



## La tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> di telerilevamento satellitare applicata al progetto ed alla realizzazione delle infrastrutture ferroviarie

### Satellite remote-sensing PSInSAR<sup>TM</sup> technique applied to design and construction of railway infrastructures

*Dott. Ingg. Andrea PIGORINI(\*), Massimo RICCI(\*\*), Alessandra SCIOTTI(\*\*\*), Chiara GIANNICO(\*\*\*\*), Dott. Geol. Andrea TAMBURINI(\*\*\*\*)*

#### 1. Premessa

La tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> <sup>(1)</sup> è uno strumento efficace per il monitoraggio ad alta precisione dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre, ed è basata sull'impiego di serie temporali di immagini radar satellitari. Italferr ha recentemente siglato un Accordo Quadro con la società che ne ha la licenza in esclusiva<sup>(2)</sup>, aprendo la strada ad una serie di applicazioni della tecnica in ambito ferroviario, di utile supporto in tutte le fasi della vita di una infrastruttura: dal concepimento progettuale alla fase realizzativa e, infine, all'esercizio.

Nell'articolo viene descritta questa particolare tecnica di elaborazione delle immagini satellitari, sottolineandone i limiti e le potenzialità; tra quest'ultime si evidenzia in particolare la disponibilità sull'intero territorio nazionale di archivi storici di immagini satellitari, che consentono di recuperare serie storiche di spostamento sin dal 1992.

Vengono quindi analizzate le possibili applicazioni in ambito ferroviario, con riferimento a casi di studio che coinvolgono opere in sotterraneo (la galleria Cassia-Monte Mario a Roma e la galleria Scianina-Tracoccia a Messina). In particolare, le recenti analisi condotte nella zona dei cantieri del Nodo di Bologna, durante i lavori per il completamento della galleria naturale della nuova linea AV/AC, hanno offerto la possibilità di un utile confronto tra le misure di spostamento ottenute dall'elaborazione dei dati satellitari e quelle tradizionali dei dati del monitoraggio previsto in progetto a presidio dei lavori.

#### 1. Abstract

PSInSAR<sup>TM</sup> <sup>(1)</sup> is an efficient tool for high precision monitoring of deformation of the Earth's surface and is based on the use of a time series of satellite radar images. Italferr has recently signed a Framework Agreement with the company owning the exclusive patent<sup>(2)</sup> of the PSInSAR<sup>TM</sup> technique thus opening the way to a series of applications in the railway field; these applications could be a useful support in all life phases of the infrastructure: from the design phase to the construction and operation phases.

This paper describes the satellite image processing technique revealing its limits and its potentials: a particular potential is the availability of a satellite image historical archive all over the nation thus allowing the recovery displacement historic time series dating back up to 1992.

Some possible applications in the railway field are then analyzed with particular reference to case studies involving underground works (the Cassia-Monte Mario tunnel in Rome and the Scianina-Tracoccia tunnel in Messina). Recent analyses carried out in the area of the working sites of the Bologna Node, during work for the completion of the tunnel along the new High-Speed/High-Capacity line, provided a useful comparison between the displacement measurements obtained by satellite data processing and the topographic measurement data obtained during the work.

(\*) Italferr – Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Gallerie.  
(\*\*) Italferr – Direzione Tecnica, U.O. Gallerie, Settore Calcoli Geotecnici e Strutturali.

(\*\*\*) Italferr – Direzione Tecnica, U.O. Gallerie, Capo Settore Calcoli Geotecnici e Strutturali.

(\*\*\*\*) TRE – Tele-Rilevamento Europa srl Milano.

<sup>(1)</sup> La tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> è stata sviluppata e brevettata dal Politecnico di Milano nel 1999.

<sup>(2)</sup> Tele-Rilevamento Europa srl Milano, primo *spin off* del Politecnico di Milano.

(\*) Italferr – Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Gallerie.  
(\*\*) Italferr – Direzione Tecnica, U.O. Gallerie, Settore Calcoli Geotecnici e Strutturali.

(\*\*\*) Italferr – Direzione Tecnica, U.O. Gallerie, Capo Settore Calcoli Geotecnici e Strutturali.

(\*\*\*\*) TRE – Tele-Rilevamento Europa srl Milano.

<sup>(1)</sup> PSInSAR<sup>TM</sup> technique was developed and patented in 1999 by the "Politecnico di Milano".

<sup>(2)</sup> Tele-Rilevamento Europa srl Milan, first *spin off* of the "Politecnico di Milano".

## 2. Introduzione

A partire dagli anni '90 i primi dati della superficie terrestre forniti da Radar ad Apertura Sintetica (SAR) montati a bordo di satelliti, hanno impresso una svolta significativa al settore dell'Osservazione della Terra, aprendo nuove prospettive, fino a quel momento impensabili, all'analisi e al monitoraggio dei fenomeni di deformazione superficiale.

I sistemi radar di tipo SAR consentono di ottenere immagini della superficie terrestre ad alta risoluzione e sono in grado di misurare la distanza sensore-bersaglio registrando il tempo intercorso tra l'emissione dell'onda elettromagnetica inviata verso la superficie terrestre dal sensore radar montato sul satellite e la ricezione del segnale retro-diffuso dal bersaglio stesso a terra.

I satelliti SAR, ad un'altezza di circa 800 km, ripercorrono la stessa orbita con cadenza regolare e consentono, pertanto, di ottenere sequenze temporali di immagini della stessa area. Grazie a questa periodicità di acquisizione, i dati SAR forniscono misure ripetute nel tempo della distanza sensore-bersaglio lungo la direzione di vista del satellite. Eventuali variazioni della distanza misurata in istanti di tempo diversi consentono di mettere in luce gli spostamenti del bersaglio a terra, e di apprezzare quindi le deformazioni sulla superficie terrestre.

La tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> si pone come obiettivo quello di sfruttare tutte le acquisizioni disponibili su una stessa area ed individuare quei bersagli radar identificati sulla superficie terrestre dal satellite che si distinguono per il fatto di possedere una elevata stabilità nel tempo della risposta elettromagnetica (*Permanent Scatterers* - PS). I PS corrispondono generalmente ad elementi presenti al suolo quali manufatti (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.), oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito, etc.).

L'affinamento della tecnologia ha permesso di raggiungere oggi una precisione millimetrica nella stima delle misure di spostamento sul terreno, che, unita alle tipiche caratteristiche dei sistemi di telerilevamento, ed in particolare alla capacità di coprire da remoto vaste aree della superficie terrestre (da poche unità fino a migliaia di chilometri quadri), ha di fatto messo a disposizione uno strumento nuovo e molto efficace per il monitoraggio ad alta precisione dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre, di utile supporto per analisi di carattere geologico, geotecnico e geofisico, a qualsiasi scala, fino a studi di dettaglio su singole strutture.

## 3. Il telerilevamento radar satellitare

### 3.1. Satelliti radar

I sistemi radar satellitari forniscono immagini elettromagnetiche della superficie terrestre a frequenze comprese

## 2. Introduction

Early Earth surface data from *Synthetic Aperture Radars* (SAR) installed onboard the satellites have given, since the early 90's, a significant impulse to the Earth observation field and opened new unimaginable perspectives on the analysis and monitoring of the surface deformation phenomena.

SAR radar systems allow high resolution images of the Earth surface to be obtained; they are able to measure the sensor to target distance by recording the time elapsed between the emission of the electromagnetic wave from the satellite towards the Earth's surface and the reception of the signal that is back-scattered by the ground itself.

SAR satellites orbit at a height of about 800km with the same frequency, thus allowing time sequences of images of the same area to be obtained. Thanks to this periodical acquisition, SAR data returns a time sequence of measurements of the sensor-target distance along the sight direction of the satellite. Possible variations in distance measured at different times allow the detection of ground target displacements, thus ground surface deformations.

The PSInSAR<sup>TM</sup> technique aims to exploit all available data for a definite area, and to detect radar targets on the Earth's surface identified by the satellite in that area that are characterised by a stable temporal electromagnetic response (*Permanent Scatterers* - PS).

The Permanent Scatterers generally correspond to ground elements such as manufactured structures (buildings, monuments, streets, railway lines, antennas, metallic structures, etc.) or natural elements (rocky outcrops, debris accumulations, etc.).

Refinement of the technology has allowed millimetric precision to be achieved in the estimation of the ground displacement measurements. This particularity, along with the characteristics of remote sensing systems (such as the capacity to cover large areas of the Earth's surface from a few to thousands of square kilometres), represents a new and very efficient tool for high precision monitoring of surface deformation phenomena. It is moreover a useful support for geological, geotechnical and geophysical interpretation on different scales and for detailed studies on single specific structures.

## 3. The Radar Satellite Remote Sensing System

### 3.1. Radar Satellites

Satellite radar systems allow electromagnetic (e.m) images of the Earth surface to be obtained in a frequency range from 500 MHz to 10 GHz with a spatial resolution of a few meters. Compared with optical sensors, radar satellite systems can acquire data independently of weather conditions and sun illumination conditions.

As well known, a radar (RADio Detecting And Ranging) is an active sensor: an antenna irradiates electro-

se tra 500 MHz e 10 GHz, con risoluzione spaziale di qualche metro. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa, sia di giorno che di notte.

Il principio di funzionamento RADAR (acronimo di *radio detecting and ranging*) è il seguente: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incidendo sulla superficie terrestre subisce 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 d'individuare (*detecting*) il bersaglio elettromagnetico e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, valutare la distanza (*ranging*) a cui è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*).

I sistemi SAR (*Synthetic Aperture Radar* - Radar ad Apertura Sintetica) consentono di ottenere immagini ad alta risoluzione osservando, lungo la propria orbita, la stessa porzione di terreno sotto angoli di vista differenti e combinando tra loro i diversi contributi relativi a una stessa cella.

Poiché il sistema SAR illumina lo spazio circostante con radiazioni elettromagnetiche proprie è detto sistema *attivo*: non è richiesta infatti illuminazione solare e le frequenze utilizzate dal radar penetrano attraverso le nuvole, evitando così i già accennati problemi di acquisizione dei sistemi ottici.

Le immagini che si ottengono dai sistemi radar satellitari sono matrici di numeri complessi definiti dalle grandezze di ampiezza e fase: ad ogni elemento della matrice (pixel) corrisponde una zona a terra. La dimensione del pixel varia in funzione del sensore utilizzato (20 per 5 metri per i satelliti ERS o RADARSAT o fino a 1 metro per i nuovi satelliti in banda X).

L'ampiezza individua la quantità di campo elettromagnetico retrodiffusa verso il satellite, mentre la fase dipende da diversi fattori, tra cui la distanza sensore-bersaglio. Proprio la fase costituisce l'informazione chiave per le applicazioni interferometriche volte a misurare fenomeni di movimento superficiale.

In fig. 1 è illustrato il confronto tra un'acquisizione di tipo ottico e una radar (immagine di ampiezza) della stessa area. Le informazioni

magnetic waves towards a certain area of interest or a target; a fraction of the field is backscattered by the target and returns to the sensor, where both amplitude and phase information can be recorded. Such a device is typically able to detect an object and to evaluate its distance (range) by measuring the time-delay between transmission and reception, thus locating precisely the target along the antenna pointing direction (range direction). The shorter the electromagnetic impulse used to illuminate the target, the better the spatial resolution of the radar in range direction.

SAR (Synthetic Aperture Radar) systems can achieve high resolution images also in the direction parallel to the platform velocity by properly combining, as the sensor goes along its orbit, different radar returns belonging to same radar target on ground, actually synthesizing a much larger antenna than the real one.

A SAR image is a matrix of complex numbers defined by amplitude and phase values: each matrix element (pixel) corresponds to a ground area. Pixel dimensions depend on the sensor used and its acquisition mode (20x5m for ERS or RADARSAT satellites, or up to 1m for the new



Fig. 1 - Linate-Idroscalo (Milano). Confronto tra acquisizione ottica (in basso) e acquisizione radar di tipo SAR (in alto). La direzione del nord è a sinistra dell'immagine. Linate-Idroscalo (Milano). Comparison between optical acquisition (top image) and SAR-type radar acquisition (bottom image). North direction is on the left of the image.

geografiche di carattere generale sono le stesse, tuttavia nell'immagine radar si può notare come le strutture al suolo rispondano in modo differente alle onde elettromagnetiche emesse: le strade o i bacini d'acqua appaiono neri poiché riflettono specularmente il campo trasmesso, mentre le strutture metalliche sono particolarmente luminose.

Ad oggi in orbita si contano diverse costellazioni di satelliti SAR i cui dati sono utilizzabili per analisi PSInSAR<sup>TM</sup>. Per vaste aree del pianeta è disponibile un archivio di immagini sin dal 1992; in particolare per l'intero territorio italiano sono disponibili due archivi storici: l'archivio ESA-ERS che copre in modo pressoché continuo il periodo 1992-2001 e un archivio di dati RADARSAT-1 da Marzo 2003 ad oggi (tabella 1).

Negli ultimi anni l'utilizzo dei nuovi sensori operanti in banda X (Cosmo Sky-Med e TerraSAR-X) ha permesso un ulteriore miglioramento dei risultati in termini di risoluzione sia spaziale che temporale (tempo di rivisitazione 8 e 11 giorni, risoluzione a terra fino a 1 metro).

X-band satellites).

While amplitude values depend on the amount of electromagnetic field back-scattered towards the satellite, phase values are related to the sensor-to-target distance. Indeed, phase values are the key information element for interferometric applications aiming at measuring surface deformation phenomena.

Figure 1 illustrates a comparison between an optical and a radar acquisition (amplitude image) over the same area. Although similar, the radar image reveals a different response to ground structures: streets and ponds appear black, as they reflect away from the satellite the electromagnetic field (the incidence angle is never zero, so smooth surfaces backscatter only a small fraction of the illuminating beam towards the sensor), while metallic structures appear as very bright pixels, as should be expected by a radar sensor.

Many different SAR satellites, whose data can be used for PSInSAR<sup>TM</sup> analyses, are presently in orbit. An image archive is available back to 1992 with a large coverage

TABELLA 1 - TABLE 1

SATELLITI IN ORBITA UTILIZZABILI PER ANALISI PSInSAR<sup>TM</sup>. PER RISOLUZIONE SI INTENDE LA DIMENSIONE DEL PIXEL DELL'IMMAGINE<sup>(3)</sup> - ORBITING SATELLITES THAT CAN BE USED FOR THE PSInSAR<sup>TM</sup> TECHNIQUE ANALYSIS. RESOLUTION IS INTENDED AS THE DIMENSION OF THE IMAGE'S PIXEL<sup>(3)</sup>

Satellite	Proprietà <i>Property</i>	Tempo di rivisitazione <i>Revisiting time</i>	Risoluzione (azimuth x range) <i>Resolution</i> (azimuth x range)	Banda <i>Band</i>	Operatività <i>Operation</i>
ERS1-2	Agenzia Spaziale Europea <i>European Space Agency</i>	35 giorni <i>35 days</i>	20x5 m	C	1992-2001
ENVISAT	Agenzia Spaziale Europea <i>European Space Agency</i>	35 giorni <i>35 days</i>	20x5 m	C	2003-ad oggi <i>Since 2003 to date</i>
RADARSAT 1	Agenzia Spaziale Canadese <i>Canadian Space Agency</i>	24 giorni <i>24 days</i>	Fino a - Up to 10 x 5 m	C	1995-ad oggi <i>Since 1995 to date</i>
RADARSAT 2	Agenzia Spaziale Canadese <i>Canadian Space Agency</i>	24 giorni <i>24 days</i>	Fino a - Up to 3 x 3 m	C	2008-ad oggi <i>Since 2008 to date</i>
Cosmo SkyMed	Agenzia Spaziale Italiana <i>Italian Space Agency</i>	8 giorni <i>8 days</i>	Fino a - Up to 1 x 1 m	X	2008-ad oggi <i>Since 2008 to date</i>
TerraSAR X	Agenzia Spaziale tedesca <i>German Space Agency</i>	11 giorni <i>11 days</i>	Fino a 1 - Up to x 1 m	X	2008-ad oggi <i>Since 2008 to date</i>

### 3.2. Geometria di acquisizione

I satelliti radar percorrono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota attorno a 800 km, una striscia di terreno larga circa 100 km con un sistema radar SAR operante nel dominio

over the planet; in particular, two historical archives are available for the whole Italian territory: the ESA-ERS archive, covering almost continuously the period 1992 - 2001, and the RADARSAT-1 data archive, covering the period 2003 to date (Table 1).

<sup>(3)</sup> La dimensione reale del PS è in genere più piccola della dimensione del pixel: i PS corrispondono ad elementi dominanti all'interno della cella.

<sup>(3)</sup> The PS real dimension is usually lower than the pixel dimension: Permanent Scatterers correspond to dominating elements within the cell.



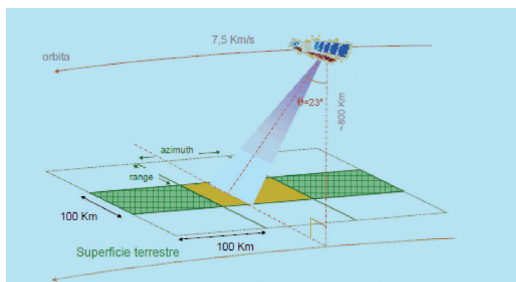


Fig. 2 - Geometria d'acquisizione SAR delle piattaforme ERS-1 ed ERS-2. Acquisition geometry of the ESA-ERS SAR systems.

delle microonde a varie bande (C, X, L), ovvero con lunghezze d'onda  $\lambda$  pari a 3-24 cm, caratteristica fondamentale per poter apprezzare movimenti millimetrici.

La stessa orbita nominale viene ripercorsa dopo un intervallo definito (tempo di rivisitazione), consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti.

La direzione parallela all'orbita è detta azimuth e coincide approssimativamente con la direzione Nord-Sud. La risoluzione (ovvero la capacità di riconoscere come distinti due bersagli) in azimuth vale solitamente qualche metro cfr. par. 4.4).

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo  $\theta$  - detto off-nadir - rispetto alla verticale) è detta range oppure Line Of Sight (LOS).

Le immagini radar si sviluppano pertanto lungo le direzioni di range e azimuth, dette usualmente coordinate SAR. In fig. 2 è rappresentata come esempio la geometria di acquisizione dei sistemi SAR-ERS.

Dalla combinazione della rotazione terrestre con le orbite eliosincrone risulta che una stessa area della superficie terrestre viene illuminata dalla radiazione radar sia durante un passaggio del satellite in direzione Nord-Sud, denominata geometria discendente, sia durante un passaggio del satellite in direzione Sud-Nord, denominata geometria ascendente (fig. 3). Ciò significa che l'area al suolo viene rilevata sotto due angoli di vista praticamente speculari. Entrambe le geometrie hanno lo stesso tempo di rivisitazione.

L'uso congiunto di entrambe le geometrie del satellite nella analisi PSInSAR<sup>TM</sup> consente un notevole aumento dei punti di misura al suolo.

### 3.3. Interferometria differenziale DInSAR

La tecnica tradizionale per lo studio di dati SAR è l'interferometria differenziale (DInSAR), che si basa sull'analisi dell'evoluzione del valore di fase tra due distinte acquisizioni satellitari in modo tale da mettere in luce eventua-

The use of X-band sensors (COSMO-SkyMed and TerraSAR-X) has recently allowed a significant improvement in both space and time resolution of SAR data (revisiting times as low as a few days and ground resolution down to 1m).

### 3.2. Acquisition Geometry

Radar satellites follow sun-synchronous orbits, slightly inclined with respect to the Earth meridians. They acquire data along ground strips about 100 km wide, by using SAR sensors working at different bands of the microwave domain (C, X and L), corresponding to wavelengths ( $\lambda$ ) ranging from 3 cm to 24 cm.

SAR sensors can acquire data on the same area of interest at different times, as they orbit the Earth. The direction parallel to the satellite trajectory is called 'azimuth' and is almost parallel to the North-South direction. The azimuth resolution (i.e. the capability of discerning two nearby radar targets) is usually equal to some meters (see section 4.4).

The 'sensor to target' direction (orthogonal to the orbit and inclined of an angle ' $\theta$ ' - called the off-nadir angle - with respect to the vertical) is referred to as range or Line Of Sight (LOS).

Therefore, radar images extend along the range and azimuth directions, usually referred to as *SAR coordinates*. For instance, Figure 2 shows the acquisition geometry of the ESA-ERS SAR systems.

The combination of the motion of the satellite and the motion of the Earth makes it possible to look at the same area of interest from two opposite acquisition geometries: one with the sensor moving from South to North (*ascending geometry*) looking towards East, and the other with the satellite moving North to South (*descending geometry*) looking West (fig. 3). The joint use of both satellite geometries in PSInSAR<sup>TM</sup> analyses allows one to significantly increase the number of measurement points in a certain area of interest and to better characterize the local displacement field.

### 3.3. Differential Interferometry (DInSAR)

The conventional technique for monitoring surface deformation phenomena using SAR data is called Differential SAR Interferometry (DInSAR). DInSAR is based on the computation, on a pixel-by-pixel basis, of the difference of phase values between two satellite images acquired at different times.

As already mentioned, the key-element in any interferometric analysis is the phase value of each image pixel. Phase values of a single SAR image depend on different factors that can be summarized in the following equation:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n$$

where  $\psi$  is the so-called phase reflectivity (depending on

li differenze riconducibili a fenomeni di moto.

Come accennato, le immagini radar sono definite dalle grandezze di ampiezza e fase. L'ampiezza individua la quantità di campo elettromagnetico retrodiffusa dal bersaglio verso il satellite, mentre la fase dipende da diversi fattori che possono essere riassunti nella seguente equazione:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n$$

dove  $\psi$  è il termine di fase dovuto alla riflettività del bersaglio (dipendente dal materiale e dalla sua geometria),  $\alpha$  è un contributo di fase dovuto all'atmosfera,  $r$  è la distanza sensore-bersaglio (questo valore, moltiplicato per il fattore riportato nell'equazione, viene indicato con il termine di *propagatore*) e  $n$  è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

I valori di fase di una singola immagine SAR non sono utilizzabili, dal momento che non risulta possibile separarne i vari contributi. Molto più utile è lo studio delle *variazioni* di fase da un'immagine radar ad un'altra, acquisita in tempi diversi dalla stessa orbita.

L'interferogramma è il risultato del confronto (differenza) tra le matrici di fase di due singole immagini SAR acquisite sulla stessa area. In condizioni ideali (ovvero qualora i termini di fase dovuti alla riflettività e al contributo atmosferico possano essere ritenuti pressoché identici nelle due acquisizioni) può essere assimilato ad una mappa degli spostamenti, ma le informazioni ad esso associate sono solo qualitative e areali.

In realtà, diversi fattori riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR.

In primo luogo i fenomeni di decorrelazione temporale causati dalla variazione delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar nel tempo, fenomeni che risultano più marcati al crescere dell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni utilizzate. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo, ovvero la loro "risposta elettromagnetica" al segnale emesso dal radar è stabile nel tempo.

In secondo luogo è rilevante il disturbo del segnale elettromagnetico causato dalla presenza dell'atmosfera terrestre che, variando sensibilmente tra un'acquisizione e la successiva, può determinare sfasamenti significativi che si sovrappongono a quelli dovuti alle deformazioni, tanto da rendere impossibile la stima di questi ultimi.

#### 4. La tecnica PSInSAR™

Le tecniche sviluppatasi in seguito ai primi promet-

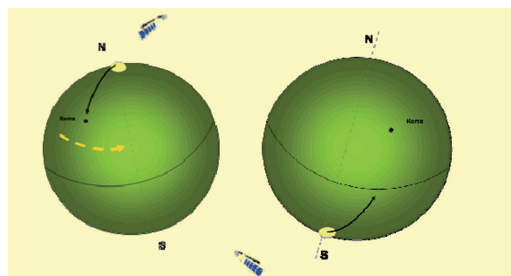


Fig. 3 - Geometrie di acquisizione discendente (a sinistra) e ascendente (a destra). *Descending acquisition geometry (on the left side) and ascending geometry (on the right side).*

the specific material and its geometry),  $r$  is the sensor-to-target distance,  $\alpha$  is the phase contribution due to propagation of the e.m. wave through the atmosphere and  $n$  is a noise term inherent in any acquisition system.

The phase values of a single SAR image are of no practical use, since it is not possible to separate the different phase contributions. A far more useful approach is the study of *phase variations* between two or more different radar images, acquired at different times from the same nominal orbit.

A SAR interferogram is a comparison (difference) of the phase matrixes of two SAR images acquired over the same area. Under ideal conditions (i.e. should the phase terms due to the reflectivity of the target and to atmospheric effects be identical and the noise term negligible), the phase values of an interferogram are simply *proportional to displacement values affecting the area of interest between the first and the second acquisitions*.

Different factors reduce (or even compromise) the quality of DInSAR results. The most important one is related to temporal-decorrelation phenomena caused by the variation of the electromagnetic properties of the radar targets. If the phase reflectivity value of a certain image pixel changes with time, the generation of an interferogram, i.e. the computation of the difference between the phase values of two SAR images, cannot highlight the displacement values, since the first term in the equation cannot be considered identical in the two SAR images. The impact of temporal decorrelation phenomena increases as the *temporal baseline* of the interferogram (i.e. the time lag between the two SAR acquisitions) increases. Of course, different objects are characterized by different *decorrelation times*: areas covered by vegetation change reflectivity much more quickly than rocky or urban areas.

Apart from phase decorrelation, propagation effects in both troposphere and ionosphere can differ significantly during the first and the second acquisition, thus creating phase disturbances hindering the interpretation of SAR interferograms.

tenti risultati interferometrici prevedono un'analisi multi-immagine per ovviare alle limitazioni dell'interferometria e per ottenere misurazioni quantitative e puntuali.

#### 4.1. *Permanent Scatterers*: misure di precisione delle deformazioni superficiali

L'algoritmo PSInSAR<sup>TM</sup> nasce da oltre 10 anni di studi del gruppo radar del Politecnico di Milano. Brevettato nel 1999 è stato concesso in licenza esclusiva alla TRE di Milano, primo *spin-off* del Politecnico, che ha continuato a perfezionarlo, migliorandone costantemente caratteristiche e prestazioni.

Come descritto nei paragrafi precedenti, l'idea alla base della tecnica è semplice (fig. 4): il sensore radar montato sul satellite invia un impulso elettromagnetico verso la superficie terrestre; gli elementi a terra riflettono il segnale, rinviandone verso il satellite una porzione (retrodiffusione). Misurando il tempo trascorso tra l'invio del segnale e la ricezione del segnale retrodiffuso, il sistema radar è in grado di determinare la distanza tra il sensore ed il bersaglio. Dunque, se l'oggetto si trova in un'area affetta da fenomeni di deformazione superficiale, il sensore rileva tra un'immagine e l'altra una variazione di distanza e quindi il movimento del bersaglio. Utilizzando più acquisizioni sulla stessa area è possibile ricostruire la storia dello spostamento avvenuto.

#### 4. The PSInSAR<sup>TM</sup> Technique

Since phase decorrelation phenomena and atmospheric effects can compromise interferometric measurements using SAR satellites, only the development of multi-interferogram techniques could overcome the limits of conventional DInSAR analyses.

##### 4.1. *Permanent Scatterers*: Precise Measurements of Surface Deformations

The PSInSAR<sup>TM</sup> algorithm is the result of more than 10 years of research of the SAR group at the Politecnico di Milano (POLIMI) technical university. It was patented in 1999. In March 2000, an ad hoc spin-off company, called Tele-Rilevamento Europa (TRE), was incorporated to exploit commercially this technology and to further improve the algorithms for precise surface deformation measurements.

As described in the previous paragraphs, the basic idea is simple (see Figure 4): the radar sensor is installed on-board a satellite and transmits an electromagnetic pulse towards the Earth's surface: ground elements reflect a fraction of the signal back to the satellite. The radar system is able to estimate the target-sensor distance by measuring the time elapsed between the signal transmission and the reception of the back-scattered signal. The accuracy is of the order of a few meters. However, if the phase values of two SAR images acquired over the same area from the same acquisition geometry are compared (i.e. an interferogram is generated), the interferometric phase values are related to possible variations of the sensor-to-target distance.

The PSInSAR<sup>TM</sup> technique overcomes most of the difficulties encountered in conventional DInSAR analyses by identifying a small subset of radar targets, called Permanent Scatterers (PS), only slightly affected by phase decorrelation phenomena and where the signal-to-noise ratio is extremely favourable.

PS correspond to radar targets already present in the area of interest, such as man-made objects (buildings, monuments, railway lines, antennae, metallic elements, etc.) or natural elements (rocky outcrops, boulders, debris accumulations, etc.) having a stable *radar signature* in time and where

the signal level is much higher than the background noise of the sensor.

Considering the phase variation between two SAR images, the interferometric phase ( $\Delta\phi$ ) is given by:

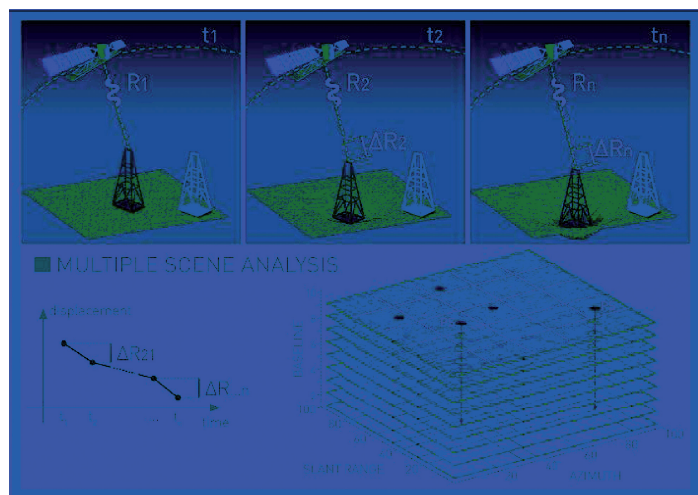


Fig. 4 - Principio di funzionamento della tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> basato sulla misura di variazione di distanze. Functioning principle of the PSInSAR<sup>TM</sup> technique based on the distance variation measurements.

La tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> consente di superare i limiti propri dell'interferometria tradizionale considerando il fatto che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, denominati *Permanent Scatterers* (PS), è praticamente immu-

ne agli effetti di decorrelazione geometrica (i PS sono bersagli molto più piccoli della cella di risoluzione) e temporale (sono stabili nel tempo). I PS corrispondono ad elementi già presenti al suolo, quali manufatti (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.) oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito, etc.), sui quali è possibile effettuare misure di spostamento di alta precisione.

Considerando due immagini SAR, possiamo scrivere la loro differenza di fase ( $\Delta\phi$ ) come:

$$\Delta\phi = \Delta\psi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \Delta\alpha + n$$

In corrispondenza dei PS, i termini  $\Delta\psi$  e  $n$  risultano trascurabili e l'unico problema è quello del filtraggio delle componenti atmosferiche.

Considerando il fatto che il moto risulta (solitamente) fortemente correlato nel tempo, mentre le condizioni atmosferiche variano lentamente nello spazio e non sono correlate nel tempo, è possibile applicare specifici algoritmi di stima e rimozione dei contributi spuri atmosferici ed evidenziare i contributi dovuti agli eventuali spostamenti; l'efficienza di tali algoritmi aumenta se invece di due sole immagini radar sono disponibili molte immagini acquisite con regolarità sulla stessa area.

Per tutti i PS individuati nell'immagine è possibile stimare con estrema precisione lo spostamento relativo rispetto ad un PS selezionato come riferimento. L'approccio differenziale consente infatti di eliminare tutte le componenti sistematiche degli errori di misura (ad esempio dovute alle inevitabili variazioni dell'orbita del satellite nel tempo) e permette di migliorare fortemente l'accuratezza delle stime di spostamento. In generale, affinché la tecnica risulti applicabile con successo è necessario disporre di dataset di almeno 25-30 immagini, e una densità spaziale di PS superiore a 5 PS/km<sup>2</sup>.

La densità spaziale dei PS risulta 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 (>500 PS/km<sup>2</sup>), mentre sono assenti nelle zone vegetate o innevate.

Tutte le misure di spostamento, associate a ciascun PS, sono rilevate lungo la linea di vista del sensore (ossia, la congiungente sensore-bersaglio o *Line Of Sight*, LOS) e - come già ricordato - sono di tipo differenziale, ovvero riferite spazialmente ad un punto a terra di coordinate note, detto *reference point*, e temporalmente alla data di acquisizione della prima immagine; le informazioni di movimento fornite dai PS sono pertanto relative e non assolute. Inoltre, i dati vengono acquisiti con cadenza variabile da sensore a sensore (*tempo di rivisitazione* cfr. tabella 1).

$$\Delta\phi = \Delta\psi + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r + \Delta\alpha + n$$

The terms  $\Delta\psi$  and  $n$  can be neglected in correspondence of a PS, and the only problem is the estimation and removal of atmospheric effects. The atmospheric filtering is based on a statistical analysis of the signals involved: phase values proportional to range variations are (usually) strongly correlated in time, while atmospheric disturbances vary slowly in space and are not correlated in time. It is then possible to apply specific algorithms to estimate and remove spurious atmospheric effects and to highlight any displacement. The efficiency of such algorithms increases as the number of images acquired over the same area increases.

For all PS identified in a certain area, it is possible to estimate with high precision the relative displacement with respect to a reference PS, properly selected. The differential approach allows one to strongly limit the impact of any systematic errors in the data (e.g. satellite orbital variations). In general, a data-set of at least 15-20 images and a PS spatial density higher than 5 PS/km<sup>2</sup> is recommended to be able to successfully apply the technique, achieving high-quality measurements.

The PS density depends on the sensor used in analysis, the kind of terrain and its morphology. PS reach very high densities in urban areas (>500 PS/km<sup>2</sup>), while are almost absent in heavily vegetated areas.

All displacement measurements associated with a PS are the projection, along the satellite line of sight, of the displacement vector affecting the target. As already mentioned, these are differential measurements with respect to a reference point, time referenced to the acquisition date of the first image. Movement data exhibited by a PS are then relative, not absolute, data. Measurements can be updated in time with a frequency depending on the satellite sensor used for the application (revisiting time - see Table 1).

PS can be seen as a 'natural' ground network of radar benchmarks, similar to a GPS (Global Positioning System) network, that can be used to monitor both the displacement of individual structures (a building for instance), and the evolution of a large displacement field affecting hundreds of square kilometres (due, for example, to subsidence, slope instability, fault creeping, volcanic activity, etc.).

It should be noted that PS density is usually much higher than the density of benchmarks used in any conventional geodetic network; moreover, PS measurements do not require any installation and fast algorithms allow the update of the information concerning thousands of PS quickly and reliably.

A further advantage of SAR interferometry with respect to conventional techniques is the possibility to exploit radar data already acquired, taking advantage of the historical archives of SAR data. Indeed, thanks to the



Sul territorio l'insieme dei PS può essere visto come una rete naturale di "capisaldi radar", concettualmente analoga ad una rete di stazioni GPS (*Global Positioning System*), utile sia per conoscere lo spostamento di un singolo bersaglio a terra (ad esempio, un edificio), sia per ricostruire, a livello regionale, la distribuzione territoriale e l'evoluzione dei fenomeni deformativi superficiali legati a subsidenza, instabilità di versante, faglie, attività vulcanica, ecc. La differenza sostanziale è che la densità dei PS è di gran lunga superiore a quella dei capisaldi di una rete geodetica tradizionale e che i PS non necessitano di alcuna installazione. Inoltre, la tecnica PS consente di campionare aree molto ampie in tempi relativamente ristretti, condizione assolutamente irrealizzabile con le altre tecniche di monitoraggio.

Un ulteriore vantaggio della tecnologia satellitare rispetto alle comuni tecniche di rilevamento degli spostamenti superficiali è costituito dalla possibilità di disporre di una cospicua serie di immagini radar già acquisite sull'intero territorio nazionale. Infatti, grazie agli archivi dell'ESA (*European Space Agency*) e della CSA (*Canadian Space Agency*), è possibile ricostruire la dinamica dell'area di interesse a partire dal 1992. Questo può rivelarsi un elemento decisivo per l'indagine, soprattutto laddove le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter dare misure significative.

Inoltre, grazie all'automatismo dell'elaborazione che li produce e all'ottimizzazione dei tempi di calcolo, i risultati ottenuti con l'analisi PSInSAR™ permettono di ottenere un quadro sinottico dei fenomeni in atto a costi decisamente competitivi rispetto alle analisi convenzionali, dato che il sensore rileva punti di misura che si trovano già sul terreno e che non richiedono alcun intervento di installazione e manutenzione.

#### 4.2. Che cosa è possibile misurare: mappe di spostamento e serie storiche

Le informazioni basilari fornite per ciascun PS sono:

1. la posizione del bersaglio a terra, ovvero le sue coordinate spaziali (latitudine/nord, longitudine/est, quota);
2. la velocità media annua di spostamento, espressa in mm/anno, calcolata nell'intervallo di acquisizione delle immagini elaborate ed in relazione al punto di riferimento (fig. 5);
3. la serie storica di spostamento, ossia una serie di valori che rappresenta, acquisizione per acquisizione, l'evoluzione dello spostamento subito da ciascun PS, espresso in mm e misurato nella direzione di vista del sistema (fig. 6).

Mentre la posizione dei PS è solitamente nota con una precisione di qualche metro, le velocità medie e le serie storiche degli spostamenti del terreno possono essere stimate con precisione millimetrica sul singolo punto. Nelle immagini seguenti la mappa delle velocità dei PS è rap-

presentata negli archivi della European Space Agency (ESA) e della Canadian Space Agency (CSA), è possibile ricostruire la dinamica di una certa area dal 1992: ciò può accelerare la rilevazione di fenomeni di lenta deformazione che interessano una certa area, eventualmente innescando fenomeni locali più rapidi.

È da notare, tuttavia, che, piuttosto che essere tecnologie concorrenti, le misurazioni *in situ* spesso diventano *complementary* survey che possono significativamente arricchire la comprensione dei fenomeni sotto studio. L'uso sinergico di dati remoti e *in situ* può consentire lo sviluppo di nuovi paradigmi di monitoraggio che possono significativamente migliorare lo scenario attuale.

#### 4.2. What can be Measured: Displacement Maps and Historic Time-Series

Per ogni PS, le seguenti informazioni sono fornite:

1. ground target position (latitudine/Nord, longitudine/Est, altitudine);
2. annual average displacement rate (mm/year), calcolata nel tempo di acquisizione delle immagini SAR utilizzate nell'analisi, con riferimento a un punto supposto immobile (Fig. 5);
3. displacement time series - differential displacement measurement along the satellite LOS direction (Fig. 6).

La posizione dei PS è solitamente nota con una precisione di pochi metri, mentre la velocità media e la serie storica degli spostamenti possono essere stimate con precisione millimetrica sul singolo punto.

Di solito, la mappa delle velocità dei PS è rappresentata utilizzando una scala cromatica che segue la seguente convenzione: giallo, arancione e rosso indicano aumenti di distanza

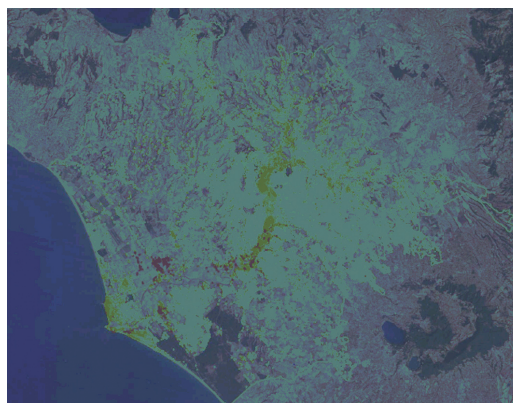


Fig. 5 - Esempio di applicazione di dati PS nello studio di fenomeni di subsidenza (Roma). Campo di velocità PS rappresentate tra -5 (rosso) e +5 mm/anno (blu). Example of application of PS data to the study of subsidence phenomena (Rome). PS velocity range represented between -5 (red) and +5 mm/year (blue).



presentata con una scala colori semaforica: con i colori giallo, arancione e rosso si indicano allontanamenti dal sensore lungo la direzione di LOS, con il verde punti sostanzialmente stabili (valori di velocità compresi tra -1 e 1 mm/anno) e con varie tonalità di blu gli avvicinamenti al sensore sempre lungo la direzione sensore-bersaglio.

È importante ricordare che i satelliti acquisiscono lungo una direzione inclinata di un angolo  $\theta$  rispetto alla verticale (fig. 2 – *Line Of Sight*, LOS). Questo significa che i movimenti misurati sul singolo PS sono la proiezione degli spostamenti reali lungo la congiungente sensore-bersaglio.

La direzione di LOS varia a seconda del satellite utilizzato (da ca. 20 a 45 gradi). Per un dato PS, la componente del movimento misurato è tanto maggiore quanto più la direzione del vettore spostamento reale si avvicina alla direzione di puntamento del sensore; al contrario, in caso di moto perpendicolare alla linea di vista del satellite, lo spostamento misurato risulta essere nullo.

In fig. 7 sono rappresentati tre casi che illustrano come al variare della direzione reale del moto (vettore rosso) il sistema misuri una componente lungo la LOS (vettore blu) che può variare notevolmente in modulo e avere segni opposti. Si ricorda che la componente del moto lungo la direzione N-S non è rilevabile dai sistemi SAR proprio per la geometria di acquisizione descritta.

In generale, utilizzando una sola geometria di acquisizione, non è possibile distinguere i vari contributi di spostamento dovuti a moti orizzontali o verticali. Tuttavia, se si dispone, per una stessa area di interesse, di dati PS acquisiti sia in modalità ascendente che discendente, si può procedere alla stima del vettore di spostamento in *direzione verticale* e in *direzione orizzontale est-ovest*.

#### 4.3. Stima della componente verticale e orizzontale E-W

Il problema può essere compreso meglio se inqua-

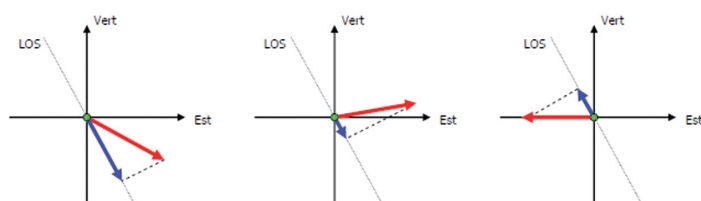


Fig. 7 - Componente di spostamento rilevata dal sensore in funzione delle diverse direzioni dello spostamento reale. In rosso è rappresentato il vettore di spostamento reale mentre in blu quello rilevato dal sistema. Si noti che l'angolo di incidenza del satellite (LOS) varia da 20° a 45°. *Displacement component measured by the sensor as a function of the different directions of the real displacement. The real displacement vector is represented in red while the component measured by the system is represented in blue. It can be noted that the satellite incidence angle (LOS) varies from 20° to 45°.*

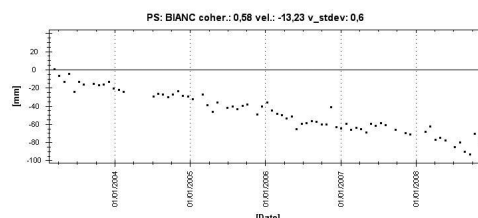


Fig. 6 - Esempio di serie storica di spostamento di un PS.  
*Example of displacement historic time series of a PS.*

from the sensor to the radar target on ground (i.e. the PS), green PS represent stable points (velocity values ranging from -1 to 1 mm/year), while different blue tones indicate a reduction in the distance from the sensor to the PS.

It is worth recalling here that PSInSAR data are 1D measurements. This means that displacement values measured over a PS are the projection of the 3D displacement vector along the satellite line of sight (Fig. 7). A consequence of this is that no phase variation is detected if the radar target is affected by a displacement in the direction perpendicular to the line of sight.

It should be noted that any motion component along the North-South direction is not detectable by SAR systems in use today (since it doesn't create a significant range variation), as a consequence of the satellite orbits, almost parallel to the Earth meridians.

In general, the use of a single acquisition geometry doesn't allow one to distinguish between horizontal or vertical movements. However, if PS data are available for both ascending and descending acquisition geometries, it is possible to estimate two components of the displacement vector, as is described in the section 4.3.

#### 4.3. Estimation of the Vertical and East-West Horizontal Components

Let us consider a Cartesian reference system (x, y, z), where the three reference directions are parallel to the Easting (x), the Northing (y), and the vertical direction (z), respectively.

If a PS is visible in both descending and ascending data-sets, the PS technique can provide two components of the 3D displacement vector affecting this radar target. For example, considering its average velocity, the following equation holds:

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{s}_x + V_y \cdot \vec{s}_y + V_z \cdot \vec{s}_z$$

where  $V_x$ ,  $V_y$  and  $V_z$  are the components of the velocity vector along

drato da un punto di vista geometrico. Si consideri a tal proposito un sistema di riferimento cartesiano  $x, y, z$ , in cui le tre direzioni coincidono nella realtà rispettivamente con quella orizzontale E-W, orizzontale N-S e verticale.

Si consideri un PS, corrispondente alla stessa struttura a terra, individuato sia nel dataset discendente che in quello ascendente. La tecnica PS fornisce per questo elemento le corrispondenti velocità  $V_a$  e  $V_d$  rilevate dai due diversi punti di vista (ascendente e discendente).

Nel sistema di riferimento  $x, y, z$ , il vettore velocità  $V$  può essere espresso in generale come:

$$\vec{V} = V_x \cdot \vec{s}_x + V_y \cdot \vec{s}_y + V_z \cdot \vec{s}_z$$

dove  $V_x, V_y$  e  $V_z$  sono le componenti del vettore velocità  $V$  lungo le direzioni orizzontale E-W, orizzontale N-S e verticale e  $s_x, s_y, s_z$  i versori dei tre assi coordinati del sistema cartesiano.

I dati orbitali del satellite consentono di stabilire l'orientamento nel sistema di riferimento  $x, y, z$  della congiungente sensore-bersaglio (LOS) nelle due differenti geometrie e quindi i coseni direttori dei rispettivi vettori  $V_a$  e  $V_d$ . Dunque, utilizzando le stime di velocità derivanti dall'elaborazione delle due diverse geometrie di acquisizione (ascendente e discendente), si può scrivere il seguente sistema:

$$\begin{cases} V_a = V_x \cdot s_{xasce} + V_y \cdot s_{yasce} + V_z \cdot s_{zasce} \\ V_d = V_x \cdot s_{xdesce} + V_y \cdot s_{ydesce} + V_z \cdot s_{zdesce} \end{cases}$$

in cui  $s_{xasce}, s_{yasce}, s_{zasce}$  e  $s_{xdesce}, s_{ydesce}, s_{zdesce}$  rappresentano i coseni direttori dei rispettivi vettori velocità  $V_a$  e  $V_d$  e quindi i coseni degli angoli che il vettore  $V_a$  o  $V_d$ , misurato lungo la LOS, forma con i tre assi coordinati.

Come si può osservare nel precedente sistema il numero di incognite ( $V_x, V_y$  e  $V_z$ ) è superiore a quello delle equazioni e quindi esso non è risolvibile. Tuttavia, dal momento che il sensore risulta molto poco sensibile agli spostamenti in direzione N-S (coincidente con la direzione  $y$ ), considerare il moto in questa direzione uguale a zero ( $V_y=0$ ) è un'approssimazione accettabile e permette di risolvere il precedente sistema in modo da risalire all'entità delle componenti del moto in direzione E-W e in direzione verticale (corrispondenti alle direzioni  $x$  e  $z$ ).

In definitiva, sotto l'ipotesi di spostamento nullo in direzione N-S, noti i parametri di puntamento del satellite (ossia, i coseni direttori) al momento dell'acquisizione nelle due rispettive geometrie e a condizione che i valori ascendente e discendente della velocità siano riferiti allo stesso bersaglio radar, è possibile calcolare le componenti verticale,  $V_v$ , ed orizzontale in direzione E-W,  $V_E$ , del vettore velocità reale esplicitando il precedente sistema nella forma:

East-West, North-South and vertical direction respectively, and  $S_x, S_y, S_z$  are the versors of the Cartesian system.

Since both acquisition geometries are known, the following system of linear equation should be considered:

$$\begin{cases} V_a = V_x \cdot s_{xasce} + V_y \cdot s_{yasce} + V_z \cdot s_{zasce} \\ V_d = V_x \cdot s_{xdesce} + V_y \cdot s_{ydesce} + V_z \cdot s_{zdesce} \end{cases}$$

where  $s_{xasce}, s_{yasce}, s_{zasce}, s_{xdesce}, s_{ydesce}, s_{zdesce}$  are the direction cosines of the two acquisition geometries (ascending and descending) and  $V_a$  and  $V_d$  are the projections of the velocity vectors along the two opposite lines of sight.

Since the number of unknowns ( $V_x, V_y$  and  $V_z$ ) in the system is greater than the number of equations, the full 3D vector cannot be estimated. However, since the satellite orbits are almost parallel to the Earth meridians and so the radar is almost insensitive to any target displacements in North-South direction ( $y$ ), it is then a reasonable approximation to assume  $s_{yasce}$  and  $s_{ydesce}$  equal to zero and focus our efforts on the estimation of Easting ( $x$ ) and vertical ( $z$ ) components only.

Under the hypotheses of zero displacement in a N-S direction, the satellite pointing parameters (direction cosines) at the time of the acquisition are known and that the ascending and descending velocity values refer to the same radar target, it is possible then to calculate the vertical component  $V_v$  and the E-W horizontal component  $V_E$  of the actual velocity vector, by solving the following system of equations:

$$\begin{cases} V_a = V_v \cdot \cos \theta_{asce} + V_E \cdot \sin \theta_{asce} \\ V_d = V_v \cdot \cos \theta_{desce} + V_E \cdot \sin \theta_{desce} \end{cases}$$

where  $V_a$  and  $V_d$  are the velocity values estimated by ascending and descending data, respectively,  $\theta_{asce}$  and  $\theta_{desce}$  are the incidence angles proper to the two acquisition geometries and  $V_v$  and  $V_E$  the unknown quantities to be estimated.

Whenever PS identified along ascending and descending orbits do not correspond to the same objects, but it is reasonable to assume that PS belonging to the same small patch of terrain (say, 50 x 50 m wide) are affected by the same displacement vector; data are re-sampled on a regular grid (50 x 50 m) and the above mentioned approach is then applied to the 'pseudo PS' relative to each ground patch (Fig. 8).

#### 4.4. Precision of the Measurements

The precision of PS measurements depends on different factors, among which we recall:

- number of images used for the analysis;
- PS density (i.e. the presence of good radar targets within the area of interest);

$$\begin{cases} V_a = V_v \cdot \cos \theta_{asce} + V_E \cdot \sin \theta_{asce} \\ V_d = V_v \cdot \cos \theta_{desce} + V_E \cdot \sin \theta_{desce} \end{cases}$$

in cui  $V_a$  e  $V_d$  sono rispettivamente i valori di velocità ascendente e discendente relativi al bersaglio,  $\theta_{asce}$  e  $\theta_{desce}$  gli angoli di incidenza nelle due geometrie e  $V_v$  e  $V_E$  le incognite da esplicitare.

Poiché spesso non è possibile che le posizioni dei PS coincidano nelle due geometrie, dal punto di vista operativo è necessario ricampionare il dato PS in celle regolari di larghezza fissa (es: 50 x 50 m) così da descrivere il moto relativo a quella cella con un unico "pseudo PS". L'ipotesi è che tutti i PS all'interno della stessa cella presentino valori di spostamento simili così che il moto locale possa essere descritto mediante un unico vettore di spostamento. Sotto questa ipotesi le velocità e le serie storiche di spostamento di tutti i PS identificati all'interno della stessa cella con una medesima geometria di acquisizione (ascendente o discendente) vengono mediate e opportunamente proiettate per ottenere il risultato finale (fig. 8).

#### 4.4. Precisione delle misure

La precisione delle misure PS dipende da diversi fattori, tra cui i principali sono:

- numero di immagini utilizzate in sede di analisi;
- densità dei PS ottenuti dall'elaborazione;

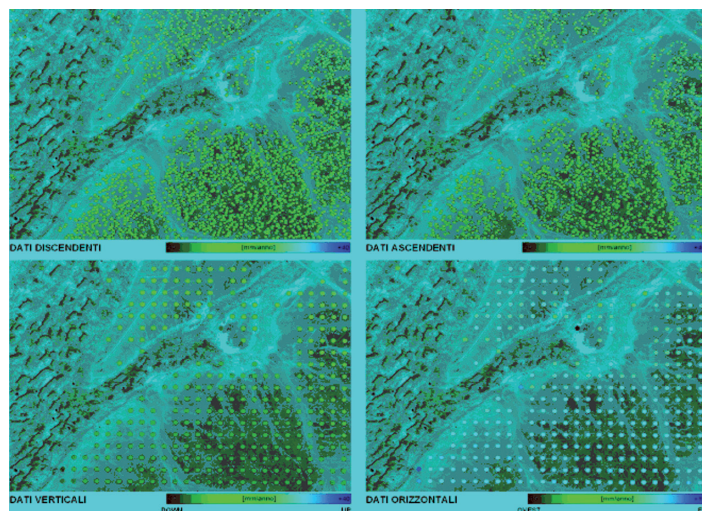


Fig. 8 - Esempio di scomposizione del moto su griglia regolare. In alto i dati PS di origine (ascendenti e discendenti) sulla stessa area misurati lungo la LOS, in basso il risultato della scomposizione lungo le componenti verticale e orizzontale est-ovest. *Example of vertical and E-W horizontal components calculation.*

- distance from the reference point;
- weather conditions at time of acquisitions;
- ground morphology and topography.

Considering a 5-year SAR data-set of at least 40 data, for all PS within 1km from the reference point, the following statements hold (Table 2):

- the precision (standard deviation) of the (differential) displacement measurements of each PS is better than 5mm;
- the precision (standard deviation) of the average displacement rate is better than 1mm/year;
- as far as the geocoding accuracy of the PS is concerned, for standard ERS and RADARSAT data the PS location precision is about  $\pm 7m$  in Easting direction,  $\pm 2m$  in Northing direction, and  $\pm 1.5m$  on the vertical axis. For the new X-band generation COSMO-SkyMed and TerraSAR-X satellites the PS location precision can go down to  $\pm 4m$  in Easting and  $\pm 1m$  in Northing and the vertical axis.

The apparent inconsistency between the precision figures of the displacement measurement (millimetre) and the positioning values (metre) of the PS depends on the fact that while PS displacements are measured as a fraction of the operating wavelength (a few centimetres), the positioning precision is a function of the ground pixel dimension (a few meters) <sup>(4)</sup>.

#### 4.5. Advantages and Disadvantages

Based on our experience, in this section we report a list of advantages and disadvantages of PSInSAR™ data for the analysis of surface deformation phenomena.

The main strengths include:

- PS data allow the detection and monitoring of displacement fields with sub-centimetre accuracy.
- PS data are multi-scale data: they can be used for regional studies as well as for monitoring individual buildings and structures.
- Whenever the PS density is high enough, PSInSAR™ does not require the installation of any ground instrumentation.

<sup>(4)</sup> For further details see: C. COLESA-  
TI, A. FERRETTI, R. LOCATELLI, F. NOVALI, G.  
SAVIO, "Permanent Scatterers: Precision  
Assessment and Multi-platform Analy-  
sis", IGARSS 2003, 21-25 July 2003, Tou-  
louse, France. pp 1-3.

## OSSERVATORIO

- distanza dal punto di riferimento;
- condizioni climatiche;
- morfologia del terreno.

Considerando l'elaborazione di un dataset di immagini di 5 anni, per un'area di qualche centinaio di chilometri quadrati ed entro 1 km dal punto di riferimento, si ottiene che (tabella 2):

- la precisione (deviazione standard) della misura di spostamento dei PS è tipicamente minore di 5 mm;
- la precisione (deviazione standard) della velocità media di spostamento può essere derivata come l'errore sullo spostamento diviso la durata del periodo in analisi. In casi favorevoli dove sono presenti grandi quantità di dati si raggiungono valori inferiori ad 1 mm/anno;
- la precisione (deviazione standard) di localizzazione dei PS è funzione del sensore che si sta utilizzando. Per i dati ERS e RADARSAT Standard è generalmente dell'ordine dei  $\pm 7$  m in direzione Est,  $\pm 2$  m in direzione Nord e  $\pm 1,5$  m sull'asse verticale. Per i satelliti di nuova generazione Cosmo - TerraSAR X si arriva a  $\pm 4$  m in direzione Est,  $\pm 1$  m in direzione Nord. Le precisioni sull'asse verticale rimangono invariate e dipendono dal numero di immagini SAR, dal DEM di riferimento e dalle caratteristiche della scena osservata.

L'apparente incongruenza fra la precisione di spostamento (millimetrica) e la precisione di posizionamento (metrica) dei PS dipende dal fatto che lo spostamento dei PS è misurato come frazione della lunghezza d'onda (sfasamento di pochi centimetri) mentre la precisione di posizionamento è di fatto funzione della dimensione del pixel a terra (alcuni metri)<sup>(4)</sup>.

By properly combining two acquisition geometries is possible to estimate both vertical and horizontal (East-West) displacement components.

Two historical archives covering the whole Italian territory are available: the ESA-ERS archive (1992-2001) period and the RADARSAT-1 data archive (2003-today).

- PS data are often complementary to conventional in situ measurements (such as GPS and optical levelling).
- PS density can exceed 500 PS/km<sup>2</sup> in urban and rocky areas.
- PS analyses can cover thousands of square kilometres. Results can be obtained in a limited amount of time, using reliable (and repeatable) algorithms.

The advent of new X-band SAR sensors allows better spatial resolution and more frequent acquisition over an area of interest. These sensors will play a key role for the monitoring of individual structures (such as a dam, a levee system, etc.)

The main weaknesses include:

- The absence of measurements in areas where no PS can be identified (such as heavily vegetated areas). The problem can be solved by installing (passive) artificial reflectors, carefully designed to create PS measurement points.
- Unfortunately, it is very difficult to estimate - before actually processing the radar data - the number and the location of the PS of a certain area, although a feasibility study can be carried out using a limited amount of data (8-10).
- A minimum of 15-20 radar scenes are required for hi-

TABELLA 2 - TABLE 2

VALORI TIPICI PER PS ENTRO 1 KM DAL PUNTO DI RIFERIMENTO OTTENUTI DALL'ANALISI  
DI UN DATASET DI IMMAGINI DI 5 ANNI. TYPICAL VALUES FOR WITHIN 1KM  
FROM THE REFERENCE POINT, CONSIDERING A 5 YEARS SAR DATA SET

<u>Spostamenti</u> <i>Displacements</i>	Velocità media di spostamento <i>Average displacement rate</i>		Singola Misura <i>Single measurement</i>
Precisione (1 $\sigma$ ) <i>Precision (1<math>\sigma</math>)</i>	<1 mm/anno <1 mm/year		<5 mm
<u>Posizione</u> <i>Position</i>	Est <i>East</i>	Nord <i>North</i>	Verticale <i>Vertical</i>
Precisione (1 $\sigma$ ) <i>Precision (1<math>\sigma</math>)</i>	7 m (satelliti ERS-RSAT) 4 m (satelliti in banda X) 7 m (ERS-RSAT satellites) 4 m (X-band satellites)	2 m (satelliti ERS-RSAT) 1 m (satelliti in banda X) 2 m (satelliti ERS-RSAT) 1 m (X-band satellites)	1.5 m

<sup>(4)</sup> Per maggiori approfondimenti cfr: C. COLESANTI, A. FERRETTI, R. LOCATELLI, F. NOVALI, G. SAVIO, "Permanent Scatterers: Precision Assessment and Multi-platform Analysis", IGARSS 2003, 21-25 July 2003, Toulouse, France. pp 1-3.

gh quality results. The higher the number of scenes available the better the precision of the measurement and the reliability of the PS detection algorithms.

- Phase ambiguity: common to any interferometric sy-

### 4.5. Vantaggi e limiti

A sintesi dei principi generali della tecnica di telerilevamento satellitare esposti, si propone di seguito un elenco dei principali vantaggi e limiti della tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> applicata allo studio delle deformazioni della superficie terrestre.

Principali punti di forza:

- Grazie alla tecnica PS, l'interferometria diventa a tutti gli effetti una tecnica applicabile con successo allo studio ed al monitoraggio dei movimenti superficiali, consentendo di apprezzare spostamenti di entità millimetrica su vaste aree, sia a scala regionale che del singolo edificio.
- La tecnica PS consente di monitorare le deformazioni da remoto senza l'installazione di strumentazione a terra e permette di misurare movimenti in due dimensioni: verticale ed orizzontale in direzione E-W, grazie alla disponibilità di dati di spostamento in due geometrie (ascendente e discendente).
- Per l'intero territorio italiano sono disponibili due archivi storici: l'archivio ESA-ERS che copre in modo pressoché continuo l'intervallo 1992-2001 e un archivio di dati RADARSAT-1 a partire da Marzo 2003 ad oggi.
- La complementarità con la strumentazione tradizionale in situ (GPS, livellazione, misure topografiche): la tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> garantisce una maggiore densità di punti di misura (>500 PS/km<sup>2</sup>), ma non permette monitoraggi in tempo reale (al più 8 giorni).
- L'utilizzo dei nuovi sensori in banda X garantisce un ulteriore miglioramento in termini di risoluzione spaziale (più punti di misura) e temporale (maggiore frequenza di osservazione).

Principali punti deboli:

- L'assenza di misure in aree prive di bersagli radar, tipicamente aree vegetate; il problema può essere risolto mediante l'installazione di riflettori artificiali.
- L'impossibilità di stabilire a priori il numero dei PS e la loro distribuzione areale: questa informazione può essere ottenuta solo al completamento dello studio, poiché rappresenta uno dei risultati dell'elaborazione.
- E' richiesta l'elaborazione di un numero minimo di 25-30 immagini radar.
- L'ambiguità della misura: trattandosi di una misura interferometrica le differenze tra un'acquisizione e la successiva possono essere calcolate solo come frazione di un ciclo d'onda.
- La mancanza di informazioni di spostamento in direzione N-S.

Nel complesso, considerato l'elevato contenuto informativo, la possibilità di ricostruire l'evoluzione pregressa dell'area in esame, l'elevata precisione dei risultati e la complementarità con le tecniche di rilievo tradizionali,

stem, displacement measurements are obtained from phase values. These are known modulo-2pi. Under certain circumstances displacement values can be underestimated by one or more wavelengths. This problem is however similar to the well known cycle-slip problem in differential GPS measurements.

- The system is almost insensitive to target displacements along the North-South direction.

Based on the previous paragraphs, it is probably worth pointing out that radar data are becoming a very important tool for surface deformation monitoring and will play a key-role in any monitoring projects in the future.

### 4.6. Future Developments

Research and development efforts carried out by TRE and the POLIMI SAR group recently allowed the development of a new technology known as SqueeSAR<sup>TM</sup>, which can be considered as the natural evolution of the PSInSAR<sup>TM</sup> technique for non-urban areas, where PS density can be low. The algorithm couples the PS population with the so-called Distributed Scatterers (DS), that can be used successfully only after a sophisticated identification and estimation algorithm, also subject to a patent.

This new technology will allow a more effective use of SAR data coming from the new high resolution sensors operating at X-band, characterized by low repeat-cycles and where DS can be then successfully exploited.

## 5. Applications to the Railways

### 5.1. The Project Phase

During the feasibility and preliminary project phase of any infrastructure development, satellite remote-sensing data can offer a useful contribution to the analysis and the study of the area of interest. The identification of unstable areas affected by surface movements and the reconstruction of their displacement over time by means of a historical PS analysis (possibly integrated with geological and geo-technical information) allows the reconstruction of a synoptic view of the local dynamics in a geographic information system (GIS), useful for the definition and the planning of a railway route. When constructing large linear structures, such as a railway, satellite remote-sensing data offer the advantage of minimizing survey times and costs, compared to other monitoring techniques.

The analysis of satellite radar data by means of the PSInSAR<sup>TM</sup> technique is currently being applied in the preliminary design of the new Venice-Trieste railway line, specifically the Ronchi-Trieste section, for assessment of the planned route, which, between the two towns of Santa Chiara and Trieste, crosses the coastal slopes and the Trieste Flysch formations (Fig. 9). The analysis aims to identify any areas subject to surface movements: the feedback from the geological studies and the geotechnical sur-



l'indagine PSInSAR<sup>TM</sup> rappresenta uno strumento ineguagliabile per studiare movimenti del terreno ad ampia scala spaziale e temporale.

### 4.6. Sviluppi futuri

Gli sforzi di ricerca e innovazione portati avanti da TRE e dal Politecnico di Milano hanno recentemente permesso di mettere a punto una nuova tecnologia denominata SqueeSAR<sup>TM</sup>, che di fatto può essere considerata come il naturale sviluppo della tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> per aree extra-urbane dove, in assenza di strutture riflettenti o aree rocciose, la densità di PS può risultare bassa. Ai *Permanent Scatterer* l'algoritmo affianca i cosiddetti *Distributed Scatterer* (DS), punti di misura radar che possono essere utilizzati con successo solo dopo un complesso algoritmo di identificazione e stima, oggetto anch'esso di brevetto.

Questa nuova tecnologia permetterà un più efficace sfruttamento dei dati provenienti dai nuovi sensori ad alta risoluzione operanti in banda X che, nei prossimi anni, andranno a creare un formidabile strumento per il monitoraggio del nostro territorio e dove l'Italia, con la costellazione COSMO-SkyMed, sta giocando un ruolo di primo piano nel panorama internazionale.

## 5. Le applicazioni della tecnica nel settore del trasporto ferroviario

### 5.1. La fase progettuale

Nello studio di fattibilità e nella fase preliminare della progettazione di opere infrastrutturali il telerilevamento satellitare può fornire un utile contributo all'analisi e allo studio del territorio. L'individuazione di aree soggette a movimenti superficiali e la ricostruzione del loro decorso temporale tramite gli archivi storici, consentono, infatti, unitamente alle informazioni di carattere geologico e geotecnico, di ricostruire le condizioni evolutive di versanti o di evidenziare fenomeni deformativi su grande scala, arricchendo il complesso di informazioni necessarie per la definizione e la scelta del tracciato. Nel caso di opere a grande sviluppo lineare, quali le linee ferroviarie, il telerilevamento satellitare, rispetto ad altre tecniche di monitoraggio, presenta, inoltre, il grande vantaggio di ottimizzare tempi e costi di indagine.

L'analisi di dati radar satellitari tramite tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> è in corso di applicazione nell'ambito della progettazione preliminare della nuova linea ferroviaria Venezia-Trieste, tratta Ronchi-Trieste, per la verifica del tracciato, che, tra i comuni di Santa Chiara e Trieste, attraversa i versanti costieri nelle Formazioni del Flysch di Trieste (fig. 9). L'analisi è mirata all'individuazione di eventuali aree soggette a movimenti superficiali: il riscontro con lo studio geologico e con le indagini geotecniche in corso fornirà gli elementi utili alla definizione di un approfondimento di indagine geotecnica.

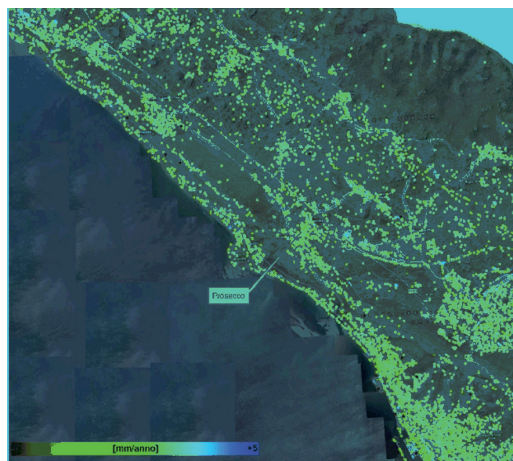


Fig. 9 - Analisi PSInSAR<sup>TM</sup>. Dati preliminari sull'area di studio (estensione 10 km lineari). Dati ERS 1992-2000 (geometria discendente). PSInSAR<sup>TM</sup> analysis. Preliminary data on the area of study (10 km linear length). ERS 1992-2000 data (descending geometry).

veys currently under analysis will provide data for a more in-depth geotechnical survey.

### 5.2. The Construction Phase

#### 5.2.1. Case Study 1: the Cassia - Monte Mario Tunnel in Rome

The Cassia-Monte Mario tunnel is part of the railway belt North of Rome. The tunnel's construction started immediately after the war and finished in 1984, due to severe difficulties encountered when crossing sandy silty soils, requiring several ground improvement works in the tunnel area.

In November 2004, during the upgrading works requiring the invert reconstruction, a sudden flow of water and mud occurred in the tunnel. Despite the tunnel depth in the area exceeds 50 m, the flow of water and mud created fractures and displacements up to the ground surface, affecting the area by subsidence of tens of centimetres. Private properties were damaged, with private gardens and a building being affected.

Shortly after this event, a topographic monitoring system was set up to monitor the development of ground deformation phenomena as well as the stability of the structures surrounding the area. Satellite radar data analysis was also exploited to assess the extent of the area affected by displacements.

The study covered an area of approximately 1 km<sup>2</sup>, centred around the area affected by the event (Fig. 10). Satellite radar data analysis was carried out using 306 satellite radar images. Data gathered by the ESA ERS-1

## 5.2. La fase realizzativa

### 5.2.1. Il caso della galleria Cassia-Monte Mario a Roma

La galleria Cassia-Monte Mario fa parte dell'incompleta cintura ferroviaria a nord di Roma. I lavori di realizzazione della galleria ebbero inizio nell'immediato dopoguerra e si conclusero nel 1984, anche per le notevoli difficoltà incontrate nell'attraversare terreni limo-sabbiosi sotto falda, che hanno richiesto numerosi e diversi interventi di consolidamento dei terreni al contorno del cavo.

Nel novembre 2004, durante i lavori per la messa in sicurezza e per l'adeguamento a sagoma della galleria, nella fase di demolizione e rifacimento per campioni dell'arco rovescio, si è verificato un improvviso ingresso di acqua e fango in galleria. Nonostante la copertura della galleria in tale zona sia superiore a 50 m, l'ingente venuta d'acqua con trasporto di materiale fino ha prodotto fratture ed abbassamenti del piano campagna, dell'ordine delle decine di centimetri e in qualche punto fin quasi ad un metro. I dissesti hanno interessato proprietà private, coinvolgendo zone adibite ad orto e giardino e un'abitazione.

Subito dopo l'evento è stato predisposto un sistema di monitoraggio topografico per controllare l'evoluzione degli spostamenti del terreno e delle strutture circostanti e, successivamente, si è fatto ricorso all'analisi di dati radar satellitari, mirata alla verifica del completo esaurimento degli spostamenti conseguenti al dissesto del 2004 e alla valutazione, tramite le serie storiche, di eventuali fenomeni deformativi lenti presenti prima del dissesto.

L'analisi ha riguardato un'area di estensione di circa 1 km<sup>2</sup>, centrata sulla zona interessata dai dissesti superficiali (fig. 10). L'elaborazione dei dati radar satellitari è stata condotta utilizzando 306 immagini satellitari. Sono stati analizzati i dati radar dei sensori ERS-1 ed ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea acquisiti nell'arco temporale 1992-2000 e del sensore RADARSAT-1 dell'Agenzia Spaziale Canadese acquisiti nel periodo 2003-2008. Sono state considerate entrambe le geometrie di acquisizione (ascendente e discendente).

Per ciascun PS è stata ricavata la velocità media annua di deformazione e per i punti di maggiore interesse sono state generate le serie storiche di spostamento per analizzare in maggior dettaglio l'evoluzione deformativa nel periodo di acquisizione considerato. L'analisi, estesa su una superficie più ampia di quella interessata dal dissesto, ha permesso di evidenziare la sostanziale stabilità dell'area nel periodo 1992-2000 (fig. 11) con velocità di spostamento medie dell'ordine di 2-3 mm/anno (fig. 12).

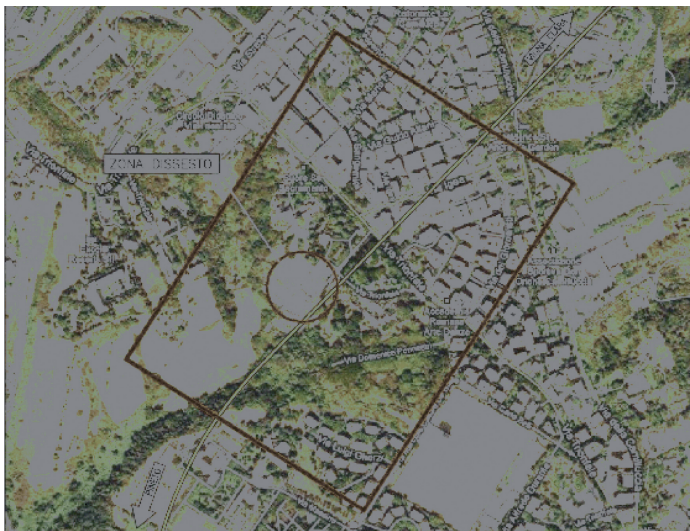


Fig. 10 - Inquadramento dell'area oggetto dell'analisi PSInSAR<sup>TM</sup>. In giallo il tracciato della galleria. Focus on the area object of PSInSAR<sup>TM</sup> analysis. Tunnel line layout in yellow.

and ERS-2 sensors (1992-2000) and by the CSA RADARSAT-1 satellite (2003-2008) were carefully analyzed. Both acquisition geometries (ascending and descending) were considered. For each PS, the average displacement rate was calculated and, for points of high interest, displacement time series data were generated to be able to look into the onset and evolution of deformational phenomena. The historical analysis, which covered an area much wider than the area affected by displacement field triggered by the event, highlighted a general stability of the area in the period 1992-2000 (Fig. 11), with average displacement rates of about 2-3 mm/year (Fig. 12).

On the contrary, the PS analysis carried out on the SAR data covering the time span 2003-2008 highlighted a significant increase in the values of the average displacement rates over the area of interest (Fig. 13). PS time series clearly highlighted the displacements associated with the event in November 2004, proceeding during 2005 with velocities ranging between 15-30 mm/year, and finally exhibiting a progressive reduction in displacement rate values up to a full stabilization in 2006 (Fig. 14). The slight velocity increase measured in 2008 is attributed to small surface deformation phenomena due to the rainfall infiltration in the still unrecovered loose and fractured ground surface.

The processing of both ascending and descending data-sets allowed the estimation of vertical and horizontal (East-West) components, providing an evidence that displacements occurred predominantly in the vertical direction (settlements), while horizontal displacements pointed towards the tunnel.

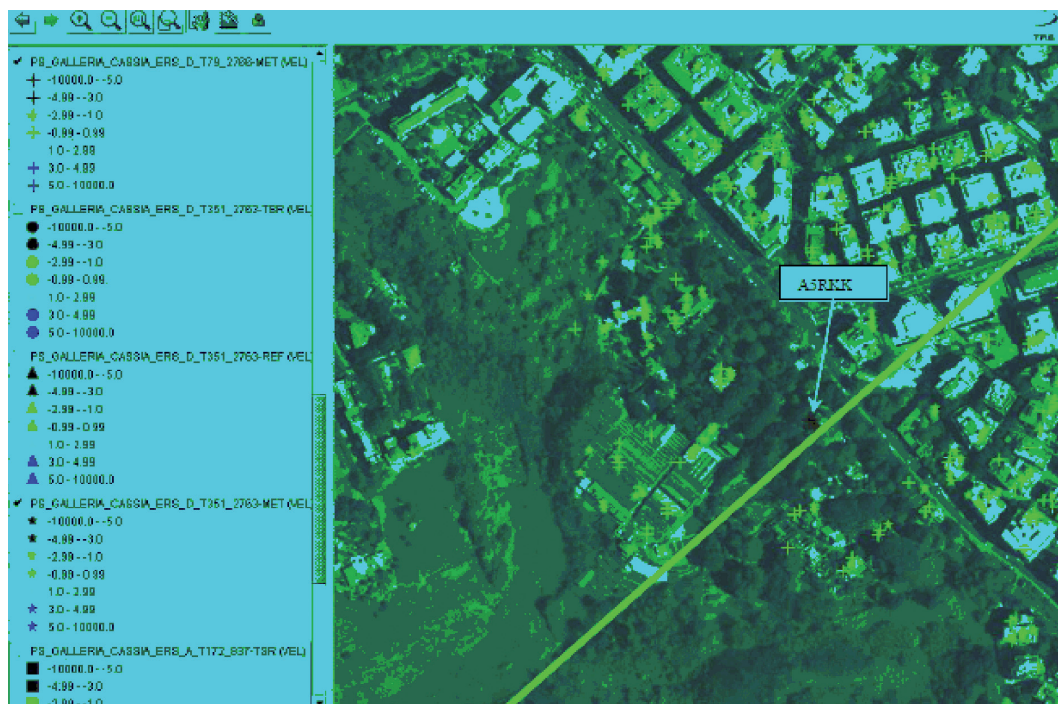


Fig. 11 - Campo di velocità PS. Dati ERS 1992-2000 (geometria discendente). La scala colori identifica con il giallo, arancione e rosso (valori negativi) allontanamenti del punto di misura dal sensore lungo la direzione di vista. PS velocity range. ERS 1992-2000 data (descending geometry). The colour scale shows the point of measurement's movement away from the sensor along the sight direction in yellow, orange and red (negative values).

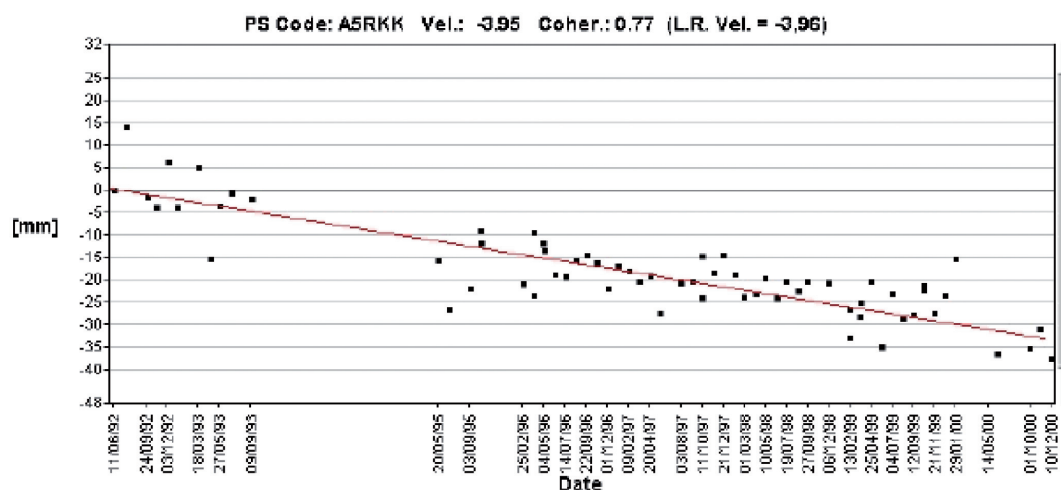


Fig. 12 - Serie storica di spostamento del PS identificato in fig. 11. PS displacement time series data shown in fig. 11.



Le analisi condotte con riferimento al periodo temporale 2003-2008 evidenziano un significativo incremento della velocità di spostamento media nell'area interessata dal dissesto (fig. 13). Le serie storiche dei PS ben evidenziano gli spostamenti associati al dissesto in galleria del novembre 2004, che proseguono nel corso del 2005 con velocità comprese tra 15 e 30 mm/anno e con progressiva diminuzione della velocità di spostamento fino alla completa stabilizzazione nel 2006 (fig. 14). Il modesto incremento di velocità riscontrato nel 2008 è da attribuire alla presenza di situazioni di dissesto del piano campagna ancora non risanate, che, favorendo l'infiltrazione delle acque meteoriche, hanno prodotto la ripresa di fenomeni deformativi superficiali, comunque di scarso rilievo.

L'elaborazione dei due dataset ascendente e discendente ha consentito la scomposizione del moto lungo le direzioni verticale ed orizzontale Est-Ovest, dimostrando che il movimento si è manifestato prevalentemente in direzione verticale (cedimento) e, per la componente orizzontale, in direzione della galleria.

L'analisi dei dati satellitari elaborati con tecnica PSInSAR™ ha fornito, pertanto, un quadro dei fenomeni deformativi, prodottisi con il dissesto del 2004, congruente con le osservazioni e con i rilievi topografici, completandolo con le informazioni ricavate su un'area di maggiore estensione e sul periodo temporale antecedente il 2004. Ha, inoltre, confermato la raggiunta stabilizzazione dell'area ed evidenziato l'esistenza di situazioni singolari e puntuali caratterizzate da lenti spostamenti, presenti anche prima del dissesto del 2004.

La ripresa dei lavori di adeguamento della galleria Cassia-Monte Mario, avvenuta nel 2007, ha richiesto, a presidio degli scavi per la demolizione e ricostruzione dell'arco rovescio ammalorato della galleria, l'adozione della tecnica del congelamento artificiale dei terreni per una tratta di circa 300 m a cavallo della zona in cui si verificò il dissesto in galleria. I lavori di ricostruzione dell'arco rovescio sono terminati nell'agosto 2009 e non hanno manifestato nessuna interazione, né profonda, né superficiale con l'area in esame.

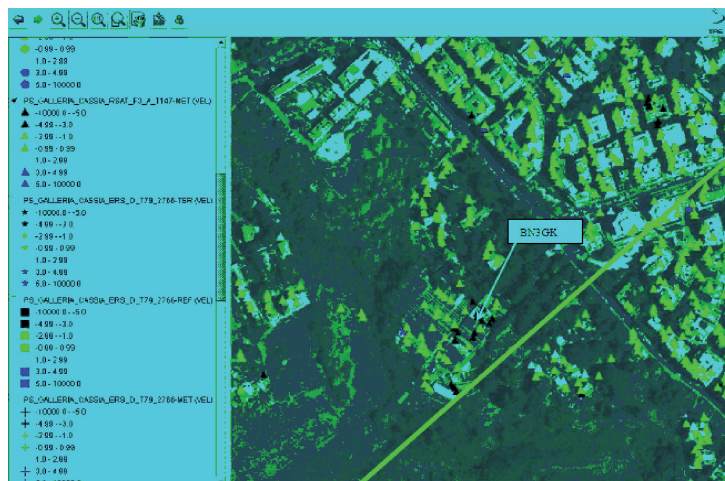


Fig. 13 - Campo di velocità PS. Dati RSAT 2003-2008 (geometria ascendente). La scala colori identifica con il giallo, arancione e rosso (valori negativi) allontanamenti del punto di misura dal sensore lungo la direzione di vista. PS velocity range. RSAT 2003-2008 data (ascending geometry). The colour scale shows the point of measurement's movement away from the sensor along the sight direction in yellow, orange and red (negative values).

The analysis of satellite PS data provided a synoptic view of the deformation phenomena caused by the 2004 event over an area where ground observations were available and topographic surveys were carried out. The PS data covered a wider area than *in situ* data and, more importantly, allowed the analysis of the local dynamics *before* the event. Additionally, the study confirmed that the area had achieved stability and highlighted the existence of local and specific small areas characterised by slow displacements, which were also present before the 2004 event.

The resumption of the invert reconstruction works in the Cassia-Monte Mario tunnel required the adoption of artificial ground freezing technique for a length of ap-

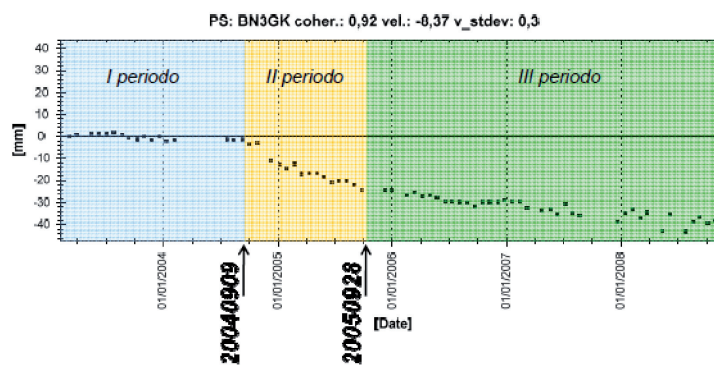


Fig. 14 - Serie storica di spostamento del PS identificato in fig. 13. PS displacement time series data shown in fig. 13.

### 5.2.2. Il caso della galleria naturale del Nodo AV di Bologna

Nell'ambito della penetrazione urbana della nuova linea Milano-Napoli AV/AC nella città di Bologna, sono attualmente in fase di esecuzione i lavori per il completamento della galleria naturale a nord del camerone della futura stazione.

Si tratta di una galleria a doppio binario con un'area di scavo di circa 130 m<sup>2</sup>, scavata con metodo tradizionale in depositi alluvionali sotto falda, che attraversa sotto basse coperture (circa 10 m) un contesto urbano ricco di interferenze commerciali e di civili abitazioni.

Considerato il delicato contesto urbano e geotecnico in cui l'opera si inserisce, e gli attesi effetti indotti dalle lavorazioni sulle interferenze a piano campagna, appare evidente come in questo caso specifico l'esame degli aspetti deformativi in superficie assuma un'importanza fondamentale.

In fase di esecuzione, si è così ritenuto opportuno integrare il già complesso sistema di monitoraggio di progetto previsto a presidio dei lavori, con un'attività di monitoraggio degli spostamenti superficiali mediante dati radar satellitari elaborati con la tecnica PSInSAR<sup>TM</sup>.

L'analisi dei dati satellitari ha consentito di acquisire preziosi elementi di monitoraggio della zona inquadrando nell'ambito di un'area ben più estesa di quella coperta dal monitoraggio di progetto; l'elaborazione dei dati storici ha consentito inoltre di verificare il comportamento deformativo dell'area precedente all'apertura dei cantieri e quindi indipendente dai lavori.

La contemporanea presenza del monitoraggio di progetto ha infine offerto l'opportunità di un utilissimo confronto tra i dati del monitoraggio satellitare e quelli ottenuti con tecniche tradizionali, per una sorta di mutua validazione delle misure e a conferma dell'affidabilità e della precisione della tecnica di elaborazione dei dati satellitari.

In fig. 15 è mostrata l'area di studio dell'estensione di circa 1 km<sup>2</sup> centrata sulla zona di cantiere del tratto di galleria attualmente in fase realizzativa. Il fronte di scavo della galleria procede da ovest verso est parallelamente a via de' Carracci a circa 30 m dall'asse stradale; ad oggi restano da scavare gli ultimi 200 m circa per raggiungere il camerone della futura stazione.

In particolare, il tratto attualmente in fase di scavo, di lunghezza pari a circa 270 m, è quello la cui sezione tipo di progetto (denominata C1) prevedeva la costruzione preventiva di 10 microtunnel con diametro esterno pari a circa 2 m, al contorno della calotta di scavo. Per la realizzazione dei microtunnel, eseguita con scavo meccanizzato, sono stati realizzati preliminarmente anche due pozzi di immissione ed estrazione fresa.

Per l'analisi in oggetto sono stati utilizzati i dati radar del sensore RADARSAT-1 dell'Agenzia Spaziale Canadese (CSA) acquisiti nel periodo 2003-2008, e i dati storici dei sensori ERS-1 ed ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) acquisiti nel periodo 1992-2000. Per tutti i sensori

proximamente 300 m overlapping the area where the 2004 event had occurred. Tunnel invert reconstruction works were completed in August 2009 and did not show any further interaction, either on the surface or below, with the area under examination.

### 5.2.2. Case Study 2: the High-Speed/High-Capacity Bologna Node Tunnel

In the framework of the construction of the urban section of the new High-Speed/High-Capacity Milan-Naples railway line across the city of Bologna, tunnelling works are currently underway. In particular, a double-track tunnel North of the future railway station is under construction: it has an excavation area of approximately 130 m<sup>2</sup> through alluvial soils below groundwater table, crossing urban areas at low depths (approximately 10 m) with a high density of commercial activities and residential housing.

Considering the sensitive urban and geotechnical context and the expected effects induced by the tunnel, the monitoring of surface deformation is of utmost importance. Thus, during the construction, it was decided to combine the comprehensive *in situ* monitoring system with PSInSAR<sup>TM</sup> data.

Satellite analysis provided a precise monitoring survey of an area much wider than that covered by the original monitoring system. The processing of historic SAR data allowed additional assessment of deformation behaviour *ante operam* (i.e. before the start of tunnelling activities), and therefore independent of any construction work.

The availability of both satellite and *in situ* measurements provided a great opportunity for a comparison between the two data-sets, resulting in a mutual confirmation of the measurements and confirming the accuracy and reliability of the satellite data.

Figure 15 shows the study area of approximately 1 km<sup>2</sup> centred around the construction area. The tunnel excavation proceeds from West to East in parallel to Via de' Carracci, approximately 30 m from the road centre line. To date, excavation of the remaining 200 m is needed to reach the future station.

In particular, the stretch currently under excavation, approximately 270 m long, was designed according to a cross section (named C1) which requires the preliminary construction of 10 micro-tunnels, with an outer diameter of approximately 2 m, around the excavation crown. For the mechanised excavation of the micro-tunnels, two shafts were also constructed: one for launching and one for receiving the tunnel boring machine.

For the PS analysis, both RADARSAT-1 satellite data (for the period 2003-2008) and ESA ERS-1 and ERS-2 images (for the period 1992-2000) were used. More than 250 images were processed.

By December 2008, date of the last radar image used in the analysis, tunnel excavation in section C1 had been





Fig. 15 - Area di studio. *Area of study.*

sono state utilizzate entrambe le geometrie di acquisizione a disposizione (ascendente e discendente) per un totale di 251 immagini satellitari.

A dicembre 2008, data di acquisizione dell'ultima immagine radar utilizzata nell'analisi, lo scavo della galleria in sezione C1 risultava completato per i primi 32 m a partire dal pozzo di immissione dei microtunnel.

Come noto ed ampiamente documentato nella letteratura tecnica, l'area della provincia di Bologna, e più in generale l'intera pianura dell'Emilia Romagna, è affetta storicamente da un fenomeno di subsidenza le cui cause sono da ascrivere a vari processi naturali ed antropici (compattazione di sedimenti, estrazione di acque sotterranee etc.). L'analisi dei dati satellitari su una zona di inquadramento ben più ampia della suddetta area di studio, ha consentito di evidenziare tale fenomeno.

Nella fig. 16 si riporta il risultato dell'elaborazione per l'arco temporale 1992-2000 (dato ERS) e per quello 2003-2008 (dato RSAT), in termini di velocità medie di spostamento annue, avendo definito il punto di riferimento nella zona degli Appennini a sud della città.

completed up to the first 32 m, starting from the micro tunnels launching shaft.

As well known and broadly documented in technical literature, the area of the District of Bologna (and in general the whole of the Emilia Romagna plain) is historically characterised by a subsidence phenomenon caused by different natural and anthropogenic processes (sediment compaction, groundwater extraction, etc.). The analysis of satellite data, covering on a much wider area than the above mentioned area of interest, clearly confirmed this phenomenon.

Figure 16 illustrates the PS results for the period 1992-2000 (ERS data) and the period 2003-2008 (RSAT data) in terms of annual average displacement rate. The reference point was defined and located in the Apennines area, South of the town of Bologna. Figures 17 to 20 show in detail the same results for the area of interest, both in terms of annual average displacement rate values and displacement time series for two PS chosen as representatives of the area average behaviour. The displacement velocities are represented by a colour scale

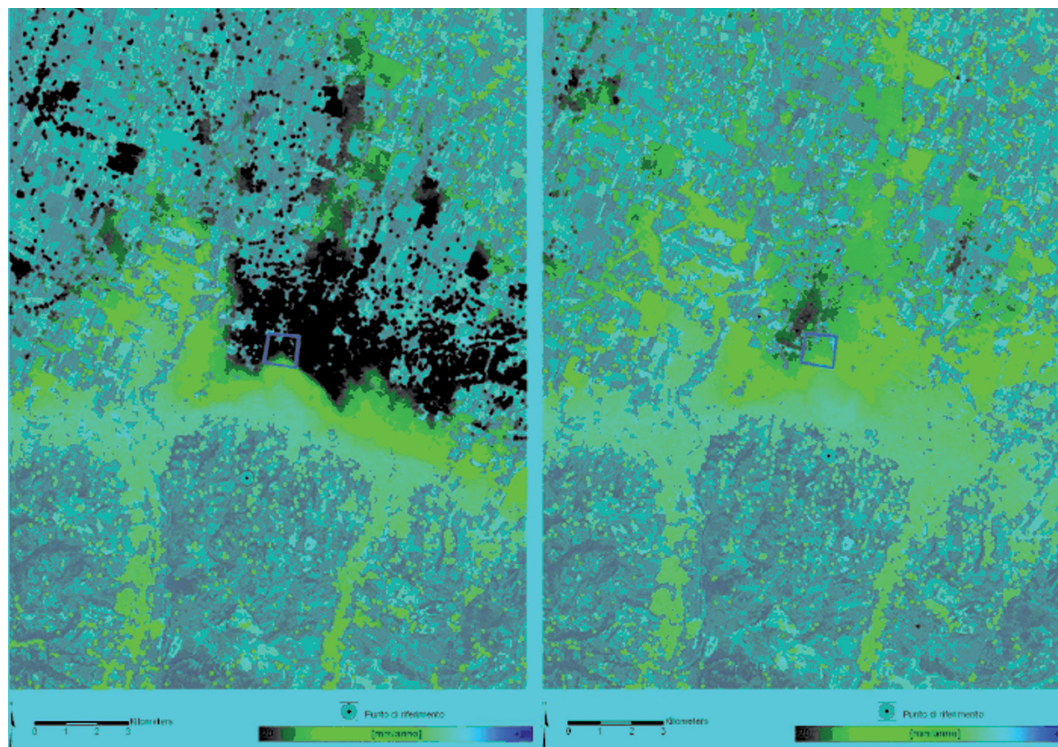


Fig. 16 - Campo di velocità PS sull'area di Bologna, a sinistra dati ERS 1992-2000 (geometria discendente) a destra dati RSAT 2003-2008 (geometria discendente). Nel quadrato blu è indicata l'area di studio di fig. 15. *PS velocity range in the area of Bologna – ERS 1992-2000 data (descending geometry) on the left side – RSAT 2003-2008 data (descending geometry) on the right side. The blue frame shows the area of study of fig. 15.*

Nelle successive figg. da 17 a 20 gli stessi risultati dell'elaborazione sono mostrati in dettaglio per l'area di studio, ancora in termini di velocità medie di spostamento annue ed anche come serie storiche di spostamento per due PS scelti come rappresentativi del comportamento medio dell'area.

Le velocità di spostamento sono rappresentate in scala a colori saturata tra  $\pm 20$  mm/anno (si ricorda che valori positivi indicano avvicinamenti dei PS al satellite).

Le elaborazioni indicano la vastità del fenomeno ed evidenziano una attenuazione delle velocità di spostamento tra il primo periodo (1992-2000) dove nell'area di studio si hanno valori medi di 20 mm/anno e il secondo periodo (2003-2008) dove i valori medi si attestano sui 12 mm/anno. La subsidenza risulta inoltre crescente procedendo in direzione nord con gradienti di spostamento non trascurabili anche nell'ambito della limitata estensione dell'area di studio.

Sulla base dei risultati di questa analisi preliminare di

ranging from -20 to +20 mm/year (it should be noted that positive values indicate PS movement towards the satellite).

PS data show the extent of the area affected by subsidence and reveal a reduction in the displacement velocity between the first period (1992-2000), during which average values of about 20 mm/year were measured in the area of interest, and the second period (2003-2008), characterised by average values of about 12 mm/year. Subsidence rates increase towards North with non-negligible displacement gradients, even within the limited extent of the area under study.

On the basis of the preliminary results, and above all thanks to SAR archive data processing, it was possible to highlight a significant deformation trend in the area of study before the construction activities. The effects induced by tunnel construction arose in addition to the pre-existing deformation phenomena.

In order to highlight the displacements induced by tunnelling activities, it was considered appropriate to se-



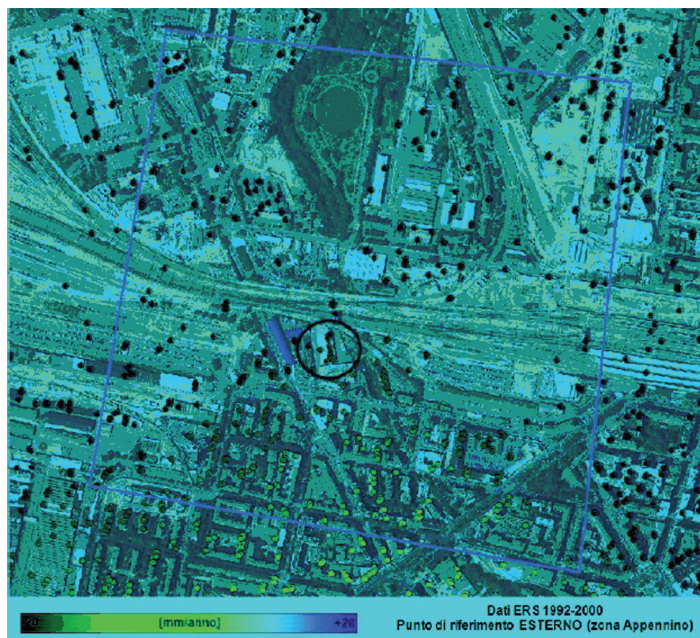


Fig. 17 - Campo di velocità PS sull'area di studio. Dati ERS 1992-2000 (geometria discendente). All'interno del cerchio rosso è scelto il PS di cui è mostrata la serie storica di spostamento in fig. 18. PS velocity range in the area of study. ERS 1992-2000 data (descending geometry). The red circle indicates the chosen PS whose displacement historical series is shown in fig. 18.

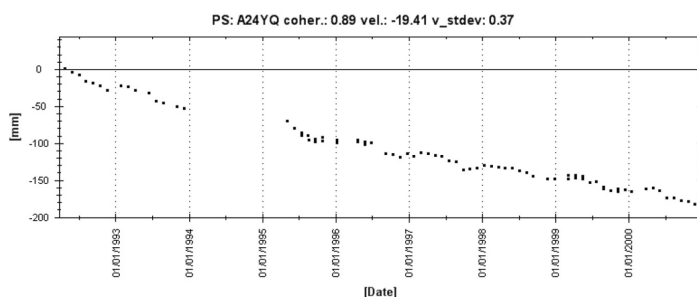


Fig. 18 - Serie storica di spostamento rappresentativa del comportamento medio dell'area di studio. Dati ERS 1992-2000 (geometria discendente). Displacement historic time series representing the average behavior of the area of study. ERS 1992-2000 data (descending geometry).

inquadramento, soprattutto grazie all'elaborazione dei dati storici, è stato così possibile definire compiutamente un significativo trend deformativo dell'area, precedente all'inizio dei lavori, cui oggi vanno a sommarsi gli effetti indotti dalle lavorazioni per la realizzazione della galleria.

Al fine di evidenziare gli spostamenti indotti dalle sole

lect a reference point in such a way to minimize the displacement gradients due to generalised subsidence and to detect the sole displacements induced by the excavation works.

The RADARSAT data processing for the time period 2003-2008 identified hundreds of PS around the tunnel centreline. These PS are characterised by the highest displacement velocities, although the velocity gradient due to the large-scale subsidence phenomenon affecting the area was still visible.

Critical analysis of single PS displacement time series, along with the chronology of site and tunnel excavation activities (even before initiation of site works) have provided a detailed evaluation of any interference and other interesting deformation aspects occurring at the ground level.

Figure 21 shows an example of a PS time series located near the tunnel centre line, approximately in the centre of the area of interest. After the first section (2003-2006) characterised by displacements with low zero-average ripples, it is evident an increase in displacement values, and, in particular a continuous increase throughout 2007 (up to 2 cm), followed again by a section with practically zero displacement values until the end of December 2008.

This behaviour is in perfect agreement with site work activities in 2007. The displacement increase is related to the construction of the 10 micro-tunnels between March and October 2007. In the subsequent period until December 2008, the tunnel excavation did not proceed, remaining far from the considered PS, and the displacements quickly stopped (confirming the final section of the historic time series).

As already mentioned, the use of satellite data provided a very useful data-set to be compared with the displacement values measured by *in situ* devices. In this case, it was also possible to compare the historical time series of PSInSAR™ data with the settlement rates estimated by optical levelling surveys.

In order to make such a comparison possible, it was

attività di cantiere, si è ritenuto opportuno approfondire le elaborazioni scegliendo un punto di riferimento sufficientemente lontano dall'asse della galleria ma interno all'area di studio, in modo da minimizzare i gradienti di spostamento dovuti alla subsidenza generalizzata e cogliere invece gli spostamenti indotti dalle operazioni di scavo.

La ripetizione in tal senso delle elaborazioni dei dati RSAT, per l'arco temporale 2003-2008, ha in effetti consentito di evidenziare tutti quei PS nell'intorno dell'asse della galleria che, nell'ambito dei suddetti gradienti di velocità di spostamento da attribuire alla subsidenza generalizzata, si distinguevano per velocità di spostamento più elevate.

Per ciascuno di tali PS l'analisi critica delle singole serie storiche di spostamento in relazione alla cronologia delle attività del cantiere (anche prima dell'avvio del monitoraggio di progetto) e all'avanzamento del fronte di scavo della galleria, ha consentito di effettuare valutazioni di dettaglio su ciascuna interferenza sensibile e su qualsiasi altro aspetto deformativo di interesse a piano campagna.

A scopo esemplificativo in fig. 21 è riportata la serie storica di un PS ubicato in corrispondenza dell'asse della galleria approssimativamente al centro dell'area di studio.

Dopo il tratto iniziale (da inizio 2003 a fine 2006) con spostamenti caratterizzati da modeste oscillazioni stagionali a media nulla, si osserva un incremento degli spostamenti che risultano crescenti con continuità durante tutto il 2007 (fino a 2 cm), e quindi nuovamente un tratto con velocità di spostamento praticamente nulla fino al termine dell'elaborazione (dicembre 2008).

Tale andamento trova pieno riscontro con le attività del cantiere, che solo nel 2007 hanno interessato la zona in oggetto. Gli incrementi di spostamento appena descritti sono infatti attribuibili alla realizzazione dei 10 microtunnel avvenuta tra marzo e ottobre 2007. Nel periodo successivo, fino a Dicembre 2008, il fronte di scavo della galleria è rimasto fermo, lontano dal PS considerato, e

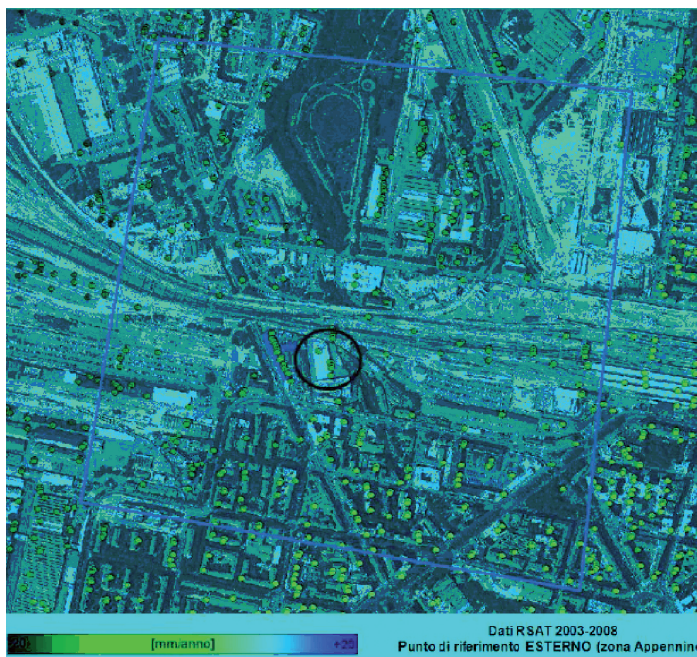


Fig. 19 - Campo di velocità PS sull'area di studio. Dati RSAT 2003-2008 (geometria discendente). All'interno del cerchio rosso è scelto il PS di cui è mostrata la serie storica di spostamento in fig. 20. PS velocity range in the area of study. RSAT 2003-2008 data (descending geometry). The red circle indicates the chosen PS whose displacement historical series is shown in fig. 20.

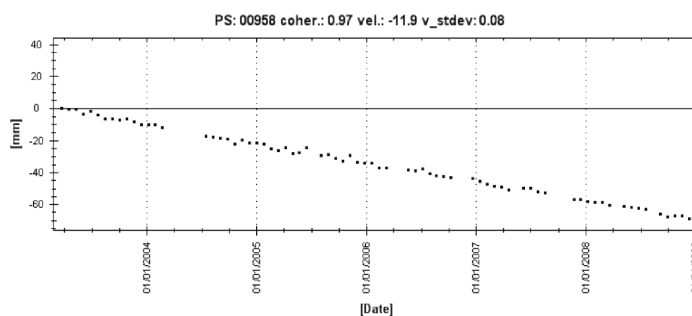


Fig. 20 - Serie storica di spostamento rappresentativa del comportamento medio dell'area di studio. Dati RSAT 2003-2008 (geometria discendente). Displacement historic time series representing the average behavior of the area of study. RSAT 2003-2008 data (descending geometry).

necessary to define a common reference point. The topographic monitoring design refers to a datum point "ARPA 75/02 line 324" located in Zanardi street, n. 83 (on the building at the corner with De' Carracci street), 400 m from the reference point chosen for the satellite analysis.

gli spostamenti si sono rapidamente esauriti (a conferma del tratto finale della serie storica).

Come anticipato, l'impiego dell'analisi satellitare ad integrazione del monitoraggio di progetto, ha offerto l'opportunità di un utilissimo confronto con gli spostamenti misurati mediante tecniche tradizionali, così da poterne verificare l'accordo o evidenziare eventuali discrepanze. In particolare è stato possibile confrontare le serie storiche di spostamento delle misure PSInSAR™ con i cedimenti misurati nei corrispondenti capisaldi di livellazione presenti nell'area.

Per poter eseguire tale confronto, si è reso necessario innanzitutto omogeneizzare i dati in termini di punti di riferimento. In effetti tutto il monitoraggio topografico di progetto si riferisce al caposaldo ARPA 75/02 linea 324 ubicato in via Zanardi 83 (sul fabbricato d'angolo con via de' Carracci), che risulta distante circa 400 m dal punto di riferimento scelto per l'analisi satellitare di dettaglio.

A causa del forte fenomeno di subsidenza sopra descritto che interessa l'area di studio, la diversa posizione dei due punti di riferimento si traduce in una differenza di velocità media di spostamento valutabile in circa 2 mm/anno, che è stato necessario compensare.

Altro aspetto da considerare ai fini del confronto è il fatto che le misure ottenute dal monitoraggio satellitare non sono relative a spostamenti verticali bensì lungo la direzione di vista del satellite secondo la geometria di acquisizione del sensore radar.

Come già evidenziato nella descrizione generale della tecnica, nei casi in cui sono disponibili entrambe le geometrie di acquisizione dal satellite (ascendente e discendente) e dall'elaborazione risulta una densità di PS adeguata, è possibile ottenere una stima rigorosa del moto verticale dei PS secondo la procedura di calcolo descritta al precedente paragrafo 4.3.

In questo particolare caso di studio, considerato l'ambito del problema, si è ritenuto lecito trascurare la componente orizzontale del moto ed ipotizzare che il moto reale dei PS fosse puramente verticale. Con tale assunzione le misure di spostamento lungo la linea di vista del satellite rappresentano una componente del moto reale per cui è stato possibile calcolare i cedimenti, dividendo il moto stimato per il coseno dell'angolo di incidenza (nello specifico, per il dato RSAT discendente, pari a circa 34°).

Infine, a causa della diversa origine temporale delle misure, alle serie storiche di cedimento del monitoraggio topografico è stato aggiunto lo spostamento verticale stimato dalla serie storica PS in corrispondenza della data del 28/03/2007, origine temporale delle misure topografiche.

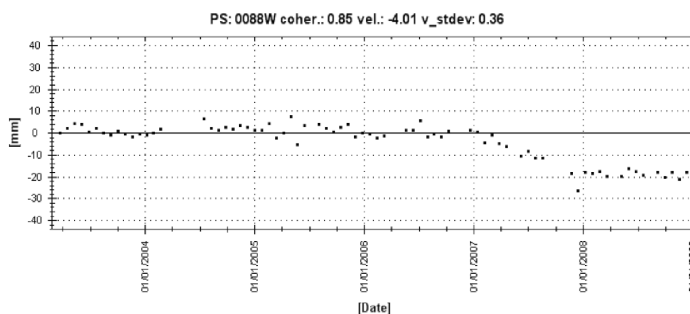


Fig. 21 - Serie storica di spostamento rappresentativa degli effetti indotti dallo scavo della galleria. Dati RSAT 2003-2008 (geometria discendente). *Displacement historic time series representing the effects induced by tunnel excavation. RSAT 2003-2008 data (descending geometry).*

Due to strong subsidence phenomenon described above, the different location of the two reference points determines a difference of about 2 mm/year in the average displacement rate: this had to be taken into account before the comparison. Another important factor to be taken into account is the fact that satellite data do not measure vertical displacements directly, although these can be estimated by properly combining two data-sets acquired along two opposite acquisition geometries (see Section 4.3).

In this particular case study, it was considered acceptable to neglect the horizontal components of the deformation field and to assume that the PS movement was merely vertical. Under this assumption, the displacement measurement along the satellite LOS was used to calculate the relevant settlements by dividing the estimated movement by the cosine of the incidence angle of the illuminating beam (specifically the incidence angle was equal to about 34° for the descending RADARSAT dataset).

Finally, the vertical displacement estimated by the PS time series on March 28<sup>th</sup> 2007 (starting time of topographic survey) was added to the settlement time series of the topographic monitoring data, as the time origin of the measurements was different. Figure 22 shows a comparison between the PS time series of Figure 21, properly corrected as described above, and the settlement time series of the corresponding topographic levelling benchmark existing in the area. The optimal correlation between the two data-sets confirmed the precision of the PSInSAR™ technique for the detection and estimation of surface displacement phenomena.

It should also be noted that the positive result of the comparison gave an evidence of the accuracy and reliability of satellite data not only for monitoring slow and constant-velocity movements, but even in cases characterised by small absolute displacements with abrupt changes and significant variations in average velocity values.



A scopo esemplificativo, in fig. 22 è mostrato il confronto tra la serie storica del PS già mostrata nella precedente fig. 21, opportunamente corretta secondo quanto detto sopra, e quella dei cedimenti del corrispondente caposaldo di livellazione topografica.

Risulta evidente l'ottimo accordo tra le due serie storiche, a conferma della precisione della tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> nella stima degli spostamenti superficiali.

Da sottolineare peraltro il fatto che il buon esito di tale confronto ha dimostrato l'affidabilità e la precisione dell'analisi satellitare, non solo nell'ambito del monitoraggio di movimenti lenti e costanti nel tempo (ideale campo di applicazione della tecnica) ma anche in un caso come questo, caratterizzato da spostamenti modesti in valore assoluto ma con incrementi rapidi e forti variazioni di velocità nel tempo.

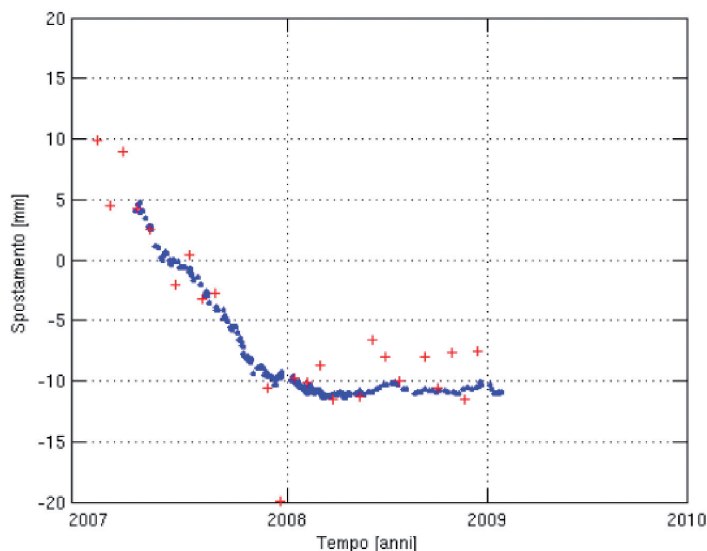


Fig. 22 - Confronto tra il dato satellitare (in rosso) e il dato topografico tradizionale (in blu). Comparison between the satellite data (red points) and the traditional topographic data (blue points).

### 5.3. La fase di esercizio

#### 5.3.1. Il caso della galleria Scianina – Tracoccia

Nel settembre 2001, mentre erano in corso le attività di scavo della galleria Scianina-Tracoccia per la nuova linea ferroviaria Palermo-Messina, tratta Rometta-Pace del Mela, un grande fenomeno franoso si è sviluppato sul versante settentrionale del rilievo collinare dominato dall'abitato di Tracoccia (località Valdina). Il tratto di galleria scavato dal lato Messina (circa 156 m) è stato completamente distrutto insieme a parte delle opere di imbocco.

La galleria si trova ad attraversare un contesto geomorfologico complesso: il versante, costituito da argille consistenti pleistoceniche, era stato interessato in passato da un'intensa attività estrattiva per la produzione di laterizi, che aveva lasciato acclivi ed estesi fronti di cava, mentre l'area al piede del versante era stata utilizzata come sito per discarica di rifiuti solidi urbani. La frana ha prodotto una scarpata di distacco di altezza superiore a 20 m e ha provocato la fuoriuscita di percolato dalla discarica RSU. Le gallerie autostradali che attraversano il rilievo collinare a monte della galleria ferroviaria (fig. 23) non sono state coinvolte dal movimento franoso.

La messa in sicurezza e il ripristino della galleria crollata hanno richiesto, dopo la necessaria bonifica ambientale della discarica, la stabilizzazione del versante con un importante intervento di riprofilatura del pendio tramite la costruzione di un rilevato alto circa 20 m (fig. 23). La galleria è stata quindi ricostruita secondo il tracciato ori-

### 5.3. The Operational Phase

#### 5.3.1. Case Study 3: the Scianina – Tracoccia Tunnel

In September 2001, during the excavation of the Scianina-Tracoccia tunnel for the Palermo-Messina railway line, a landslide occurred on the North slope of the hill near the village of Tracoccia. The tunnel excavation section on the Messina side (about 156 m) was completely destroyed, together with the tunnel portal.

The tunnel crosses a complex geomorphological context: the slope, made of Pleistocene stiff clays, had been affected in the past by intense quarry activities for bricks production, that left steep slope cuts, while the area at the bottom of the slope had been used as a dump for solid waste.

The landslide created a crown scarp exceeding 20 m in height and caused a percolation leak from the dump. The roadway tunnels crossing the hill area upstream of the railway tunnel (Fig. 23) were not involved by the landslide phenomenon.

Railway tunnel restoration required the slope to be stabilised with a re-profiling intervention by means of an embankment with a maximum height of about 20 m (Fig. 23). The tunnel was then reconstructed, according to the original layout, by carrying out significant ground improvement treatments.

After the landslide, an accurate monitoring system aiming at controlling the status of the slope and the safety of

ginario, realizzando preventivi trattamenti di consolidamento dei terreni rimaneggiati e allentati dal movimento franoso.

A seguito del dissesto, è stato predisposto un accurato piano di monitoraggio per controllare l'evoluzione delle condizioni di stabilità del pendio e la sicurezza delle strutture preesistenti. Il monitoraggio è proseguito durante tutte le fasi di realizzazione degli interventi di messa in sicurezza e del ripristino della galleria, fornendo evidenza dell'efficacia dell'intervento di stabilizzazione e garanzia della sicurezza dell'opera ferroviaria.

In ogni caso, data la complessità del contesto in cui è realizzata la galleria, come previsto in progetto e in accordo con le indicazioni della più recente normativa in materia (DM 14/1/2008) si è ritenuto opportuno proseguire il monitoraggio delle condizioni deformative ed idrauliche del versante per tre anni dalla data di ultimazione dell'opera.

Accanto all'usuale controllo degli spostamenti profondi tramite strumentazione geotecnica, il programma di monitoraggio ha previsto anche il controllo degli spostamenti superficiali attraverso l'analisi di dati radar satellitari secondo la tecnica PSInSAR<sup>TM</sup>. Sul versante di interesse non sono presenti riflettori naturali (manufatti o rocce esposte), si è pertanto deciso di installare una rete di *Permanent Scatterers* artificiali ("riflettori artificiali") (fig. 24), i quali consentono di monitorare da remoto e con una precisione millimetrica eventuali fenomeni deformativi.

I riflettori artificiali sono stati realizzati in modo da essere visibili dal satellite in entrambe le geometrie di acquisizione (fig. 25). Questa tipologia di riflettori garantisce, inoltre, che il centro di fase visibile dal satellite in entrambe le geometrie sia fisicamente lo stesso punto, garantendo un significato fisico più robusto alla scomposizione delle velocità lungo la linea di vista del satellite, ascendente e discendente, nelle componenti verticali e orizzontale est-ovest.

Questa rete di riflettori artificiali, che non richiede alcuna manutenzione o alimentazione, potrà essere utilizzata anche per un controllo di più lungo termine, qualora ritenuto necessario.

Ad oggi sono state avviate le attività di acquisizione ed elaborazione dei dati satellitari e i primi risultati utili saranno disponibili alla fine del 2010.



Fig. 23 - Il versante di Tracoccia dopo l'intervento di riprofilatura con rilevato di stabilizzazione. *The Tracoccia slope after the re-profiling intervention with a stabilization embankment.*

pre-existing structures was installed. Monitoring was continuous during the tunnel restoration activities thus providing evidence of both the efficiency of stabilization activities and the safety guarantee of the railway structure.

Given the complexity of the context in which the tunnel was constructed, it was suggested to continue the monitoring activities of the slope stability for further three years after the completion date, in accordance with recent Italian regulations (DM 14/1/2008).

The monitoring plan included not only the usual control of any deep displacements by means of geotechnical instruments, but also surface displacement monitoring by means of satellite data. There were no natural reflectors on the slopes; consequently, a network of PS 'artificial reflectors' was installed.

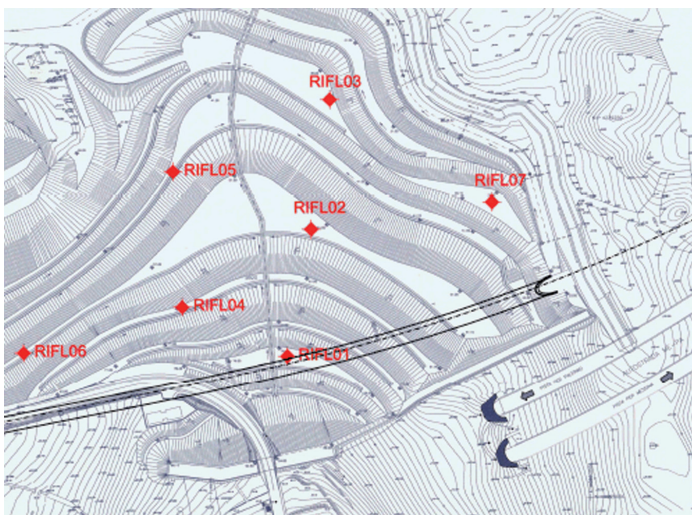


Fig. 24 - Rete dei riflettori artificiali installata sul versante di Tracoccia. *Network of artificial reflectors installed on the slope of Tracoccia.*

## 6. Conclusioni

La tecnica di telerilevamento satellitare PSInSAR™ (brevettata dal Politecnico di Milano) costituisce ad oggi uno strumento nuovo e molto efficace per il monitoraggio ad alta precisione dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre. Questa particolare tecnica di elaborazione delle immagini radar satellitari, superando i limiti propri dell'interferometria tradizionale, ha permesso infatti di raggiungere una precisione millimetrica nella stima delle misure di spostamento sul terreno, mantenendo intatti tutti i punti di forza del telerilevamento.

La capacità di coprire da remoto vaste aree della superficie terrestre senza la necessità dell'installazione di strumentazione a terra, la disponibilità sull'intero territorio nazionale di archivi storici di immagini satellitari sin dal 1992, unitamente a tempi di elaborazione dei dati relativamente brevi, fanno delle indagini PSInSAR™ uno strumento con grandi potenzialità di applicazione nel settore dell'ingegneria civile.

Italferr, grazie ad un Accordo Quadro recentemente attivato con la società TRE che possiede la licenza in esclusiva del brevetto, ha già dato il via ad una serie di applicazioni della tecnica in ambito ferroviario. I casi di studio descritti in questo articolo (relativi in particolare ad opere in sotterraneo), dimostrano come questo strumento possa costituire un utile supporto in tutte le fasi di vita di una infrastruttura.

*In fase di progettazione*, la tecnica PSInSAR™ rappresenta sicuramente uno strumento integrativo di indagine che può fornire un utile contributo all'analisi del territorio. In effetti, anche per opere a grande sviluppo lineare come una linea ferroviaria, è possibile in tempi brevi eseguire analisi dei dati storici, che consentano di evidenziare eventuali aree soggette a movimenti superficiali. Tali indicazioni, unitamente alle informazioni geologiche e geotecniche, concorrono all'individuazione di eventuali movimenti di versante, deformazioni gravitative profonde o altri fenomeni deformativi su grande scala, di primaria importanza nella scelta e nella definizione dei tracciati.

*In fase di realizzazione* delle opere, considerati i tempi di rivisitazione dei satelliti ad oggi in orbita, l'analisi PSInSAR™ non può ancora utilizzarsi come strumento di monitoraggio in tempo reale (in futuro, visti i continui investimenti della comunità nazionale e internazionale nel settore spazio, è lecito ipotizzare

The artificial reflectors were constructed and installed in such a way to be seen by the satellite in both ascending and descending acquisition geometry (Fig. 25). This reflector typology (patent pending) guarantees that the phase 'centre', visible from the satellite in both the acquisition geometries, is represented by the same physical point. An artificial reflector doesn't require any supply or maintenance activities and can be used, if considered necessary, even for long periods.

The activities of acquisition and processing of the satellite data are in progress and the first useful results will be available at the of 2010 end.

## 6. Conclusions

Satellite radar data today represent a new and efficient tool for high precision monitoring of surface deformation phenomena. PSInSAR™ (patented by the "Politecnico di Milano") is a sophisticated technique for processing satellite radar images, specifically designed to overcome the limitations of conventional DInSAR analysis, allowing millimetre precision to be reached in the estimation of differential displacements, while maintaining all the advantage of remote-sensing technologies.

Its capability of covering large areas of the Earth's surface remotely, without any need of installing *in situ* instruments, the availability of historic archives of satellite images dating back to 1992, and the possibility to process large amount of data in a limited amount of time makes the PSInSAR™ technique a very interesting tool for civil engineering projects.

Italferr has already exploited PSInSAR™ data for a number of railway applications. The case studies described in this paper (relevant in particular to underground works) show that this kind of data may reveal extremely useful in all life phases of an infrastructure.

When designing an infrastructure, PSInSAR™ represents a complementary tool providing a useful contribution to any ground stability analysis. Linear infrastructure, such as railway lines, can benefit from PS data. Such information, along with geological and geotechnical data, can be extremely valuable to detect sliding areas, deep gravitational deformations or other large scale deformation phenomena which are of utmost importance in track routing.

PSInSAR™ data cannot



Fig. 25 - Vista di un riflettore artificiale installato sul versante di Tracoccia. View of an artificial reflector installed on the slope of Tracoccia.

che si arriverà ad avere sistemi che garantiranno acquisizioni giornaliere), ma la sua utilità è comunque indubbia se impiegata ad integrazione dei sistemi di monitoraggio tradizionali previsti a presidio dei lavori.

I casi di studio presentati, relativi alla galleria naturale del Nodo AV di Bologna (par 5.2.2) e alla galleria Cassia-Monte Mario a Roma (par 5.2.1), hanno dimostrato infatti come l'analisi PSInSAR™ offra la possibilità di acquisire preziosi elementi di monitoraggio di una zona di cantiere, inquadrandola nell'ambito di un'area ben più estesa di quella tipicamente coperta dal monitoraggio di progetto, e in un arco temporale ben più ampio; in particolare, grazie all'elaborazione dei dati storici, è possibile verificare anche il comportamento deformativo dell'area *ante operam*.

Il caso della galleria naturale del nodo AV di Bologna, ha peraltro offerto l'opportunità di un utilissimo confronto tra i dati del monitoraggio satellitare e quelli ottenuti con tecniche tradizionali. Il buon esito di tale confronto ha confermato l'affidabilità e la precisione della tecnica di elaborazione dei dati satellitari anche in casi caratterizzati da spostamenti con incrementi rapidi e forti variazioni di velocità nel tempo.

Infine, *in fase di esercizio*, per le verifiche del comportamento deformativo dell'opera al termine dei lavori ed il controllo a lungo termine, la tecnica PSInSAR™ può essere impiegata come vero e proprio strumento di monitoraggio integrativo, da utilizzare comunque in parallelo a tecniche di monitoraggio tradizionali (cfr. il caso della galleria Scianina-Tracocchia a Messina par 5.3.1).

be used as a real-time monitoring tool for construction work due to the revisiting time of the satellites currently being used. However, considering the growing investments of the national and international community in new satellite radar sensors, it is reasonable to assume that in the near future there will be systems offering daily acquisitions. In any case, it is already an extremely useful tool which can complement conventional monitoring data.

The case studies illustrated in this paper, regarding the tunnel of the HS/HC Railway Bologna Node and to the Cassia - Monte Mario Tunnel in Rome, demonstrate how satellite radar data can provide useful displacement data covering an area much larger than the typical area of interest monitored by means of conventional monitoring techniques, and offer the possibility to get *ante operam* information, taking advantage of data archives.

The HS/HC Railway Bologna Node case study was an opportunity to carry out an interesting comparison between satellite radar data and other measurements collected from conventional techniques. The results confirmed the accuracy and reliability of satellite data even in cases characterised by displacements with fast variations, abrupt changes and significant variations in velocity values.

PSInSAR™ can be applied as a monitoring tool during the construction phase, with the ultimate aim of verifying deformation phenomena caused by site works, and to carry out a long-term control. The technique, however, should be used with other traditional monitoring techniques allowing a real time monitoring of the construction works.

## BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] A. FERRETTI, F. NOVALI, R. BÜRGMANN, G. HILLEY and C. PRATI, "InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area", EOS, Vol. 85, N. 34.
- [2] C. COLESANTI, A. FERRETTI, F. NOVALI, C. PRATI, F. ROCCA, "SAR Monitoring of Progressive and Seasonal Ground Deformation Using the Permanent Scatterers Technique", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, no. 7, 1685-1701, 2003.
- [3] C. COLESANTI, A. FERRETTI, C. PRATI, F. ROCCA, "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique", Engineering Geology, Vol. 68, Issue 1-2, pp. 3-14, 2003.
- [4] G.E. HILLEY, R. BÜRGMANN, A. FERRETTI, F. NOVALI and F. ROCCA, "Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis", Science, 25 June 2004, Volume 304, Number 5679, pp. 1952-1955.
- [5] C. COLESANTI, M. LE MOUËLIC, M. BENNANI, D. RAUCOULES, C. CARNEC, A. FERRETTI, "Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers Technique - a case study in the east of France", International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 1, 10 January 2005, pp. 201-207.
- [6] Don W. VASCO, A. FERRETTI, "On the use of quasi-static deformation to understand reservoir fluid flow", Geophysics, Vol. 70, N. 4, July-August 2005, pp. 13-27.
- [7] R. BURGEMANN, G. HILLEY, A. FERRETTI, F. NOVALI, "Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis", Geology, March 2006, Volume 34, Numero 3, pp. 221-224.
- [8] T.H. DIXON, F. AMELUNG, A. FERRETTI, F. NOVALI, F. ROCCA, R. DOKKAS, G. SELLA, S.W. KIM, S. WDOVINSKI, D. WHITMAN, "Subsidence and flooding in New Orleans", Nature, Vol 441, June 2006, pp. 587-588.



## OSSERVATORIO

- [9] J.W. BELL, F. AMELUNG, A. FERRETTI, M. BIANCHI, F. NOVALI, "Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge", Water Resources Research, Vol. 44, February 2008; pp. 1-18.
- [10] A. FERRETTI, A. TAMBURINI, B. BIANCHI, M. BROCCOLATO, D.C.G. MARTELLI (2008), "Exploitation of historical satellite SAR archives for mapping and monitoring landslides at regional and local scale", Proc. 1st World Landslide Forum, Tokyo, Nov 2008.
- [11] C. COLESANTI, A. FERRETTI, R. LOCATELLI, F. NOVALI, G. SAVIO, "Permanent Scatterers: Precision Assessment and Multi-platform Analysis", IGARSS 2003, 21-25 July 2003, Toulouse, France. pp 1-3.
- [12] F. BONSIGNORE, "Il monitoraggio della subsidenza a scala regionale in Emilia Romagna", Atti del Convegno ARPA Bologna 3 dicembre 2007
- [13] E. CARMINATI, G. MARTINELLI, "Subsidence rates in the Po Plain, Northern Italy: the relative impact of natural and anthropic causation", Engineering Geology. 66: 241-255 2002.



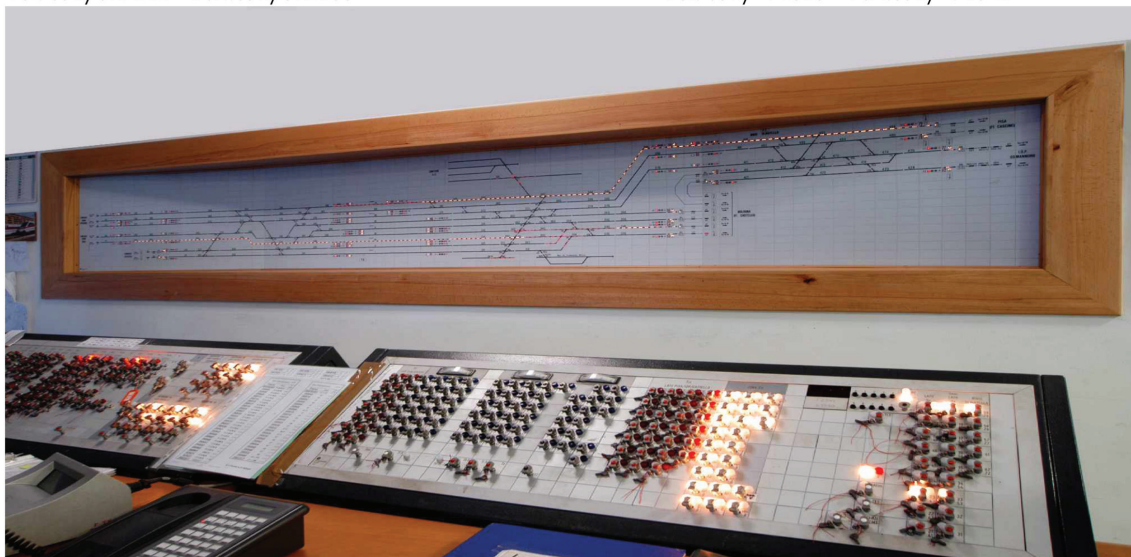
S.p.A.

### Sede Legale e Direzione Generale

Via del Tuscolano 15 - Bologna  
Tel. 051/329111 Fax.051/321106

### Divisione Ferroviaria (ex DLK Srl)

Via della Chimica 3 - Ozzano dell'Emilia (BO)  
Tel. 051/794820 Fax.051/794821



Realizzazione apparati di sicurezza, impianti di Blocco Automatico a correnti codificate e impianti di telecomunicazioni per Ferrovie e Metropolitane.  
Fornitura di componenti e dispositivi per la sicurezza ferroviaria.