 077). (b) Le 10 possibili combinazioni sulla stessa area (orbita relativa 306). L'overlap dei look è riportato nella parte superiore della tabella; parallassi [m] / intervalli temporali [giorni] nella parte inferiore.

Più recentemente un set di immagini ASAR WS sono state analizzate sull'area di Bam, Iran, per indagare sugli effetti del forte terremoto che ha colpito la regione il 26 dicembre del 2003. Per questo set di immagini è capitato che le coppie interferometriche trovate hanno avuto una

percentuale di successi superiore a quanto atteso dalla [1] (confronta tabelle 3a e 3b).  
Le figure 4a e b riportano infine l'ampiezza e l'interferogramma differenziale (geocodificati) sull'area di Bam, ottenuti utilizzando un DEM SRTM con una risoluzione a terra di 90m.

### Conclusioni

Si è mostrato che i dati ASAR WS SLC sembrano ottimali per applicazioni che richiedono post-processing coerente; in particolare sono stati mostrati i risultati sull'interferometria. L'accuratezza delle orbite e delle informazioni ancillari hanno dimostrato di essere adeguate per questo tipo di applicazioni, anche senza tecniche di autofocus.

Applicazioni interferometriche future potrebbero godere di grande beneficio se le missioni si riuscissero a programmare in modo da acquisire coppie interferometriche sincronizzate.

Questo lavoro è stato sviluppato in collaborazione con l'ESA, sotto forma di numerosi contratti (#14143/00/NL/GD, #15609/01/NL/SF, #18343/04/I-LG).

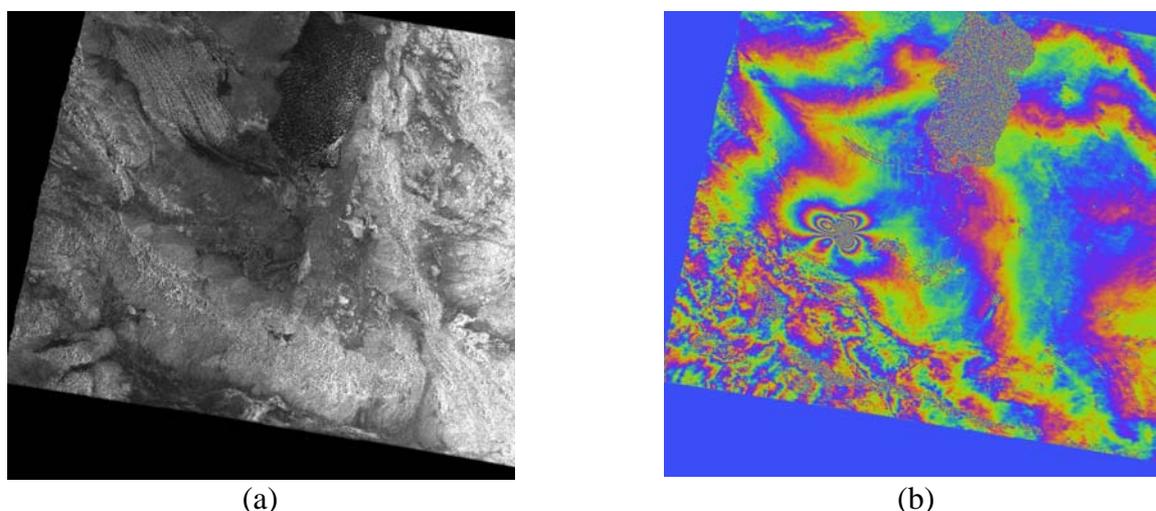


Fig. 4. (a) Immagine di ampiezza, (b) Interferogramma differenziale su Bam. Le missioni utilizzate sono 07875 e 11883, orbita relativa 306. L'immagine è stata geocodificata. La sua posizione assoluta è: latitudine 27-31N, longitudine 57-61E. Il passo di campionamento è 90m

### Bibliografia

A M Guarnieri, P Guccione, P Pasquali and Y L Desnos (2003), "Multi-mode ENVISAT ASAR interferometry: techniques and preliminary results", *IEE Proc. Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 150, No. 3, pp. 193-200.

J Holzer, R Bamler (2002), "Burst-Mode and ScanSAR Interferometry", *IEEE Trans Geosci. and Remote Sensing*.

A M Guarnieri, F Rocca (1999), "Combination of Low- and High-Resolution SAR Images for Differential Interferometry", *IEEE Trans Geosci. And Remote Sensing*.

R Lanari, S Hensley, P A Rosen (1998), "Chirp z-transform based SPECAN approach for phase-preserving ScanSAR image generation", *IEE Proc.*, pag. 254-261.

F Wong, I Cumming (1997), "Phase Preserving processing of ScanSAR data with a modified range Doppler algorithm", *IEEE Trans Geosci. And Remote Sensing*, Pages:725-727, vol.2.

A M Guarnieri, C Prati (1996), "ScanSAR Focusing and Interferometry", *IEEE Trans Geosci. and Remote Sensing*.

R Bamler, P Hartl (1988), "Synthetic Aperture Radar Interferometry", *IEEE Trans Inverse Problem*, top. rev., vol 14.

A K Gabriel, R M Goldstein (1988), "Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B", *IEEE Trans Geosci. and Remote Sensing*, vol 9, no. 8, pag. 857-872.