NOTA SINTETICA PER LA COMPRENSIONE DEL DATO SATELLITARE PSInSAR™ E SqueeSAR™

La presente nota riassume sinteticamente i principi del metodo PSInSAR™ e del recente SqueeSAR™, limiti e vantaggi dei due prodotti e della tecnica delle "*aree anomale*" individuate sulla base dei dati interferometrici.

1. GENERALITA' SUL SAR

1.1. I sistemi radar

I sistemi radar satellitari forniscono immagini elettromagnetiche della superficie terrestre con risoluzione spaziale di qualche metro. Rispetto ai sistemi ottici, i radar sono sistemi attivi in quanto, emettendo un segnale e registrando l'eco di ritorno, operano con continuità consentendo di acquisire dati anche in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno sia di notte. Si tratta di sistemi coerenti in quanto acquisiscono sia il dato di ampiezza del campo elettromagnetico rilevato (*valore di modulo*) sia l'informazione associata alla distanza sensore-bersaglio (*valore di fase*).

Il principio di funzionamento è il seguente (*Figura 1.1.1.*): un apparecchio illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che, incidendo sulla superficie terrestre, subisce un fenomeno di riflessione disordinata (*scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, che ne misura le caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, di valutare la distanza a cui è posizionato, localizzandolo in modo preciso nella direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*); la direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di individuare l'oggetto anche nell'altra direzione (direzione di *azimut*). Quanto è più grande l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio a scapito, tuttavia, dell'estensione dell'area illuminata. Combinando coerentemente i dati acquisiti dal sensore in posizioni successive, è possibile sintetizzare un'antenna fittizia di grandi dimensioni, detta **ad apertura sintetica**, che garantisce un'elevata risoluzione anche nella direzione di azimuth (*SAR – Synthetic Aperture Radar*).

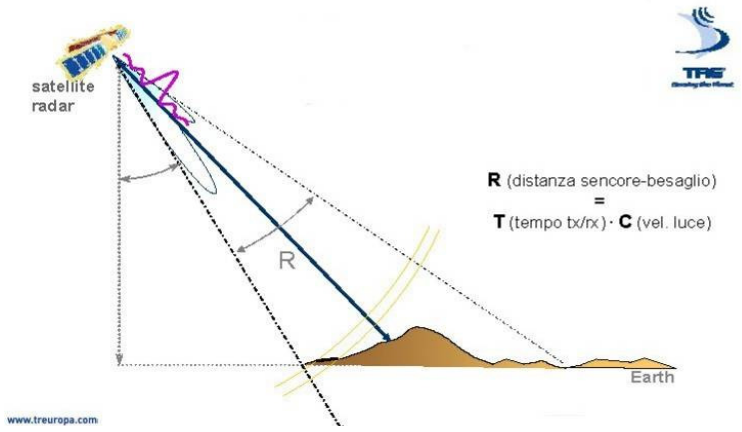

Figura 1.1.1. Principio di funzionamento dei sistemi SAR (fonte T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

Alcune definizioni (*Figura 1.1.2.*):

- revisiting time: intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi successivi del satellite sulla stessa porzione di territorio;
- azimuth: direzione parallela all'orbita, coincidente approssimativamente con la direzione Nord-Sud;
- slant range o range: direzione congiungente sensore-bersaglio, perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo θ (*off-nadir*) rispetto alla verticale;
- ground range: proiezione sul piano della direzione di range.

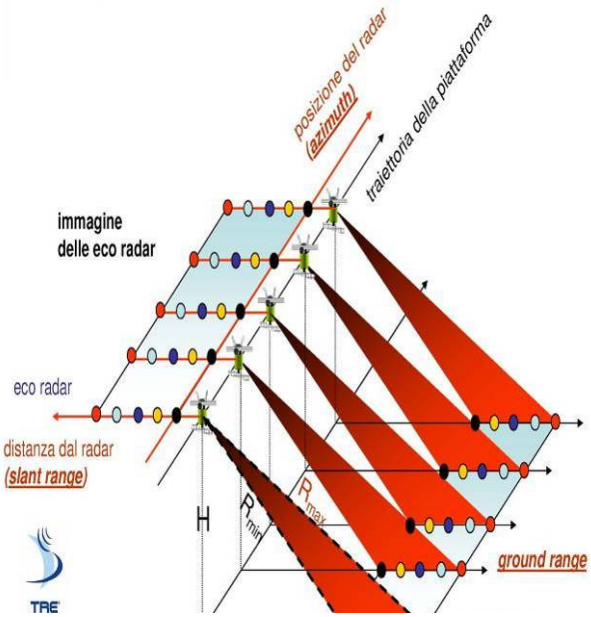

Figura 1.1.2. Principio di funzionamento delle immagini radar (fonte T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

1.2. I satelliti

I principali satelliti che acquisiscono immagini SAR sono ERS1 e ERS2, ENVISAT, RADARSAT, TerraSAR-X, JERS e COSMO-SkyMed. Ad oggi, sono statr acquisite elaborazioni PSI su immagini ERS, ENVISAT e RADARSAT per i quali sono riassunte le caratteristiche principali.

SATELLITE	**ERS1 – ERS2**
AGENZIA SPAZIALE	ESA (Agenzia Spaziale Europea)
INTERVALLO DI ACQUISIZIONE	Dal 1992 al 2001 (ERS1) Dal 1995 al 2001 (ERS2)
FREQUENZA ONDA UTILIZZATA	5.33 GHz (ovvero lunghezza d'onda λ pari a 5.66 cm)
REVISITING TIME	35 giorni
RISOLUZIONE IN AZIMUTH	5 m
RISOLUZIONE IN RANGE	8 m
RISOLUZIONE IN GROUND RANGE	20 m
ANGOLO Θ DI OFF-NADIR	23°
NOTE	I due satelliti seguono la stessa orbita eliosincrona, lievemente inclinata rispetto ai meridiani, con un ritardo di 24 h l'uno dall'altro

SATELLITE	**ENVISAT**
AGENZIA SPAZIALE	ESA (Agenzia Spaziale Europea)
INTERVALLO DI ACQUISIZIONE	Dal 2002 a oggi
FREQUENZA ONDA UTILIZZATA	5.33 GHz (ovvero lunghezza d'onda λ pari a 5.66 cm)
REVISITING TIME	35 giorni
RISOLUZIONE IN AZIMUTH	5 m
RISOLUZIONE IN RANGE	9.5 m
RISOLUZIONE IN GROUND RANGE	25 m
ANGOLO Θ DI OFF-NADIR	variabile

SATELLITE	**RADARSAT**
AGENZIA SPAZIALE	CSA ASC (Agenzia Spaziale Canadese)
INTERVALLO DI ACQUISIZIONE	Dal 1996 a oggi
FREQUENZA ONDA UTILIZZATA	5.33 GHz (ovvero lunghezza d'onda λ pari a 5.66 cm)
REVISITING TIME	24 giorni
RISOLUZIONE IN AZIMUTH	5 m
RISOLUZIONE IN RANGE	5 m (fine beam) – 9.5 m (standard beam)
RISOLUZIONE IN GROUND RANGE	20 m
ANGOLO Θ DI OFF-NADIR	variabile
NOTE	Inizio acquisizione completa dell'archivio italiano a partire dal 2003

Il programma COSMO-SkyMed è un progetto dell'Agenzia Spaziale Italiana e del Ministero della Difesa per applicazioni sia civili/istituzionali/commerciali sia militari: il sistema è costituito da una costellazione di 4 satelliti equipaggiati con sensori SAR ad alta risoluzione operanti in banda X e dotati di un sistema di acquisizione e trasmissione dei dati altamente flessibile ed innovativo in grado di consente la copertura globale del nostro pianeta operando in qualsiasi condizione meteorologica e di illuminazione (giorno/notte) con *revisiting time* ridotti (16 giorni/satellite). A configurazione completata, il sistema COSMO-Sky Med consentirà di ottenere immagini radar ad elevata risoluzione con tempi di rivisitazione di circa 4 giorni.

1.3. Le immagini radar

Le immagini radar sono matrici di numeri complessi definiti dalle grandezze (*Figura 1.3.1.*):

- ampiezza: ampiezza del campo elettromagnetico retrodiffusa verso il satellite;
- fase: informazioni associate alla distanza sensore-bersaglio, utili ai fini inteferometrici.

Le immagini radar derivano dall'applicazione di un algoritmo di focalizzazione che consente di associare a ciascuna cella di risoluzione (*pixel*) il relativo contributo di energia retrodiffusa. Ad ogni elemento della matrice corrisponde una zona a terra di 20x5 metri circa (terreno piano).

Durante i vari passaggi lungo la stessa orbita i satelliti si discostano leggermente dalla propria traiettoria nominale, con variazioni dell'ordine di centinaia di metri: ne consegue che la geometria di acquisizione per la stessa zona varia di volta in volta, generando matrici di pixel non corrispondenti alla stessa cella di risoluzione a terra. Per effettuare l'analisi è necessario che a pixel omologhi nella varie immagini corrisponda la stessa cella di risoluzione e, quindi, si procede con una fase di elaborazione dei dati detta **registrazione** o **ricampionamento**: tra tutte le acquisizioni viene scelta un'immagine di riferimento (*master*) rispetto alla geometria della quale vengono ricampionate tutte le altre immagini (*slave*), in modo da avere la stessa griglia di riferimento per tutti i passaggi del satellite.

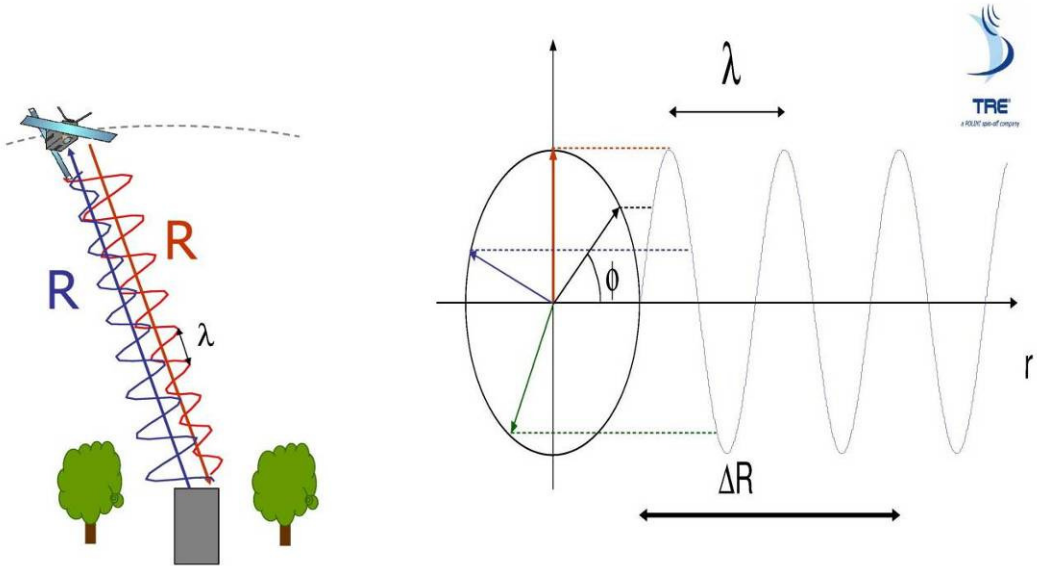

Figura 1.3.1. La fase dell'immagine SAR è assimilabile ad una sinusoide di lunghezza d'onda λ (fonte T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

Le immagini SAR vengono localizzate geograficamente attraverso due numeri indicanti rispettivamente track, lungo la traiettoria della piattaforma satellitare, e frame , "piastrella" sul lungo la traiettoria del satellite (*Figura 1.3.2.*).

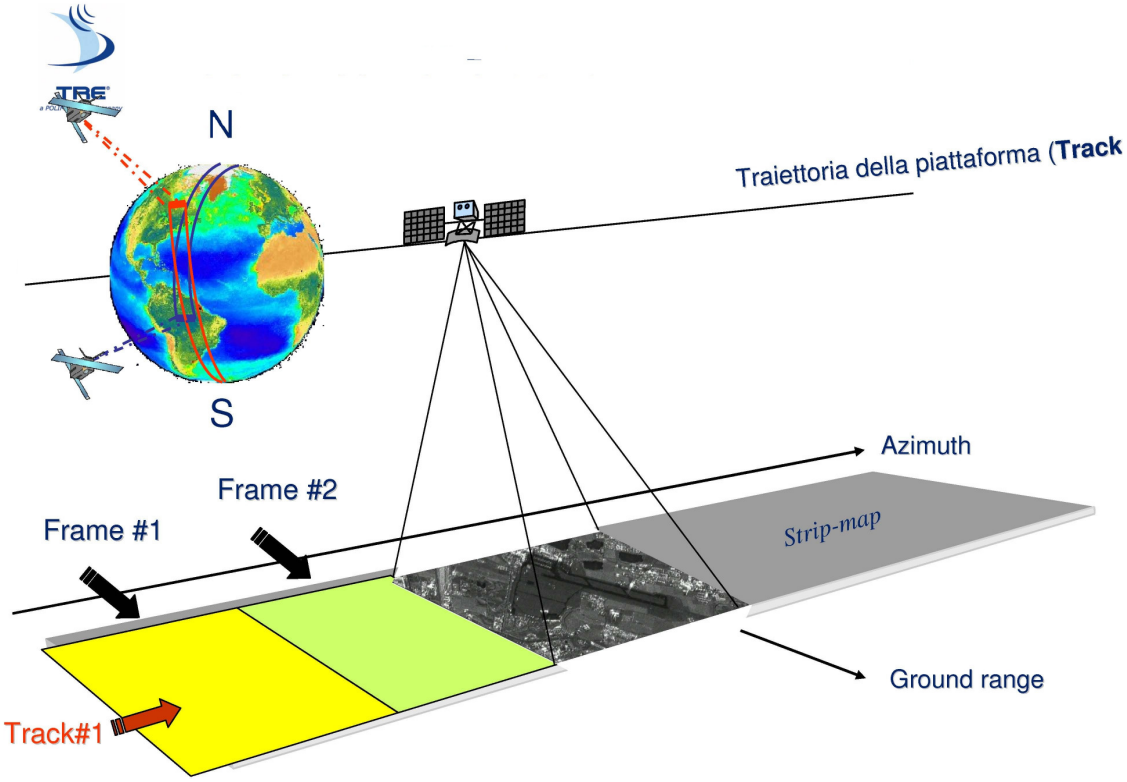

Figura 1.3.2. Identificazione e localizzazione geografica delle immagini SAR mediante track e frame (fonte T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

1.4. Deformazioni prospettiche

Le modalità di acquisizione, non perpendicolari al suolo ma secondo un angolo di vista θ, variabile a seconda del satellite utilizzato, danno origine a deformazioni prospettiche nelle immagini utilizzate, dovute alla topografia del terreno. In base alla pendenza del terreno se ne distinguono tre differenti tipi (*Figura 1.4.1.*):

1. foreshortening: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio (pendenza positiva pari all'angolo di off-nadir). In questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza;

2. layover: si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo di off-nadir. In questi casi si produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale;

3. shadowing: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti. In questi casi si producono aree molto scure (in ombra) nell'immagine di ampiezza.

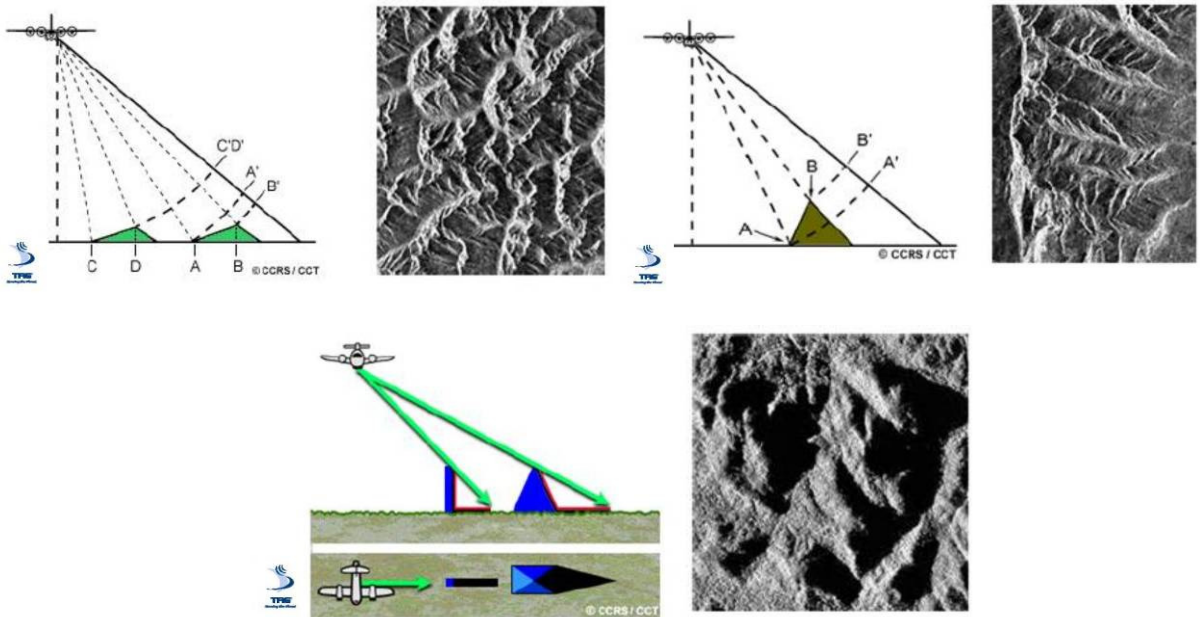

Figura 1.4.1. Deformazioni prospettiche di foreshortening, layover e shadowing e conseguenti fenomeni di deformazione nelle immagini focalizzate SAR (da T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

1.5 . Interferometria differenziale DInSAR

La tecnica applicata per elaborare i dati SAR è denominata **interferometria differenziale** (*DInSAR*): si basa sul confronto di due immagini radar, acquisite dal satellite percorrendo la stessa orbita e sulla stessa porzione di territorio, eseguendo una differenza delle distanze sensore-bersaglio misurate nei due istanti di acquisizione in modo da mettere in evidenza eventuali movimenti superficiali (*Figura 1.5.1.*).

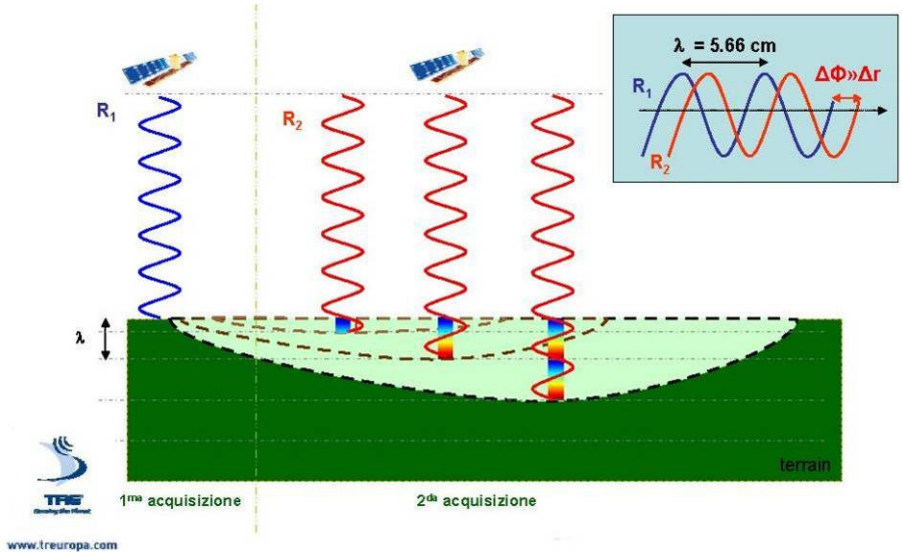

Figura 1.5.1. Principio di funzionamento dell'interferometria differenziale (fonte T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

Tale operazione genera un interferogramma, matrice delle differenze del valore di fase tra le due immagini SAR considerate; tipicamente presenta una serie di frange colorate, in cui i diversi colori rappresentano diversi valori di fase mentre ciascuna frangia rappresenta un ciclo di variazione della fase interferometrica (*Figura 1.5.2.*).

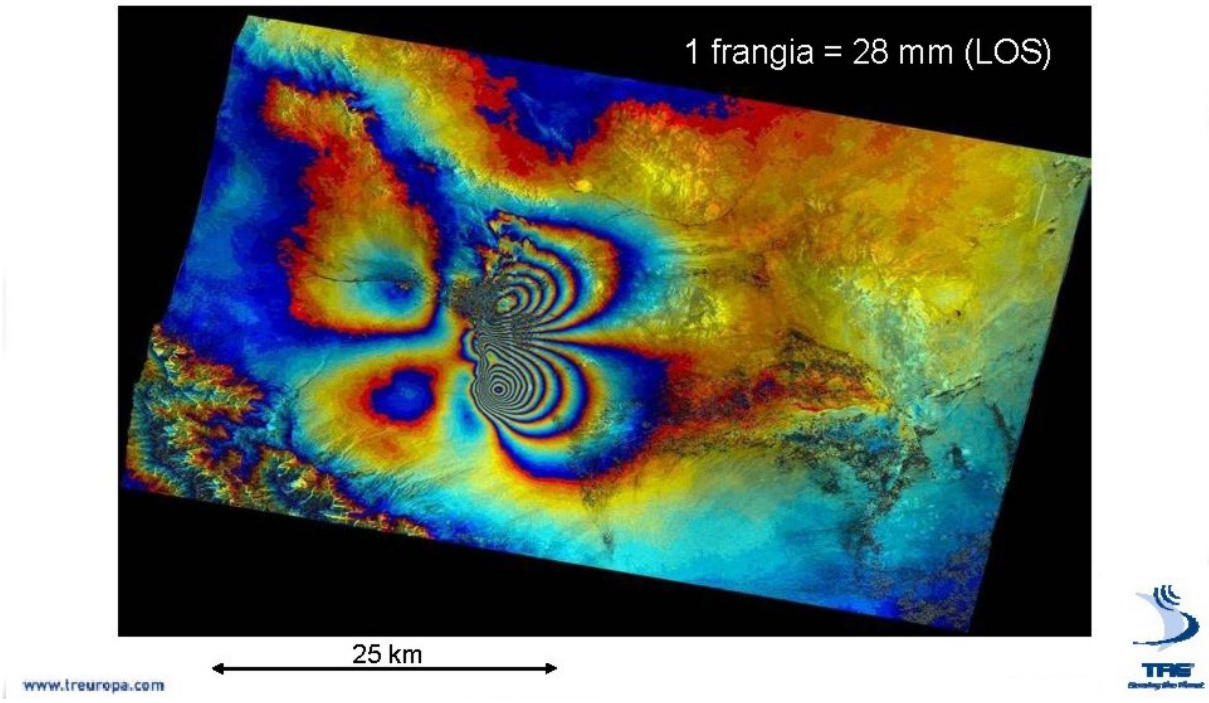

Figura 1.5.2. Esempio di interferogramma generato da un sisma (fonte T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

I contributi di fase, tuttavia, non dipendono solo dalla distanza sensore-bersaglio e, quindi, da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni, ma sono affetti da disturbi (**fenomeni di decorrelazione**) legati alla topografia dell'area, alla riflettività del suolo e alle variazioni delle condizioni atmosferiche tra le due acquisizioni che riducono e talora compromettono, la lettura dell'interferogramma. In primo luogo, intervengono i fenomeni di decorrelazione temporale, causati dalla variazione delle proprietà elettromagnetiche dei bersagli radar nel tempo, soprattutto nel caso di acquisizioni lontane tra loro nel tempo in presenza di copertura vegetale; in secondo luogo, quelli di decorrelazione geometrica, causati dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal satellite durante l'acquisizione delle immagini.

I limiti della tecnica DInSAR classica sono pertanto legati ai fenomeni di decorrelazione e al disturbo atmosferico, che genera effetti in molti casi difficilmente distinguibili dai fenomeni di movimenti del terreno. Inoltre non consente di effettuare stime puntuali ma solo analisi areali, con capacità di risoluzione dell'ordine del centimetro.

Queste difficoltà sono state superate dalla tecnica del diffusori permanenti o *Permanent Scatterers* (*PSInSAR*™), brevettata dal Politecnico di Milano.

2. TECNICA PS

2.1. Generalità sulla tecnica PS

L'approccio PS si basa sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*), è praticamente immune dagli effetti di decorrelazione temporale e geometrica e pertanto, preservando tutte le informazioni di fase nel tempo ed al variare della geometria di acquisizione, mostra caratteristiche ideali per le osservazioni interferometriche. Tipicamente i PS sono parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, e più in generale elementi artificiali o naturali già presenti al suolo le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione; non sono PS invece la vegetazione, il cui aspetto cambia di continuo, le superfici d'acqua (fiumi, laghi, mari) e la copertura nevosa.

I PS, preservando la coerenza di fase in lunghe serie storiche di immagini, possono essere utilizzati per ricostruire e compensare efficacemente il disturbo atmosferico sfruttando il fatto che le condizioni atmosferiche variano lentamente nello spazio e non sono correlate nel tempo. Stimato tale contributo è possibile individuare tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminare i termini spuri e isolare quello che descrive la variazione del cammino ottico dell'onda elettromagnetica e, quindi, i movimenti subiti dal bersaglio nell'arco temporale tra le due acquisizioni. Per eseguire stime accurate dei disturbi atmosferici è necessario che la densità spaziale dei PS sia sufficientemente elevata (> 5 PS/km^2), vincolo sempre verificato in aree urbane, e utilizzare dataset di almeno 25-30 immagini.

L'elaborazione dei PS prende origine da uno studio statistico delle immagini radar e segna un passaggio da un'analisi per coppie di immagini, tipica dell'interferometria differenziale classica DSInSAR, ad un'analisi multi-immagine dell'intero dataset disponibile sull'area di interesse per selezionare l'insieme di PS (*Figura 2.1.1.*).

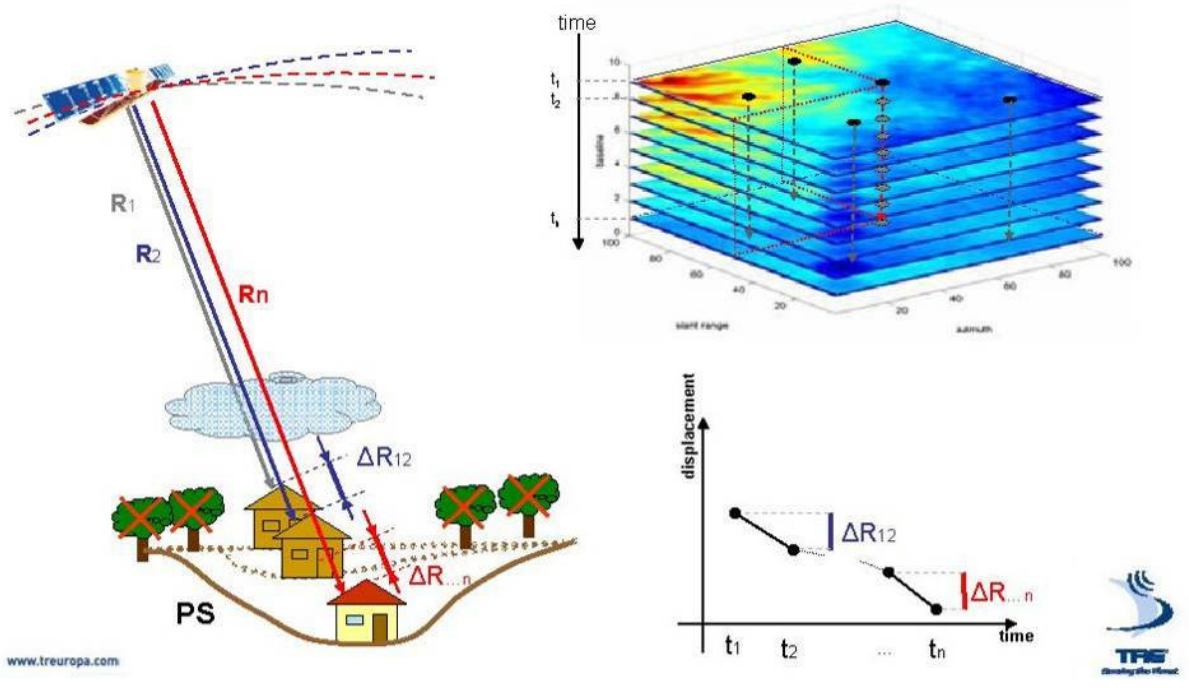

Figura 2.1.1. Rappresentazione schematica del principio di funzionamento della tecnica PSInSAR™ (fonte T.R.E. - TeleRilevamento Europa).

La griglia di PS può essere immaginata come una sorta di rete di stazioni GPS “naturali” per il monitoraggio di vaste aree di interesse, con una frequenza di aggiornamento del dato mensile ed una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata (in aree urbane fino a 100-400 PS/km^2).

Per ogni singolo PS si ricavano la posizione, il trend medio di deformazione con un’accuratezza compresa tra 0.1 e 2 mm/anno e l’intera serie temporale di deformazione con una precisione fino a 1 mm su ogni singola misura per i PS migliori.

L’accuratezza è funzione del numero di immagini e della qualità del bersaglio stesso, cioè di quanto l’informazione di fase del PS sia immune dai fenomeni di disturbo.

Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (*LOS, Line Of Sight*) e sono di tipo differenziale in quanto riferite spazialmente ad uno o più punti di riferimento a terra (*Reference Point*), di coordinate note e supposti fermi, e temporalmente alla data di acquisizione della prima immagine. Inoltre i dati vengono acquisiti con cadenza variabile da sensore a sensore (*revisiting time*): si ricorda che ERS e ENVISAT hanno un tempo di rivisitazione pari a 35 giorni, RADARSAT pari a 24 giorni.

L’elevato grado di precisione che la tecnica PS consente di ottenere per quel che riguarda le misure di spostamento lungo la direzione di puntamento del sensore dipende dalla lunghezza d’onda utilizzata e dalla coerenza dei segnali utilizzati: nel caso dei radar satellitari, la lunghezza d’onda è centimetrica (5.6 cm nel caso di ENVISAT e RADARSAT) e risulta possibile mettere in evidenza spostamenti differenziali di un bersaglio tra due acquisizioni successive pari ad una frazione di lunghezza d’onda. Ne consegue che, nel caso di fenomeni di deformazioni con evoluzione particolarmente rapida, eventuali “salti” di diversi centimetri possano essere “equivocati” ovvero si verifica l’impossibilità di contare il numero intero di lunghezza d’onda (**ambiguità di fase**); al limite, se il bersaglio si muovesse esattamente di mezza lunghezza d’onda fra due passaggi successivi del satellite (2.8 cm nel caso di ERS, ENVISAT o RADARSAT), non risulterebbe possibile rilevare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo. Pertanto, tenuto conto che il segnale percorre per due volte lo stesso cammino (dal sensore al bersaglio e viceversa), la distanza massima misurabile tra due successive acquisizioni è pari a $\lambda/4$ (1.4 cm nel caso di ERS, ENVISAT o RADARSAT).

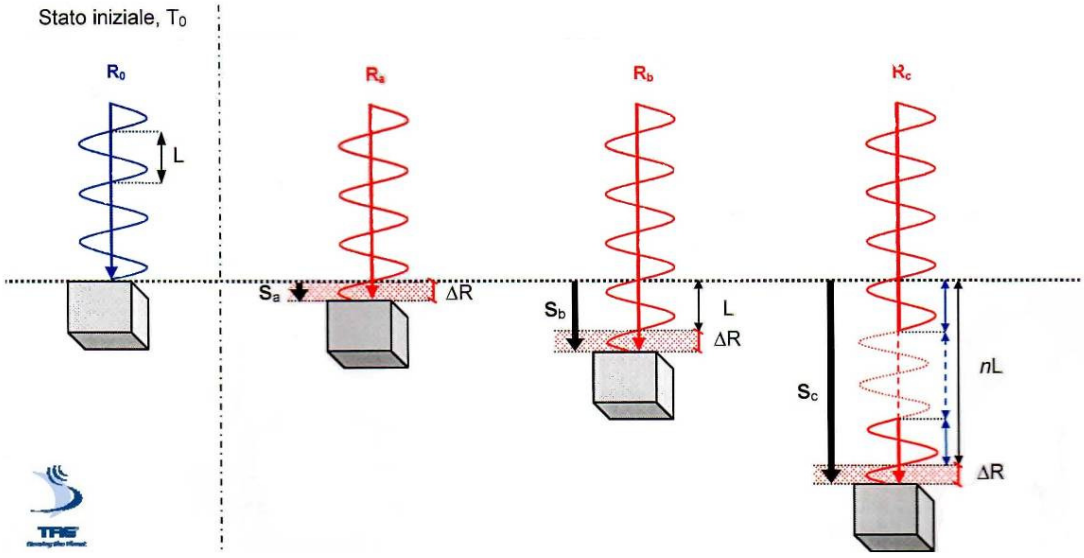

Figura 2.1.2. Esempio di equivocazione del moto dei PS (fonte T.R.E. - TeleRilevamento Europa).

Occorre, infine, ricordare che i sensori hanno un diverso *revisiting time* (35 giorni nel caso di ERS e ENVISAT, 24 giorni nel caso di RADARSAT): nell'ipotesi di acquisizioni regolari, cioè in assenza di rumore, e di moto del PS perfettamente lineare, le velocità annue massime misurabili saranno diverse per i diversi sensori (140 mm/anno nel caso di ERS e ENVISAT, 210 mm/anno nel caso di RADARSAT). Tali valori sono assolutamente teorici: i dati ad oggi acquisiti evidenziano che le deformazioni massime registrate non superano mai i valori di 5 cm/anno.

I principali **vantaggi** della tecnica PSInSAR™ sono:

- stima e rimozione dei contributi del disturbo atmosferico dal segnale;
- stime puntuali;
- archivio storico di immagini radar sul territorio italiano dal 1992 al 2001 (ERS 1-2) e dal 2003 ad oggi (ENVISAT, RADARSAT), con la possibilità di indagare fenomeni passati;
- misure differenziali, con accuratezza elevata: a) fino a 0.1 mm/anno sul trend di deformazione della velocità media; b) fino a 1 mm su singola misura di spostamento verticale;
- elevata densità spaziale di capisaldi radar, già presenti sul territorio (fino a 400 PS/km^2);
- facile integrabilità in ambiente GIS;
- applicazioni sinergiche con altre tecniche di rilevamento;
- accuratezza delle misure sull'asse verticale superiore rispetto alla tecnica GPS.

I principali **limiti** della tecnica sono:

- assenza di misure in aree prive di bersagli radar: aree totalmente vegetate o non visibili al satellite a causa di deformazioni prospettiche legate alla topografia del terreno non contengono PS;
- impossibilità di stabilire a priori il numero di PS e la loro distribuzione areale;
- mancanza di informazioni di spostamento in direzione N-S: secondo la geometria dei satelliti in orbita è possibile apprezzare solo deformazioni lungo la direzione di LOS (componenti E-W e verticale);
- ambiguità della misura: le differenze di fase tra acquisizioni successive possono essere calcolate solo come frazioni di un ciclo d'onda;
- difficile applicabilità della tecnica a movimenti caratterizzati da cinematica estremamente rapida (maggiore di 80 mm/anno) o impulsiva in assenza di informazioni a priori sui fenomeni in atto;
- tempo di rivisitazione elevato: limita l'applicabilità della tecnica a movimenti caratterizzati da velocità di spostamento annuo di ordine centimetrino.

2.2. I PS

Come detto, i PS corrispondono ad elementi naturali o artificiali già esistenti sulla superficie terrestre, quali porzioni di edifici (terrazzi, tetti, cornicioni), monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, pali, strutture metalliche oppure affioramenti rocciosi, coni e falde detritiche.

Si tratta dunque di oggetti caratterizzati da comportamento rigido che, illuminati dal satellite, restituiscono verso di esso un segnale di risposta elettromagnetica ad elevata stabilità nel tempo. Ad ogni passaggio sull'area di interesse, il sistema radar misura la distanza esistente tra il sensore ed il bersaglio a terra lungo la linea di vista del satellite, rilevando eventuali variazioni tra acquisizioni successive e, quindi, lo spostamento dell'oggetto.

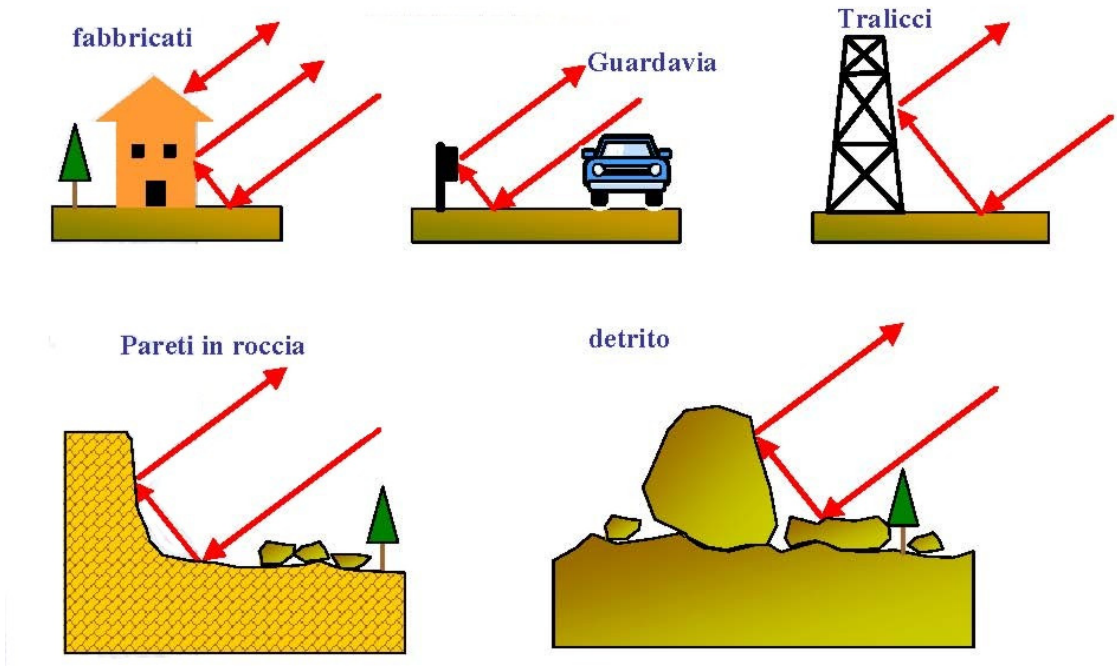

Figura 2.2.1. Rappresentazione schematica di elementi (naturali o artificiali) che si comportano come PS (fonte T.R.E. - TeleRilevamento Europa).

Affinché un oggetto potenziale bersaglio radar possa essere effettivamente rilevato come PS, è necessario che siano verificate alcune condizioni relative alla geometria del versante sul quale è posizionato e al cinematismo del bersaglio, affinché risultino compatibili con il range degli spostamenti rilevabili con la tecnica PS.

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche del versante:

- esposizione sub parallela alla LOS;
- debole acclività.

Per quanto riguarda le caratteristiche cinematiche del bersaglio:

- tassi di spostamento non superiori a 6-8 mm/mese;
- cinematismi costanti nel tempo e comunque non impulsivi;

- spostamenti a prevalente componente verticale.

A ciascun PS sono associate le seguenti informazioni (con * sono indicati i campi presenti in tutti i dataset):

a. codice identificativo*: codice alfanumerico che consente di identificare univocamente il punto di misura all'interno del dataset analizzato;

b. latitudine/longitudine* o north/east*: posizione del PS espresso nel sistema di coordinate proiettate (UTM-WGS84) o geografiche (Gauss-Boaga). La precisione di georeferenziazione del punto è ± 10m in direzione E-W e ± 2m in direzione N-S nel caso dei satelliti ERS e ENVISAT e ± 7m in direzione E-W e ± 2m in direzione N-S nel caso dei satelliti RADARSAT;

c. quota:quota relativa sul livello medio-marino calcolata rispetto alla quota del punto di riferimento a partire dall'ellissoide di riferimento;

d. deviazione standard del valore di quota: indice statistico che misura il grado di dispersione attorno al valore di quota medio;

e. velocità*: velocità media annua di spostamento, espressa in mm/anno, misurata lungo la congiungente sensore-bersaglio (in presenza di spostamenti in direzioni diverse, il valore di velocità rappresenta la proiezione del vettore velocità lungo la LOS). La precisione dichiarata è inferiore a 1 mm/anno;

f. deviazione standard del valore di velocità*: parametro di qualità del dato PS, che misura il grado di dispersione attorno al valore di velocità ovvero l'errore sulla velocità media di ciascun PS. E' funzione della distanza del PS dal punto di riferimento;

g. coerenza*: parametro di qualità del dato PS rappresentativo dell'accordo tra il dato misurato e il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi. Può assumere valori compresi tra 0 (punti privi di attinenza con il modello e quindi inaffidabili) e 1 (punti ad elevato accordo con il modello e quindi affidabili); bassi valori di coerenza non necessariamente indicano un'elevata rumorosità del dato ma possono essere causati da tipi di moto che si discostano dal modello di moto lineare;

h. serie storica*: serie di valori che rappresenta, per ciascun PS, gli spostamenti subiti dal bersaglio lungo la LOS (espressi in mm) in funzione del tempo trascorso dall'acquisizione master che viene utilizzata come riferimento temporale e posta quindi a 0 mm. In genere sono caratterizzate da valori di coerenza elevata.

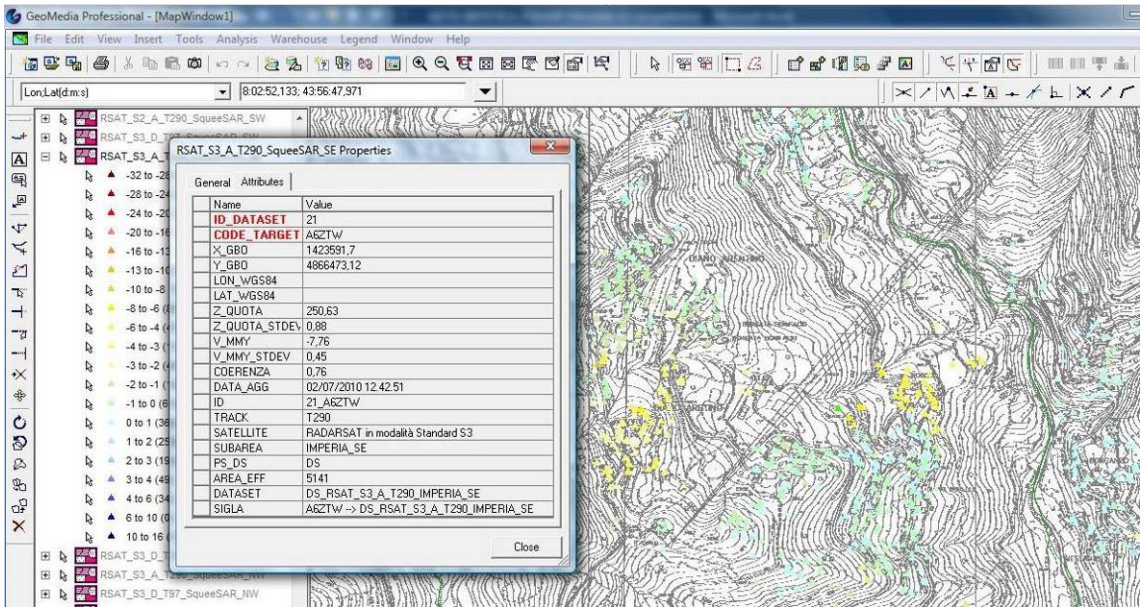

Figura 2.2.2. Esempio di visualizzazione dei campi di velocità dei PS in ambiente GIS

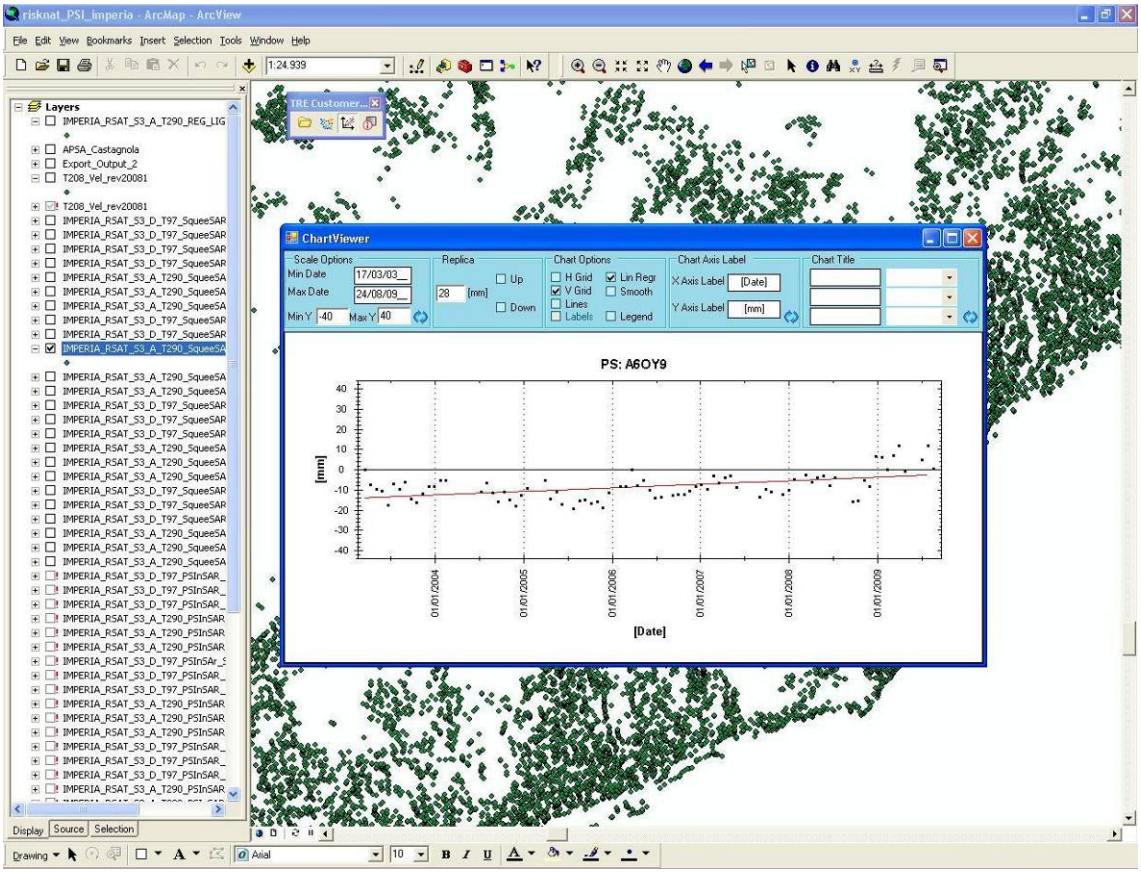

Figura 2.2.3. Esempio di visualizzazione della serie storica degli spostamento in ambiente GIS utilizzando la "Client Toolbar" fornita da T.R.E. – Telerilevamento Europa

2.3. Precisione delle misure

La qualità delle misure PS dipende da alcuni fattori:

- numero di immagini disponibili e loro frequenza: maggiore è il numero di immagini radar processate, più elevata è la probabilità di identificare punti di misura, mentre più frequenti nel tempo sono le misure, migliore è la stima degli spostamenti differenziali dei PS;

- problemi di decorrelazione: sono legati all'incertezza dei parametri orbitali dei satelliti e all'eventuale variazione nel tempo delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio;

- rumore atmosferico: eventuali errori residui possono presentarsi in caso di condizioni atmosferiche non perfettamente simulabili durante il processo di rimozione del disturbo atmosferico;

- distanza e differenza di quota dal punto di riferimento: maggiore è la distanza dal punto di riferimento minore è la precisione della misura ed è espressa dal valore di deviazione standard associato a ciascun PS; allo stesso modo un'elevata differenza di quota determina un aumento della deviazione standard del valore di velocità media.

Le problematiche legate all'accuratezza e precisione dei risultati forniti dalla tecnica PS riguardano:

- georeferenziazione del PS: la procedura è affetta da due tipi di errori, uno variabile per ciascun PS legato al passaggio da coordinate SAR a coordinate geografiche e l'altro comune all'intero set di PS dovuto all'operazione di allineamento dei PS sul supporto cartografico mediante traslazione rigida.

- determinazione della velocità media e delle serie storiche: la stima degli spostamenti è affetta dal disturbo atmosferico e dal rumore di decorrelazione.

Per quanto riguarda il passaggio da coordinate SAR a coordinate geografiche, nel caso dei satelliti ERS/ENVISAT il posizionamento del PS è affetto in direzione N-S da un errore con distribuzione statistica di tipo uniforme compresa tra ± 2m mentre in direzione E-W da un errore con distribuzione statistica di tipo gaussiano a valor medio nullo e deviazione standard pari a circa 6 m.

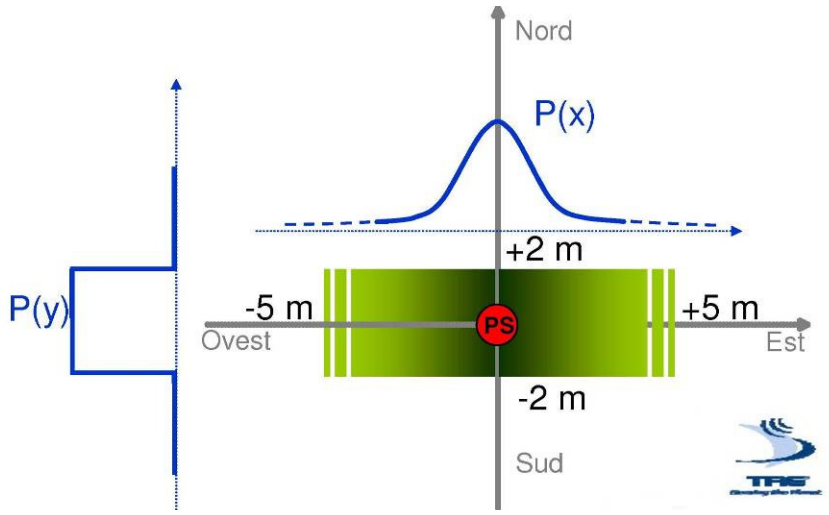

Figura 2.3.1. Schematizzazione degli errori di posizionamento del PS nella geometria SAR per i satelliti ERS/ENVISAT (fonte T.R.E. – Telerilevamento Europa

Di seguito i valori di precisione del dato PS dichiarati da TRE, da considerarsi validi per punti distanti dal punto di riferimento meno di 1 km in caso di dataset composti da almeno 40 immagini.

Posizione in Nord	± 2m
Posizione in Est	± 7m
Quota ellissoidica	± 1.5 m
Velocità media di spostamento	± 1 mm/anno
Misure differenziali di spostamento	± 5 mm

Figura 2.3.2. Precisione delle misure (1σ) sotto ipotesi di dataset di 40 immagini e distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km fornite da T.R.E. – Telerilevamento Europa

2.4. Visualizzazione dei PS

La visualizzazione dei PS viene effettuata classificando i punti in funzione della velocità con colori differenti. La scala cromatica utilizzata identifica:

- tonalità dal giallo al rosso: punti in allontanamento dal satellite lungo la LOS;
- colore verde: punti stabili;
- tonalità dall'azzurro al blu: punti in avvicinamento al satellite lungo la LOS.

I valori di velocità vengono generalmente raggruppati in un numero di classi i cui limiti possono essere scelti in funzione delle esigenze di analisi, a seconda della tipologia (e quindi dalla velocità) del fenomeno esaminato (frana, subsidenze, neotettonica, ecc.)

Figura 2.4.1. Legenda standard utilizzata da Regione Liguria per la tematizzazione delle classi di velocità

I bersagli nelle due geometrie orbitali, discendente ed ascendente, devono essere rappresentati con una simbologia differente (ad esempio triangoli per gli ascendenti e cerchi per i discendenti): a causa delle differenti geometrie di vista delle due orbite, si possono generare notevoli differenze nel tasso di deformazione anche su uni stesso versante.

3. LIMITI DELLA TECNICA PS CON RIFERIMENTO ALL'ANALISI DEI FENOMENI FRANOSI

Nell'interpretazione dei dati PS in generale e nella valutazione dei fenomeni franosi in particolare, occorre tenere presente una serie di elementi e limitazioni, legati principalmente alle caratteristiche intrinseche della tecnica e alla natura del dato. Per la definizione e caratterizzazione di tali fenomeni pertanto non è possibile fare riferimento esclusivamente al dato PS in quanto esso rappresenta solo uno tra gli elementi che, unitamente ai più tradizionali rilievi di terreno, fotointerpretazione, monitoraggio, dati storici, ecc., concorrono alla loro caratterizzazione.

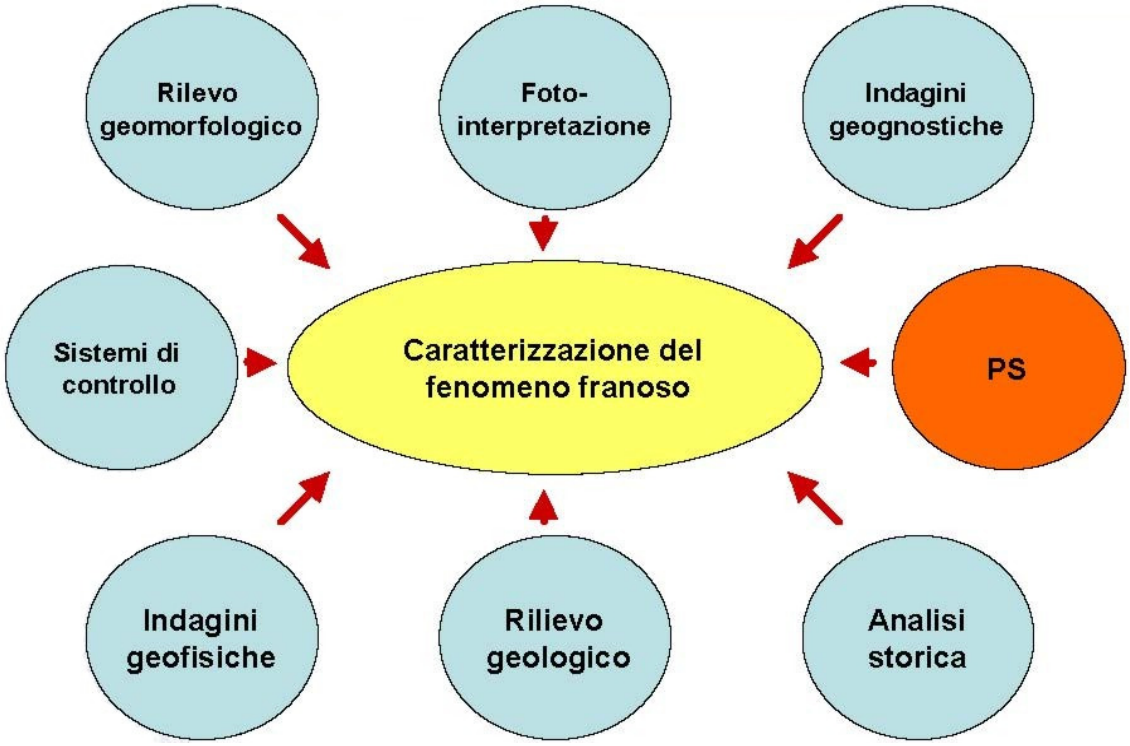

Figura 3. Rappresentazione schematica degli elementi che contribuiscono alla caratterizzazione del fenomeno franoso (*fonte ARPA Piemonte*)

3.1. Copertura del territorio

Non tutto il territorio è adatto ad essere indagato con la tecnica PSInSAR™ o SqueeSAR™. L'assenza di informazioni (ovvero l'assenza di riflettori PS) è dovuta a:

- aspetti geometrici legati alle relazioni tra le orbite satellitari e l'orientazione dei versanti (*(Figura 3.1.1.*): i versanti paralleli alla direzione di vista del sensore non sono analizzabili mentre alcuni versanti non sono illuminati in quanto coperti da altri; esistono inoltre sensibili distorsioni prospettiche dei pendi ad elevata energia del rilievo;
- assenza di riflettori in aree vegetate e innevate, che non riflettono quindi segnali radar;

- presenza di riflettori temporanei (strutture in costruzione o ristrutturazione durante il periodo di monitoraggio del satellite);
- assenza di riflettori.

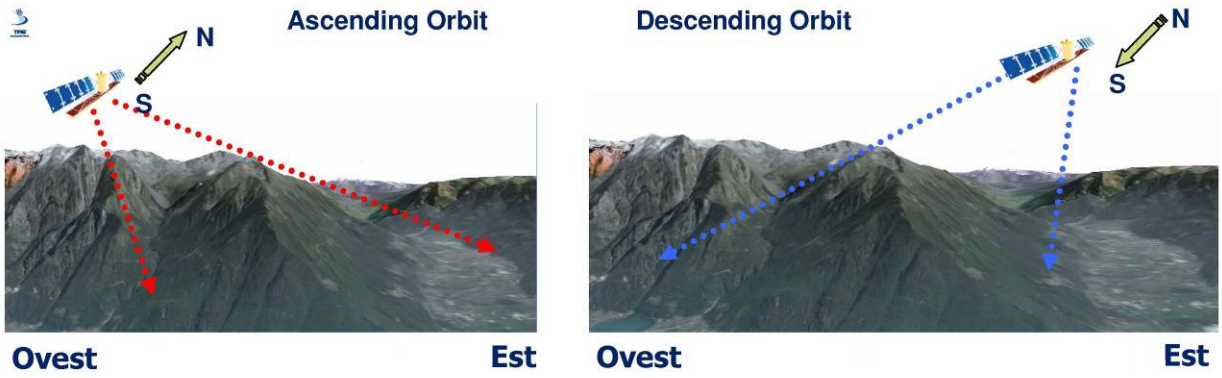

Figura 3.1.1. Versanti monitorabili con le due diverse geometrie di acquisizione: in modalità ascendente, ossia percorrendo l'orbita da sud verso nord, il sensore illumina l'area da ovest verso est e pertanto risultano ben visibili i versanti esposti verso est; in modalità discendente, ossia percorrendo l'orbita da nord verso sud, il sensore illumina l'area da est verso ovest e pertanto risultano ben visibili i versanti esposti verso ovest. I versanti esposti verso nord e sud risultano visibili in entrambe le geometrie (fonte T.R.E. – TeleRilevamento Europa)

3.2. Relatività delle misure

Tutte le misure di velocità attribuite ai PS sono misure relative in quanto derivanti dal confronto tra il singolo bersaglio ed un bersaglio di riferimento considerato stabile (*REF*). Benché venga posta estrema cura nella localizzazione del punto di riferimento, è possibile che lo stesso non sia perfettamente stabile, anche per assenza o scarsità di informazioni a priori circa moti del sito o presenza di deformazioni regionali; inoltre la deviazione standard dall'errore della misura di velocità aumenta all'aumentare della distanza da esso.

Per quanto riguarda l'individuazione del punto di riferimento, è pertanto auspicabile basare la scelta non solo su criteri ingegneristici ma anche geologici:

- ubicazione in aree stabili dal punto di vista geologico (assenza di dinamiche di versante o di terreni problematici, ecc.);
- localizzazione in zone facilmente accessibili e possibilmente non soggette a modificazioni nel tempo (ad esempio rifacimento di tetti nel caso di edifici, ecc.);
- prossimità a capisaldi topografici o di altro tipo monitorabili nel tempo;
- posizione baricentrica rispetto all'area indagata.

3.3. Campi di velocità rilevabili

La tecnica PS è in grado di individuare deformazioni all'interno di un preciso campo di velocità (velocità della componente lungo LOS):

- limite superiore: bersagli con velocità tali da subire spostamenti superiori ad un quarto di lunghezza d'onda tra due acquisizioni successive non vengono individuati come PS e, pertanto,per i satelliti in banda C, non vengono rilevati spostamenti (lungo LOS) superiori a 5-6 cm/anno;

- limite inferiore: relativamente al campo dell'interpretazione dei fenomeni franosi, si possono considerare stabili i bersagli con velocità lungo LOS pari a ± 2 mm/anno.

3.4. Aspetti geometrici

Il metodo rileva spostamenti lungo un solo asse, quello congiungente il bersaglio a terra con il sensore (LOS), che presenta orientazione spaziale diversa per le orbite ascendenti e discendenti; in altri termini il metodo rileva se il bersaglio a terra si è avvicinato o allontanato dal satellite. Tale configurazione geometrica presenta numerose implicazioni in fase di interpretazione di dati quando ci si riferisce ad areali collinari o montuosi:

- viene rilevata solo una componente dello spostamento totale, lungo l'asse di vista del satellite (LOS); a seconda dell'orientazione dei versanti e dell'asse degli spostamenti potranno essere rilevati valori prossimi allo spostamento totale o solo una minima frazione degli stessi (*Figura 3.4.1.*). Il valore di velocità rilevato sarà tanto più vicino a quello reale quanto più il bersaglio si sposta lungo la direzione coincidente con la LOS): al limite, nel caso di moto ortogonale alla linea di vista del satellite, lo spostamento misurato è nullo;

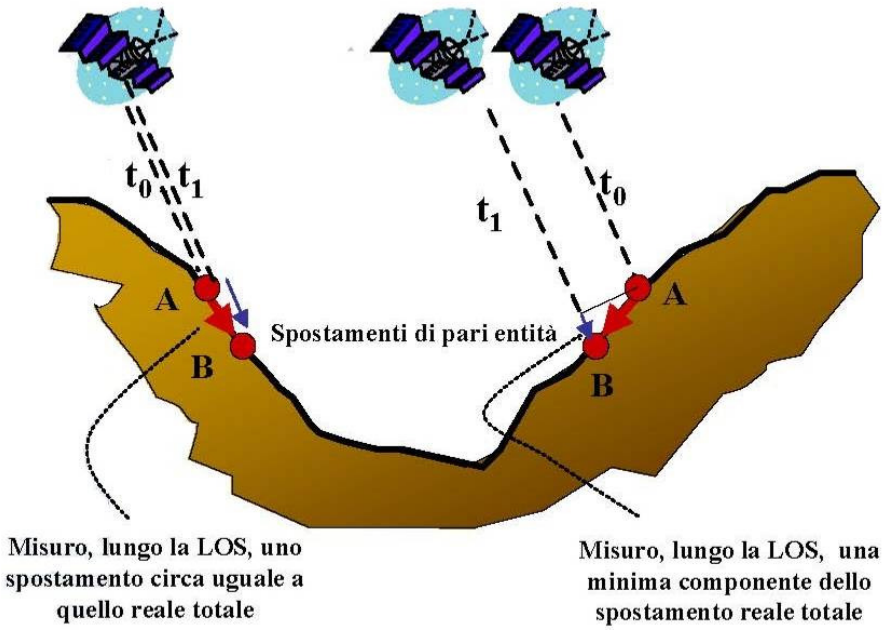

Figura 3.4.1. Rappresentazione schematica delle componenti misurate nel caso di due spostamenti di uguale entità su versanti opposti: le relazioni geometriche tra orientazione dei versanti, orbita satellitare e direzioni degli spostamenti fanno si che in un caso (a sinistra) il dato PS indica uno spostamento prossimo a quello reale, mentre nell'altro caso (a destra) viene rilevata solo una frazione minima dello spostamento totale (fonte ARPA Piemonte)

- date le relazioni geometriche tra orientazione dei versanti e orbita satellitare, nel caso di deformazioni a prevalente componente orizzontale, saranno meglio rilevati gli spostamenti lungo l'asse E-W in quanto comportano più decisi avvicinamenti o allontanamenti dal satellite. Al contrario, i movimenti lungo l'asse N-S non comportano sensibili movimenti rispetto al satellite e pertanto non vengono rilevati o, più precisamente, vengono rilevate solo componenti minime;

- nel caso di spostamenti lungo l'asse E-W, gli stessi riflettori potranno indicare valori di spostamento opposti nelle elaborazioni relative alle orbite ascendente e discendente in quanto il riflettore rispettivamente risulterà in avvicinamento e in allontanamento dal satellite (*Figura 3.4.2.*);

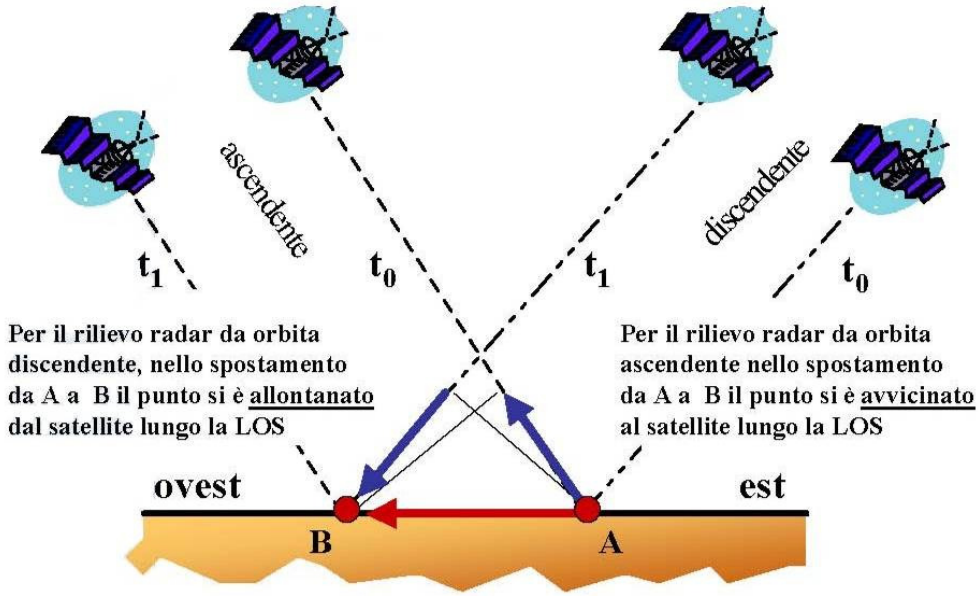

Figura 3.4.2. Rappresentazione schematica del caso di un riflettore PS che si sposta nel tempo da est verso ovest (da A a B) lungo un percorso suborizzontale per il quale vengono registrati valori di spostamento opposti nelle elaborazioni relative alle due geometrie orbitali: le elaborazioni effettuate a partire dai dati del satellite che percorre l'orbita discendente indicano che il punto si è allontanato dal satellite, mentre le elaborazioni effettuate a partire dai dati del satellite che percorra l'orbita ascendente indicano che il punto si è avvicinato al satellite. Un'analisi superficiale potrebbe quindi portare a risultati contrastanti: abbassamento nel primo caso e sollevamento nel secondo (fonte ARPA Piemonte)

- un'analisi superficiale della distribuzione del seminato PS può portare a definire settori a comportamento cinematico diverso dove, in realtà, tali settori differiscono unicamente per l'orientazione del versante rispetto alle orbite satellitari, elemento che si riflette in componenti diversi degli spostamenti reali lungo la LOS;

- la presenza su uno stesso versante di settori con diversa orientazione rispetto alle orbite satellitari può portare a rilevare componenti tra loro diverse degli spostamenti reali lungo la LOS e pertanto una erronea definizione di settori a comportamento cinematico differente.

3.5. Interpretazione delle deformazioni osservate sugli edifici

La massa dei PS rilevati corrisponde in genere a fabbricati o infrastrutture. Nell'interpretazione dei fenomeni franosi occorre tenere presente che non è possibile attribuire acriticamente al fenomeno le velocità rilevate sugli edifici e i manufatti. Tra le velocità "reali" del fenomeno franoso e le velocità rilevate sui manufatti si interpongono numerosi elementi che possono amplificare o sottostimare i valori registrati:

- richiamo di terreno da parte dei fenomeni franosi attivi;
- fenomeni di ritiro-rigonfiamento della copertura argillosa;
- caratteristiche strutturali dell'edificio e, in particolare, le caratteristiche delle sue fondazioni;
- fattori geotecnici legati al comportamento dei terreni di fondazione.

Quando un PS coincide con un manufatto, la posizione del bersaglio su di esso può influenzare sensibilmente i valori e l'interpretazione dei valori di velocità registrate (*Figura 3.5.1.*)

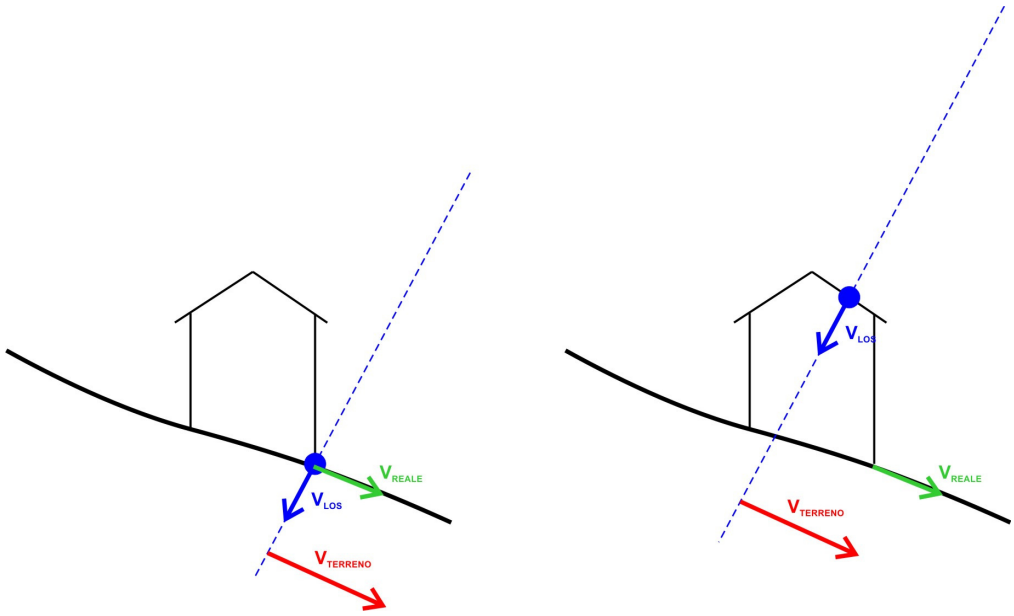

Figura 3.5.1.: se il bersaglio è posizionato alla base di un manufatto fondato direttamente su terreno naturale, il valore di velocità misurato è, presumibilmente, prossimo alla componente della velocità reale di spostamento del terreno lungo la LOS (a sinistra); se il bersaglio è ubicato in elevazione su un manufatto, la velocità misurata rappresenta la proiezione sulla LOS della risultante dell'interferenza fra la velocità di spostamento del terreno e la risposta della struttura del manufatto allo spostamento del terreno stesso (a destra).

3.6. Movimenti non lineari

L'analisi PS standard suppone l'esistenza di movimenti che seguono un andamento lineare. In presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare si hanno forte perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS. In presenza di movimenti non lineari occorre pertanto modificare l'algoritmo utilizzato (per esempio applicando dei modelli polinomiali o una riduzione dei valori della soglia di coerenza) l'adozione di modelli diversi da quello lineare comporta tuttavia un notevole calcolo computazionale che rende possibile la loro applicazione solo nel caso di studi di dettaglio, limitati ad un'area circoscritta (*local area*).

4. PRATICHE DA EVITARE

Nell'analisi dei dati PS occorre assolutamente evitare:

- indagini PS su aree inadatte all'analisi PS (versanti ad orientazione sfavorevole, aree vegetate);
- acritica accettazione del dato PS come "risolutore";
- acritica trasposizione del seminato di PS in una zonizzazione del territorio a fini pianificatori;
- interpretazione generica degli spostamenti rilevati come dovuti a sole componenti sub-verticali;
- assenza di PS interpretata come assenza di movimenti;
- acritica interpretazione di spostamenti rilevati su manufatti come spostamenti dovuti a corpi di frana.

5. TECNICA SqueeSAR™

5.1. Generalità sulla tecnica

Un' immagine SAR contiene dati provenienti da bersagli di varia natura, sia naturali (boschi, rocce, prati, ecc.) che artificiali (manufatti, strutture metalliche, autoveicoli, ecc.): le caratteristiche elettromagnetiche possono dunque variare significativamente anche tra pixel adiacenti di un'immagine radar. È possibile far ricadere i pixels dell'immagine in due "famiglie" di bersagli:

- <u>bersagli puntiformi</u>: l'interazione con il segnale elettromagnetico è propria di un solo pixel dell'immagine o al più di pochi altri pixel ad esso connessi.
- <u>bersagli distribuiti</u>: bersagli che esibiscono un'interazione con il segnale elettromagnetico pressoché identica per tutto un gruppo di pixel (ad esempio un campo agricolo, un bosco, una porzione di territorio caratterizzato dallo stesso tipo di vegetazione, ecc.).

I bersagli radar del primo tipo sono i **PS** (*Permanent Scatterers*) mentre quelli del secondo tipo prendono il nome di **DS** (*Distributed Scatterers*).

E' stato recentemente messo a punto e brevettato da T.R.E. un nuovo algoritmo, denominato **SqueeSAR™**, grazie al quale è possibile estrarre maggiore informazione dall'immagine SAR utilizzando anche quella fornita dai bersagli radar distribuiti (DS).

A differenza di un target puntiforme (PS), dove l'energia retrodiffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità dell'eco radar per un pixel appartenente ad un DS è solitamente molto più bassa. Ciò comporta una stima più rumorosa dei parametri fisici relativi al bersaglio in esame ottenibili dall'analisi del segnale radar (ad esempio la velocità di spostamento) se si esegue la stima a livello di singolo pixel. Tuttavia il fatto che l'interazione con il segnale radar sia la medesima per tutti i pixels appartenenti al medesimo DS ne consente l'utilizzo congiunto al fine di ottenere una riduzione del rumore inevitabilmente presente nei dati (quest'operazione è nota con il termine di filtraggio). I dati così filtrati permettono un miglioramento significativo della

qualità della stima dello spostamento del DS che risulta così paragonabile a quella ottenibile per un PS. Tutto questo, però, a discapito della risoluzione spaziale, dato che l'operazione di filtraggio comporta inevitabilmente una perdita di dettaglio.

Esempi di target distribuiti sono ad esempio rocce esposte, aree detritiche, campi non coltivati, aree desertiche (non sabbiose).

Le informazioni fornite dai DS integrano quelle dei PS e risultano particolarmente efficaci in aree prive di bersagli puntuali, tipicamente le aree non urbanizzate, caratterizzate comunque da una risposta radar stabile nel tempo. Consentono infatti di ottenere una copertura più continua del territorio e risultano particolarmente utili nella perimetrazione di aree interessate da fenomeni di deformazione o movimento superficiale.

Analogamente a quanto avviene per i PS, per ciascun DS vengono forniti il valore di velocità media annua e la serie storica di spostamento lungo la LOS.

Nella tabella attributi associata allo shapefile con i risultati dell'elaborazione è stato inserito un campo nel quale viene riportata l'estensione dell'**area efficace** associata a ciascun DS. Tale valore nel caso dei PS è convenzionalmente posto uguale a zero. L'estensione dell'area rappresentata da ciascun DS è generalmente inferiore ad un ettaro.

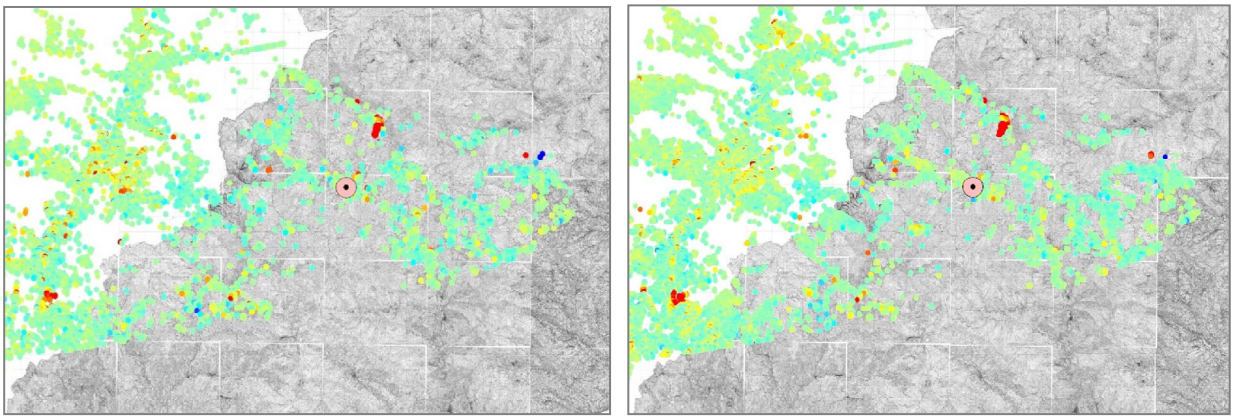

Figura 5.1.1. Confronto tra i risultati dell'analisi PSInSAR™ (sinistra) e SqueeSAR™ (destra) sulla stessa porzione di territorio: l'aumento dl numero di bersagli radar riguarda prevalentemente falde detritiche ed aree con affioramenti rocciosi In questo caso, pertanto, i DS apportare informazioni aggiuntive ai PS

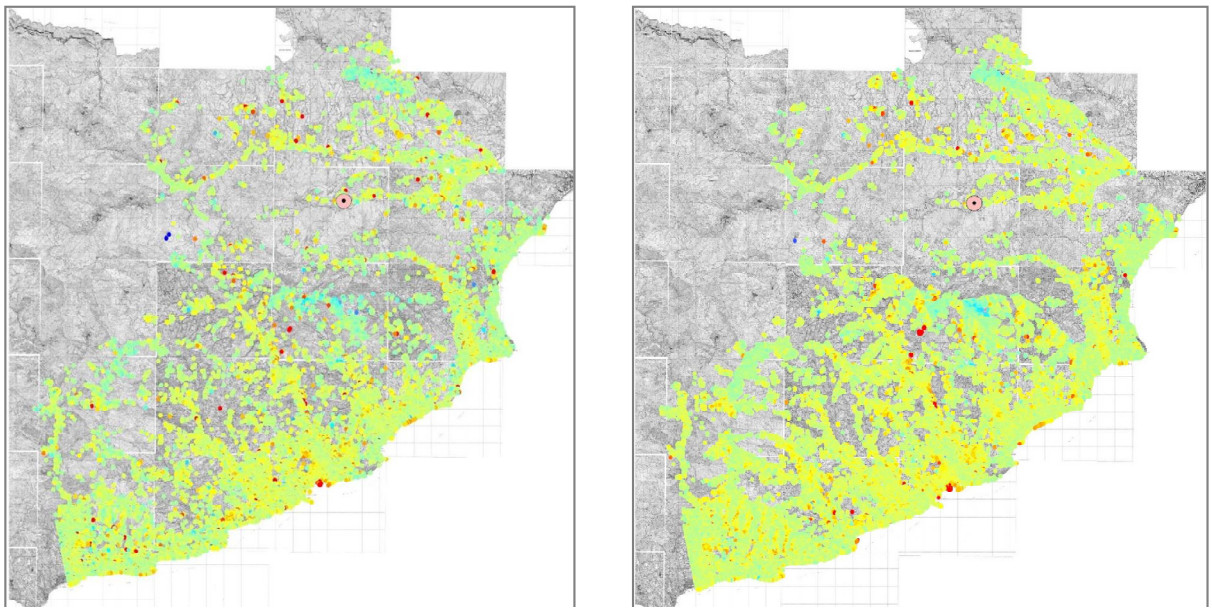

Figura 5.1.2. Confronto tra i risultati dell'analisi PSInSAR™ (sinistra) e SqueeSAR™ (destra) sulla stessa porzione di territorio: l'aumento dl numero di bersagli radar riguarda prevalentemente le aree urbanizzate lungo la costa e gli assi vallivi principali, già caratterizzati da densità elevate In questo caso, pertanto, i DS integrano i PS senza tuttavia apportare informazioni aggiuntive

5.2. Precisione delle misure

Le problematiche relative all'accuratezza ed alla precisione dei risultati forniti dalla tecnica PSInSAR™ - SqueeSAR™ riguardano tre aspetti distinti:

- la georeferenziazione dei PS-DS;
- la determinazione della velocità media di spostamento;
- la determinazione delle serie storiche degli spostamenti.

In tabella sono sintetizzati i valori di precisione raggiungibili in caso di analisi di almeno 40 immagini e per punti distanti dal punto di riferimento meno di 2 km. Per un DS la precisione di georeferenziazione si intende relativa al baricentro dell'area efficace ad esso associata.

Posizione in Nord	± 2m
Posizione in Est	± 7m
Quota ellissoidica	± 1.5 m
Velocità media di spostamento	± 1 mm/anno
Misure differenziali di spostamento	± 5 mm

Figura 5.2.1. Precisione delle misure (1σ) sotto ipotesi di dataset di 40 immagini e distanza dal punto di riferimento inferiore a 2 km fornite da T.R.E. – Telerilevamento Europa