

1 Interferometria radar satellitare

I sistemi *radar* (acronimo di *radio detection and ranging*) sono sensori di tipo attivo, ossia inviano un segnale che viene riflesso dalla superficie terrestre e ricevuto dal sensore. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno che di notte. Forniscono immagini elettromagnetiche (a frequenze comprese tra 500 MHz e 10 GHz) della superficie terrestre con risoluzione spaziale fino al metro.

Il principio di funzionamento è il medesimo per tutti i sistemi *radar*: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica (con determinata lunghezza d'onda e frequenza) che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detection*) e, misurando lo sfasamento tra il segnale emesso e quello ricevuto, valutare la distanza (*ranging*) a cui il bersaglio è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*). La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*, ovvero la direzione parallela all'orbita del satellite).

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo θ - detto *off-nadir* - rispetto alla verticale) è detta *slant range* (o più semplicemente *range*) oppure LOS (*Line Of Sight*, linea di vista del satellite).

Le immagini *radar* contengono due tipi di informazione: la fase, indice della distanza sensore bersaglio e l'ampiezza, ossia l'intensità del segnale riflesso dal terreno. Ogni cella di un'immagine contiene entrambe le quantità. L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente riflessa verso il sensore e può essere utilizzata per valutare il cambiamento delle superfici nel tempo (ad esempio la variazione di umidità nei terreni agricoli). La fase rappresenta l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche e viene utilizzata per ricavare, attraverso algoritmi specifici, gli spostamenti del terreno.

I satelliti *radar* permettono di misurare spostamenti superficiali del terreno con precisione millimetrica grazie all'impiego di particolari tecniche di elaborazione dei dati dette "interferometriche". Tra le più recenti e sofisticate, la tecnica *SqueeSAR* consente di individuare dei particolari bersagli al suolo per i quali è possibile stimare il loro spostamento nel tempo. *SqueeSAR* (Ferretti et al., 2011) rappresenta l'evoluzione della tecnica *PSInSAR* (Ferretti et al., 2000; 2001; Colesanti et al., 2003), sviluppata e brevettata nel 1999 dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva nel 2000 a Tele-Rilevamento Europa (TRE) S.r.l., *spin-off* del Politecnico. Le tecniche *PSInSAR* e *SqueeSAR* rappresentano gli strumenti più efficaci per il monitoraggio da remoto, con accuratezza millimetrica, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre.

L'interferometria satellitare si basa sulla misura delle variazioni di fase tra due acquisizioni del satellite nello stesso punto. In Figura 1 viene illustrato in maniera schematica questo principio. Il satellite passa su di un punto acquisendo un segnale la cui fase è dipendente dalla distanza sensore-bersaglio in quel dato momento. In caso di movimento del terreno (in questo caso un abbassamento tettonico) la distanza sensore bersaglio aumenta e di conseguenza la fase subisce una variazione misurabile. Questo tipo di elaborazione viene comunemente chiamata interferometria differenziale (acronimo *DInSAR*).

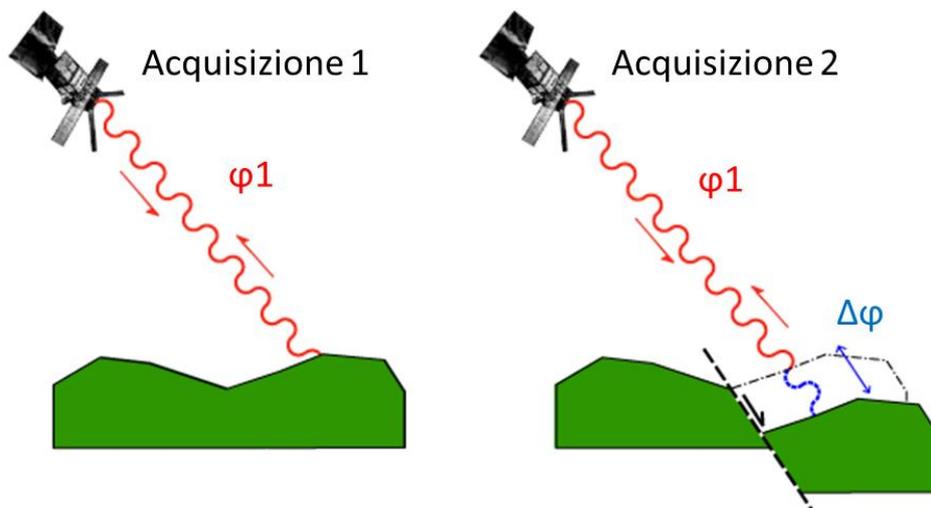


Figura 1 – Principio base dell'interferometria. A sinistra la prima acquisizione nella quale viene misurata la distanza tra il punto a terra e il sensore (fase φ_1). A destra la variazione della distanza sensore-bersaglio a seguito di un terremoto; la fase è pari a $\varphi_1 + \Delta\varphi$ (modificata a partire da http://comet.earth.ox.ac.uk/for_schools_radar4.html).

L'interferometria differenziale si basa sulla misura di fase tra due diverse acquisizioni sulla stessa area. L'obiettivo della tecnica interferometrica differenziale è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi atmosferici o rumore, ovvero di stimare accuratamente la differenza di fase ($\Delta\varphi$) dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra. La tecnica DInSAR permette di valutare le differenze, in termini di spostamento del terreno, intercorse tra due immagini. Il prodotto dell'elaborazione viene chiamato interferogramma.

In Figura 2 è mostrato un esempio di interferogramma elaborato a seguito al terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009. L'interferogramma è caratterizzato da quelle che vengono definite frange interferometriche che rappresentano un ciclo di variazione della fase interferometrica: maggiore è il movimento intercorso tra due immagini, più fitte e numerose saranno le frange. Ognuna di esse equivale ad uno spostamento di 2.8 cm nell'interferogramma mostrato.

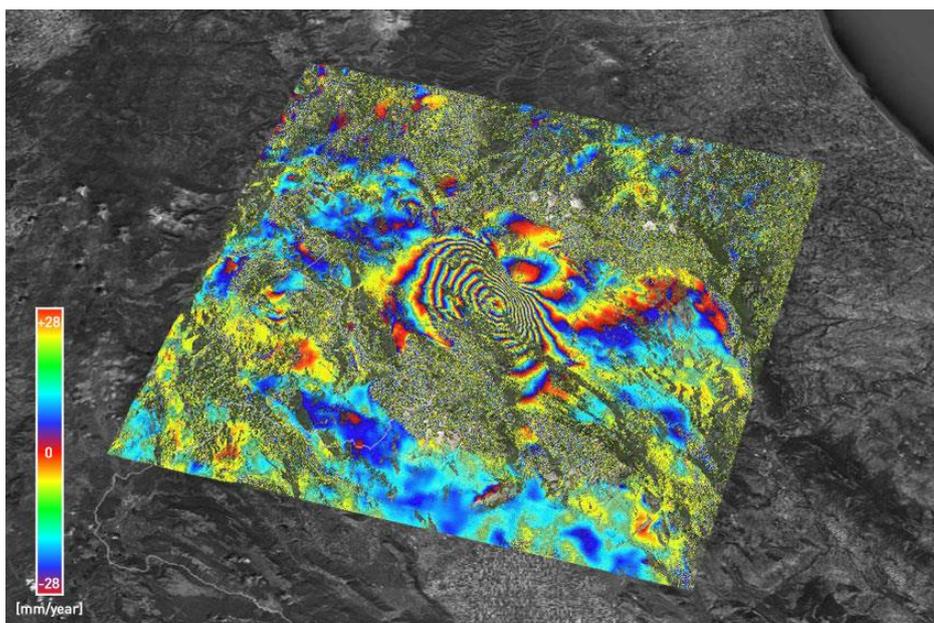


Figura 2 – Interferogramma relativo al sisma de L'Aquila del 6 aprile 2009. Ogni frangia equivale ad uno spostamento del terreno di 2.8 cm (da <https://site.tre-altamira.com/tag/earthquake/>).

Diversi effetti riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR. In primo luogo, i fenomeni di decorrelazione temporale. Questi sono causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli *radar* tra i diversi giorni di acquisizione del dato, indicati dal parametro *baseline* temporale. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono spesso fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo (cambiamenti possono essere causati anche da altri eventi atmosferici quali pioggia o neve).

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta *baseline* normale o geometrica). Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto della *baseline*, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo disturbo è denominato decorrelazione geometrica.

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni che si possono tradurre in un ulteriore termine di fase, difficile da discriminare dal contributo relativo al movimento.

1.1 Le tecniche multi-interferometriche

Lo sviluppo, a partire dai primi anni 2000, delle tecniche multi-interferometriche ha permesso di superare i limiti intrinseci dell'interferometria differenziale, poiché esse consentono di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni.

Queste tecniche si basano su analisi di tipo multi-interferogramma o multi-immagine, cioè utilizzano una lunga serie di immagini *radar* relative a una stessa area, all'interno delle quali vengono identificati alcuni bersagli che vengono utilizzati per la misura degli spostamenti. Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, le tecniche multi-interferometriche permettono di ottenere risultati migliori di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire la loro evoluzione temporale. Infatti, mentre l'interferometria differenziale campiona il fenomeno di deformazione in esame tramite lo studio di due acquisizioni (la *master* M, e la *slave* S), stimando soltanto la deformazione cumulata avvenuta tra le due acquisizioni, l'analisi multi-interferogramma è capace di fornire la descrizione completa dell'evoluzione temporale delle deformazioni. Ovviamente, questa capacità è limitata dal numero e dalla distribuzione temporale delle acquisizioni disponibili.

Le tecniche multi-interferometriche si basano sulla definizione in ogni immagine *radar* dei così detti riflettori permanenti (*Permanent Scatterers* in inglese), elementi già presenti al suolo che mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando quindi l'informazione di fase nel tempo. Questi punti, essendo praticamente immuni da effetti decorrelazione temporale e spaziale, consentono di seguire gli spostamenti intercorsi tra multiple immagini *radar*.

Tra le più recenti e sofisticate, la tecnica *SqueeSAR* consente di individuare dei particolari bersagli al suolo per i quali è possibile stimare il loro spostamento nel tempo. *SqueeSAR* (Ferretti et al., 2011) rappresenta l'evoluzione della tecnica *PSInSAR* (Ferretti et al., 2000; 2001; Colesanti et al., 2003), sviluppata e brevettata nel 1999 dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva nel 2000 a Tele-Rilevamento Europa (TRE) S.r.l., *spin-off* del Politecnico. Le tecniche *PSInSAR* e *SqueeSAR* rappresentano gli strumenti più efficaci per il monitoraggio da remoto, con accuratezza millimetrica, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre.

La tecnica *PSInSAR* rappresenta il capostipite di tutte le tecniche multi-interferogramma, vale a dire di quelle tecniche che impiegano lunghe serie temporali di immagini *radar* satellitari per l'individuazione e la misura di fenomeni deformativi della superficie terrestre.

In particolare, la tecnica si basa sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli *radar*, denominati diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS), che sono praticamente immuni da effetti di decorrelazione temporale e spaziale. Ciò significa che essi mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini *radar* utilizzate, al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando l'informazione di fase nel tempo. Il segnale di fase è proprio l'elemento che contiene l'informazione relativa alla posizione al suolo e alla distanza del bersaglio dal satellite. Poiché i segnali utilizzati hanno lunghezze d'onda centimetriche (microonde), spostamenti anche di pochi millimetri inducono degli sfasamenti tra un'onda e la successiva che possono essere rilevati (Figura 3). I PS corrispondono generalmente ad elementi già presenti al suolo, quali strutture di origine antropica (edifici, monumenti, strade, ponti, argini, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.), oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito): ovvero a tutti quegli elementi già presenti al suolo, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche e atmosferiche.

Al contrario, la risposta elettromagnetica della vegetazione, il cui aspetto muta di continuo, cambia anche per brevi intervalli temporali. La Figura 3 mostra una rappresentazione schematica della base teorica della tecnica interferometrica, di un PS e dei disturbi presenti nelle acquisizioni *radar* (disturbi atmosferici, variazione della componente di riflettività che dà luogo a decorrelazione temporale, variazione della *baseline* normale che dà luogo a decorrelazione geometrica).

La densità spaziale dei PS risulterà quindi variabile a seconda del sensore utilizzato per l'analisi, dell'uso del suolo e della morfologia del terreno. In generale, i PS raggiungono una densità molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e delle aree antropizzate (fino a diverse centinaia di PS/km²), mentre sono pressoché assenti nelle zone vegetate o innevate. In generale, affinché la tecnica risulti applicabile con successo è necessario disporre di un *dataset* di almeno 25-30 immagini *radar*. Maggiore è il numero delle immagini disponibili e l'omogeneità della loro distribuzione temporale, migliori sono i risultati. In dettaglio, mediante l'analisi statistica delle variazioni dei valori di ampiezza e di fase di ciascun *pixel* dell'area di interesse è possibile individuare i riflettori più stabili.

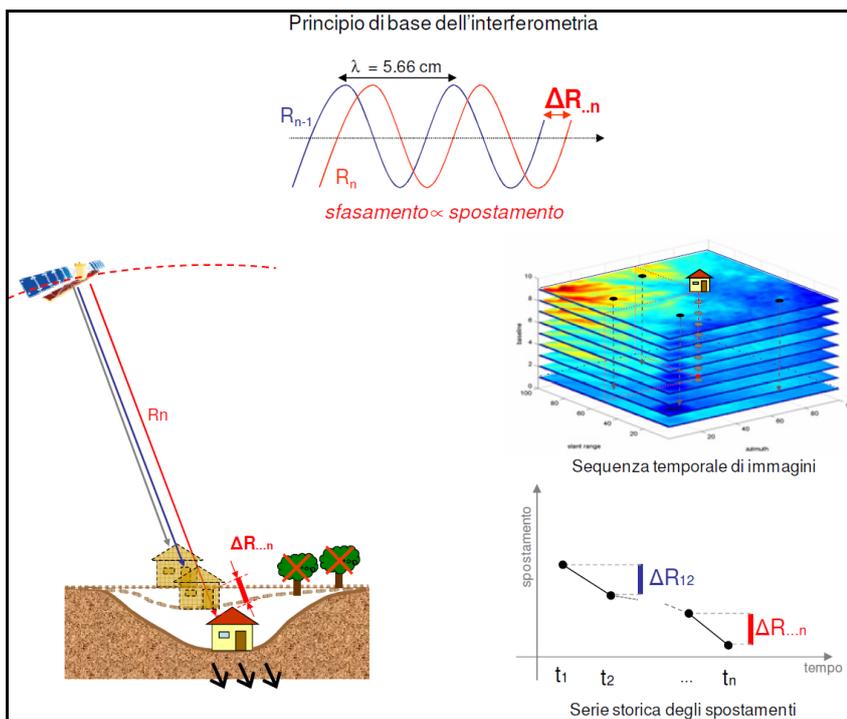


Figura 3 - Principio di funzionamento della tecnica interferometrica, basato sulla misura di variazione di distanze satellite-bersaglio a terra.

Nel 2011 TRE ha sviluppato l' algoritmo *PSInSAR* di seconda generazione, *SqueeSAR*, il quale rappresenta la tecnica *InSAR* (*Interferometric SAR*) più all'avanguardia per la misura degli spostamenti superficiali, in grado di estrarre informazione di movimento in aree dove altre tecniche non sono ancora in grado di farlo, e con la più alta densità possibile di punti di misura, aumentando la comprensione generale dei movimenti relativi ad un'area di interesse. La tecnica *SqueeSAR* (Figura 4) rappresenta la soluzione più avanzata per il monitoraggio non solo delle aree urbane ma anche di quelle extra-urbane, dove la densità delle misure PS può talvolta risultare non soddisfacente. L'innovazione consiste nell'aver individuato una nuova famiglia di "bersagli" monitorabili da satellite, i cosiddetti *Distributed Scatterers* o DS, che si vanno ad aggiungere ai PS.

I dati, in un'immagine *radar*, provengono da bersagli di varia natura a terra. È possibile classificare i *pixel* dell'immagine in due famiglie di bersagli: i bersagli puntiformi, che caratterizzano un solo *pixel*, o al più pochi altri *pixel* ad esso connessi, e i bersagli distribuiti, che caratterizzano tutto un gruppo di *pixel*, e che generano caratteristiche pressoché identiche del segnale *radar* riflesso. I primi rappresentano i PS, mentre i secondi costituiscono la nuova famiglia dei DS. Sono DS le aree detritiche, i campi non coltivati, le aree desertiche non sabbiose.

A differenza di un *target* puntiforme, dove l'energia retro-diffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità dell'eco *radar* per un *pixel* appartenente a un DS è solitamente meno forte, perché manca un bersaglio dominante. D'altra parte, l'utilizzo congiunto di tutti i *pixel* appartenenti al DS permette di ridurre il rumore presente nei dati, migliorando in modo significativo la qualità della stima, tanto che le serie temporali di movimento di un DS appaiono meno rumorose.

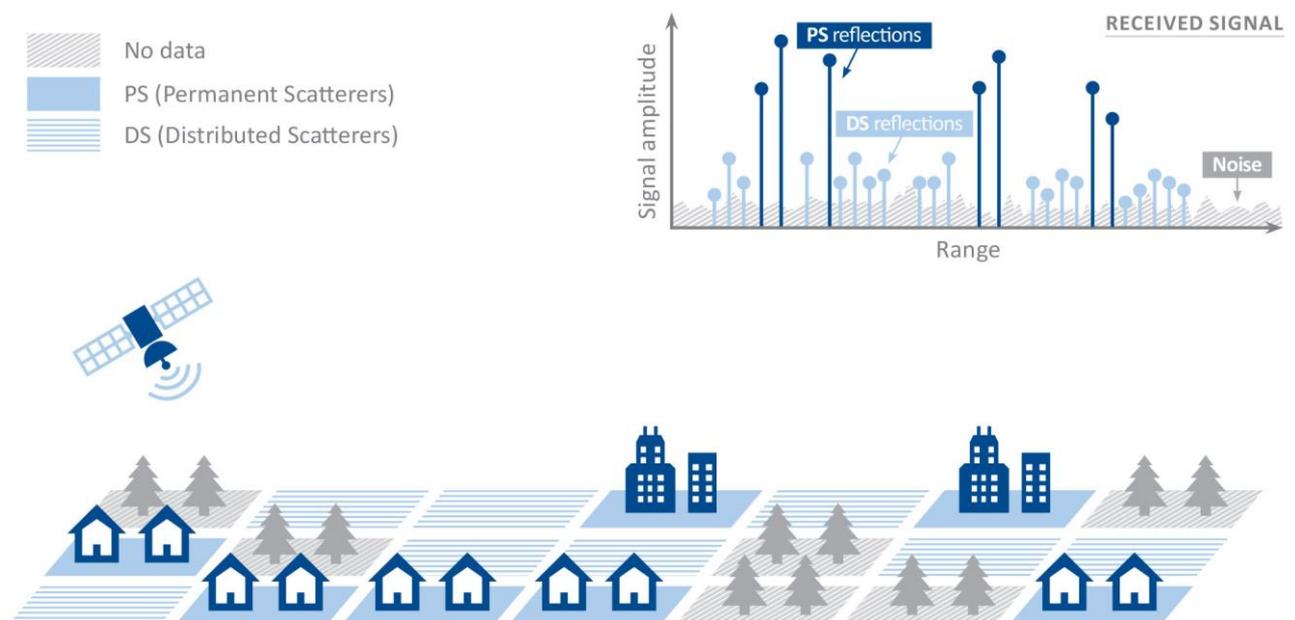


Figura 4 - Differenze tra DS (*Distributed Scatterer*) e PS (*Permanent Scatterer*).

In corrispondenza di ciascun riflettore (PS o DS) individuato è possibile fare una stima del disturbo atmosferico e rimuoverlo, isolando quindi il contributo dovuto alle sole deformazioni del terreno. Più precisamente, una volta stimato il contributo atmosferico, vengono individuate tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminati i termini spuri e isolato il termine che descrive la variazione di cammino ottico dell'onda elettromagnetica nelle varie acquisizioni, cioè il movimento del "bersaglio" nell'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile.

Per ogni singolo bersaglio (PS o DS) si ricavano la posizione (le sue coordinate geografiche: latitudine, longitudine, quota), il *trend* medio di deformazione (calcolato in mm/anno come l'interpolazione lineare dello spostamento misurato nell'intero periodo di monitoraggio) e l'intera serie temporale degli spostamenti, fornendo un valore di spostamento per ognuna delle acquisizioni disponibili. Tutte le misure sono sempre calcolate lungo la congiungente sensore – bersaglio (linea di vista del sensore, LOS), che è inclinata rispetto alla verticale di un angolo (θ) che varia secondo il satellite utilizzato. Inoltre, tutte le

misure sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra (*reference points*), di coordinate note e supposti fermi (su basi geologiche oppure indicati come tali ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica). Inoltre, tutte le informazioni di movimento fornite dai PS sono relative e non assolute, cioè sono riferite temporalmente alla data di acquisizione della immagine *master*, usata come misura "zero" (es.: prima acquisizione disponibile nell'arco temporale analizzato).

La particolare combinazione tra il moto del satellite che orbita intorno alla Terra e il movimento di rotazione della Terra stessa, permette al sensore di rilevare la stessa area geografica secondo due differenti geometrie (Figura 5 e Figura 6):

- in modalità ascendente, quando il satellite percorre l'orbita da S verso N, e illumina l'area da O verso E;
- in modalità discendente, quando il satellite percorre l'orbita da N verso S, e illumina l'area da E verso O.

Come conseguenza delle diverse geometrie di acquisizione si possono registrare deformazioni di segno opposto (positive oppure negative). Per convenzione si hanno segni positivi per spostamenti in avvicinamento lungo la congiungente sensore-bersaglio e segni negativi per allontanamenti rispetto al sensore. Un moto con componente prevalentemente verticale come la subsidenza determina velocità di deformazione simili in entrambe le geometrie sia come intensità che come segno (*i.e.*, in allontanamento rispetto al satellite in entrambe le geometrie). Ugualmente, un fenomeno di sollevamento determina velocità di deformazione simili sia come intensità che come segno (anche se in questo caso si avrà un avvicinamento in entrambe le geometrie). Al contrario, un moto con componente orizzontale non trascurabile (come una frana) determina velocità di deformazioni diverse nelle due geometrie, sia come intensità che come segno: in una geometria si hanno velocità negative (ovvero il sensore registra un allontanamento), nell'altra si hanno velocità positive (ovvero il sensore registra un avvicinamento) (Figura 5).

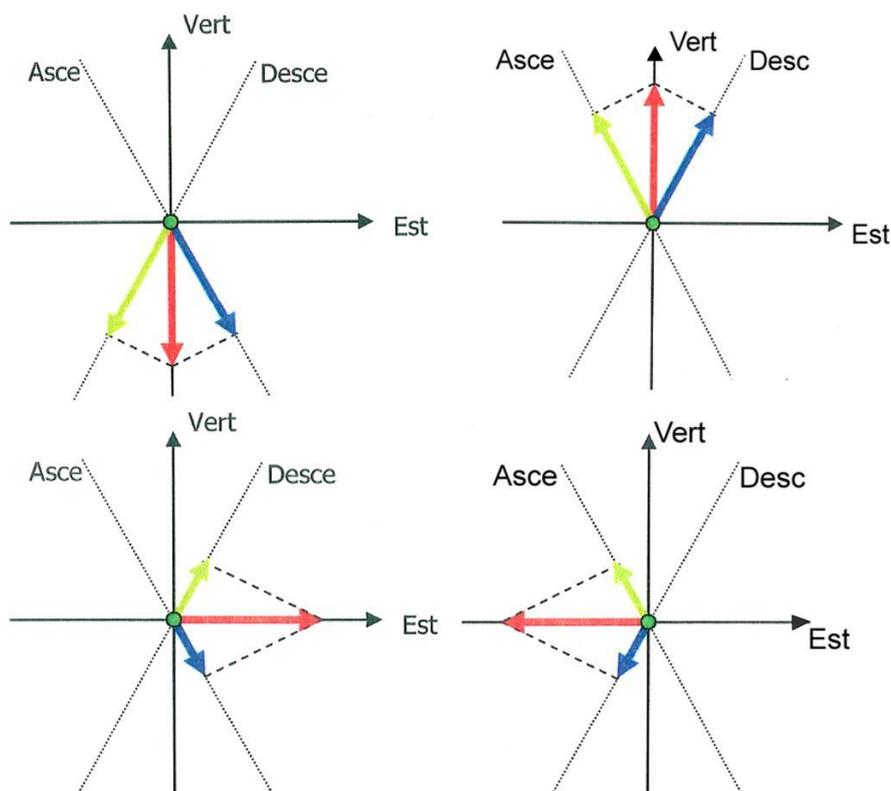


Figura 5 - Esempio di moto reale puramente verticale (sopra) e puramente orizzontale (sotto). In rosso è rappresentato lo spostamento reale, in blu e in verde le componenti di deformazione lette dalla geometria ascendente e discendente rispettivamente.

Come detto, l'area al suolo viene rilevata sotto due angoli di vista praticamente speculari (Figura 6). Disponendo di una adeguata disponibilità di punti di misura, dalla combinazione di dati ascendenti con quelli discendenti è possibile risalire all'orientazione del vettore velocità nel piano Est-Verticale e quindi fornire una stima del moto verticale e orizzontale in direzione Est-Ovest. Un eventuale spostamento in direzione puramente orizzontale Nord-Sud non può essere rilevato per ragioni intrinseche alla geometria del sistema (orbita dei satelliti quasi parallela alla direzione Nord-Sud, da cui si discosta per un angolo δ).

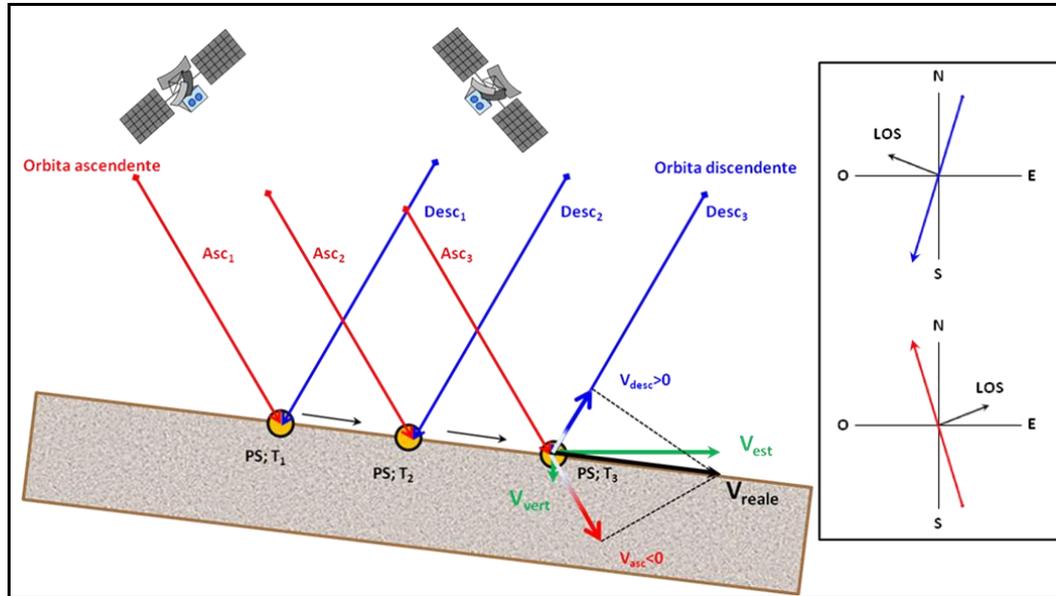


Figura 6 - Scomposizione del moto nelle direzioni verticale e orizzontale (indicate in verde), risultata dalla combinazione delle misure in geometria ascendente e discendente.

Un quadro di insieme delle precisioni della stima della velocità e della singola misura di spostamento ottenibili con un'analisi *SqueeSAR* è dato nella Tabella 1, nella quale vengono riportati i valori di deviazione *standard* (σ) della velocità di spostamento media e la misura di deformazione singola (millimetri di spostamento in un certo *intervallo* temporale). Ogni PS risulta caratterizzato da un valore di velocità e deviazione *standard*, che indica di quanto vibra la stima della differenza di velocità del punto in analisi rispetto al riferimento. La deviazione *standard* dipende dalla distanza tra il punto considerato ed il riferimento e dalla topografia dell'area di interesse. I valori di spostamento e di velocità di PS vicini tra loro (ad esempio, distanti qualche km) sono affetti da un errore di entità simile e quindi il loro moto relativo ha precisioni notevolmente superiori da quanto riportato dal campo della deviazione standard.

Parametro	Precisione (1σ)
Velocità media di spostamento	$\pm 1\text{mm/anno}$
Misura singola	$\pm 3\text{-}5\text{ mm}$

Tabella 1 - Tabella delle precisioni ottenibili. Valori tipici per distanze < 1 km dal punto di riferimento per un *dataset* di almeno 5 anni.

La stima delle velocità e della singola misura di spostamento viene degradata da due fonti principali di rumore:

- i)* disturbo atmosferico, che varia lentamente nello spazio per cui due PS vicini tra loro risultano affetti dallo stesso contributo per una data acquisizione. L'impatto di questo disturbo è funzione delle particolari condizioni atmosferiche presenti al momento dell'acquisizione;
- ii)* rumore di decorrelazione: introdotto dalla possibile variazione delle caratteristiche fisiche del bersaglio *radar* tra due diverse acquisizioni (temperatura, copertura vegetativa, ecc.). Ha un carattere spazialmente non correlato e presenta generalmente basso impatto.

Un quadro di insieme delle precisioni di georeferenziazione (coordinate geografiche del punto: nord, est, quota) dei dati ottenibili da un'elaborazione di immagini SAR in banda C è dato nella Tabella 2. Il PS non è un punto materializzato a terra quindi non ha una sua coordinata geografica di installazione. L'operazione di georeferenziazione consta di due passaggi:

- i) passaggio da coordinate nel sistema SAR (*range* ed *azimuth*) a coordinate geografiche;
- ii) allineamento dei PS sul supporto cartografico disponibile mediante traslazione rigida.

L'errore di georeferenziazione è dovuto in prima istanza a:

- i) posizione del PS all'interno della cella di risoluzione a terra;
- ii) distanza del PS dal punto di riferimento.

La precisione di georeferenziazione è un aspetto da non sottovalutare, specie se l'obiettivo dell'analisi si riduce a un singolo edificio o una parte di esso.

Parametro	Precisione banda C
Posizione in Nord	± 2 m
Posizione in Est	± 6 m
Quota ellissoidica	± 1,5 m

Tabella 2 - Tabella delle precisioni di georeferenziazione ottenibili con sensori in banda C (e.g., Sentinel-1).

L'apparente incongruenza tra la precisione di spostamento (millimetrica) e la precisione di posizionamento (metrica) dei punti a terra dipende dal fatto che lo spostamento è misurato come frazione della lunghezza d'onda, mentre la precisione di posizionamento è di fatto funzione della dimensione del *pixel* dell'immagine a terra (alcuni metri). Inoltre, bisogna considerare che nel caso di PS, il bersaglio *radar* corrisponde all'elemento dominante all'interno del *pixel* e che quindi la dimensione reale del punto monitorato a terra è in genere più piccola della dimensione del *pixel* dell'immagine

In sintesi, i punti di forza della tecnica *SqueeSAR* rispetto alla strumentazione tradizionale possono essere così riassunti:

- il contributo all'analisi e allo studio del territorio tramite l'individuazione di aree soggette a movimento e la ricostruzione dell'evoluzione temporale delle deformazioni;
- la possibilità di elaborare un lungo archivio storico di immagini *radar* (dal 1992 ad oggi, grazie agli archivi ESA), da cui la possibilità di indagare i fenomeni di dissesto attivi o riattivati in questo arco temporale. Questo può rivelarsi un elemento importante soprattutto laddove le tecniche convenzionali richiedono mesi prima di poter dare misure significative, consentendo di recuperare informazioni altrimenti non reperibili con le tradizionali tecniche di monitoraggio. Per una specifica area è pertanto possibile ricostruire, senza necessità di contatto diretto con il terreno e senza l'installazione di strumentazione a terra, l'evoluzione delle deformazioni superficiali degli ultimi quindici - venti anni.
- la possibilità di ottenere misure differenziali con accuratezza millimetrica;
- la possibilità di ricostruire la componente verticale e orizzontale (sul piano E-O e verticale) delle deformazioni, quando si dispone di due geometrie di acquisizione e di una densità di PS sufficientemente elevata;
- la maggiore accuratezza delle misure in direzione verticale rispetto alla tecnica GPS;
- la possibilità di ottenere stime accurate della velocità di spostamento (con accuratezza dell'ordine del millimetro) su una rete di misurazione molto densa (in area urbana fino a circa 500 PS/km²), senza la necessità di contatto diretto con la zona di indagine e senza dover installare strumentazione invasiva e/o apparecchiature al suolo;
- le tecniche interferometriche da satellite possono essere utilizzate come supporto in parallelo a tecniche di monitoraggio tradizionali basate a terra.

È importante sottolineare anche i limiti della tecnica PS, che possono essere riassunti come segue:

- capacità di apprezzare solo deformazioni con velocità non superiori ad alcuni cm/anno. Tenendo conto delle lunghezze d'onda utilizzate e dei tempi di rivisitazione dei sensori, si possono ricavare informazioni solo su movimenti lenti;
- necessità che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione, oppure presenza di rocce esposte);
- possibile sottostima delle deformazioni in caso di versanti orientati verso Nord o Sud (a causa della traiettoria orbitale del satellite).

Due sono gli elementi di grande rilievo, nell'impiego delle tecniche interferometriche applicate ai dati satellitari per il monitoraggio delle deformazioni del terreno e delle strutture:

1) la vasta disponibilità di dati *radar* su molte aree, e in particolare su tutto il territorio italiano, che permette pertanto di condurre delle analisi storiche, vale a dire delle indagini a ritroso nel passato, di fondamentale importanza per comprendere l'evoluzione di fenomeni già avvenuti, consentendo di recuperare informazioni altrimenti non reperibili con le tradizionali tecniche di monitoraggio basate a terra. Per una specifica area è pertanto possibile ricostruire, senza necessità di contatto diretto con il terreno e senza l'installazione di strumentazione a terra, l'evoluzione delle deformazioni superficiali degli ultimi anni (a partire dal 1992 se si considerano gli archivi dei satelliti ERS dell'ESA).

2) il lancio del satellite Sentinel-1A dell'ESA nell'aprile 2014 ha permesso un flusso continuo di dati *radar* satellitari acquisiti con regolarità, ogni 12 giorni, su vaste aree del pianeta e in particolare sull'Italia. Questo intervallo temporale si è accorciato a 6 giorni da quando anche i dati di Sentinel-1B, lanciato il 25 aprile 2016, sono disponibili.

Negli ultimi quindici - vent'anni, i dati SqueeSAR sono stati utilizzati in diversi settori per la misura e la mappatura degli spostamenti superficiali pregressi:

- rischi naturali: le principali applicazioni riguardano lo studio di deformazioni del suolo indotte da frane (*e.g.*, Raspini et al., 2013; Meisina et al., 2013; Bardi et al., 2014; Ciampalini et al., 2015; Raspini et al., 2015), movimenti tettonici (*e.g.*, Lagios et al., 2013), attività vulcanica (Sakkas et al., 2014), consolidazione naturale di terreni (Raspini et al., 2014);
- monitoraggio grandi opere (in particolare attività di *tunnelling*, Bayer et al., 2017) e analisi delle deformazioni alla scala del singolo edificio (Ciampalini et al., 2014; Bianchini et al., 2015);
- monitoraggio attività mineraria (in particolare *open pit mine*, Paradella et al., 2015);
- monitoraggio attività di emungimento: analisi di subsidenza legata ad estrazione di fluidi dal sottosuolo (Righini et al., 2011) od attività mineraria (Iannacone et al., 2015).

1.2 La costellazione Sentinel-1

La missione Sentinel-1, progettata nell'ambito del progetto europeo *Copernicus*, è composta da una costellazione di due satelliti (Sentinel-1A e Sentinel-1B) orbitanti su traiettorie eliosincrone ad una quota di 698 km. Il satellite Sentinel-1A è stato lanciato il 3 aprile 2014, Sentinel-1B il 25 aprile 2016. Entrambi i satelliti sono equipaggiati con sensori SAR in banda C (frequenza 5.5 GHz e lunghezza d'onda di circa 5.6 cm) ed hanno tempi di rivisitazione di 12 giorni, ridotto a 6 giorni grazie alla contemporanea presenza in orbita dei due satelliti che condividono lo stesso piano orbitale.

La costellazione ESA Sentinel-1, progettata per fornire informazioni sistematiche su vaste del pianeta per i prossimi decenni, ha aperto nuove opportunità per il monitoraggio continuo dei fenomeni di deformazione terrestre a scala regionale, grazie anche alla politica di accesso aperto e gratuito ai dati. La costellazione di satelliti Sentinel-1 è ideata per fornire informazioni sempre aggiornate, in continuità con i dati provenienti dalle precedenti missioni ERS e ENVISAT, ma con un notevole miglioramento delle informazioni, soprattutto in termini di affidabilità e tempestività dei dati stessi. Questa costellazione satellitare risulta la migliore scelta operativa per attività di studio e monitoraggio delle deformazioni del terreno a media risoluzione con coperture a scala regionale.

La costellazione Sentinel-1 può acquisire in quattro modalità, con diverse risoluzioni e coperture spaziali (Figura 7):

- *STRIPMAP (SM)*, con risoluzione nominale a terra di 5 m e larghezza (*swath*) dell'immagine di 80 km. Polarizzazione singola o doppia;
- *INTERFEROMETRIC WIDE SWATH (IW)*, con risoluzione nominale a terra di 5x20 m e larghezza (*swath*) dell'immagine di 250 km. Polarizzazione singola o doppia. IW è la principale modalità di acquisizione della superficie terrestre;
- *EXTRA-WIDE SWATH (EW)*, con risoluzione nominale a terra di 20x40 m e larghezza (*swath*) dell'immagine di 400 km. Polarizzazione singola o doppia;
- *WAVE (WV)*, con risoluzione nominale a terra di 5 m e larghezza (*swath*) dell'immagine di 20 km. Polarizzazione singola.

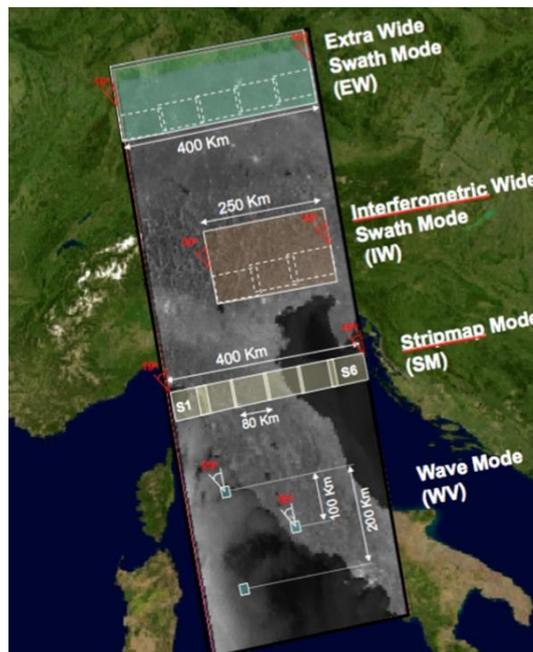


Figura 7 – Modalità di acquisizione della costellazione Sentinel-1.

La missione Sentinel-1 opera in modo da acquisire in maniera regolare e sistematica immagini satellitare in modo da costruire archivi consistenti adatti a programmi di monitoraggio a lungo termine. Sentinel-1 offre quindi una nuova opportunità per il monitoraggio della superficie terrestre e risulta la migliore scelta operativa per attività di studio e monitoraggio in continuo delle deformazioni del suolo e di elementi strategici del territorio. La Figura 8 mostra, a livello globale, la copertura e il numero di immagini SLC (*Single Look Complex*, ovvero dati SAR focalizzati e georeferenziati a partire dal dato acquisito in coordinate *radar*) al 20 settembre 2018. La Figura 9 mostra la copertura Sentinel-1 ascendente e discendente per la penisola italiana. Sei *track* in ciascuna geometria garantiscono la copertura completa del territorio italiano.

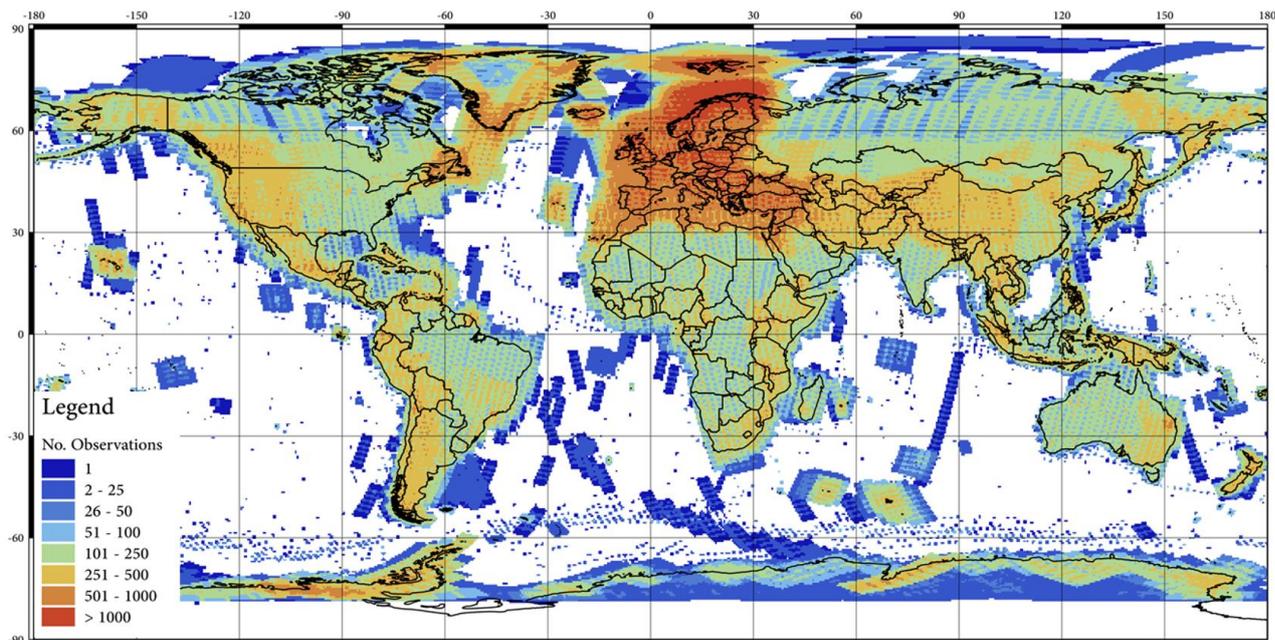


Figura 8 – Copertura e numero di acquisizioni SLC della costellazione Sentinel-1. Modificato da: <https://www.asf.alaska.edu/sentinel/data/sentinel-1-coverage-maps/>

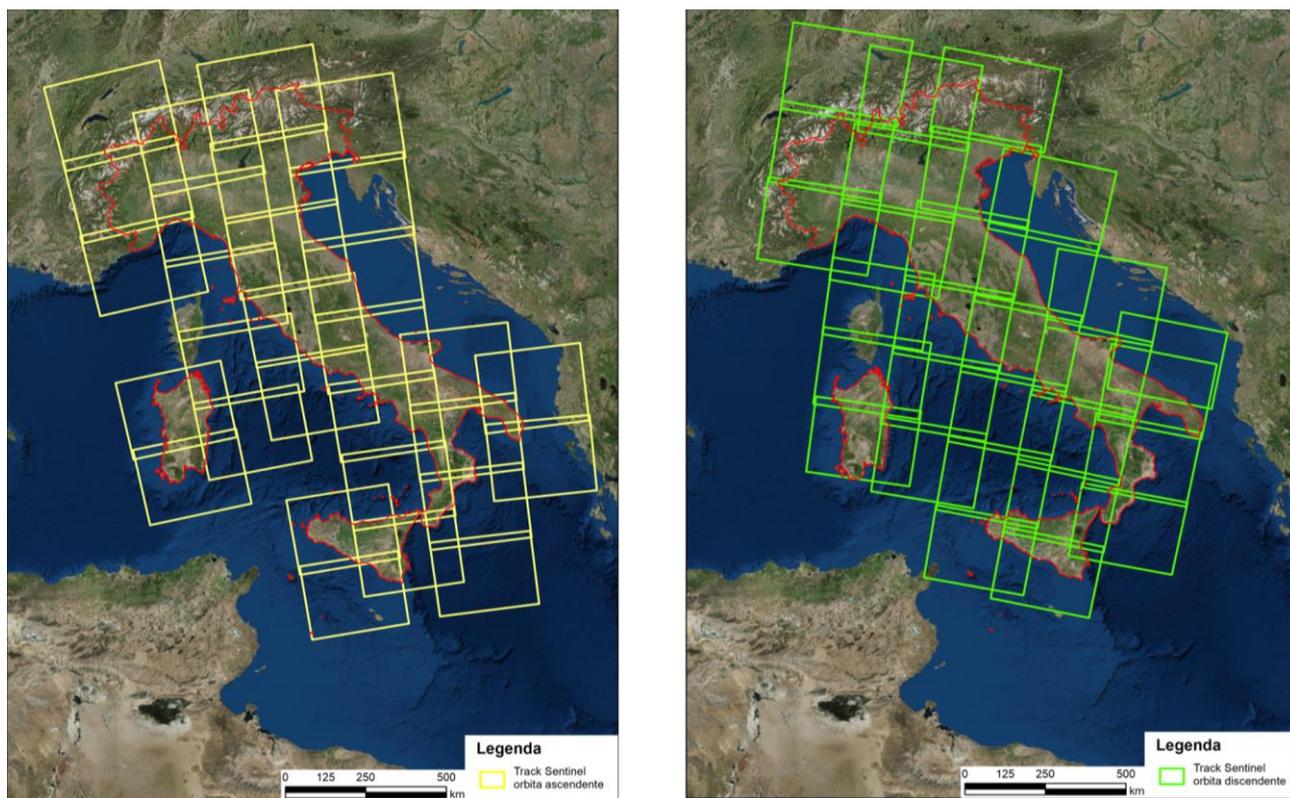


Figura 9 – Copertura Sentinel-1 per l'Italia. A sinistra la geometria ascendente, a destra quella discendente.

2 Bibliografia

- Bardi, F., Frodella, W., Ciampalini, A., Bianchini, S., Del Ventisette, C., Gigli, G., Fanti, R., Moretti, S., Basile, G., & Casagli, N. (2014). Integration between ground based and satellite SAR data in landslide mapping: The San Fratello case study. *Geomorphology*, 223, 45-60.
- Bayer, B., Simoni, A., Schmidt, D., & Bertello, L. (2017). Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy. *Engineering Geology*.
- Bianchini, S., Pratesi, F., Nolesini, T., & Casagli, N. (2015). Building Deformation Assessment by Means of Persistent Scatterer Interferometry Analysis on a Landslide-Affected Area: The Volterra (Italy) Case Study. *Remote Sensing*, 7(4), 4678-4701.
- Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., Del Ventisette, C., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 166-180.
- Ciampalini, A., Raspini, F., Bianchini, S., Frodella, W., Bardi, F., Lagomarsino, D., Di Traglia, F., Moretti, S., Proietti, C., Pagliara, P., Onori, R., Corazza, A., Duro, A., Basile, G., & Casagli, N. (2015). Remote sensing as tool for development of landslide databases: The case of the Messina Province (Italy) geodatabase. *Geomorphology*.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68(1), 3-14.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49(9), 3460-3470.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE transactions on*, 38(5), 2202-2212.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(1), 8-20.
- Iannaccone, J. P., Corsini, A., Berti, M., Morgan, J., & Falorni, G. (2015). Characterization of Longwall Mining Induced Subsidence by Means of Automated Analysis of InSAR Time-Series. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5* (pp. 973-977). Springer International Publishing.
- Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Bellotti, F., Ferretti, A., Vlachou, K., & Dietrich, V. (2013). SqueeSAR™ and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano (1992–2012): Tectonic implications. *Tectonophysics*, 594, 38-59.
- Meisina, C., Notti, D., Zucca, F., Ceriani, M., Colombo, A., Poggi, F., Roccati, A., & Zaccone, A. (2013). The use of PSInSAR™ and SqueeSAR™ techniques for updating landslide inventories. In *Landslide Science and Practice* (pp. 81-87). Springer Berlin Heidelberg.
- Paradella, W.R.; Ferretti, A.; Mura, J.C.; Colombo, D.; Gama, F.F.; Tamburini, A.; Santos, A.R.; Novali, F.; Galo, M.; Camargo, P.O.; Silva, A.Q.; Silva, G.G.; Silva, A.; Gomes, L.L. (2015). Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, 193, 61-78.
- Raspini, F., Ciampalini, A., Del Conte, S., Lombardi, L., Nocentini, M., Gigli, G., Ferretti, A., & Casagli, C. (2015). Exploitation of amplitude and phase of satellite SAR images for landslide mapping: the case of Montescaglioso (South Italy). *Remote Sensing*.
- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D., Adam, N., & Moretti, S. (2014). Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent

Scatterer Interferometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 78-89.

Raspini, F., Moretti, S., & Casagli, N. (2013). Landslide mapping using SqueeSAR data: Giampilieri (Italy) case study. In *Landslide Science and Practice* (pp. 147-154). Springer Berlin Heidelberg.

Righini, G., Raspini, F., Moretti, S., & Cigna, F. (2011). Unsustainable use of groundwater resources in agricultural and urban areas: a persistent scatterer study of land subsidence at the basin scale. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 144(544), 81-92.

Sakkas, V., Novali, F., Lagios, E., Bellotti, F., Vassilopoulou, S., Damiata, B. N., & Allievi, J. (2014). Ground deformation study of KOS island (SE Greece) based on Squee-SAR™ interferometric technique. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International* (pp. 4319-4322).