

RADAR INTERFEROMETRICO PER IL MONITORAGGIO DI FRANE, GHIACCIAI E VALANGHE

Massimiliano Pieraccini, Daniele Mecatti, Linhsia Noferini, Giovanni Macaluso, Guido Luzi, Carlo Atzeni

Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni, Università di Firenze,
via Santa Marta, 3 50139 Firenze tel. 055-4796 273 massimiliano.pieraccini@unifi.it

Riassunto

In questa comunicazione, gli autori presentano un innovativo radar portatile per il monitoraggio a distanza dei versanti. Si tratta di un radar interferometrico ad apertura sintetica in grado di operare fino a qualche chilometro di distanza, sviluppato dall'Università di Firenze e sperimentato in decine di campagne in vari siti. Un progetto della comunità europea, denominato GALAHAD, del sesto programma quadro ha finanziato lo sviluppo e la validazione della tecnica in una varietà di scenari operativi. I principali campi di applicazioni sono il monitoraggio di frane, ghiacciai e manti innevati. Impiegato come sistema di monitoraggio di versanti in frana, il radar è in grado di fornire in tempo reale, ogni pochi minuti, la mappa di velocità della frana rivelando spostamenti con precisione millimetrica. Lo stesso sistema è stato usato con successo per il monitoraggio dell'evoluzione dei ghiacciai. Infine, il radar interferometrico installato in modo da vedere un versante innevato, può fornire informazioni sullo stato del manto nevoso e sulla distribuzione delle valanghe.

Abstract

In this paper, the authors present an innovative portable radar for remote monitoring of slopes. It is an interferometric synthetic aperture radar (In-SAR) able to operate at a distance of a few kilometres. It has been designed and developed by the University of Florence and it has been experimented in tens of sites. A research project, named GALAHAD, funded by European Community, has supported the development and the validation of the technique in a variety of operation scenarios. The main fields of applications are the monitoring of landslides, glaciers and slope covered by snow. As system for landslide monitoring, the radar is able to provide in real time, each a few of minutes, the velocity map of the landslide by detecting the displacements with millimetric accuracy. The same system has been successfully employed for monitoring the evolution of glaciers. Finally, the interferometric radar, installed in such a way to view a slope covered by snow, is able to provide information about the state of snow and the distribution of avalanches.

Introduzione

Frane, valanghe e in generale i movimenti dei versanti sono fenomeni naturali, diffusi in gran parte del territorio italiano, che possono provocare ingenti danni alla popolazione e al patrimonio. Si stima che il 68% dei comuni italiani sia interessato da problemi di assetto idrogeologico (Massaro, 2003) con oltre 13.200 Km² di territorio italiano a rischio frana (Guazzetti, 2000). Per il numero di vittime e l'ammontare dei danni l'Italia si colloca ai primi posti della classifica mondiale (Schuster, 1996). Negli ultimi anni la consapevolezza dell'importanza della gestione del rischio naturale associato ai movimenti dei versanti è in crescita. Pertanto è cresciuto l'interesse e gli investimenti nel settore delle tecnologie di monitoraggio dei versanti. In effetti, nell'ambito del Sesto Programma Quadro della comunità Europea sono stati finanziati vari progetti per lo sviluppo di tecnologie per il monitoraggio dei rischi naturali, tra cui il progetto GALAHAD (www.galahad.eu). In questa comunicazione si riporteranno i principali risultati di tale progetto relativi a un'innovativa tecnologia, l'interferometria radar da terra (GB-InSAR: Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar), per il monitoraggio di frane, ghiacciai e valanghe.

L'interferometria radar da terra è una tecnologia che nasce come ricaduta del settore spaziale. Radar ad apertura sintetica (SAR) sono impiegati da anni per il monitoraggio del territorio (Zebker *et al.*, 1997). I radar satellitari hanno il vantaggio di poter coprire rapidamente un territorio vasto come un'intera nazione, ma hanno una serie di importanti limitazioni. Innanzitutto l'intervallo tra un'acquisizione e la successiva è tipicamente di molti mesi e spesso anni, il satellite è pertanto più adatto alla mappatura del territorio che come sistema di allarme in tempo reale. Molti versanti, soprattutto quelli più scoscesi, non sono visibili dal satellite. Il lancio e la gestione di un satellite è un'operazione costosa, complessa e poco flessibile. I radar installati a terra hanno il principale limite di poter coprire una zona molto limitata, tipicamente qualche Km quadrato, ma il tempo di campionamento è dell'ordine di poche decine di minuti e il sistema consente la massima flessibilità operativa, pertanto è particolarmente adatto come sistema di allarme e monitoraggio locale di fenomeni veloci.

Principio di funzionamento

L'interferometria radar da terra mediante apertura sintetica (*GB-InSAR: Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar*) si basa su due principi: la sintesi d'apertura e l'interferometria.

La sintesi d'apertura è una tecnica radar che permette di ottenere immagini con risoluzione laterale sfruttando il movimento delle antenne lungo una linea. Nel caso dei radar satellitari, le antenne si muovono lungo un'orbita, nel caso di un'installazione a terra, le antenne si muovono lungo una guida meccanica lineare, ma il principio è lo stesso.

L'interferometria radar si basa sulla coerenza delle immagini radar. In generale, in un'immagine ottenuta con un radar coerente, ciascun pixel contiene due tipi di informazione: informazione sull'ampiezza (come in una immagine fotografica in bianco e nero) e informazione di fase. L'informazione di fase è legata alla distanza tra il radar e il pixel. Purtroppo, a causa della periodicità della fase, l'informazione di fase non permette di ottenere il valore assoluto della distanza, tuttavia può essere efficacemente utilizzata per misurare i piccoli spostamenti del terreno con elevatissima precisione. Tipicamente si misurano spostamenti millimetrici operando a distanza di chilometri. La Figura 1 mostra una foto della strumentazione installata in un sito di test.

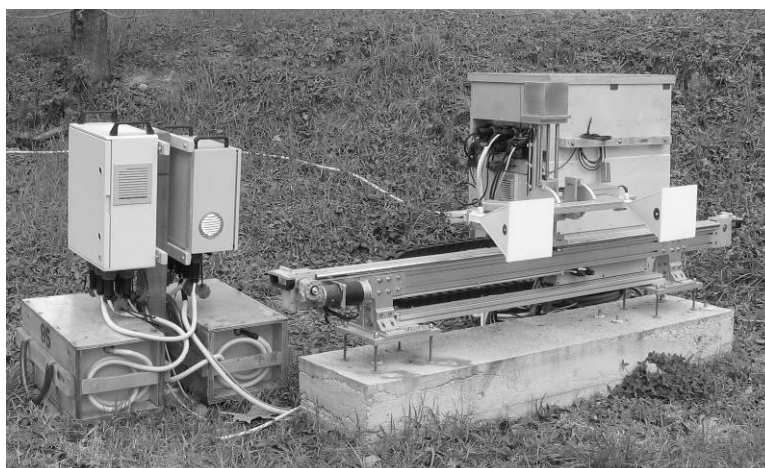


Figura 1 Il radar interferometrico ad apertura sintetica

Monitoraggio di frane

Il monitoraggio di frane mediante interferometria radar da terra è un'applicazione ormai piuttosto consolidata. Le prime pubblicazioni su rivista scientifica risalgono agli anni 2002-2003 (Pieraccini *et al.*, 2002), (Tarchi *et al.*, 2003) e se si riferiscono a ricerche iniziate negli anni 1999-2000. Attualmente gli autori di questa comunicazione hanno condotto oltre venti campagne di misura presso undici differenti siti in Italia e all'estero (Luzi *et al.*, 2004), (Luzi *et al.*, 2006), (Noferini *et al.*, 2005), (Noferini *et al.*, 2006), (Pieraccini *et al.*, 2002), (Pieraccini *et al.*, 2006), (Pieraccini *et al.*, 2006b), (Teza *et al.*, 2007).

Tipicamente, distinguiamo due modalità operative: monitoraggio continuo e monitoraggio discontinuo. Nel primo caso la strumentazione è installata in modo da avere una buona visuale del versante in frana ed è mantenuta in sito per tutta la durata della misura, acquisendo immagini radar con cadenza di una ogni 15-30 minuti a seconda dei parametri di misura impostati. Il monitoraggio in continuo consente di avere la massima coerenza tra un'immagine e l'immagine successiva ed è pertanto in grado di fornire accurate mappe di spostamento del versante. A titolo d'esempio la Figura 2 mostra una mappa di spostamento proiettata sul modello digitale del terreno (DEM) del versante. La strumentazione è collocata al vertice delle due linee nere che delimitano il cono di vista. Gli spostamenti sono indicati in toni di grigio come specificato nella barra orizzontale. L'immagine inferiore (b) mostra lo spostamento misurato in uno dei punti del versante nella zona in cui la velocità è più elevata. Si noti che il radar è in grado di misurare solo la componente degli spostamenti lungo la direzione di vista. I valori di spostamento sono stati più volte confrontati con misure indipendenti eseguite con teodolite e mire ottiche ottenendo un ottimo accordo. L'accuratezza di misura nominale della strumentazione radar è del decimo di millimetro operando a distanza fino a qualche chilometro. Tuttavia l'effettiva accuratezza della misura di spostamento dipende dall'efficacia della correzione degli effetti atmosferici. Infatti, la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche in aria dipende dall'umidità, la temperatura e la pressione. Il problema delle correzioni atmosferiche è comune a tutti gli strumenti a tempo di volo. Nel caso del radar ad apertura sintetica, l'ampio cono di vista permette di individuare numerosi punti, supposti stabili, dove eseguire i calcoli per le correzioni meteo. In condizioni operative tipiche, in condizioni ambientali non troppo severe, è possibile ottenere un'accuratezza dell'ordine del millimetro operando a circa 1 chilometro di distanza. La portata dello strumento è teoricamente di diversi Km, tuttavia, sulla base della nostra esperienza, abbiamo osservato che oltre 2-3Km gli effetti atmosferici risultano difficili da correggere per mantenere un'accuratezza di misura migliore del centimetro.

Una modalità di misura alternativa è il monitoraggio discontinuo. Molte frane hanno spostamenti lenti, dell'ordine di pochi centimetri all'anno. In questi casi spesso non è economicamente giustificato mantenere una strumentazione installata nel sito, ma è preferibile eseguire singole acquisizioni a distanza di mesi. In questi casi è assolutamente

indispensabile lasciare in sito delle placche di ancoraggio per essere in grado di riposizionare la strumentazione il più possibile esattamente alla misura precedente. Un parametro critico per la pianificazione di questo tipo di monitoraggio è l'intervallo di tempo tra una misura e quella successiva. Con il passare del tempo lo scenario si decorrela e la misura, nei pixel decorrelati, risulta non più possibile. Qualunque cambiamento dei pixel dello scenario, diverso da uno spostamento rigido, produce decorrelazione: i cambiamenti della vegetazione, deformazioni plastiche, erosione del suolo.. Un certo grado di decorrelazione è ovviamente inevitabile e non produce problemi alla misura, tuttavia quando tale decorrelazione supera un dato livello la misura risulta non più possibile. Il tempo di decorrelazione dipende fortemente dallo scenario. Una frana di roccia può avere un tempo di decorrelazione di molti mesi (anche 6-7 mesi), una frana di fango pochi giorni. In generale, le frane più lente hanno tempo di decorrelazione più lungo. In ogni caso l'effetto della decorrelazione non è uniforme nello scenario di misura. Pixel stabili si possono trovare anche in scenari molto decorrelati, in definitiva l'effetto della decorrelazione può essere visto come una riduzione dei pixel dove è possibile eseguire misure di spostamento. Nella maggior parte dei monitoraggi discontinui, a causa della decorrelazione tra un'immagine e quella successiva presa a distanza di tempo, il risultato finale non è una mappa continua (come in Figura 2), ma un insieme di punti non contigui.

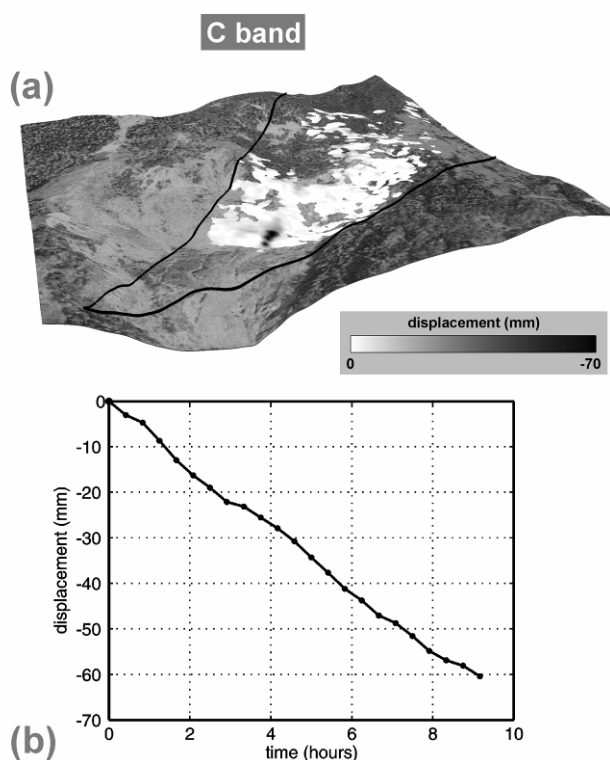


Figura 2 mappa degli spostamenti e spostamento puntuale

Le mappe di spostamento prodotte del radar interferometrico vengono visualizzate proiettandole sul modello digitale del terreno (DEM). In molti casi è possibile reperire un DEM realizzato indipendentemente dalla misura radar, ma spesso tale DEM è a bassa risoluzione oppure non abbastanza recente. Il movimento dei versanti in frana, infatti, tende a rendere i DEM obsoleti dopo pochi mesi. La possibilità di ottenere un DEM direttamente mediante il radar è quindi di grande utilità. L'interferometria radar può realizzare DEM purché si possa ottenere immagini radar dello scenario da punti di vista leggermente diversi (Pieraccini *et al.*, 2001) (Nico *et al.*, 2005). Per questa ragione i radar interferometrici oggetto di questa comunicazione sono provvisti di un sistema meccanico in grado di traslare verticalmente le antenne allo scopo di ottenere, a breve distanza di tempo, due immagini dello stesso scenario separate da una *baseline* di qualche decina di centimetri, ovvero da due punti di vista leggermente diversi. L'accuratezza dei DEM così realizzati è tipicamente di qualche metro in elevazione a distanza di 1-2 chilometri.

Monitoraggio dei ghiacciai

Il monitoraggio dei ghiacciai alpini è diventata un'esigenza fortemente sentita negli ultimi anni. I ghiacciai alpini sono, infatti, estremamente importanti come indicatori dei mutamenti climatici. Alcuni ghiacciai, possono inoltre costituire una minaccia per gli insediamenti a valle in caso di scioglimento troppo rapido. A questo proposito l'interferometria radar da terra può essere uno strumento molto potente per tenere sotto costante osservazione i ghiacciai. Nell'ambito del

progetto GALAHAD un radar interferometrico è stato installato sul ghiacciaio “Belvedere” sulla parete est del Monte Rosa. La figura 3 mostra l’installazione.

Dal punto di vista logistico, si è trattato di una campagna molto impegnativa. Il primo problema è stato la fornitura di energia elettrica. L’impiego di gruppi elettrogeni a benzina o gasolio era sconsigliato sia per ragioni ambientali e di sicurezza. Le fonti energetiche alternative sono tipicamente poco affidabili pertanto abbiamo deciso per una combinazione di pannelli solari, turbine eoliche e un’idroturbina per piccoli salti. Un’altro importante problema è stato la realizzazione di un controllo remoto affidabile che consentisse la sorveglianza della strumentazione e il flusso continuo dei dati verso il server presso il Laboratorio dell’Università di Firenze che gestiva la campagna.

La Figura 4 mostra la mappa di spostamento del flusso del ghiacciaio proiettata sull’ortofoto dopo 13 ore di misura. Si noti che il radar è in grado di misurare solo la componente dello spostamento lungo la direzione di vista tra il pixel e il radar stesso. Tale componente non separa l’effettivo spostamento orizzontale del ghiaccio dall’ablazione.



Figura 3 Installazione radar presso il ghiacciaio “Belvedere” sul Monte Rosa

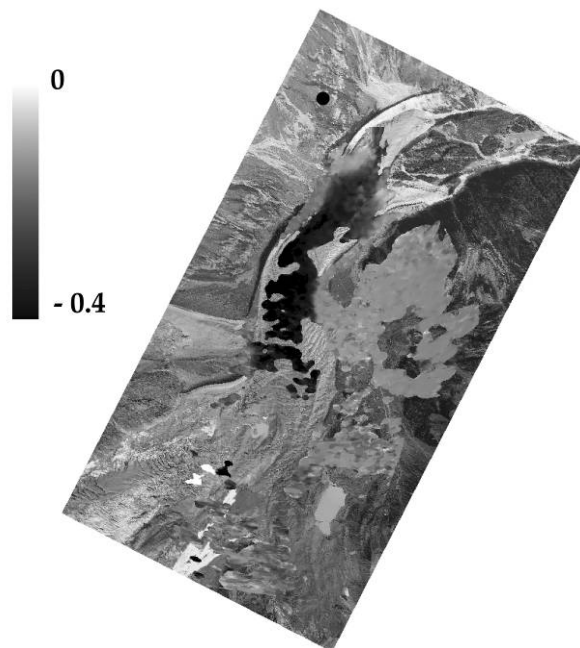


Figura 4 Mappa degli spostamenti sull’ortofoto dopo 13 ore di misura. La posizione del radar è indicata con un cerchio nero. La scala è in metri.

Monitoraggio di versanti innevati

Valanghe e slavine sono un ricorrente rischio nelle zone di montagna nei periodi invernali. La popolarità degli sport invernali ha aumentato la sensibilità a questo tipo di rischio. L'applicazione più recente dell'interferometria da terra è, appunto, il monitoraggio del manto nevoso. A tale scopo, nell'ambito del progetto GALAHAD, negli inverni 2005-2006 e 2006-2007 un radar interferometrico ha operato in continua presso un sito di test in Austria (Figura 5).

In generale, la neve asciutta è trasparente alle onde elettromagnetiche, quindi le onde emesse dal radar sono in grado di penetrare attraverso il manto nevoso fino al suolo sottostante. Tuttavia, sebbene trasparente, la neve ha un indice di rifrazione diverso dall'aria, in altre parole le onde elettromagnetiche attraversano il manto nevoso secondo un percorso come in Figura 6 e subiscono un ritardo che può essere misurato come una variazione nella fase del segnale riflesso.



Figura 5 installazione radar presso Lizum in Austria

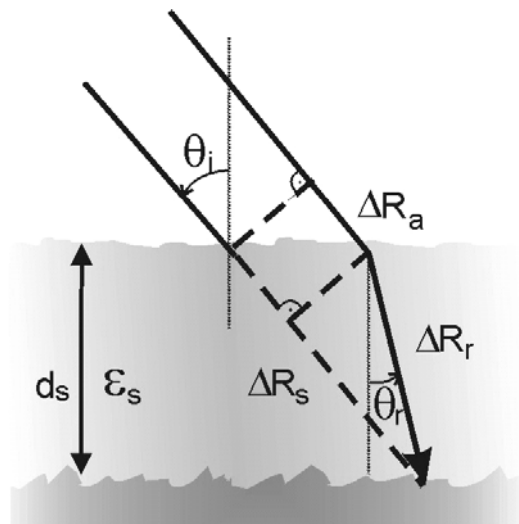


Figura 6 monitoraggio del manto nevoso mediante interferometria radar

Purtroppo, malgrado la semplicità del principio, l'effettivo impiego della tecnica necessita la soluzione di alcuni problemi ancora aperti. Innanzi tutto, per angoli di incidenza alti, come è tipico per radar installati a terra, la relazione tra fase e la quantità neve espressa dal parametro SWE (*Snow Water Equivalent*) non è diretta, ma richiede di determinare indipendentemente lo spessore della neve e il suo indice di rifrazione. Un altro problema è l'eventuale presenza di acqua allo stato liquido che non è trasparente alle onde elettromagnetiche e che può alterare sensibilmente i risultati delle misure.

Conclusioni

L'interferometria radar da terra ha oggi diverse e importanti applicazioni. L'impiego di tale tecnica per il monitoraggio di frane è ormai una applicazione piuttosto consolidata. Il monitoraggio dei ghiacciai è un'altra applicazione che ha dato ottimi risultati. L'impiego per il monitoraggio del manto nevoso è ancora nella fase di verifica di principio, ma i risultati di due prolungate campagne di misura sono incoraggianti.

Acknowledgement

This work has been supported by European Commission - 6th Framework Programme - within frame Project N. 018409 GALAHAD: Advanced Remote Monitoring Techniques for Glaciers, Avalanches and Landslides Hazard Mitigation. The radar equipment has been designed and constructed with the support of IDS-Ingegneria dei Sistemi SpA, Pisa (Italy), and it remains the property of this company.

Riferimenti bibliografici

- Guzzetti F. (2000), "Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy", *Engineering Geology*, vol. 58, no. 2, pp. 89-107.
- Luzi G., Pieraccini M., Mecatti D., Noferini L., Guidi G., Moia F., Atzeni C. (2004), "Ground-Based Radar Interferometry for Landslides Monitoring: Atmospheric and Instrumental Decorrelation Sources on Experimental Data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, n. 11, pp. 2454 – 2466.
- Luzi G., Pieraccini M., Mecatti D., Noferini L., Macaluso G., Galgaro A., Atzeni C. (2006), Advances in ground-based microwave interferometry for landslides survey: a case study, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 12, pp. 2331–2350.
- Massaro M. (2003), "Frane e alluvioni il rischio aumenta" *Il Sole 24 Ore*, 26 Maggio 2003, N. 143, pagina 19.
- Nico G., Leva D., Fortuny-Guasch J., Antonello G., and Tarchi D. (2005), "Generation of Digital Terrain Models With a Ground-Based SAR System", *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 1, pp 45-49.
- Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Luzi G., Atzeni C., A. Tamburini, M. Broccolato (2005), "Permanent scatterers analysis for atmospheric correction in Ground Based SAR Interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, No. 7, pp. 1459-1471
- Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Macaluso G., Luzi G., and Atzeni C. (2007), "DEM by Ground Based SAR Interferometry", *IEEE Letters on Geoscience and Remote Sensing*, in press
- Pieraccini M., Luzi G., Atzeni C. (2001), "Terrain Mapping by Ground-Based Interferometric Data", *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, vol 39, pp 2176-2181.
- Pieraccini M., Casagli N., Luzi G., Tarchi D., Mecatti D., Noferini L., and Atzeni C., (2002) "Landslide Monitoring by Ground-Based Radar Interferometry: a field test in Valdarno (Italy)", *International Journal of Remote Sensing*, vol 24, no 6, pp 1385-1391.
- Pieraccini M., Noferini L., Mecatti D., Luzi G., and Atzeni C. (2006), "Long term landslide monitoring by Ground Based SAR Interferometry", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 10, 1893–1905.
- Pieraccini M., Noferini L., Mecatti D., Atzeni C., Teza G., Galgaro A., Zaltron N. (2006 b), "Integration of radar interferometry and laser scanning for remote monitoring of an urban site built on a sliding slope", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 44, Issue 9, pp. 2335 – 2342
- Tarchi D., Casagli N., Fanti R., Leva D., Luzi G., Pasuto A., Pieraccini M., Silvano S. (2003), "Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy", *Engineering Geology*, Vol. 68, pp. 15-30
- Teza G., Atzeni C., Balzani M., Galgaro A., Galvani G., Genevois R., Luzi G., Mecatti D., Noferini L., Pieraccini M., Silvano S., Uccelli F., Zaltron N. (2007), "Ground-based monitoring of high-risk landslides through joint use of laser scanner and interferometric radar", *International Journal of Remote Sensing*, in press
- Schuster R.L. (1996), "Socio-economic significance of landslides," *Landslide, investigation and mitigation*, K.A. Turner and R.L. Schuster, Eds. Special Report, vol. 247, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 12-35.
- Zebker H. A., Rosen P. A., and Hensley S. (1997), "Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps", *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, No. B4, pp 7547-7563.