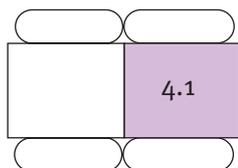




# T.R.E.: UNA SPIN-OFF UNIVERSITARIA PER L'ELABORAZIONE DI DATI RADAR SATELLITARI

Fabio Rocca  
Carlo Colesanti  
Alessandro Ferretti  
Raffaella Ratti



L'articolo ha l'obiettivo di documentare l'esperienza imprenditoriale di Tele-Rilevamento Europa, spin-off commerciale nata presso il Politecnico di Milano per offrire al pubblico prodotti e servizi sviluppati a partire da venti anni di ricerca all'avanguardia nel settore del telerilevamento radar. Dopo una sezione introduttiva sui sistemi radar e sull'interferometria, si illustrano i fondamenti scientifici della tecnica dei diffusori permanenti (Permanent Scatterers).

## 1. TELE-RILEVAMENTO EUROPA: DALLA RICERCA ALL'IMPRESA

L'esperienza imprenditoriale di Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. Srl, *spin-off* commerciale del Politecnico di Milano, nasce dall'idea di offrire al pubblico i prodotti di una tecnologia d'avanguardia, frutto di una lunga tradizione di ricerca ad alto livello nel settore del telerilevamento radar satellitare.

Il concetto di spin-off universitario, ovvero una società commerciale che nasce in seno a una realtà accademica per trasformare in *business* quanto conseguito con un serio lavoro di ricerca scientifica, è, purtroppo, estraneo alla tradizione italiana. Si tratta, invece, di una prassi consolidata nei paesi occidentali in generale e negli Stati Uniti in modo particolare. Anche senza varcare l'Oceano Atlantico, vale la pena di osservare che nella vicina Svizzera sono numerose le realtà commerciali sorte presso le maggiori istituzioni universitarie per valorizzare i risultati più promettenti della ricerca scientifica.

In questo senso Tele-Rilevamento Europa costituisce realmente una novità nel panorama italiano: si tratta del primo spin-off commerciale del Politecnico di Milano, e probabilmente, è una *première* a livello nazionale. Ad ogni modo, la realtà italiana sembra essere finalmente matura per questo genere di tentativi imprenditoriali, tanto che al Politecnico di Milano, come del resto presso diverse altre prestigiose sedi universitarie, stanno già nascendo diverse nuove spin-off.

L'aspetto più interessante e appassionante di una tale esperienza è l'occasione di seguire la nascita di un prodotto e/o di un servizio attraverso tutte le fasi della sua gestazione. Da un'idea innovativa, all'intensa attività di ricerca volta a dimostrarne l'applicabilità e a descriverne formalmente e rigorosamente potenzialità e limiti, a nuove idee che dischiudono (o, talvolta, chiudono) orizzonti più vasti. Si tratta del lavoro affascinante di chi ha l'opportunità di dedicarsi alla ricerca scientifica, ma è solo la prima tappa, anche se la più congeniale, per chi è solito lavorare in un contesto universitario.

Si rende, quindi, necessario identificare il mercato potenziale per il nuovo risultato scientifico che, proprio in quanto nuovo, è praticamente sconosciuto al pubblico. Si tratta, quasi simultaneamente di *marketing* e di definizione e implementazione di prodotti e servizi in base alla risposta dei gruppi di clienti potenziali che via via si individuano e che prendono forma nelle rispettive peculiari esigenze, attese e necessità.

È un lavoro impegnativo e appassionante, nel corso del quale, come in sede di ricerca scientifica, non mancano imprevisti e le risposte più importanti o significative non corrispondono necessariamente alle aspettative iniziali.

Ci si propone di illustrare nel seguito le tappe più significative di nascita e crescita di Tele-Rilevamento Europa. Si ritiene però opportuno, innanzitutto, mettere a fuoco il contesto scientifico in cui è sorta la società.

## 2. INTRODUZIONE AI SISTEMI SAR

Si forniscono ora alcuni brevi cenni introduttivi ai sistemi radar e in particolare, ai sistemi radar ad apertura sintetica (*Synthetic Aperture Radar*, SAR).

### 2.1. Cenni storici

Radar è acronimo di *radio detecting and ranging* [1]. Esattamente un anno fa è stato festeggiato il centenario dell'ultimo di una straordinaria sequenza di esperimenti di Marconi: la prima trasmissione radio tra le sponde opposte dell'Atlantico, avvenne infatti il 12 dicembre 1901 [11 - 13]. Furono proprio i risultati di Marconi a suggerire di utilizzare le onde radio per localizzare oggetti.

In genere, l'invenzione del radar è ascritta all'inglese Watson-Watt, 1935. In realtà, già nel 1904 il tedesco Hülsmeyer aveva messo a punto il "telemobiloscopio", apparecchio con cui era in grado di localizzare navi nella nebbia fino ad una distanza di un paio di chilometri [11]. Come spesso accade a chi precorre troppo i tempi, nessuno intuì le potenzialità dell'oggetto, che venne ben presto dimenticato.

Negli anni 1936-1939, mentre gli Stukas (velivoli da bombardamento in picchiata) tede-

schì martellavano le città spagnole durante la guerra civile, l'importanza di un sistema in grado di localizzare aerei nemici in avvicinamento divenne assolutamente evidente.

Nel corso di pochissimo tempo fu messa a punto "Chain Home", la prima rete radar di avvistamento destinata a sorvegliare la costa meridionale della Gran Bretagna. È superfluo ricordare il ruolo chiave giocato da queste stazioni radar durante la Battaglia d'Inghilterra nel 1940 e nel corso dell'intero conflitto [9].

Alla fine degli anni '50, negli Stati Uniti maturò l'idea di sistemi ad apertura sintetica che prevedevano l'impiego di un radar coerente montato su piattaforma mobile (all'inizio aerei, ora anche satelliti), in grado di illuminare l'area oggetto di interesse dalle diverse posizioni successivamente occupate dalla piattaforma lungo una ben precisa traiettoria.

Come sarà illustrato più avanti, ciò si traduce nella facoltà di generare immagini a elevata risoluzione spaziale pur utilizzando antenne di dimensioni contenute.

I primi sistemi SAR montati su aerei furono inizialmente utilizzati per scopi di ricognizione militare.

Ben presto si cominciarono a generare immagini radar del territorio [7].

Nel 1978 fu lanciato Seasat, il primo satellite per uso civile equipaggiato con un radar SAR, destinato allo studio degli oceani. Nonostante la breve durata della missione, compromessa dopo soli cento giorni da un cortocircuito, i dati ottenuti rivelarono potenzialità straordinarie.

Negli anni 1981, 1984 e 1994 si sono susseguite missioni SAR basate sull'impiego dello Space Shuttle (*Shuttle Imaging Radar*, SIR-A, SIR-B, SIR-C).

Nel luglio 1991 l'Agenzia Spaziale Europea (*European Space Agency*, ESA) lancia il satellite ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*) equipaggiato con sensore SAR. Nel 1995 gli viene affiancato ERS-2.

Nel contempo anche giapponesi (JERS, 1992) e canadesi (Radarsat, 1995) avviano missioni SAR.

Nel 2000, una nuova missione Shuttle (*Shuttle Radar Topography Mission*) viene dedicata all'acquisizione di dati SAR per la

ricostruzione della topografia delle terre comprese tra i paralleli 60°N e 56°S [8]. Diverse nuove missioni sono già state pianificate: tra le altre, si desidera menzionare ENVISAT (Agenzia Spaziale Europea, ESA) e Radarsat-2 (Agenzia Spaziale Canadese).

## 2.2. Sistemi radar ad apertura sintetica

Il principio di funzionamento di un sistema radar è abbastanza semplice: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione.

Il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione consente di valutare la distanza (*ranging*) a cui si trovano i singoli bersagli radar, cioè di localizzare gli oggetti lungo la direzione detta di *range*.

La **direttività dell'antenna** utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*).

Quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Chiaramente ciò avviene a scapito dell'estensione dell'area illuminata.

Per ovviare questo inconveniente, le antenne molto direttive usate per i radar militari e per applicazioni di aviazione civile ruotano in modo da "spazzare" tutta l'area circostante alla loro posizione.

L'idea alla base del SAR consente di aggirare la stessa limitazione (compromesso riso-

luzione-estensione dell'area osservata). Combinando coerentemente (cioè tenendo conto di modulo e fase del segnale SAR, concetti il cui significato fisico si introdurrà in seguito) i dati acquisiti dal sensore nelle posizioni successivamente occupate, si sintetizza un'antenna fittizia di grandi dimensioni detta, appunto, apertura sintetica. È proprio questo procedimento a garantire un'elevata risoluzione anche nella direzione di azimuth [10].

Si farà ora riferimento ai sensori SAR montati sui satelliti ERS-1 ed ERS-2 dell'Agenzia Spaziale Europea (Figura 1). ERS-1 ha acquisito dati dalla fine del 1991 a marzo 2000. ERS-2 è operativo dall'inizio del 1995. I satelliti ERS seguono orbite lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando una striscia di terreno larga approssimativamente 100 km (*swath*). La direzione parallela all'orbita, detta azimuth, coincide all'incirca con la direzione nord-sud. La risoluzione in azimuth è di circa 5 m. La direzione della congiungente satellite-bersaglio radar, perpendicolare all'orbita, è detta *range* oppure *line of sight (LOS)*. La risoluzione in range vale circa 9 m. Le immagini radar si sviluppano lungo le direzioni di range e azimuth, dette usualmente coordinate SAR.

I satelliti ripercorrono la stessa orbita nominale ogni 35 giorni (*revisiting time*) illuminando attivamente la medesima area a terra con un segnale alla frequenza di 5.3 GHz (lunghezza d'onda  $\lambda = 5.66$  cm). A differenza dei sistemi ottici, i sensori ERS-1/2 sono in grado di acquisire dati con qualsiasi condizione meteorologica e di notte.

Le immagini radar ottenute con **sistemi coerenti** si compongono di modulo (o ampiezza) e fase. Il modulo individua la quota di campo elettromagnetico incidente che ogni singolo bersaglio illuminato riflette verso il sensore. La fase racchiude, invece, l'informazione relativa alla distanza tra sensore e bersaglio. L'analisi interferometrica consiste nello studio dell'evoluzione della fase tra due distinte acquisizioni. L'interferogramma riassume in sé i diversi aspetti responsabili di variazioni di fase. I più importanti sono la topografia, eventuali fenomeni di movimento della superficie terrestre e la variazione delle condizioni atmosferiche.

Si usa l'espressione **direttività dell'antenna** per descrivere il funzionamento delle antenne. Si usano diversi parametri, il più importante è detto *funzione di direttività* ed individua quale porzione di spazio e con quale intensità di campo l'antenna è in grado di illuminare.

**Sistemi coerenti.** Un sistema si dice coerente se è in grado di acquisire dati di ampiezza e fase. La coerenza è ipotesi chiave per poter sfruttare il principio dell'apertura sintetica.

Tutti i sistemi radar sono pensati per stimare la distanza sensore - bersaglio con un'accuratezza, in genere, dell'ordine del metro.

L'impiego dell'informazione di fase (e quindi la coerenza) è indispensabile per stimare variazioni molto contenute (millimetriche) della distanza sensore - bersaglio da un'immagine radar alla successiva.



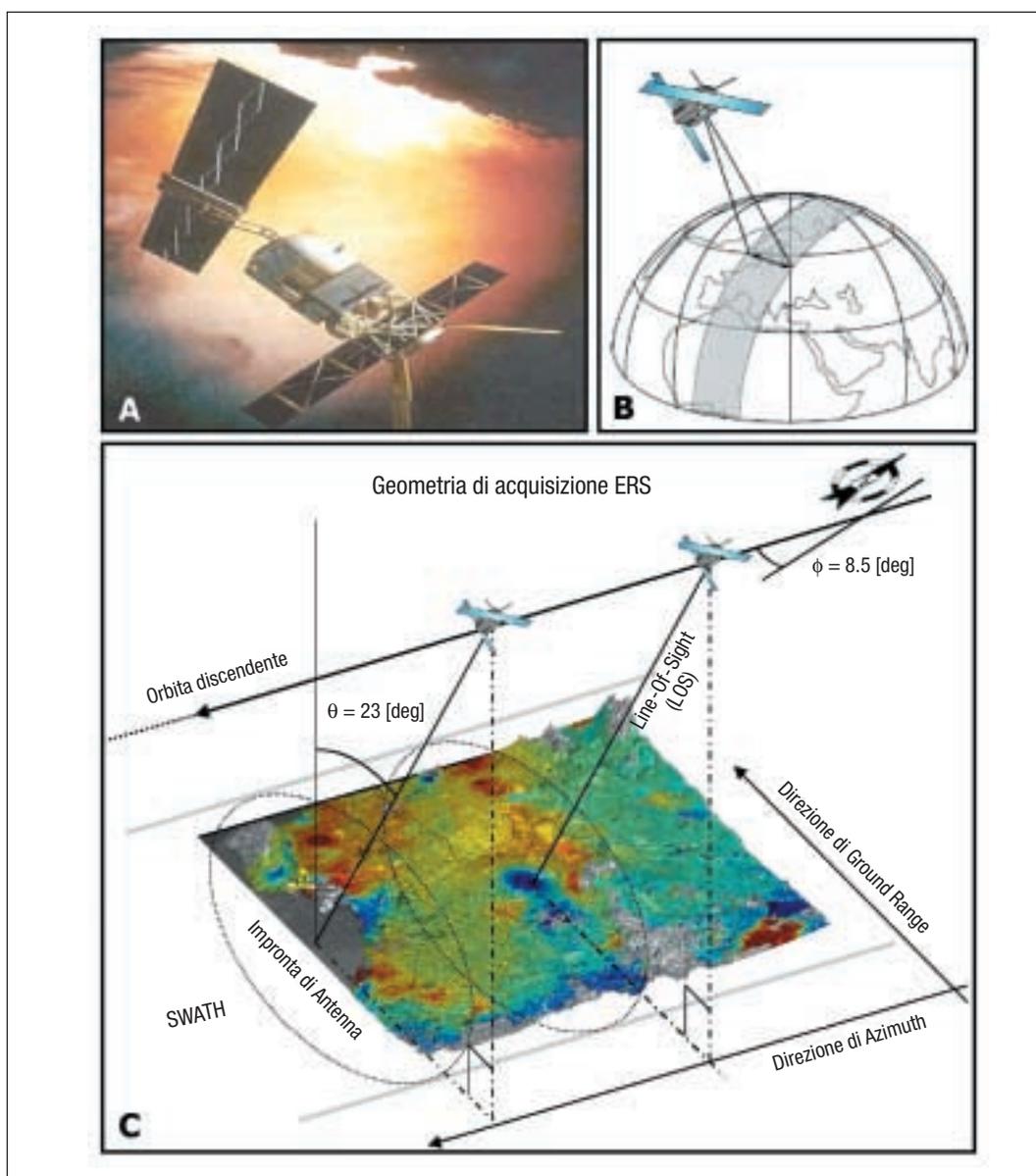
I principali obiettivi dell'interferometria SAR sono le ricostruzioni di modelli altimetrici numerici e di mappe di deformazione della superficie terrestre.

Per conseguire ogni singolo obiettivo si rende necessaria l'analisi del corrispondente contributo di fase. Gli altri termini, in particolare modo la distorsione di fase introdotta dalle condizioni atmosferiche, agiscono come fattori di disturbo.

La lettura degli interferogrammi è notevolmente complicata da fenomeni di decorrelazione che sono legati a variazioni della riflettività della superficie illuminata, che si traducono in un ulteriore contributo di fase casua-

le che rende inaccessibili i termini che individuano topografia e movimento. La riflettività locale (e in particolare, la sua fase) può infatti variare nel tempo, ad esempio con il susseguirsi delle stagioni in un'area vegetata, introducendo decorrelazione temporale. In genere, solo in aree ad elevata urbanizzazioni si riesce ad estrarre informazione da interferogrammi che coinvolgono immagini acquisite a distanza di anni.

La riflettività varia in modo ancor più significativo in funzione della geometria di acquisizione (un effetto del cambio di prospettiva). Le orbite reali del satellite si discostano dall'orbita nominale introducendo decorrelazio-



**FIGURA 1**

A Il satellite ERS.  
B e C Geometria di acquisizione ERS

ne geometrica. È sufficiente una distanza di poche centinaia di metri tra le orbite relative a una coppia interferometrica a renderne completamente illeggibile la fase.

I limiti dell'interferometria SAR classica sono proprio legati ai fenomeni di decorrelazione e al contributo atmosferico di fase che sovente genera effetti difficili da distinguere da fenomeni di movimento del terreno e/o da profili altimetrici.

### 2.3. La tecnica dei diffusori permanenti

Entrambe le difficoltà sono state risolte tramite la tecnica dei diffusori permanenti (*Permanent Scatterers, PS*), messa a punto al Politecnico di Milano [3, 4].

L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti, è praticamente immune agli effetti di decorrelazione. I PS preservano l'informazione di fase nel tempo e al variare della geometria di acquisizione. Possono, inoltre, essere utilizzati per ricostruire e compensare efficacemente il disturbo atmosferico sull'intera immagine radar, sfruttando il fatto che le condizioni atmosferiche variano lentamente nello spazio. Chiaramente è necessario che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km<sup>2</sup>), vincolo sempre verificato in aree urbane. In corrispondenza dei PS è, inoltre, possibile separare con estrema accuratezza il termine di fase dovuto alla topografia da quello dovuto al movimento del suolo. Per far ciò è necessario avvalersi di *data set* consistenti in almeno 25-30 immagini ERS. In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale di PS raggiunge valori molto alti: 100 – 400 PS/km<sup>2</sup>.

In corrispondenza di ogni singolo PS si ricava il trend medio di deformazione con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno. L'accuratezza è in funzione del numero di immagini e della "qualità" del PS stesso, cioè di quanto l'informazione di fase disponibile presso il PS è immune a fenomeni di disturbo.

È, inoltre, possibile ricostruire l'intera serie temporale di deformazione del PS; l'accuratezza arriva (nei punti migliori) a 1 mm su ogni singola misura.

Un ulteriore aspetto vantaggioso è costituito dalla ricchezza di dati disponibili nell'archivio ERS dell'ESA. È possibile avviare un'analisi PS oggi, avendo a disposizione dati acquisiti a partire dal 1992 e potendo, quindi, ricostruire la storia passata dell'area di interesse.

I limiti consistono nella facoltà di apprezzare solo la deformazione lungo la direzione di LOS, cioè approssimativamente lungo la verticale, e nel fatto che per portare a termine con successo l'analisi PS è necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quanto meno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte). Da ultimo, l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (maggiore di 80 mm/anno) è possibile solo disponendo di informazioni a priori sui fenomeni in atto.

Risultati significativi ottenuti con la tecnica PS sono stati validati facendo uso di dati di livellazione ottica, di misure effettuate presso stazioni GPS (*Global Positioning System*) e attraverso lo studio di fenomeni di dilatazione termica di strutture.

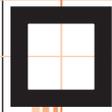
In definitiva, i PS costituiscono una sorta di "rete geodetica naturale" che consente l'analisi di fenomeni di deformazione superficiale. Si tratta di uno strumento di monitoraggio senza eguali per accuratezza, densità spaziale di punti di misura e competitività economica, in particolare nello studio di fenomeni di subsidenza urbana e di deformazione lungo faglie sismiche in aree di estensione di centinaia o migliaia di chilometri quadrati.

## 3. DALLA RICERCA AL MERCATO

Risulta interessante a questo punto ripercorrere i passi fondamentali di nascita e crescita di Tele-Rilevamento Europa, mettendo a fuoco, in particolare, il mercato cui sono rivolti prodotti e servizi PS.

### 3.1. Risultati scientifici e nascita di T.R.E.

Come già accennato, T.R.E. nasce dal lavoro di ricerca nell'ambito del telerilevamento radar condotto presso il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano dove, da circa venti anni, è attivo un gruppo di ricer-



ca guidato dai professori F. Rocca e C. Prati. Il *team* si occupa di elaborazione numerica dei dati acquisiti da sistemi SAR e può vantare un ampio riconoscimento a livello internazionale, documentato da numerosi articoli su riviste scientifiche, da brevetti nazionali e internazionali, e dalla partecipazione a numerosi progetti promossi, in particolare, dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA), dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dall'Unione Europea. I primissimi tentativi nella direzione di un'analisi PS risalgono agli anni 1996-1997, quando ormai l'interferometria SAR convenzionale cominciava a essere considerata una disciplina matura e diversi scienziati erano quasi convinti che non molto fosse ancora da sviluppare.

Negli anni successivi, si sono precisate le linee fondamentali dell'approccio PS e tra il 1998 e il 1999 sono stati conseguiti i primi notevoli risultati nell'area della Grande Frana di Ancona e sulle pendici dell'Etna (studio dei fenomeni di compattazione lavica nella Valle del Bove).

Nel 1999, la tecnica è stata brevettata a livello nazionale dal Politecnico di Milano ed è cominciata la pratica per il brevetto internazionale.

L'analisi delle potenzialità della tecnica, parallelamente all'accumularsi di una crescente messe di risultati, hanno portato, nel marzo 2000, alla nascita di Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. Srl che è divenuta effettivamente operativa verso la fine dell'anno e a cui è stato affidato in esclusiva lo sfruttamento del brevetto.

T.R.E. è stata accolta per circa un anno e mezzo presso l'Acceleratore di Impresa del Politecnico di Milano [2], che ha messo a disposizione spazi e risorse per agevolare la crescita della società.

### 3.2. Il mercato e i prodotti di T.R.E.<sup>1</sup>

Già da tempo esiste - e si va sempre più consolidando - un mercato legato al monitoraggio della deformazione della superficie terrestre (subsidenza, movimento lungo faglie

sismiche, frane e instabilità di versanti ecc.). Si pensi, per esempio, ai fenomeni di subsidenza (sprofondamento del suolo) che possono essere indotti dal prelievo di acqua della falda freatica (80% dei casi [6]), dall'estrazione di petrolio o gas naturale, oppure da fenomeni naturali di compattamento di sedimenti, in particolare lungo il corso di fiumi.

Nei soli Stati Uniti, l'area affetta da subsidenza supera i 45.000 km<sup>2</sup> [6] e produce costi che è difficile quantificare, ma che stime prudenti suggeriscono superare i 500 milioni di dollari l'anno [5].

In Europa, la situazione è ancora più drammatica a causa di un maggiore livello di urbanizzazione.

Un discorso analogo vale per i fenomeni franosi e di instabilità dei versanti.

Si tratta di tematiche strettamente connesse alla sicurezza del cittadino (Protezione Civile) a cui l'opinione pubblica è sempre più sensibile e verso cui viene convogliata una mole crescente di risorse pubbliche e private.

È ormai ampiamente riconosciuto il ruolo chiave del monitoraggio ambientale nella definizione di scenari di rischio realistici, indispensabili per la pianificazione di efficaci interventi a tutela della sicurezza.

Un ruolo analogo comincia, finalmente, ad essere ascrivito al monitoraggio preventivo anche per quanto concerne lo studio preliminare e la pianificazione di interventi infrastrutturali di grande rilievo (tratte ferroviarie e autostradali, tunnel, viadotti, linee metropolitane ecc.).

In particolare, il monitoraggio dei fenomeni di deformazione superficiali è generalmente di competenza della Pubblica Amministrazione, sia a livello locale, sia a livello nazionale (Legge 225 del 24 febbraio 1992, in relazione a fenomeni franosi). È quindi nella pubblica amministrazione che si è riconosciuto, almeno in una prima analisi, l'utente per eccellenza di prodotti e servizi PS.

Anche le compagnie petrolifere sono tenute, in diversa misura, al monitoraggio del suolo nelle zone di estrazione e costituiscono, di conseguenza, potenziali clienti. Prodotti e servizi PS possono, peraltro, rivelarsi preziosi anche per progettare nuove perforazioni

<sup>1</sup> L'analisi di mercato per prodotti e servizi PS è stata svolta con la fattiva collaborazione del Consorzio Politecnico Innovazione.

(dall'eventuale *pattern* di subsidenza indotto si può inserire dati su forma, profondità ed estensione del giacimento sottostante).

Più in generale, è nella grande industria che si individua un secondo sbocco per l'offerta PS. Si pensi, a titolo di esempio, al settore energia con dighe, oleodotti e gasdotti, eventualmente in aree a rischio, oppure ad impianti chimici la cui sicurezza è indispensabile garantire sotto ogni punto di vista.

Un terzo significativo segmento potenziale di mercato è legato alle Compagnie di Assicurazione, sia per quanto concerne il risarcimento di danni a beni immobili assicurati (per esempio, danni provocati dal cantiere relativo a un'opera pubblica come lo scavo per una linea di metropolitana), sia in sede di stipulazione di contratti e determinazione dei premi (richiede cautela assicurare, per esempio, una struttura che insiste su un terreno soggetto a deformazione che si traduce in una serie di rischi e costi aggiuntivi).

Peraltro, l'attività della legislazione italiana sembra possa dare un notevole impulso al mercato del monitoraggio di fenomeni di deformazione del suolo legati a problematiche assicurative (Legge 109, 11 febbraio 1994, articolo 30, in materia di obbligo di assicurazione di cantieri per opere pubbliche e Disegno di Legge 3326, articolo 8, in materia di introduzione nei contratti di assicurazione di beni immobili contro incendio, di clausole per la copertura del rischio sismico o derivate da altre calamità naturali).

Un quarto segmento di mercato è, infine, costituito da privati interessati a dati di deformazione relativi a singoli edifici o piccole aree (si citano, per esempio, le amministrazioni condominiali e le richieste di perizie di parte da usarsi in sede di vertenze giuridiche).

Vale la pena di osservare che il dibattito sulla possibile introduzione del Fascicolo del Fabbricato (una sorta di "cartella clinica" che ha lo scopo di certificare stabilità e "stato di salute" di ogni singolo edificio) è tuttora aperto e potrebbe tradursi in un letterale *boom* di questo ultimo segmento di mercato.

I dati di deformazione non sono, né si propongono, come sostitutivi di una perizia strutturale *in situ*, ma forniscono, senza dubbio, informazioni estremamente preziose per

chi si trova a dover garantire o meno la stabilità strutturale di un edificio.

L'analisi del mercato e, in particolare, una serie di incontri con potenziali clienti hanno permesso di mettere in luce che a partire da pochi essenziali *output* della catena di *processing* PS è possibile e agevole una vera e propria formattazione dei prodotti finali in ragione delle esigenze del cliente stesso ("customizzazione"). C'è, in definitiva, una forte domanda di dati di deformazione, coniugata con il desiderio che tali dati siano integrati nel sistema cartografico già in uso presso chi commissiona l'analisi.

Il prodotto PS è, quindi, generato a partire da una messe di dati puntuali di deformazione relativi al passato (trend medio di deformazione e serie temporale completa) che viene rappresentata in base alle esigenze del cliente, ad esempio, su cartografia tecnica regionale (CTR), su immagini ottiche ad elevata risoluzione (aerofotogrammetriche o satellitari), oppure, ed è questa la soluzione più efficace, in ambiente *GIS* (*Geographic Information System*), cioè nel contesto più ampio di un *database* che permette la consultazione interattiva di dati geografici, eventualmente anche di natura molto eterogenea.

La disponibilità di un archivio storico che raccoglie tutti i dati ERS a partire dal 1992 si è rivelata un elemento vincente che sovente garantisce una posizione di *leadership*: là dove non sono state condotte campagne di misura con altre tecniche, l'analisi PS (e l'interferometria più in generale) è l'unico strumento disponibile per misurare fenomeni di deformazione in atto, ottenendo dati estremamente preziosi al fine di quantificare il rischio attuale.

Vale la pena di osservare che non esistono veri e propri prodotti concorrenti. Le tecniche tradizionali di monitoraggio di deformazione (*in primis*, livellazione ottica e GPS) presentano caratteristiche diverse e, almeno in parte, complementari all'approccio PS. Peraltro, appare difficile trovare tecniche che, come i PS, permettono di studiare il movimento del terreno anche nel decennio passato!

Sono, quindi, auspicabili e prevedibili politiche di sinergia che possono realmente di-

schiodere nuovi orizzonti allo studio di movimenti della superficie terrestre.

La tecnica PS fornisce risultati unici, per accuratezza e densità spaziale, dei punti di misurazione ed è estremamente competitiva dal punto di vista economico, purché sia applicata su aree sufficientemente estese (da qualche decina di km<sup>2</sup> fino a scala regionale o addirittura nazionale).

È, infatti, necessario abbattere il costo dei dati grezzi che, in genere, ammonta a qualche decina di migliaia di Euro. I dati ERS vengono commercializzati sotto forma di "scene" da 100 × 100 km<sup>2</sup>. Per applicazioni commerciali il costo di una scena è nell'ordine di qualche centinaio di Euro, nel caso di acquisto del numero elevato di scene tipicamente necessario a intraprendere un'analisi PS (in genere, da 40-50 fino a 150-200 qualora si desiderino combinare i risultati relativi a più geometrie di acquisizione).

Vale la pena di osservare che tali costi si riferiscono all'acquisizione dell'intero archivio storico (per esempio dal 1992) e vanno ripartiti sulle decine o centinaia di migliaia di punti di misura radar.

Si ottengono importi estremamente bassi rispetto a quelli che sarebbero necessari per rilevazioni GPS o di livellazione "a tappeto" (in effetti, condotti di rado), per i quali il costo di una singola misura presso un unico caposaldo è nell'ordine delle centinaia di Euro. Il servizio basato sulla tecnologia PS consiste nell'aggiornamento periodico dei dati di deformazione con i nuovi passaggi di ERS-2. A seconda delle esigenze del cliente, l'aggiornamento può essere effettuato ogni volta che si rende disponibile un nuovo dato (ogni 35 giorni) o con cadenza semestrale o annuale.

Problemi di assetto di ERS-2 durante l'anno 2001 hanno differito l'effettiva offerta del servizio di monitoraggio continuo. Si ha motivo di ritenere che tali difficoltà siano comunque in via di soluzione.

Vale, inoltre, la pena di osservare che ENVISAT (il cui lancio è previsto per il 1 marzo 2002) sarà presto in grado di garantire la continuità delle misure ERS. Sarà, inoltre, possibile ridurre da 35 a 3-4 quattro giorni il tempo di rivisitazione di uno stesso sito, aprendo, letteralmente, nuovi orizzonti all'approccio PS.

#### **4. UN CASO APPLICATIVO: ANALISI DI DEFORMAZIONE NELL'AREA URBANA DI MILANO**

Si ritiene interessante illustrare molto brevemente qualche risultato ottenuto nel corso di un'analisi di deformazione dell'area urbana di Milano commissionata dall'Agenzia Spaziale Europea.

L'analisi è stata svolta avvalendosi di 64 immagini radar acquisite dai sensori SAR ERS-1/2 tra maggio 1992 e dicembre 1999.

I principali obiettivi che ci si è prefissi all'inizio dello studio sono i seguenti:

- acquisizione di dati di deformazione su larga scala per la valutazione dell'eventuale impatto dell'innalzamento della falda freatica nell'area urbana milanese; fenomeno particolarmente accentuato verso sud-est (San Donato e San Giuliano) [12];

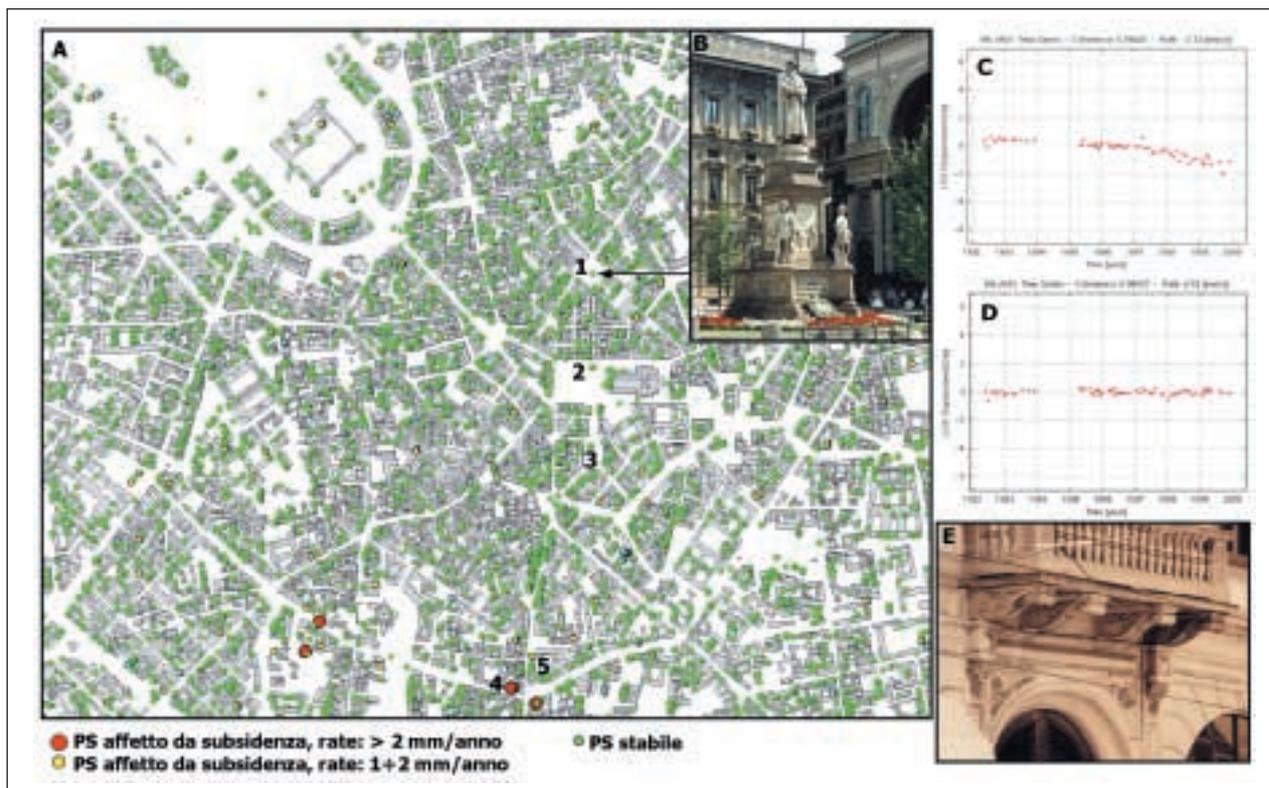
- acquisizione di dati puntuali di deformazione per identificare fenomeni che interessano singoli edifici o isolati;

- integrazione delle misure PS in ambiente GIS, per consentire all'utente di consultare e rappresentare i dati in base alle proprie esigenze. L'analisi ha consentito di individuare centinaia di migliaia di punti di misura affidabili (PS); la densità spaziale media è superiore 200 PS/km<sup>2</sup>. In corrispondenza di ogni PS si ricava il valore di altimetria con un'accuratezza inferiore al metro. Ciò consente di georeferenziare la posizione dei PS (passaggio da coordinate SAR a coordinate geografiche) con un'accuratezza sufficiente a proiettare correttamente i PS su corrispondenti strutture e edifici.

Per ogni PS si è ricavato il trend medio di deformazione nell'intervallo temporale 1992-1999, attribuendo, inoltre al PS un parametro di qualità (con valore compreso tra 0 e 1) che riassume l'accuratezza (tra 0.1 e 1 mm/anno) del trend determinato.

Per i punti di misura ritenuti più interessanti si è ricostruita l'intera serie temporale di deformazione con accuratezza compresa tra 1 e 3 mm su ogni singolo dato.

I parametri relativi ai PS (coordinate SAR, coordinate geografiche, altimetria, trend medio di deformazione, parametro di qualità ed, eventualmente, serie temporale completa) sono stati raccolti in un *database* (.dbf) accessibile in ambiente ArcView GIS. I dati pos-



**FIGURA 2**

*A Un tipico prodotto PS: il trend medio di deformazione in ambiente GIS. B Un Permanent Scatterer d'eccezione: il monumento a Leonardo da Vinci a Milano. C e D Serie temporali di deformazione. E Danni strutturali a un edificio a Milano*

sono essere agevolmente sovrapposti ad altri layer, in particolare al tessuto urbano e al grafo stradale, in modo da rendere estremamente pratica la consultazione dei risultati dell'indagine PS (Figura 2 A).

L'analisi PS consente di affermare che non sono in atto significativi fenomeni di deformazione del terreno su larga scala. Il forte innalzarsi della falda freatica nel corso degli ultimi anni non ha (per il momento) innescato fenomeni di deformazione superficiale, quantomeno su aree vaste.

Ciò è perfettamente in linea con quanto ci si aspetta: si tratta della ricarica della falda freatica a valle di un intenso prelievo idrico protratto per anni che ha causato subsidenza irreversibile (compattamento inelastico [6]).

In figura 2 A è raffigurato il centro storico della città con i PS la cui deformazione ben si lascia riassumere in un trend medio. Si è fatto uso di dati GIS relativi al territorio del Comune di Milano [14], i PS sono stati sovrapposti alla cartografia urbana con le ri-

spective velocità rappresentate tramite un codice colori.

Una quota significativa di edifici presenta caratteristiche di PS. Anche altre strutture, eventualmente molto particolari, possono costituire punti di misura radar affidabili: per esempio, il monumento a Leonardo da Vinci (1 in Figura 2 A) nel centro di Piazza alla Scala, oppure uno degli ingressi della metropolitana in piazza Duomo (2 in Figura 2 A), oppure, ancora, il monumento ai Carabinieri di Piazza Diaz (3 in Figura 2 A).

Nell'identificazione dei PS si è richiesta la coerenza di fase nell'intero intervallo 1992-1999. Per questo motivo non sono stati individuati PS in corrispondenza di edifici sottoposti a significativi lavori su facciata e tetto come il Teatro alla Scala. Analogamente, il Duomo mostra parecchi PS concentrati verso la facciata. L'abside e le navate laterali sono state, infatti, oggetto di protratti interventi di restauro nell'ultimo decennio. Gli interventi alla facciata, invece, sono stati

eseguiti negli anni '80, prima che cominciarono le acquisizioni ERS.

Chiaramente è possibile effettuare analisi locali per individuare PS tenendo conto di eventuali interventi di manutenzione che influenzano il comportamento dei bersagli radar.

Si osserva subito che buona parte dei punti affetti da movimento nel centro storico è ubicata lungo la cerchia dei Navigli, cioè lungo il corso del canale Naviglio, interrato ormai da diversi decenni.

Si riporta in figura 2 C la serie temporale di deformazione dell'edificio sull'angolo tra Corso Italia e Via Molino delle Armi (4 in Figura 2 A). Il trend medio di deformazione ammonta a -2.3 mm/anno. Vale però la pena di osservare che a partire dall'inizio del 1997 si assiste a un fenomeno di subsidenza ad evoluzione più rapida: si passa da -1.5 mm/anno a oltre -4 mm/anno.

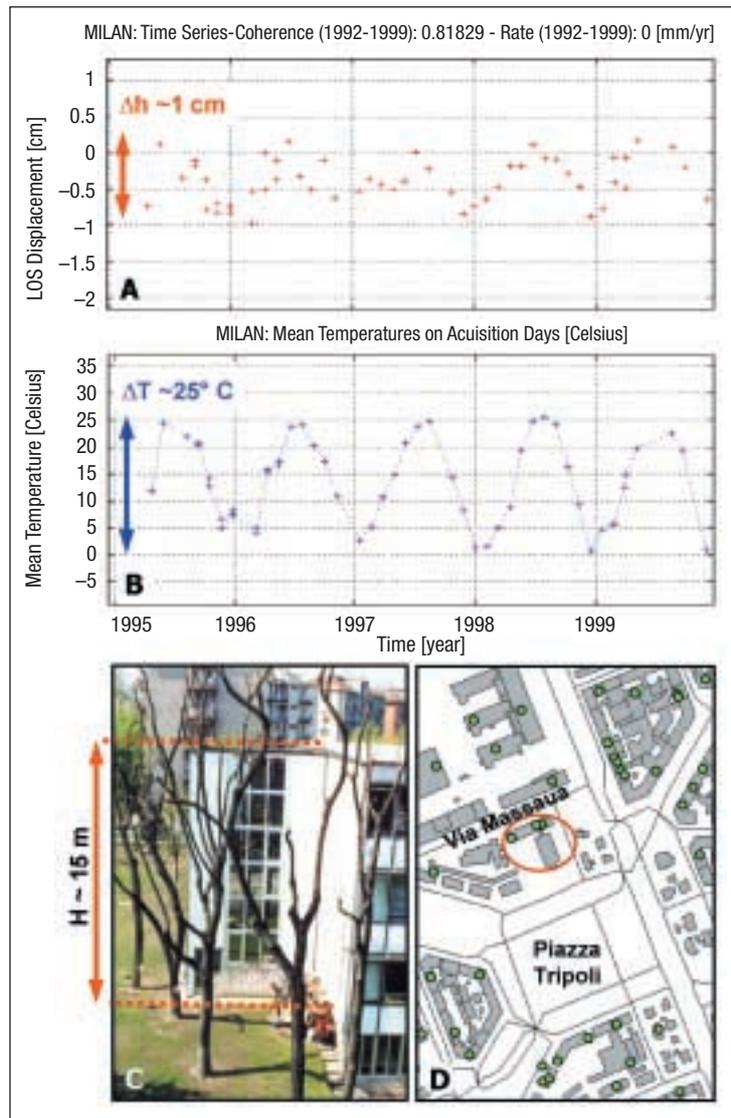
L'edificio mostra, inoltre, evidenti danni strutturali, lasciando presumere che probabilmente è stato soggetto a deformazione anche precedentemente l'inizio delle acquisizioni ERS (Figura 2 E).

Il palazzo immediatamente di fronte (5 in Figura 2 A) è invece perfettamente fermo, come si riconosce dalla corrispondente serie temporale rappresentata in figura 2 D.

L'accuratezza delle misure è tale da rendere apprezzabili i fenomeni di dilatazione termica stagionale di singole strutture. Si rappresenta, a titolo di esempio, la serie temporale di deformazione dell'edificio in cui ha sede la Scuola Elementare di Via Massaua, nei pressi di piazza Tripoli (Figura 3 A - 3 D). Si riporta anche il grafico delle temperature medie nei giorni in cui sono state effettuate le acquisizioni ERS (Figura 3 B). Si osserva immediatamente la forte correlazione tra i due dati.

Una semplice analisi probabilistica consente di escludere che si tratti di un effetto casuale, anche alla luce del fatto che sono decine gli edifici che presentano analoghi fenomeni di dilatazione termica. Nel caso riportato è stato addirittura possibile inferire dalle misure satellitari e dai dati di temperatura il materiale con cui è stata realizzata la parte di struttura cui corrisponde il PS in esame.

Dalle misure di deformazione si ricava l'entità del fenomeno di dilatazione; dai valori



**FIGURA 3**

*A Serie temporale di deformazione: evidente il "respiro" della struttura dovuto alla dilatazione termica stagionale. B Temperatura media nei giorni di acquisizione ERS. C Fotografia della struttura in alluminio. D Rappresentazione in ambiente GIS dei PS in prossimità della Scuola Elementare di Via Massaua.*

di quota accurati (disponibili presso i PS nell'intera area circostante) si stima l'altezza dell'edificio. Note le temperature, si è in grado di stimare il coefficiente di dilatazione termica del materiale, che, nella fattispecie è compatibile solo con l'ipotesi di una struttura in alluminio.

Un sopralluogo, effettuato a posteriori (Figura 3 C), ha confermato la correttezza delle deduzioni. Chiaramente si tratta solo di un risultato dimostrativo; è sufficiente che parti

della struttura siano verniciate di nero per far sì che ci sia una notevole differenza tra la temperatura dell'aria e quella della struttura stessa, in particolare nelle giornate estive.

### Ringraziamenti

Gli autori sono profondamente grati all'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che ha fornito i dati ERS e ha finanziato il progetto di analisi PS su Milano. Si ringrazia inoltre il Prof. C. Prati e tutto lo staff T.R.E., in particolare gli Ingegneri R. Locatelli, F. Novali, A. Menezz, M. Basilico, S. Cespa e D. Colombo. Infine, un grazie anche all'Arch. E. Fiorina per le fotografie.

### Bibliografia

- [1] AAVV: *Dizionario Enciclopedico Italiano*. Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Roma, 1955.
- [2] Acceleratore di Impresa del Politecnico di Milano – Sito Web: [http://www.cpi.polimi.it/it/acceleratore/pre\\_acceleratore.htm](http://www.cpi.polimi.it/it/acceleratore/pre_acceleratore.htm)
- [3] Ferretti A, Prati C, Rocca F: Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, n. 1, 2001, p. 8-20.
- [4] Ferretti A, Prati C, Rocca F: Non-linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, n. 5, 2000, p. 2202-2212.
- [5] Freeze RA: *Social Decision Making and Land Subsidence*. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Land Subsidence, 2000, Vol. 1, p. 353-384.
- [6] Galloway D, Jones DR, Ingebritsen SE (Ed.): *Land Subsidence in the United States*. U.S. Geological Survey, Circular 1182, 1999.
- [7] Hanssen RF: *Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.
- [8] Jet Propulsion Laboratory (JPL), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), - Sito Web: <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/statistics.html>
- [9] Liddel Hart BH: *Storia Militare della Seconda Guerra Mondiale*. Mondadori Verona, 1970.
- [10] Mensa DL: *High Resolution Radar Cross-Section Imaging*. Artech House, Norwood, 1991.
- [11] Nebeker F: The Electric Century.. *IEEE Spectrum*, n. 6, 2000, p. 68-74.
- [12] Raffaelli L, Raimondi P, Rosti G: *Finanziamento di interventi prevedibili per affrontare i problemi connessi al sollevamento della falda a Milano*. 1997. [http://www.provincia.milano.it/ambiente/progettispeciali/pub/cap\\_97\\_f.pdf](http://www.provincia.milano.it/ambiente/progettispeciali/pub/cap_97_f.pdf)

[13] Taylor LS: *A Thumbnail History of Electronics*. Electrical Engineering Department, University of Maryland. <http://www.ee.umd.edu/~taylor/Electrons.htm>

[14] Urban Explorer, realizzato da Assimpredil in collaborazione con il Comune di Milano, - Siti Web: <http://www.assimpredil.ance.it>  
<http://www.comune.milano.it>

FABIO ROCCA professore ordinario di Elaborazione Numerica dei Segnali presso il Politecnico di Milano. Membro del Comitato ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea). Coordina per l'ESA un Expert Support Laboratory nel quadro delle attività scientifiche di sostegno dei satelliti di telerilevamento ERS-1/2 ed ENVISAT. Associate Editor delle riviste Signal Processing e Journal of Seismic Exploration. Premio Italgas per le Telecomunicazioni del 1995. Premio 1999 (condiviso con L. Chiariglione) per le Tecnologie della Rhein Foundation, RFT. Laurea Honoris Causa (2001) in Geofisica dell'Institut Polytechnique de la Lorraine, Nancy. Socio fondatore di Tele-Rilevamento Europa.  
e-mail: rocca@elet.polimi.it

CARLO COLESANTI consegue la laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni nell'aprile 1999. Attualmente è dottorando presso il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano, dove svolge ricerca in materia di tecnica dei diffusori permanenti e di sistemi SAR passivi. Collabora con Tele-Rilevamento Europa fin dalla nascita della società.  
e-mail: colesant@elet.polimi.it

ALESSANDRO FERRETTI si laurea in Ingegneria Elettronica nel 1993. Nello stesso anno consegue il Master in Information Technology presso CEFRIEL. Nel 1997 conclude il Dottorato di Ricerca presso il Politecnico di Milano. Svolge lavoro di ricerca nel settore dell'elaborazione di dati SAR. Si è occupato della ricostruzione di modelli digitali di elevazione con tecniche interferometriche. Insieme ai Prof. C. Prati e F. Rocca ha ideato e sviluppato la tecnica dei diffusori permanenti. È socio fondatore e amministratore delegato di Tele-Rilevamento Europa.  
e-mail: aferrett@elet.polimi.it oppure  
e-mail: alessandro.ferretti@treuropa.com

RAFFELLA RATTI si laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni nel 2000. Svolge attività di ricerca presso il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano e presso Tele-Rilevamento Europa. In particolare, si occupa di phase unwrapping e ricostruzione di modelli altimetrici digitali a partire da dati SAR.  
e-mail: raffaella.ratti@treuropa.com