

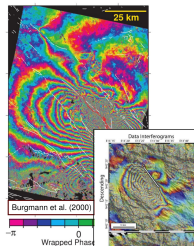
FRAGILE

EARTH-SURFACE MONITORING

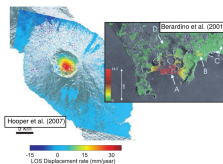
Aspetti tecnici dell'interferometria radar
Benedikt Bayer

Che cosa e' InSAR?

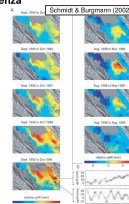
Terremoti



Monitoraggio di vulcani

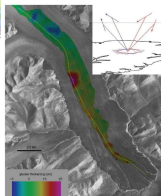


Subsidenza

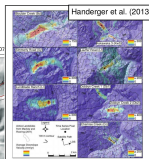
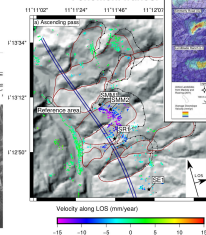


InSAR

Ghiacciai



Fenomeni franosi



Fondamenti di SAR

(Synthetic aperture radar)

Lo spettro elettromagnetico

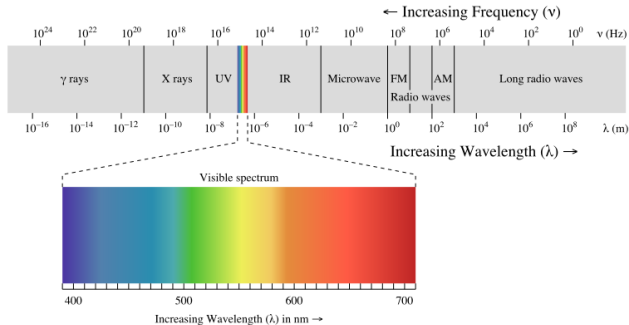
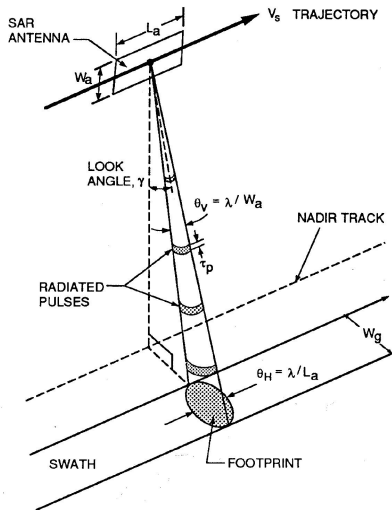


Figure: "EM spectrum". Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg#/media/File:EM_spectrum.svg

Geometria di acquisizione per un' Antenna SAR



SAR: Radar ad apertura sintetica (Synthetic Aperture Radar)

- ▶ Radar ad apertura reale:
 - ▶ Range compression per aumentare la risoluzione nella direzione range.
 - ▶ Risoluzione rimane bassa nella direzione azimuth.
- ▶ Radar ad apertura sintetica:
 - ▶ Range compression per aumentare la risoluzione nella direzione range.
 - ▶ Doppler sharpening per aumentare la risoluzione nella direzione azimuth.
 - ▶ Una cella di risoluzione risulta rettangolare e non quadrata: Ad es. 5 m in azimuth e 20 m in range.

Doppler sharpening

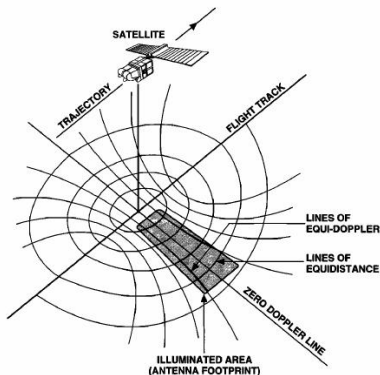
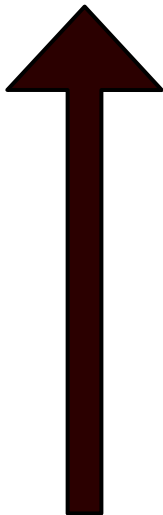


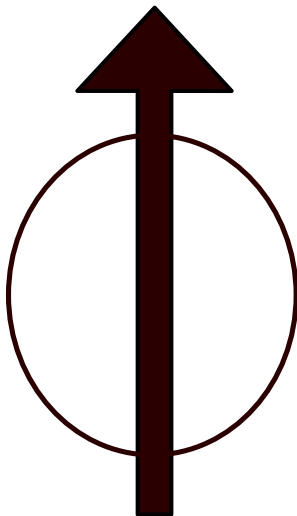
Figure 1. Imaging geometry of a side-looking radar. Two different principles help improve the resolution in a radar image. First, the samples of the returning signal are sorted according to their round trip flight time. Second, the Doppler frequency shift is then used to sort the samples along the direction of the flight. To combine these two principles and optimize resolution in both dimensions, the radar must “look to the side,” perpendicular to its trajectory. Redrawn from *Kovaly* [1976] and *Elachi* [1987].

Preso da Massonet & Feigl (1998): Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface.

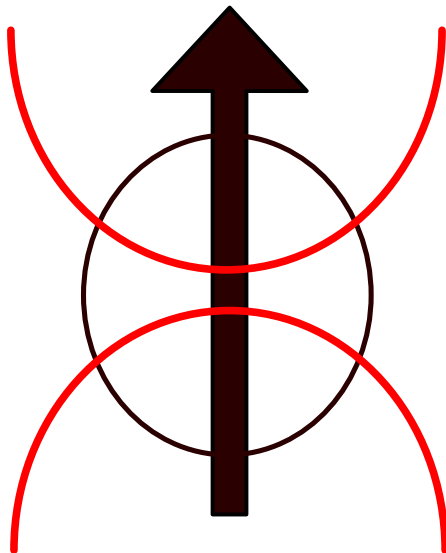
Doppler sharpening



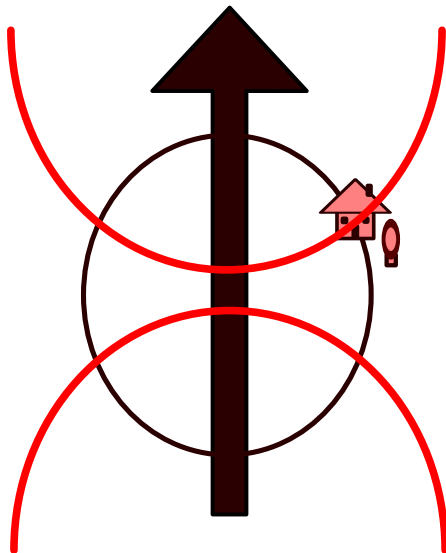
Doppler sharpening



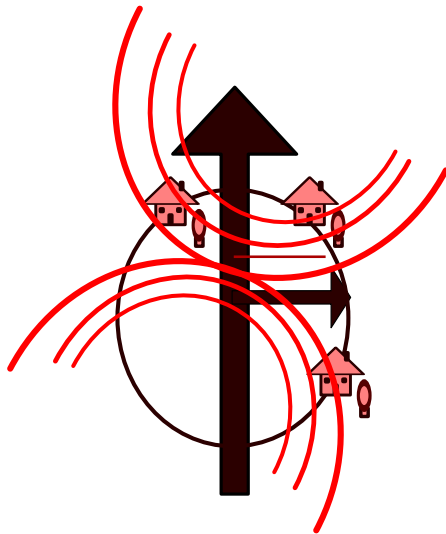
Doppler sharpening



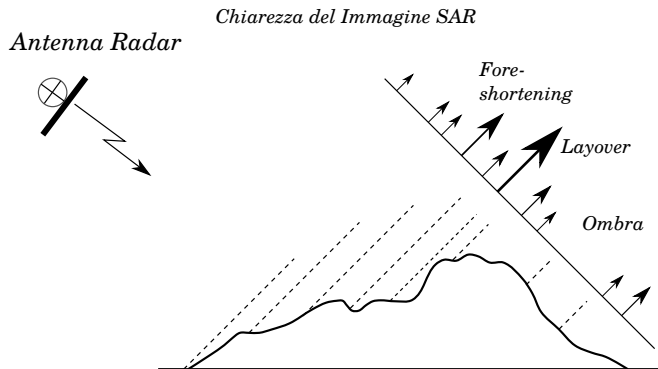
Doppler sharpening



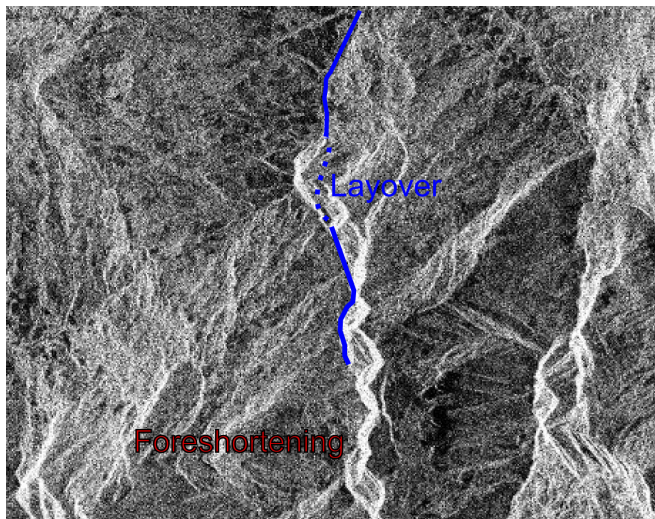
Doppler sharpening

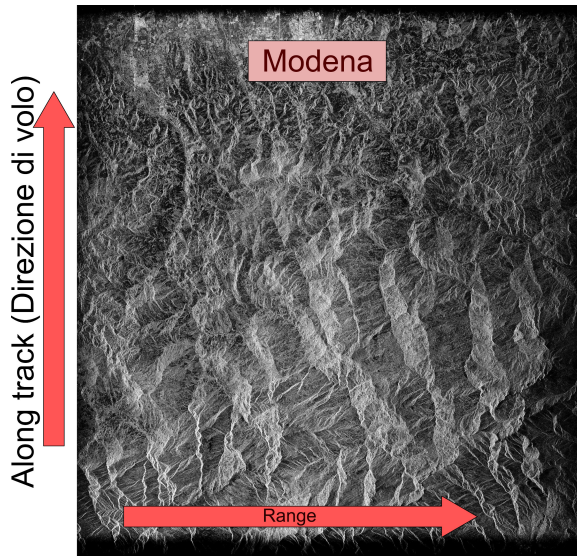


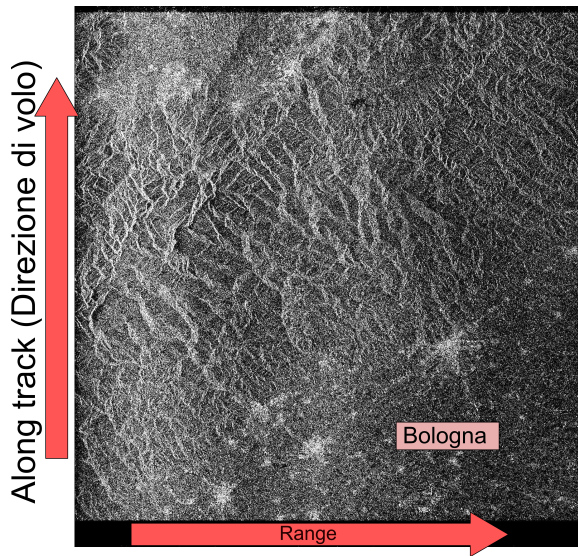
Distorsioni geometriche



Distorsioni geometriche





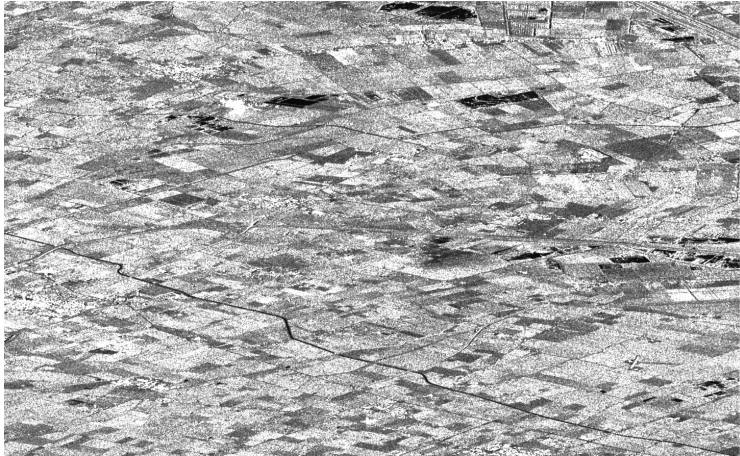


Diversi satelliti

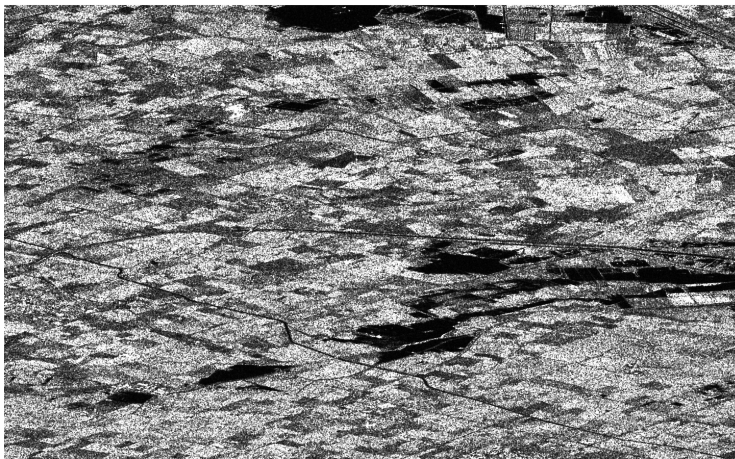
Satellite	λ	Periodo	Risoluzione (az/rg)
ERS 1/2	6cm (Banda C)	1992 - 2010	5 m/20 m
Envisat	6 cm (Banda C)	2002- 2012	5 m/20 m
JERS	23 cm (Banda L)	1992-1998	6 m / 28 m
ALOS	23 cm (Banda L)	2004–2009	6 m /28 m
Terra SAR X	3 cm (Banda X)	dal 2009	3 m /3 m
Cosmo SkyMed	3 cm (Banda X)	dal 2009	3 m /3 m
Sentinel 1	6 cm (Banda C)	dal 2014	20 m/5 m
ALOS 2	23 cm (Banda L)	dal 2014	variabile
NISAR	12/23 cm (S/L)	dal 2025	variabile

Applicazioni interessanti di immagini SAR: Alluvioni

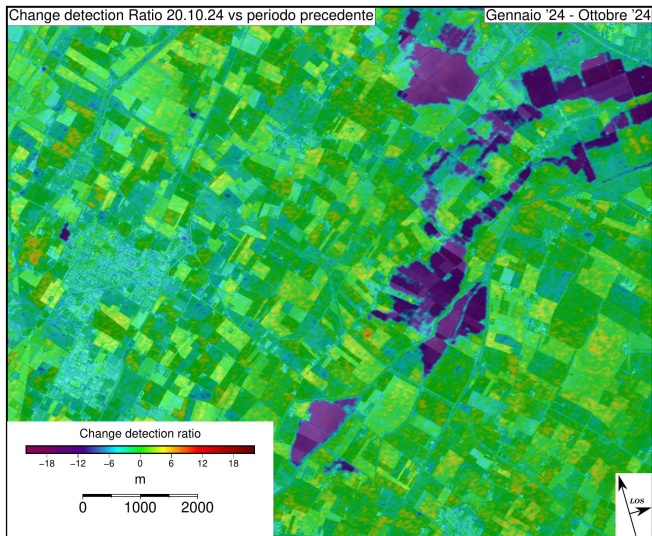
Analisi dell'inondazione di Budrio: Immagine prima dell'alluvione di Ottobre (2024)

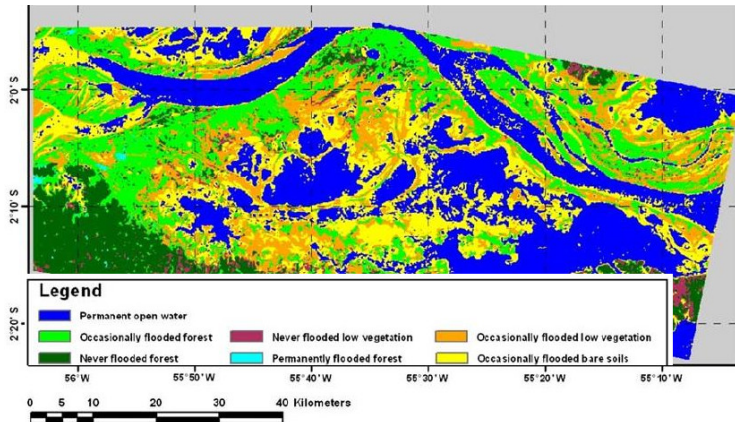


Analisi dell'inondazione di Budrio: Immagine del 20. 10. 2024

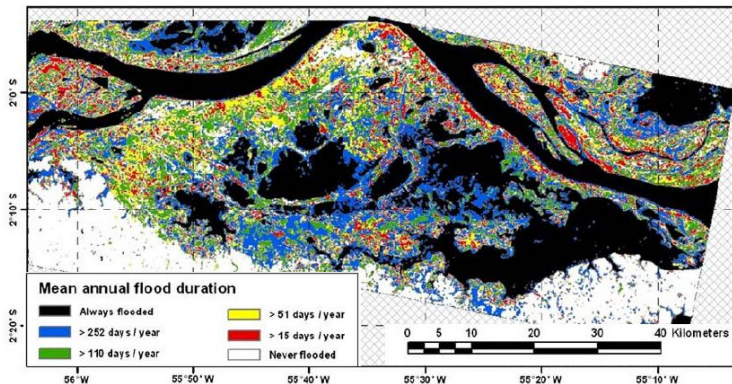


Analisi dell'inondazione di Budrio: Change detection





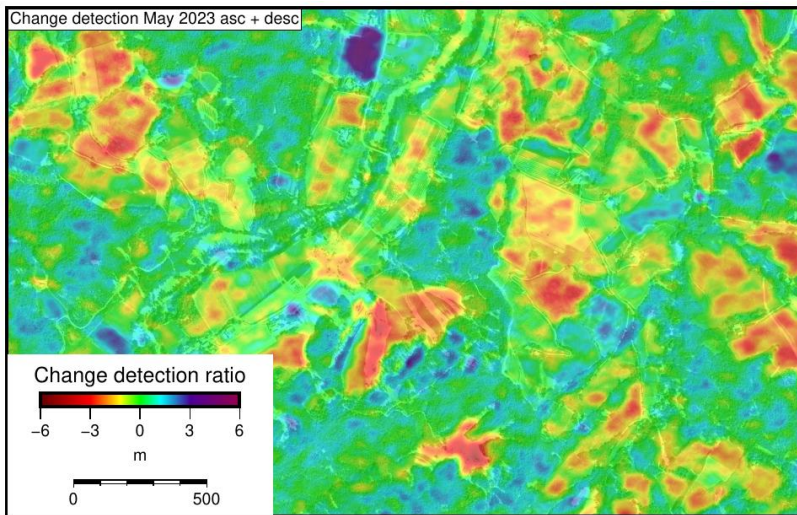
Marinez & Le Toan (2007): Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data – Remote sensing of Environment (108).



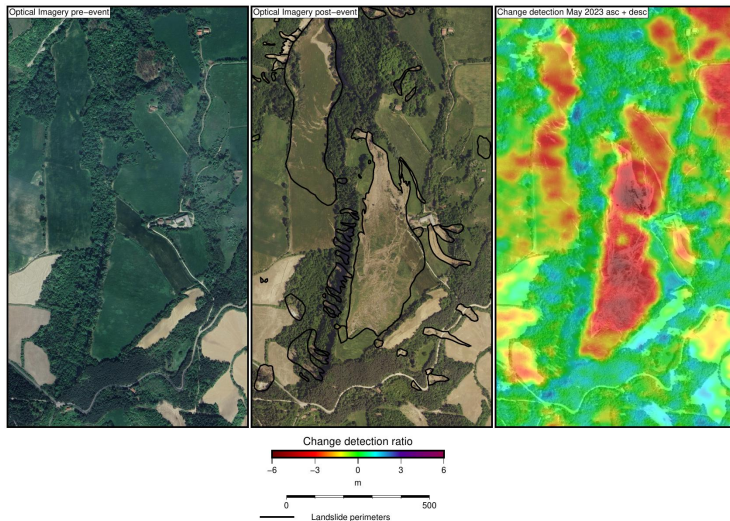
Marinez & Le Toan (2007): Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data – Remote sensing of Environment (108).

Applicazioni interessanti di immagini SAR: Frane rapide

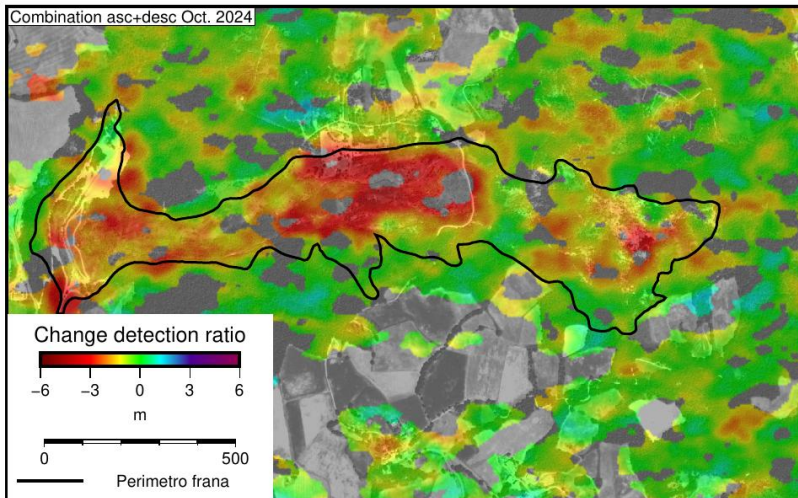
Evento Maggio 2023: Change detection a Casola Val Senio



Evento Maggio 2023: Change detection a Casola Val Senio



Frana di San Benedetto Val di Sambro: Change detection

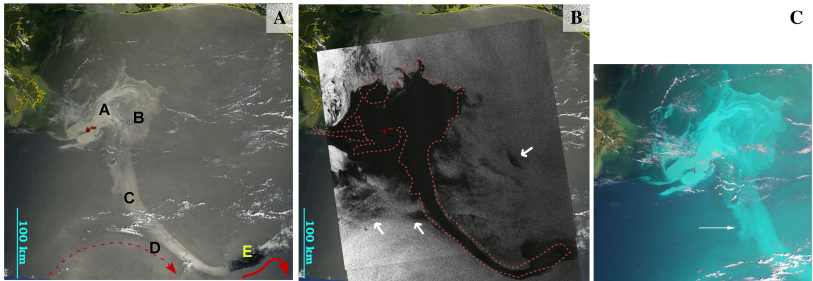


Frana di San Benedetto Val di Sambro: Change detection



Applicazioni interessanti di immagini SAR: Oil spills

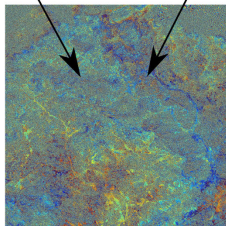
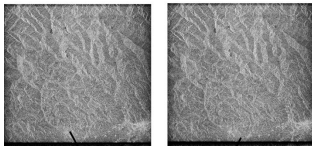
Radarsat Deep Water Horizon.



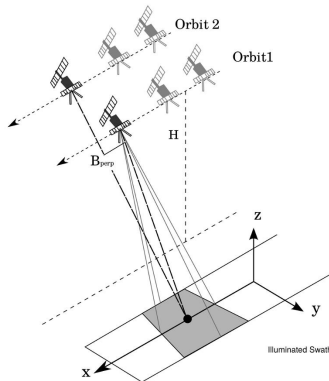
Leifer et al. (2012): State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill – Remote sensing of Environment (124).

Fondamenti di InSAR

SAR image 2 SAR image 1



Interferogram



Simplified from Curlander (1996)
and Rosen et al. (2000)

La fase interferometrica

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{defo} + \Delta\phi_{orb} + \Delta\phi_{atm}$$

$$\Delta\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{-B_{perp}h}{R \sin \theta} \right)$$

$$DEM \Rightarrow \Delta\phi_{\epsilon_h} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{-B_{perp}\epsilon_h}{R \sin \theta} \right)$$

$$\Delta\phi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\vec{D} \cdot \vec{l} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{-B_{perp}\epsilon_h}{R \sin \theta} + \left(\vec{D} \cdot \vec{l} \right) \right]$$

$\Delta\phi_{orb}$ = Facile da stimare

$\Delta\phi_{atm}$ = Difficile da stimare

λ = Lunghezza d'onda

R = Distanza satellite-terra

B_{perp} = Perpendicular baseline

θ = Angolo di incidenza

$\vec{D}$ = Vettore di deformazione

$\vec{l}$ = Vettore della linea di vista

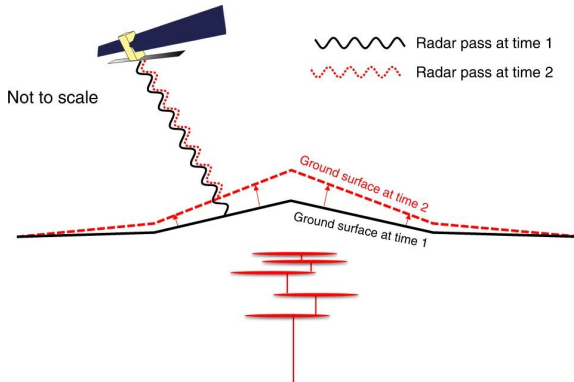
Concetti importanti dell'interferometria radar

1. Ambiguità di fase: InSAR misura di base differenze di fase da $-\pi$ a π radianti.
2. InSAR è una tecnica relativa: L'operatore deve scegliere un'area di riferimento stabile.
3. InSAR misura differenze di fase lungo la linea di vista, che possono significare un avvicinamento o un allontanamento del bersaglio lungo la linea di vista.

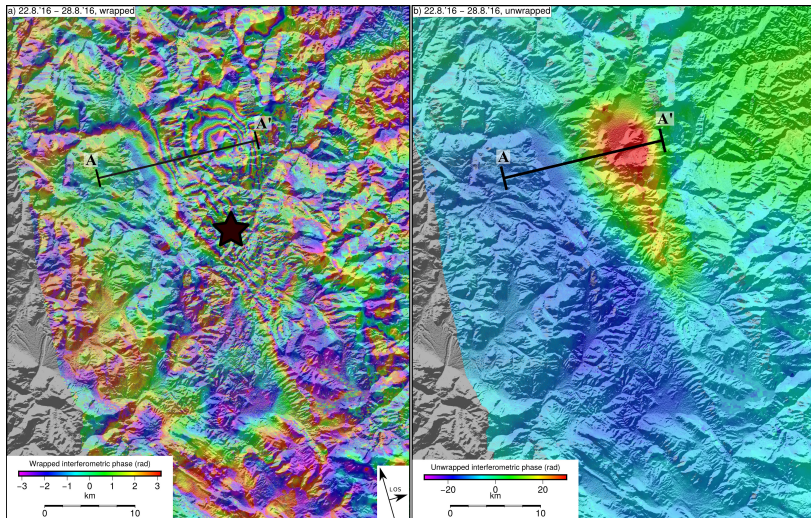
Concetti importanti dell'interferometria radar

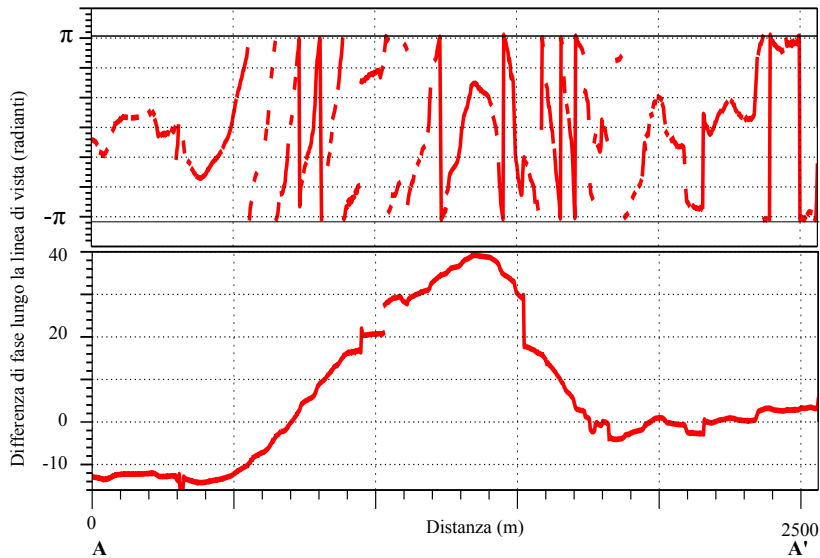
1. **Ambiguità di fase: InSAR misura di base differenze di fase da $-\pi$ a π radianti.**
2. InSAR è una tecnica relativa: L'operatore deve scegliere un'area di riferimento stabile.
3. InSAR misura differenze di fase lungo la linea di vista, che possono significare un avvicinamento o un allontanamento del bersaglio lungo la linea di vista.

InSAR misura frazioni di lunghezza d'onda

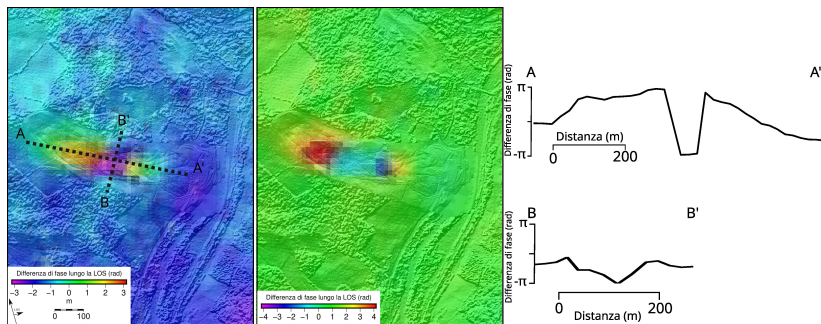


Preso da Biggs and Wright 2020: How satellite InSAR has grown from opportunistic science to routine monitoring over the last decade, *Nature communications* (11)

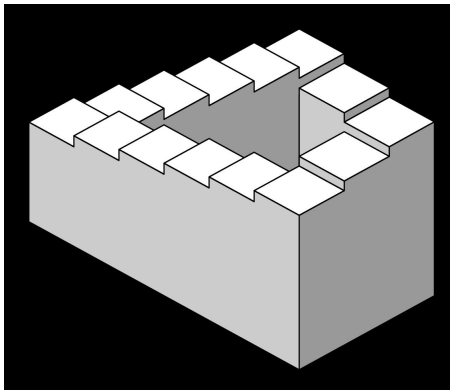




Possibilita' di problemi legati a unwrapping



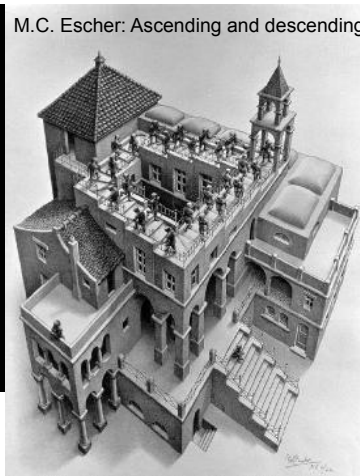
Analogie conosciute



Penrose stairs

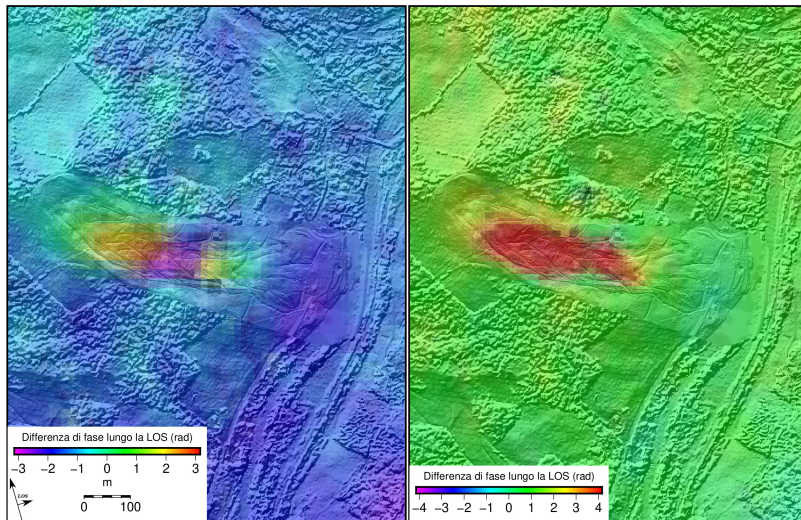
Preso da Wikipedia

M.C. Escher: Ascending and descending



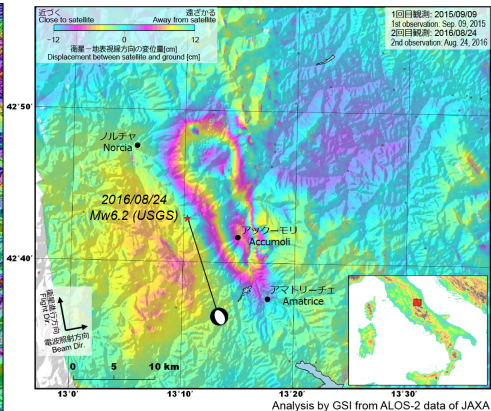
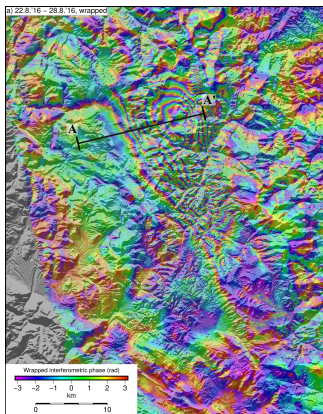
Curtis W. Chen (2001): Statistical-Cost Network-Flow approaches to two dimensional

Possibilita' di risolvere problemi legati a unwrapping



Ambiguity' di fase dipende da λ

Sentinel: $\lambda = 56$ mm, ALOS2: $\lambda = 230$ mm



Preso da: <https://www.gsi.go.jp/cais/topic160826-index-e.html>

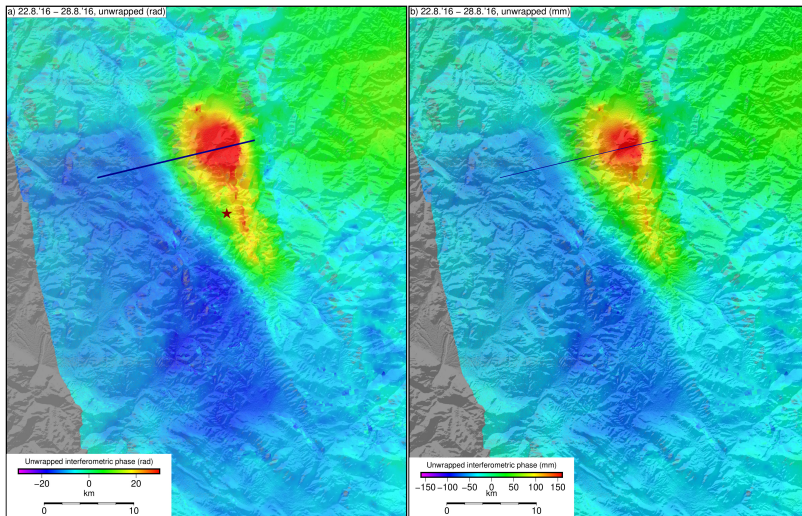
Concetti importanti dell'interferometria radar

1. **Ambiguità' di fase: InSAR misura di base differenze di fase da $-\pi$ a π radianti.**

Per tradurre in deformazioni in millimetri:

$$D_{mm} = D_{rad} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} [mm]$$

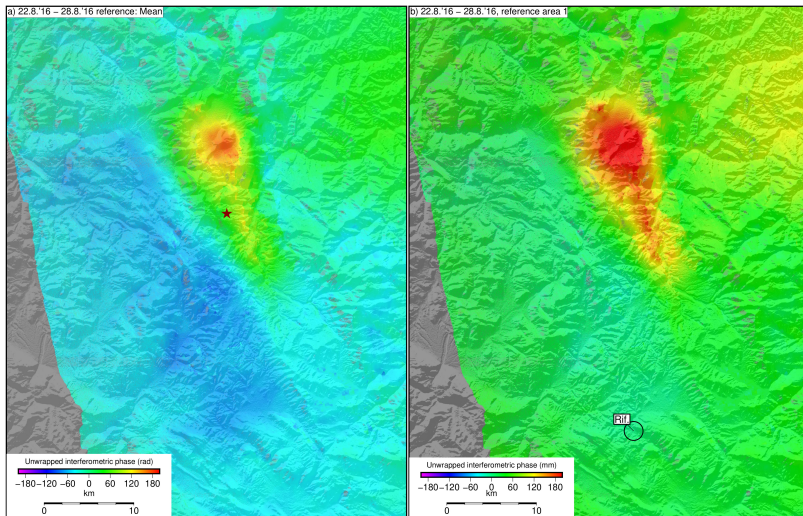
Da radianti a mm



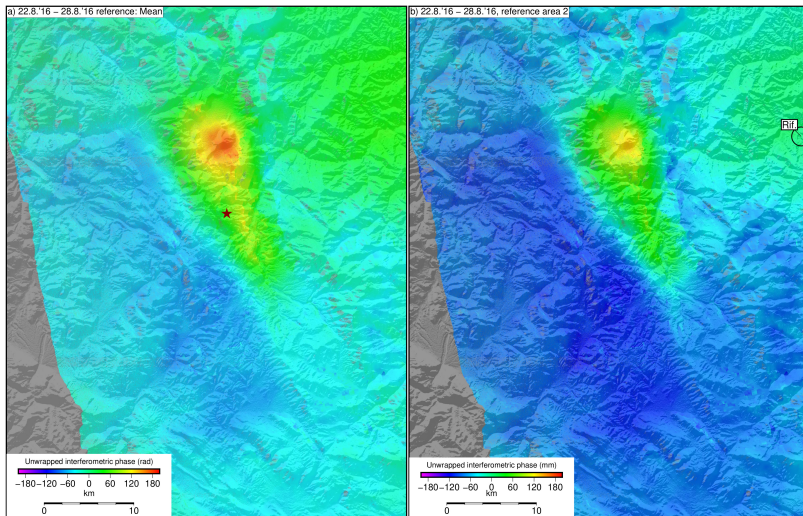
Concetti importanti dell'interferometria radar

1. Ambiguità di fase: InSAR misura di base differenze di fase da $-\pi$ a π radianti.
2. **InSAR è una tecnica relativa: L'operatore deve scegliere un'area di riferimento stabile.**
3. InSAR misura differenze di fase lungo la linea di vista, che possono significare un avvicinamento o un allontanamento del bersaglio lungo la linea di vista.

InSAR e' una tecnica relativa



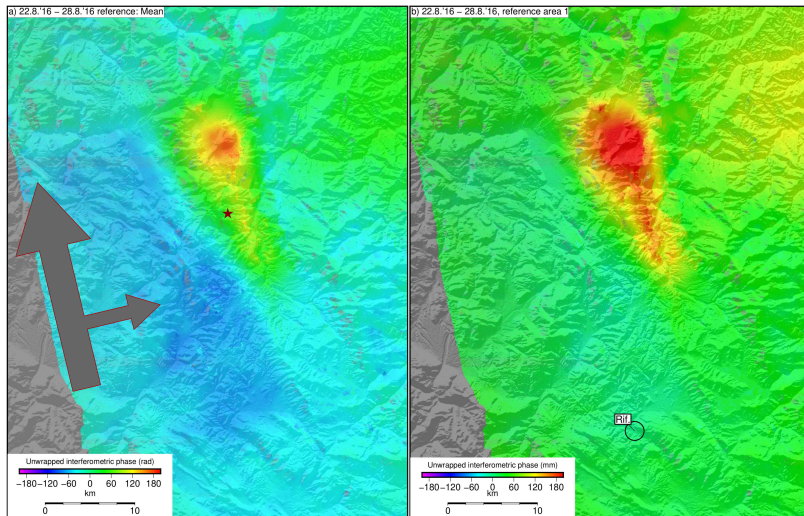
InSAR e' una tecnica relativa



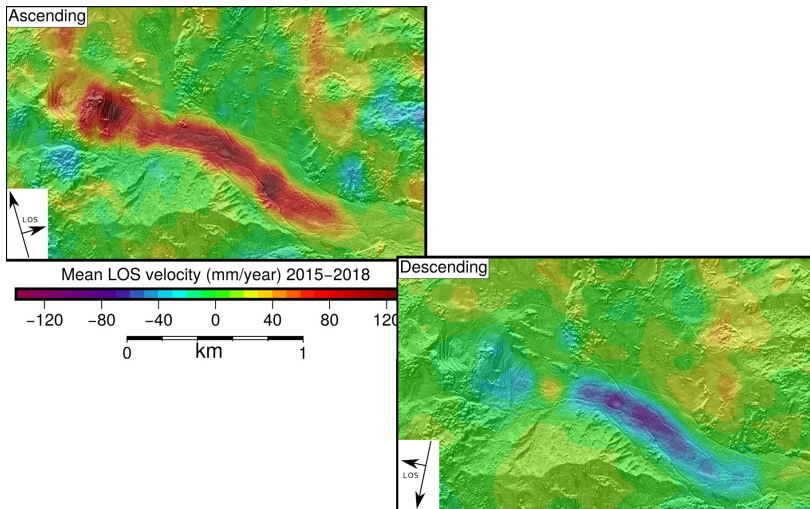
Concetti importanti dell'interferometria radar

1. Ambiguità di fase: InSAR misura di base differenze di fase da $-\pi$ a π radianti.
2. InSAR è una tecnica relativa: L'operatore deve scegliere un'area di riferimento stabile.
3. **InSAR misura differenze di fase lungo la linea di vista, che possono significare un avvicinamento o un allontanamento del bersaglio lungo la linea di vista.**

InSAR misura differenze di fase lungo la LOS



InSAR misura differenze di fase lungo la LOS



Decomposizione orizzontale e verticale

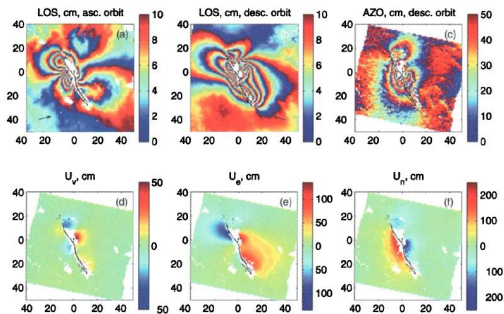
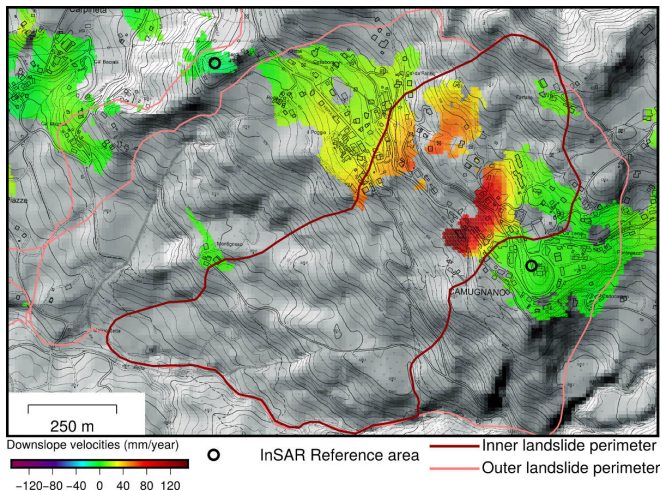


Figure 1. (a) Interferogram for the time period 99/11/21-95/11/12, ascending orbit. (b) Interferogram for the time period 99/10/20-99/09/15, descending orbit. (c) Azimuthal offsets, descending orbit. Arrows show the look direction from the satellite to the ground. (d)-(f) Up, East, and North components of the surface displacement field, respectively, obtained from the InSAR data. In all figures coordinates are in kilometers, with origin corresponding to the epicenter of the Hector Mine earthquake (116.27°W, 34.595°N). Black wavy lines denote the geologically mapped surface rupture (data courtesy of K. Kendricks, USGS).

Preso da: Fialko (2001): The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 MW7.1

Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations. Geophysical Research Letters

Proiezioni lungo la massima pendenza



Domande da porsi per la corretta interpretazione

- ▶ Formalita':
 - ▶ Scala?
 - ▶ Direzione di volo e look vector del satellite?
 - ▶ Convenzioni di segno?
 - ▶ Scala di colori?
 - ▶ Linea di vista oppure un altro tipo di sistema di coordinate?
- ▶ Caratteristica del segnale:
 - ▶ Valori minimi e massimi?
 - ▶ Distribuzione spaziale della differenza di fase?
 - ▶ Punto stabile?

Limitazioni principali dell'interferometria radar

1. Componenti della fase interferometrica non dovute a deformazione.
2. Decorrelazione – Perdita del segnale interferometrico.
3. Errori legati al processing stesso, ad esempio unwrapping.

Limitazioni principali dell'interferometria radar

1. **Componenti della fase interferometrica non dovuto a deformazione.**
2. Decorrelazione – Perdita del segnale interferometrico.
3. Errori legati al processing stesso, ad esempio unwrapping.

La fase interferometrica

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{defo} + \Delta\phi_{orb} + \Delta\phi_{atm}$$

$$\Delta\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{-B_{perp}h}{R \sin \theta} \right)$$

$$\text{DEM} \Rightarrow \Delta\phi_{\epsilon_h} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{-B_{perp}\epsilon_h}{R \sin \theta} \right)$$

$$\Delta\phi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\vec{D} \cdot \vec{l} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{-B_{perp}\epsilon_h}{R \sin \theta} + \left(\vec{D} \cdot \vec{l} \right) \right] + \Delta\phi_{noise}$$

$$\Delta\phi_{orb} = \textit{semplice}$$

$$\Delta\phi_{atm} = \textit{complicato}$$

$\lambda =$ Lunghezza d'onda

$R =$ Distanza satellite-terra

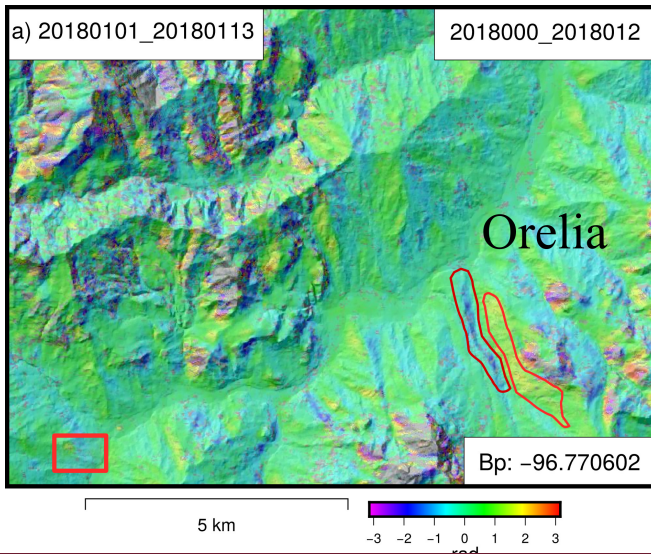
$B_{perp} =$ Baseline perpendicolare

$\theta =$ Angolo di incidenza

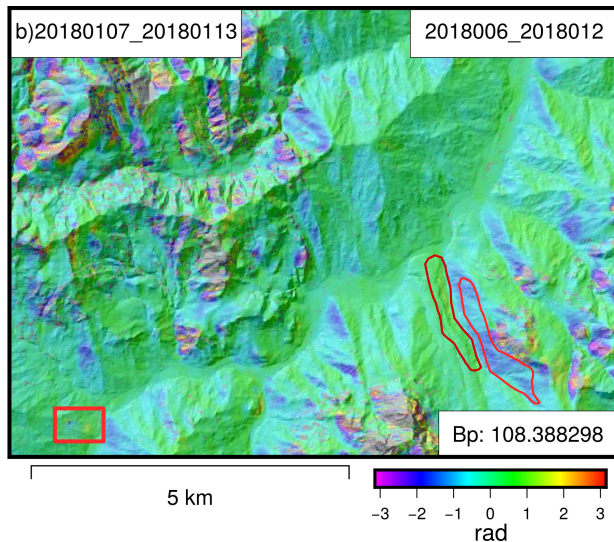
$\vec{D} =$ Vettore di deformazione

$\vec{l} =$ Vettore della linea di vista

Errori topografici residuali

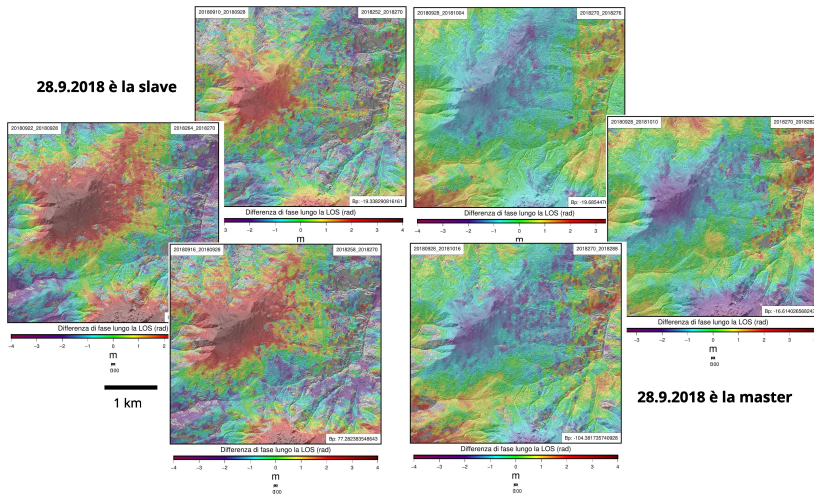


Errori topografici residuali



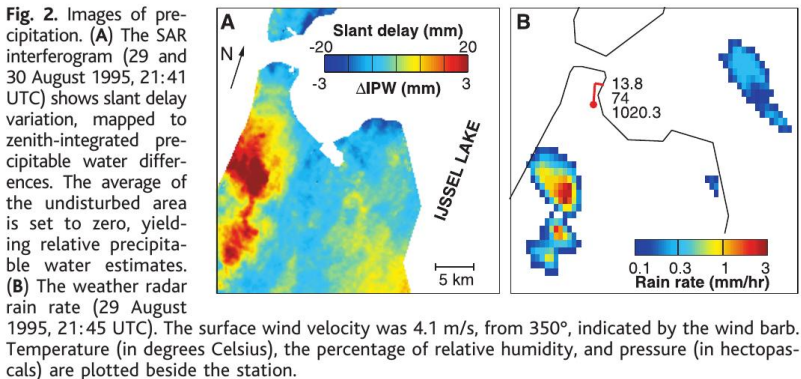
Fase causata da atmosfera

28.9.2018 è la slave



28.9.2018 è la master

Atmosfera da Hanssen (2001)



Atmosfera da Hanssen (2001)

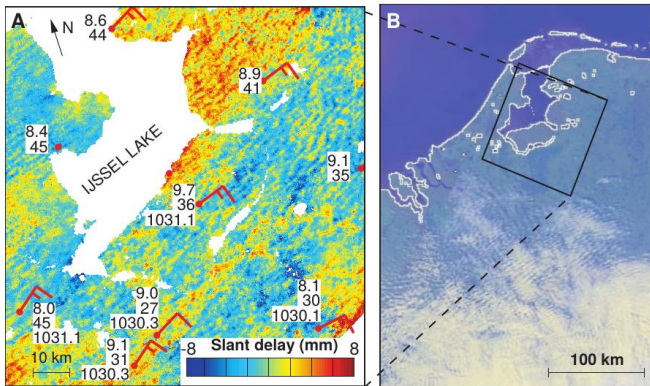
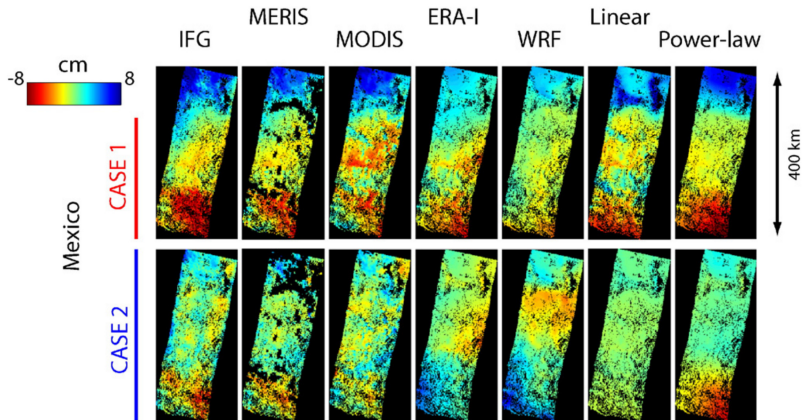
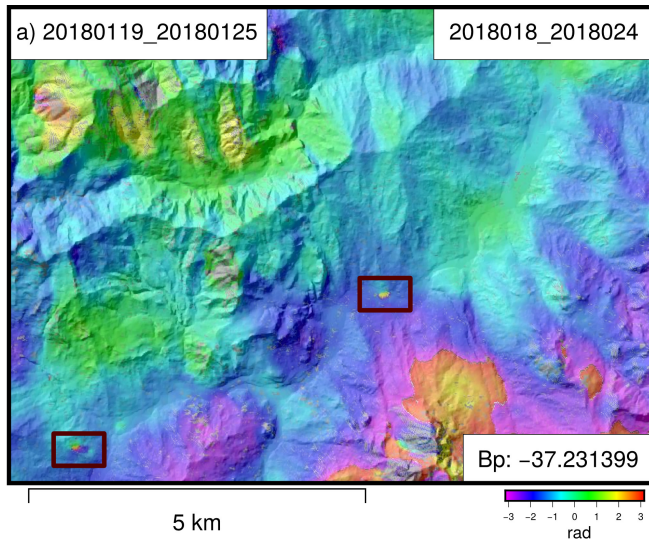


Fig. 4. (A) SAR interferogram of 4 and 5 April 1996, 10:35 UTC, showing "water vapor streets," caused by horizontal convective rolls. Surface station observations of 4 April, 11:00 UTC, are superposed as in Fig. 3B. (B) Radiometer (NOAA-AVHRR, channels 1, 2, and 4) color composite image acquired at 4 April 1996, 12:01 UTC.

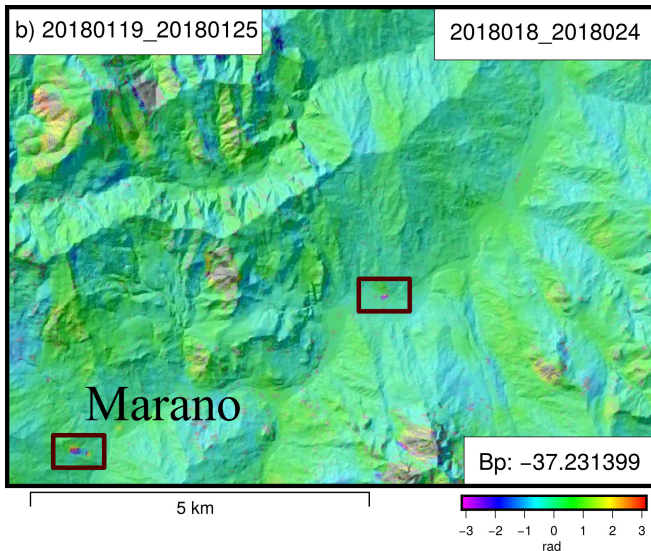
Correzioni atmosferiche da Bekaert et al. (2015)



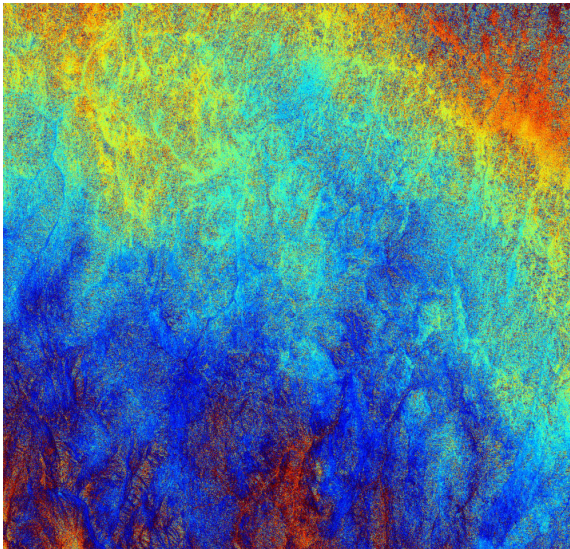
Atmosfera nel bacino del Reno



Correzioni atmosferiche nel bacino del Reno



Orbital ramps

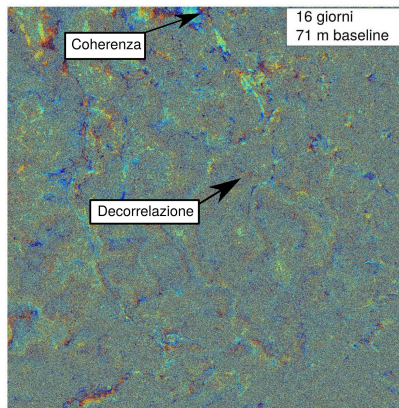


Limitazioni principali dell'interferometria radar

1. Componenti della fase interferometrica non dovuto a deformazione.
2. **Decorrelazione – Perdita' del segnale interferometrico.**
3. Errori legati al processing stesso, ad esempio unwrapping.

Problema Decorrelazione

Cosmo SkyMed (ca. 3 cm)



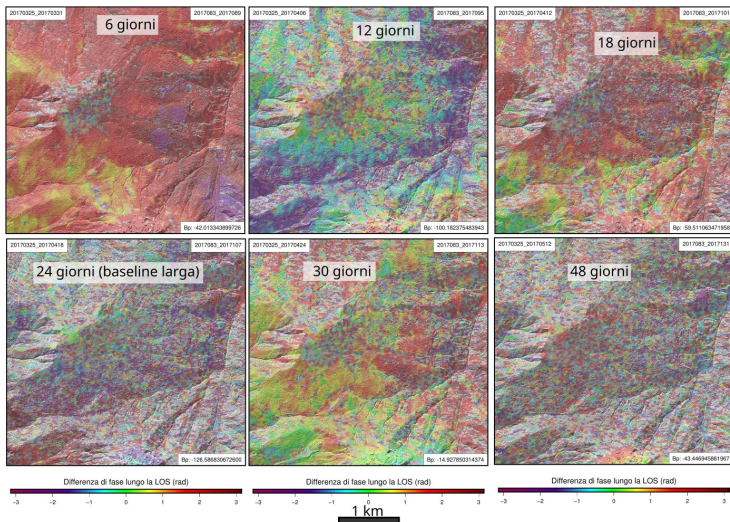
$$\gamma = \gamma_{temp} \times \gamma_{Bperp} \times \gamma_{Doppler}$$

γ_{temp} = Decorrelazione temporale

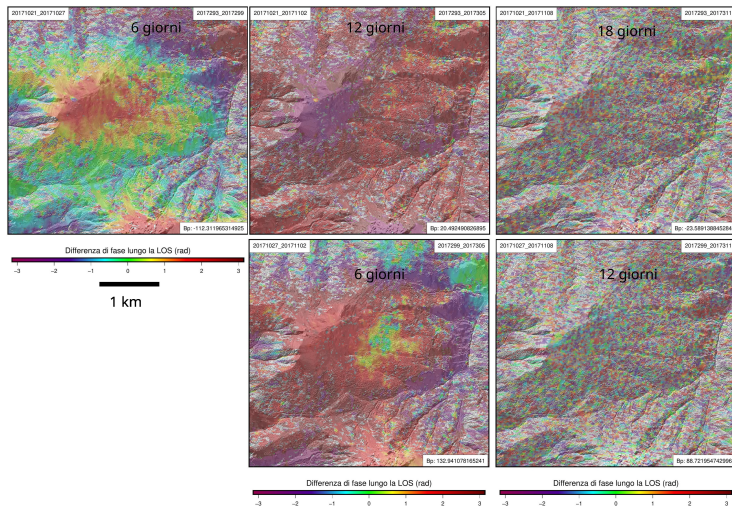
γ_{Bperp} = Decorrelazione di baseline

$\gamma_{Doppler}$ = Decorrelazione Doppler

Decorrelazione temporale e geometrica

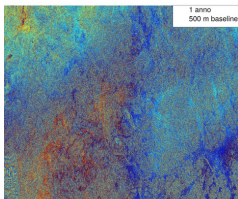


Decorrelazione temporale e geometrica

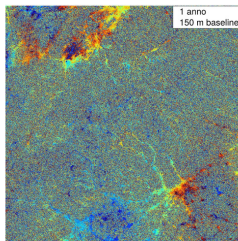


Decorrelazione dipende anche dalla lunghezza d'onda

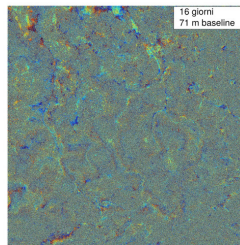
ALOS (L-Band, ca 23 cm)



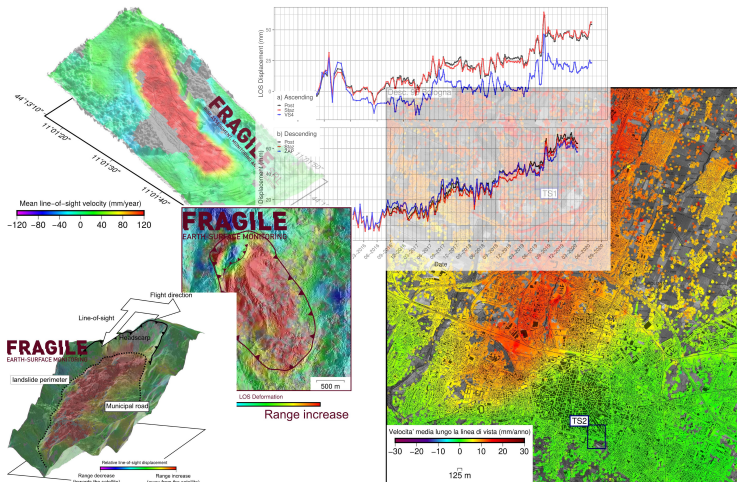
Envisat (C-Band, ca 6 cm)



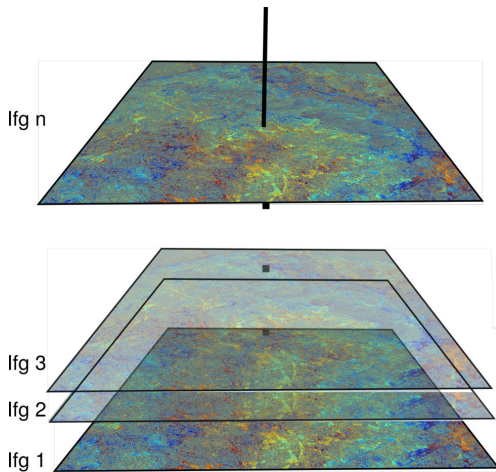
Cosmo SkyMed (ca. 3 cm)



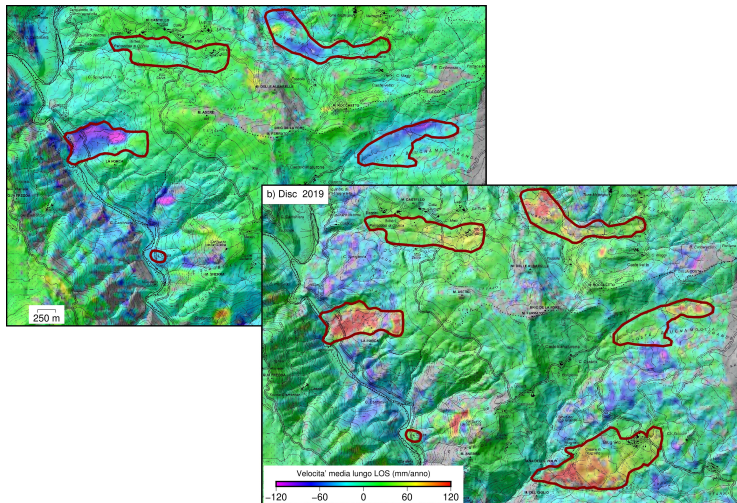
Tecniche di elaborazione avanzate



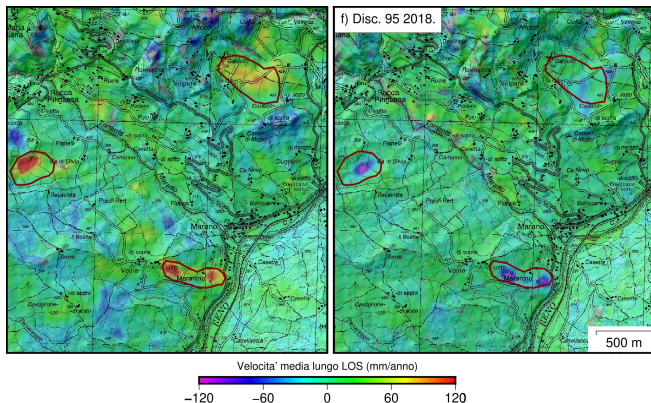
Stacking



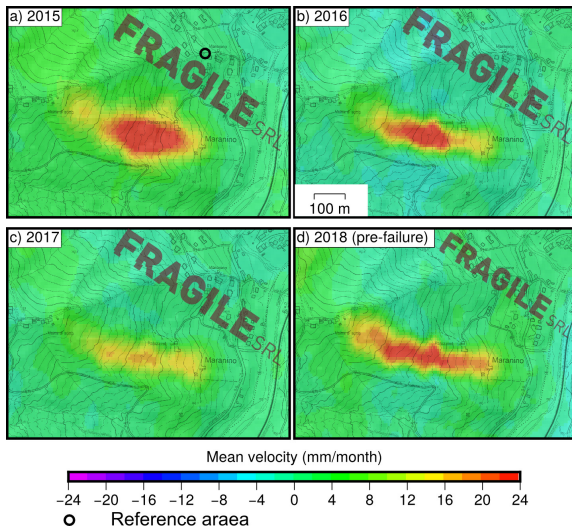
Stack a scala di un bacino



Stack a scala di un bacino



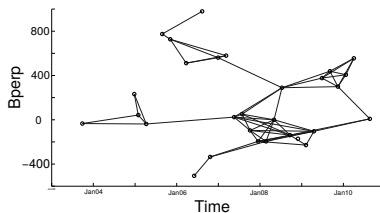
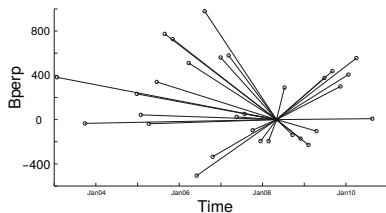
Stack a scala di un versante



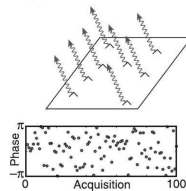
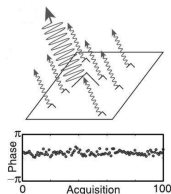
Diverse strategie: PS-InSAR e Small Baseline interferometry

- ▶ PS-InSAR:
 - ▶ Persistent Scatterer Interferometry, Permanent Scatterer InterferometryTM (Polimi).
 - ▶ Una delle prime tecniche di post processing, che ha ricevuto notevole attenzione (Ferretti et al., 1999,2001)
 - ▶ Diverse variazioni sono stati proposti (Adam et al., 2004, Hooper et al., 2006, Hooper et al., 2007)
- ▶ Small Baseline Interferometry (SBAS):
 - ▶ La seconda familie di tecniche di post processing, sviluppato indipendentemente da diversi gruppi (Berardino et al. ,2002, Schmidt Buergermann, 2003, Usai et al. 2003).

Diverse strategie: PS InSAR e Small Baseline interferometry



da Hooper et al. (2007)



Differenze tra PS-InSAR e Small Baselines

- ▶ PS-InSAR:
 - ▶ Tutti gli interferogrammi hanno la stessa master.
 - ▶ Nessun tipo di filtro o multilooking viene applicato
- ▶ Small Baselines:
 - ▶ Diverse master sono possibili.
 - ▶ Ma: Tutte le scene sono co-registrate nella geometria di riferimento di una singola master.
 - ▶ E' consigliato di applicare un filtro (e.g. gaussiano) per ridurre il rumore.
 - ▶ Spesso, si riduce la risoluzione (multilooking) per aumentare il ratio tra segnale e rumore.
- ▶ Potenzialmente sono compatibili.

Vantaggi PS-InSAR (single master)

- ▶ Risolve per spostamenti cumulativi.
- ▶ Atmosfera della scena master puo' essere stimata meglio.
- ▶ Occupa relativamente poco spazio.
- ▶ Relativamente veloce.

Svantaggi PS-InSAR (single master)

- ▶ Diversa sensitività: piccoli spostamenti vengono solo rilevati da interferogrammi con slave distanti nel tempo dalla master, mentre spostamenti alti vengono solo rilevati bene da interferogrammi vicini alla scena master.
- ▶ Spesso coerenza interferometrica è bassa in aree non urbanizzate.
- ▶ Accelerazioni rapide sono difficili da risolvere, in particolare se hanno estensioni ridotte nello spazio.

Vantaggi Small Baseline Interferometria (multi-master)

- ▶ Molto flessibile e puo' essere facilmente ottimizzata per singoli casi.
- ▶ Rileva bene accelerazioni rapide (ad es. in frane).
- ▶ Diverse componenti di errori possono essere stimate molto bene e divise da spostamenti.

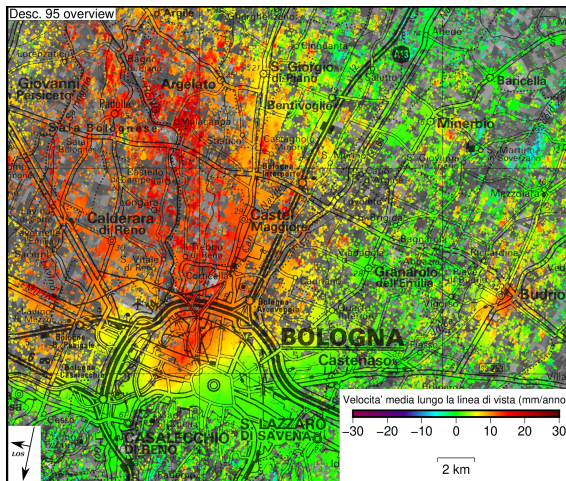
Small Baseline Interferometria (multi-master)

- ▶ Risolve per spostamenti in maniera pseudo incrementale e di conseguenza errori possono essere potenzialmente cumulati.
- ▶ Laborioso.
- ▶ Puo' facilmente occupare molto spazio.

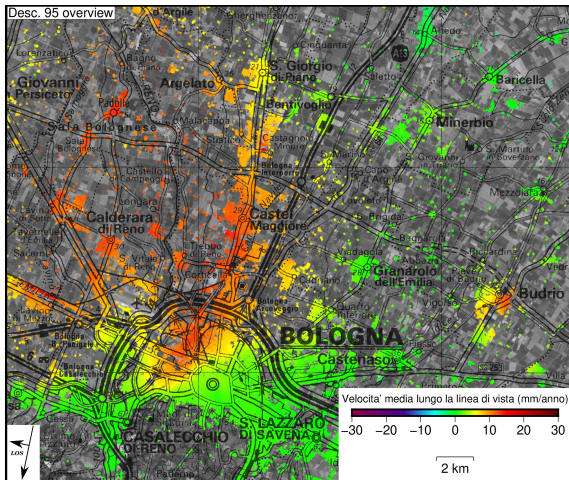
Limitazioni principali dell'interferometria radar

1. Componenti della fase interferometrica non dovuto a deformazione.
2. Decorrelazione – Perdita' del segnale interferometrico.
3. **Errori/incertezze legati al processing stesso**

Scelte durante il processing spesso sono piu' importante della tecnica stessa



Scelte durante il processing spesso sono piu' importante della tecnica stessa



Domande da porsi per la corretta interpretazione

- ▶ Formalita':
 - ▶ Scala?
 - ▶ Direzione di volo e look vector del satellite?
 - ▶ Convenzioni di segno?
 - ▶ Scala di colori?
 - ▶ Linea di vista oppure un altro tipo di sistema di coordinate?
- ▶ Caratteristica del segnale:
 - ▶ Valori minimi e massimi?
 - ▶ Distribuzione spaziale della differenza di fase?
 - ▶ Punto stabile?