

Radar dell'ultima generazione

Dai primi radar per sondaggi geognostici (GPR), si è giunti oggi a sistemi con elevato grado di automazione. In questo, che è il primo di una serie di tre articoli, si esaminano i sistemi radar dell'ultima generazione dedicati alla detezione servizi interrati, alla mappatura del sottosuolo e al riconoscimento terreni.

Renzo Chirulli

La prima traccia certa di impiego di onde elettromagnetiche per la localizzazione di oggetti interrati risale ad un brevetto tedesco del 1910 di Leimbach e Löwy. Da allora, grazie soprattutto allo sviluppo, nei primi anni '30, delle tecniche ad impulso, il radar è stato sperimentato in indagini conoscitive eseguite su diverse tipologie di suolo e di mezzi di propagazione in genere.

Dalle indagini ad alta profondità nei banchi di ghiaccio (Stenson 1951; Evans 1963), a quelle in acqua dolce o nei depositi di sale, o ancora nelle sabbie desertiche sino infine alle formazioni rocciose, i sistemi radar di questo tipo, detti SPR (surface penetrating radar), sono stati sperimentati, con risultati non sempre incoraggianti, da diversi ricercatori, tra i quali citiamo: Morey (1974), Cook (1974, 1975), Kadaba (1976), Nilsson (1978), McCann (1988).

Dopo le iniziali sperimentazioni, è stata certamente l'esplorazione lunare a ridare impulso, nei primi anni '70, al-

la ricerca sui sistemi SPR. In tempi più recenti la tecnologia dei sistemi SPR si è andata affinando, parallelamente ad un'estensione delle applicazioni possibili.

I primi georadar detti anche GPR (ground probing radar o anche ground penetrating radar), rappresentano una prima specializzazione, dedicata ad applicazioni di tipo geognostico, dei più generali sistemi SPR. La loro comparsa sul mercato delle strumentazioni scientifiche ha permesso una diffusione della conoscenza di questi versatili sistemi d'indagine. Se oggi i sistemi SPR sono così noti, lo si deve anche alla diffusione dei sistemi georadar.

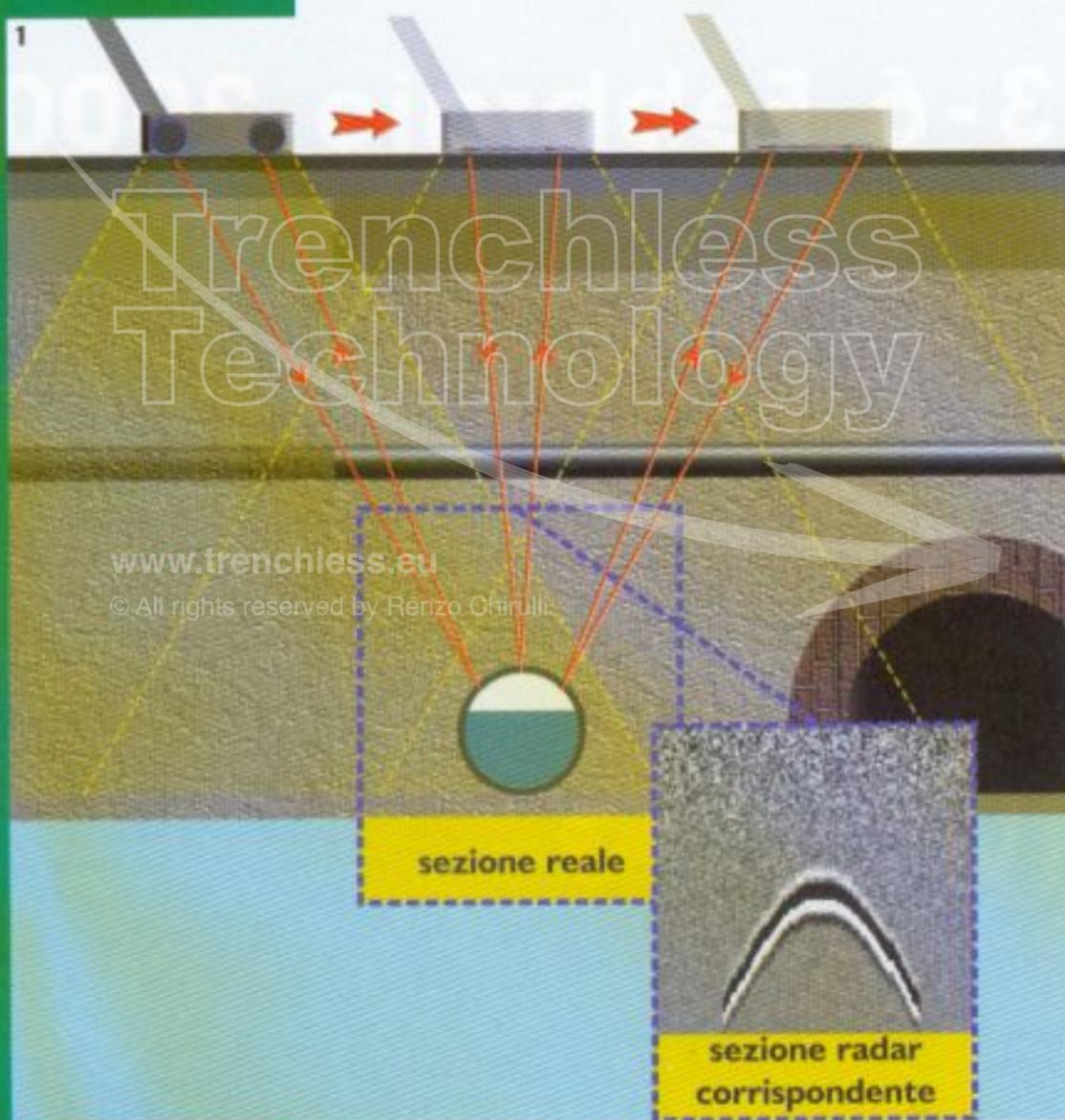
Mediante indagini georadar è possibile determinare stratigrafie ed individuare cavità nel sottosuolo, con rapidità ed efficienza, avendo quale principale (ed in certi casi stretto) limite quello rappresentato dalla profondità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel particolare suolo indagato.

Se è vero che la diffusione del georadar ha contribuito significativamente ad una altrettanto ampia diffusione della conoscenza delle potenzialità d'impiego dei sistemi SPR, è anche vero che questa diffusione ha permesso talvolta talune forzature, operate anche da parte di certi produttori di sistemi radar, e consistite essenzialmente nell'aver voluto attribuire a sistemi progettati e costruiti per indagini di tipo geognostico (ed aggiungiamo per caratterizzazioni tipicamente macrostrutturali) capacità differenti e significativamente più specializzate, come la detezione e la mappatura di servizi interrati, le indagini su pavimentazioni stradali o su manufatti edilizi.

Chiunque conosca in modo sufficientemente approfondito la fisica su cui si fonda il funzionamento dei sistemi SPR, ha certamente ben a mente che per effettuare con efficacia la detezione e la mappatura di servizi interrati, o indagini su pavimentazioni stradali o su manufatti edilizi, occorrono sistemi radar specializzati, ovvero progettati e realizzati per quello specifico impiego.

La specializzazione, come vedremo, non riguarda solo il campo delle frequenze con le quali l'antenna (o le antenne) del sistema radar trasmettono o ricevono, ma riguarda anche l'architettura del radar (singola antenna o array e subarray di antenne), le tipologie di canali impiegati, la polarizzazione, gli algoritmi di processazione dei segnali, il software per l'interpretazione e la processazione assistita da computer.

In realtà i fattori sui quali è possibile intervenire per attuare una specializzazione di un sistema SPR sono notevolmente più numerosi. Tuttavia questo lavoro non vuole essere un compendio di tecnica radaristica, quanto più una guida sintetica per comprendere quali siano le tendenze in



atto nel settore dei radar per l'ingegneria civile, e quali le prestazioni di punta che i sistemi radar dell'ultima generazione possono fornire o, guardando alle ricerche in atto, saranno in grado di fornire nell'immediato futuro.

LO STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI RADAR PER L'INGEGNERIA CIVILE

I georadar hanno rappresentato una pietra miliare nello sviluppo delle applicazioni di sistemi radar per l'ingegneria civile. Questa classe di apparati, però, oggi appare superata grazie ad un principio che si ispira alla ricerca di una sempre maggiore affidabilità ed efficienza di questi sistemi: la specializzazione.

I sistemi radar dell'ultima generazione dedicati all'ingegneria civile si ispirano a questo principio, anche se, e questo è opportuno sottolinearlo, quelli più efficienti hanno fatto della modularità una seconda e non meno importante regola base. Secondo questa regola la specializzazione può essere conseguita attraverso la composizione di architetture modulari specializzate, piuttosto che attraverso la realizzazione di completi e rigidi apparati specializzati.

Questo criterio si traduce, per chi deve acquisire ed impiegare queste attrezzature, in una sicura riduzione dei costi d'investimento, in una maggiore flessibilità d'uso degli apparati disponibili, ed in una minore variabilità di procedure e tecniche di post elaborazione (non ultimo il vantaggio di non dover cambiare totalmente ambiente ed interfaccia software per applicazioni differenti).

Nel corso di tre successivi articoli, che pubblicheremo su questa rivista, verranno esaminati i sistemi radar dedicati a tre impieghi fondamentali:

1. detezione dei servizi interrati, mappatura del sottosuolo e riconoscimento terreni;
2. caratterizzazione delle pavimentazioni stradali;
3. sistemi radar per la diagnostica del cemento armato e dei manufatti edilizi.

In questo primo articolo esamineremo i sistemi radar dell'ultima generazione dedicati al primo degli impieghi appena elencati.

DETEZIONE DEI SERVIZI INTERRATI

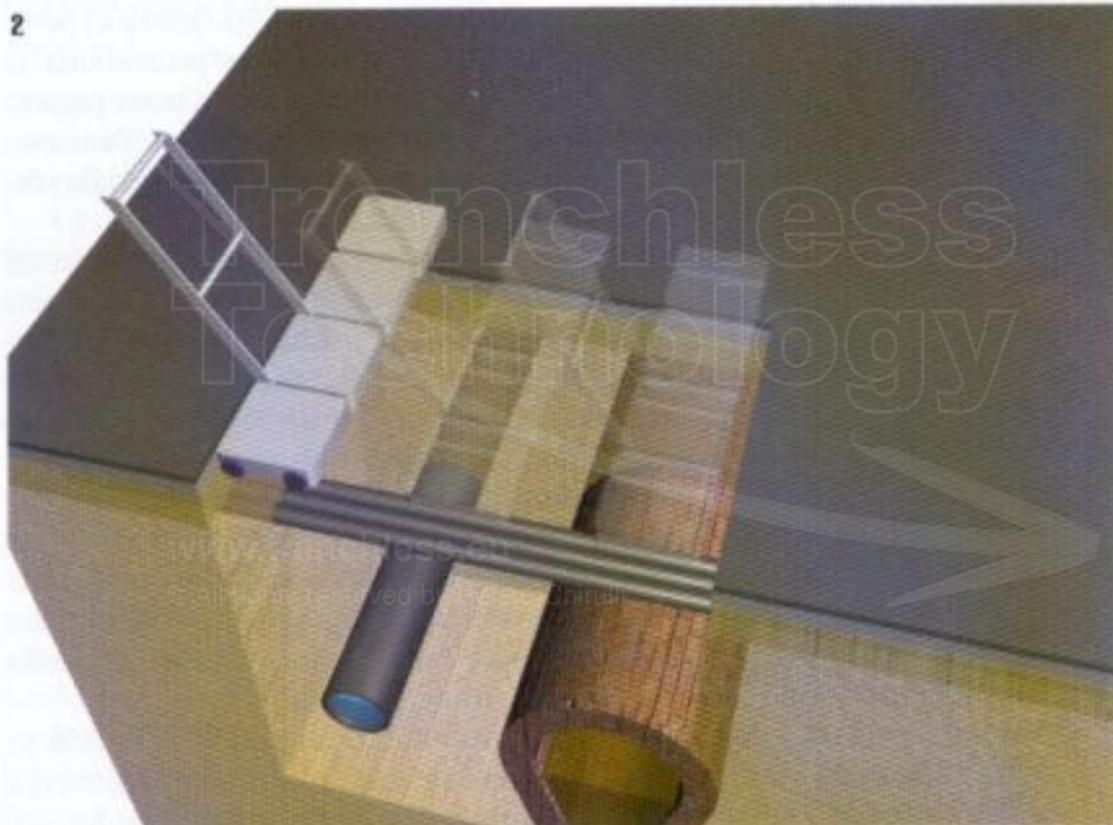
La detezione dei servizi interrati, la mappatura del sottosuolo ed il riconoscimento terreni rappresentano uno degli impieghi integrati, di sistemi radar, certamente più rilevanti dal punto di vista tecnico, anche perché le altre applicazioni elencate (certamente non meno importanti) sono derivate tecnologicamente (almeno per i sistemi dell'ultima generazione), da quanto scoperto e realizzato in questo primo e complesso ambito.

Le esigenze principali che questi sistemi devono oggi poter soddisfare sono quelle di realizzare un'efficace detezione dei servizi interrati, una perfetta localizzazione e referenziazione cartografica degli stessi ed una caratterizzazione dell'ambiente d'inserimento (terreno).

Queste esigenze sono legate a loro volta alla necessità di disporre di una cartografia reale del sottosuolo che consenta non solo di poter operare interventi esecutivi, manutentivi o sostitutivi sulle reti di servizi interrati esistenti, ma che fornisca alle aziende che ne hanno in carico la gestione, quella che costituisce per loro l'informazione base: costituzione, consistenza e struttura delle reti gestite.

Una recente direttiva, che in altre occasioni abbiamo avuto ampio modo di commentare, prescrive ai comuni con oltre 30 mila abitanti, di dotarsi di un piano del sottosuolo che sia redatto su una base cartografica nella quale sia inserita la posizione e l'articolazione di ciascuna delle reti di servizi interrati presenti nell'area rappresentata. I sistemi radar di questo tipo possono dare una risposta efficace ed effettiva a questa concreta domanda.

2



Ma cosa significa anzitutto detezione? Detezione è una parola che deriva dall'inglese "detection" (che in elettronica sta letteralmente per "rivelazione") e che rende con grande proprietà ciò che un sistema radar fa quando deve localizzare un oggetto interrato (tecnicamente "bersaglio" o target).

Effettivamente si tratta di "rivelare", a partire da onde elettromagnetiche trasmesse da opportune antenne, quindi riflesse dal bersaglio e ricevute ancora una volta dalle medesime o da differenti antenne, la presenza di un riflesso o immagine tipica a cui si associa un'alta probabilità della presenza di un determinato tipo di bersaglio.

Quando si tratta di tubazioni interrate, ciò che un radar riceve come segnali riflessi captati dalle antenne, che costituiscono la parte sensoristica dell'apparato, è in realtà un insieme di riflessi, alcuni dei quali possono essere associati a bersagli di interesse, altri no. Nelle aree urbane, oltretutto, il sottosuolo è lungi dall'essere uno spazio in cui una serie di tubi e cavidotti giacciono immersi in una matrice terrosa omogenea. Vi sono infatti sparsi: elementi lapidei, vecchie pavimentazioni, strutture sepolte, pezzi metallici, reperti archeologici, resti biologici ecc. in quello che potrebbe essere propriamente definito un enorme "minestrone" sotterraneo.

Localizzare un tubo è quindi un'operazione che solo in condizioni del sottosuolo particolarmente favorevoli, può essere eseguita con gli apparati e con le tecniche d'interpretazione dei tradizionali sistemi georadar. Nella quasi totalità dei casi questa possibilità non risulta verificata.

Di questo se ne accorse, già dieci anni fa, la Telecom Italia quando, nei primi anni '90, in vista del progetto Socrate (cablatura con fibra ottica delle città italiane), si pose il problema di dotarsi di un mezzo d'indagine, per la localizzazione dei servizi interrati, che fosse efficace, efficiente, ad alto rendimento e di basso costo.

L'obiettivo era quello di minimizzare i costi derivanti dal danneggiamento di altri sottoservizi o oggetti interrati (ipogei, siti archeologici, strutture di fabbrica ecc.) causati dalle operazioni di installazione dei cavidotti nel sottosuolo (operate sia con tradizionali tecniche con scavo a cielo aperto che con innovative tecniche No-Dig, ovvero senza scavo a cielo aperto).

Inoltre la Telecom aveva un'ulteriore esigenza che era quella di referenziare la posizione dei sottoservizi localizzati, rispetto ad una cartografia di dettaglio che potesse costituire la base per una progettazione realmente esecutiva delle reti. Infine, con l'obiettivo di ottimizzare l'impiego

1. A partire dai segnali ricevuti, il radar ricostruisce un'immagine dei bersagli presenti nel sottosuolo. Quest'immagine viene chiamata sezione radar o radargramma.

2. Il sottosuolo, ed in particolare quello urbano, presenta molto spesso una struttura caotica, determinata, in particolar modo, dall'alta densità di sottoservizi presenti.

**Renzo Chirulli,
responsabile della
ricerca della IT
Consulting**

delle risorse disponibili, aveva anche l'esigenza di poter classificare il sottosuolo, in funzione della "escavabilità" o perforabilità dei terreni presenti, in modo da poter pagare, ai propri appaltatori, ciò che essi effettivamente scavavano o perforavano (roccia, materiale ghiaioso, materiale sabbioso, terreni teneri).

A questa domanda così specifica nessuno dei sistemi georadar esistenti poteva fornire una risposta. Per questo nacque il progetto RIS (Radar per l'Introspezione del Suolo), che ormai è entrato nella storia dei radar per le applicazioni civili. Lo sforzo di un'azienda italiana specializzata in sistemi radar per il settore aerospaziale e militare (la IDS di Pisa, fondata da uno dei padri della radaristica italiana, l'ingegner Franco Bardelli) e le idee iniziali di due brillanti ricercatori della IDS (Bettini e De Pasquale) hanno condotto alla realizzazione del primo vero sistema radar dedicato alla detezione servizi, alla mappatura del sottosuolo ed al riconoscimento terreni: il RIS/MF.

Nel RIS/MF (in cui la sigla MF sta per Multi-Frequency) non solo sono state superate tutte le limitazioni tipiche dei sistemi georadar, ma sono state create ed introdotte funzionalità del tutto innovative, che hanno prodotto positive ricadute tecnologiche su sistemi radar dedicati ad altri impieghi quali: le indagini sulle pavimentazioni stradali e sulle strutture edilizie, la diagnostica sul cemento armato (RCM - Radar Concrete Mapping) e la detezione in avanti durante il tunnelling (DWT - Detecting While Tunnelling). Una

prima limitazione tipica dei sistemi georadar (ampiamente superata nei sistemi RIS) è quella legata all'impiego di antenne singole in singola frequenza.

Con un'architettura così "povera" e poco flessibile (tuttavia ottimale negli impieghi geognostici) accadono tre fenomeni che chiariscono il limite di un simile approccio:

1. sezione per sezione si dispone di un'unica immagine radar in cui cercare i bersagli d'interesse;
2. tra due bersagli sovrapposti (ovvero posizionati in prossimità di una medesima linea verticale) quello più profondo può non essere visto;
3. il trade-off tra penetrazione del segnale (maggiore profondità d'indagine) e risoluzione (possibilità di discriminare due bersagli come distinti) non può essere ottimizzato.

Senza entrare in una spiegazione di dettaglio dei fenomeni appena evidenziati, è però utile osservare che una singola antenna, che tra l'altro lavora in singola frequenza, restituisce una serie di segnali che il radar trasforma tipicamente in una sezione piana che risulta essere in genere perpendicolare al piano lungo cui l'antenna si muove e parallela alla direzione di avanzamento; questa sezione elaborata dal radar prende il nome di sezione radar o radargramma, e costituisce appunto quell'immagine radar del sottosuolo su cui è possibile individuare i bersagli cercati (figura 1).

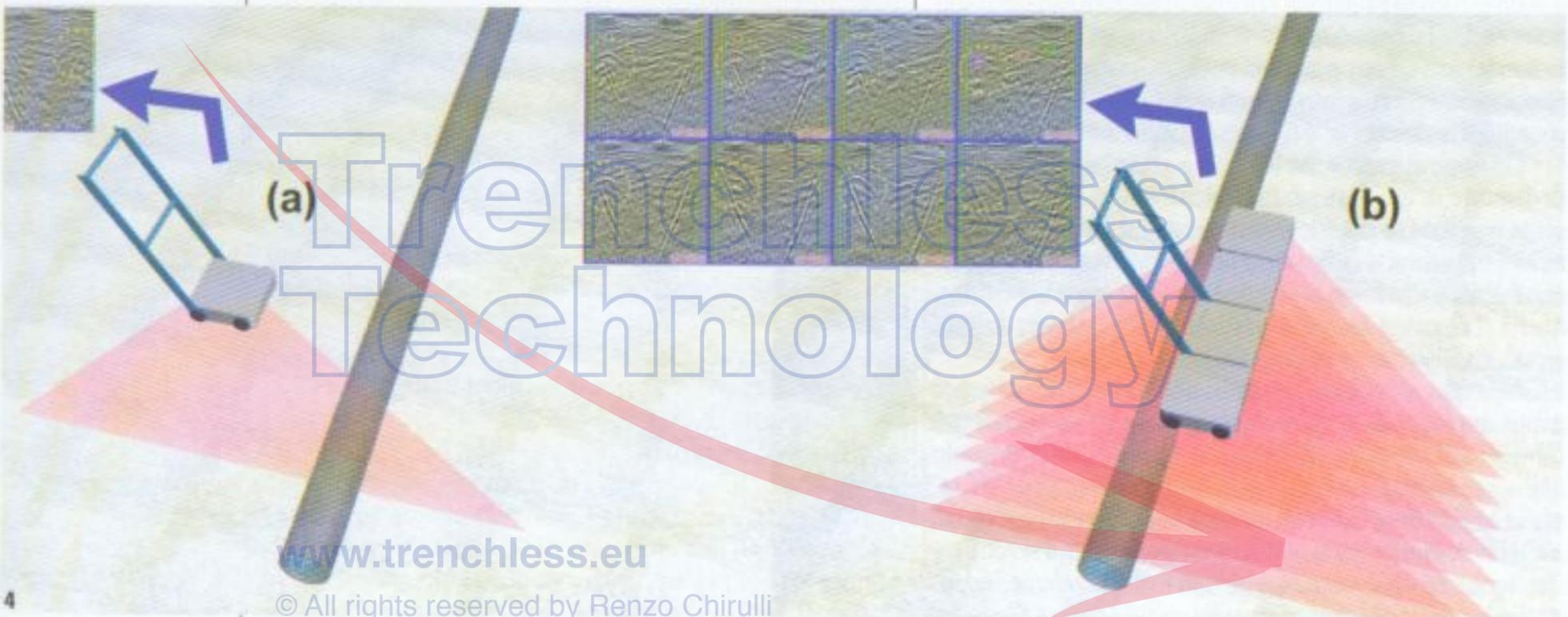
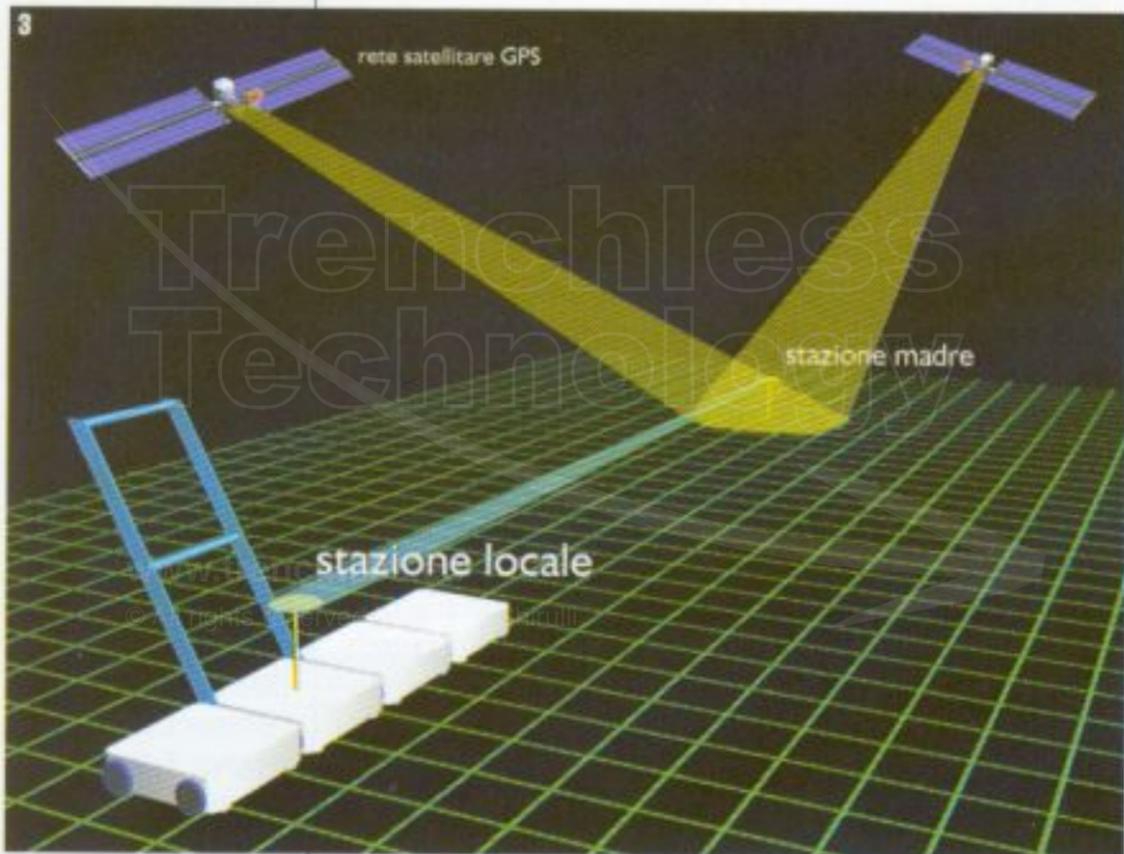
Se, come tipicamente accade, muoviamo la nostra antenna longitudinalmente lungo una strada urbana, parallelamente al ciglio, il radar estrarrà una sezione verticale parallela alla linea di avanzamento e quindi in tal caso parallela al ciglio stradale.

Un bersaglio, come può essere un tubo, restituirà, nel radargramma, un'immagine deformata che apparirà essere un'iperbole se il tubo giace ortogonalmente alla linea lungo la quale avanza l'antenna, una linea se invece esso giace parallelamente a questa.

Bisogna ricordare, inoltre, che la penetrazione di un'onda elettromagnetica, in un mezzo come può essere il suolo, a parità di altre condizioni (costante dielettrica, contenuto d'acqua, granulometria, compattezza, composizione chimica del suolo ecc.) è spesso inversamente proporzionale alla sua frequenza.

Al contrario maggiore è la frequenza migliore è la risoluzione (ovvero più piccola è la distanza minima tra due bersagli discriminabili). Ciò significa che se si desidera spingere un'indagine radar più in profondità occorre scendere in frequenza, e viceversa se si desidera un'indagine più accurata (anche se limitatamente a strati più superficiali) è necessario salire in frequenza.

Quando si effettua un'indagine radar per la detezione servizi, sia la profondità d'indagine (che deve essere spin-



www.trenchless.eu

© All rights reserved by Renzo Chirulli

ta almeno entro i primi 2-3 metri) che la risoluzione sono obiettivi di eguale importanza, che evidentemente non possono fisicamente essere soddisfatti impiegando una singola antenna in singola frequenza.

Né è plausibile pensare, per motivi di referenziazione geometrica dei dati estratti, che si possa operare passando in tempi successivi e lungo le medesime linee di scansione due antenne a diversa frequenza (una linea di scansione è il percorso lungo il quale facciamo scorrere in superficie un'antenna).

Nei sistemi RIS/MF questo problema è stato superato realizzando antenne multifrequenza, ovvero in grado di trasmettere e ricevere su due differenti frequenze medie di banda (in particolare 200 e 600 MHz; la prima frequenza per approfondire l'indagine, la seconda per renderla più accurata). Abbiamo sottolineato il fatto che il sottosuolo urbano restituisce radargrammi la cui complessità è dovuta alla struttura "caotica" del mezzo (figura 2). Disporre quindi di una singola antenna, anche se operante in multi frequenza, non avrebbe risolto in modo soddisfacente il problema della detezione.

Non è infrequente infatti che per motivi legati alle caratteristiche del sito, o anche a causa delle perturbazioni elettromagnetiche (sempre presenti), un singolo canale (ovvero una singola antenna che lavora in singola frequenza) restituisca al radar dati dai quali non emerge, pur essendoci, la presenza di un determinato bersaglio.

In tal caso il criterio della ridondanza delle informazioni (ovvero della disponibilità di più dati, anche della stessa qualità, purché raccolti in forma indipendente) trova un'efficace implementazione, e in ciò si supera anche la seconda grande limitazione che i sistemi georadar hanno nella detezione dei sottoservizi, ovvero l'incapacità di vedere, tra due bersagli sovrapposti (ovvero posizionati in prossimità di una medesima linea verticale) quello più profondo.

Nel sistemi RIS/MF non solo, come già visto, si opera il multifrequenza, ma si impiegano più antenne, ed in particolare almeno quattro antenne, che inoltre non solo lavorano in modalità per così dire autonoma (ovvero ogni singola antenna che trasmette un segnale e riceve il relativo riflesso dal bersaglio) generando così quattro canali distinti (detti monostatici) ma inoltre le stesse antenne vengono fatte lavorare in modalità incrociata, ovvero un'antenna trasmette ed un'altra riceve (i così detti canali bistatici), ed in modalità cross-polare, ovvero un'antenna trasmette in un piano, ed un'altra riceve nel piano a questo ortogonale (canale cross-polare).

In un sistema RIS/MF si dispone tipicamente di ben 8 canali (4 monostatici, 2 bistatici e 2 cross-polari) ed in altri termini, per ciascuna sezione verticale il radar ricostruisce ben 8 radargrammi, ovvero 8 differenti immagini radar della medesima sezione verticale, ciascuna con una sua caratteristica dovuta sia alla frequenza, che alla posizione geometrica delle antenne rispetto al bersaglio, che infine alla polarizzazione (figura 3).

Rispetto ai sistemi a singola antenna ciò comporta un incremento sia della quantità che della qualità delle informazioni. Conseguentemente, possono essere individuati anche tubi sovrapposti o che normalmente risultano poco o affatto visibili, superando perciò, di molte lunghezze, quelle che sono le capacità dei tipici sistemi georadar.

Attraverso rigorose e scrupolose prove sperimentali in poligoni appositamente attrezzati, è stato possibile verificare, confermando in questo un dato teorico atteso, che la capacità di detezione dei sistemi RIS/MF supera il 95%, ovvero questi sistemi sono in grado di rivelare, con una sicurezza superiore al 95%, la presenza e la posizione di sottoservizi interrati. Nelle applicazioni reali, seguendo una precisa e codificata procedura d'indagine, è possibile mantenere questi livelli nella capacità di detezione.

MAPPATURA DEL SOTTOSUOLO

Se l'alta capacità di detezione costituisce una caratteristica necessaria per un sistema dedicato a quest'uso, essa da sola non è sufficiente a completare un sistema radar dedicato alla mappatura del sottosuolo.

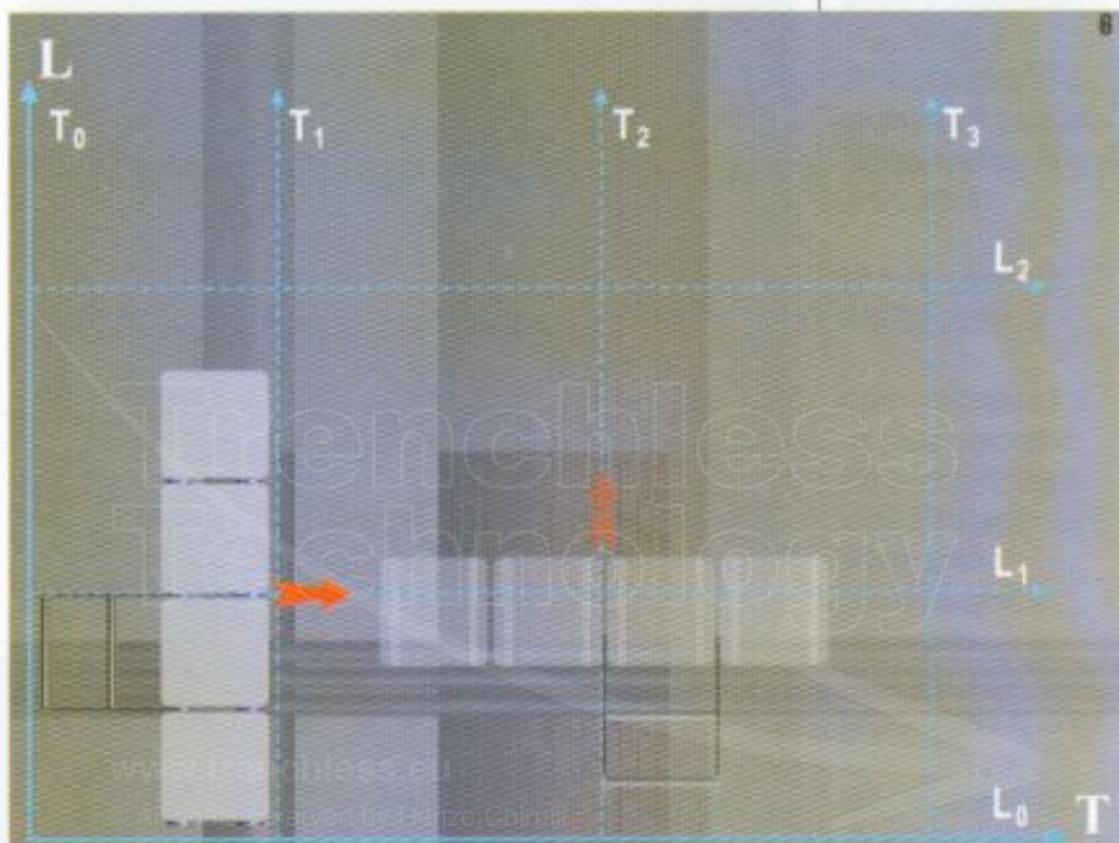
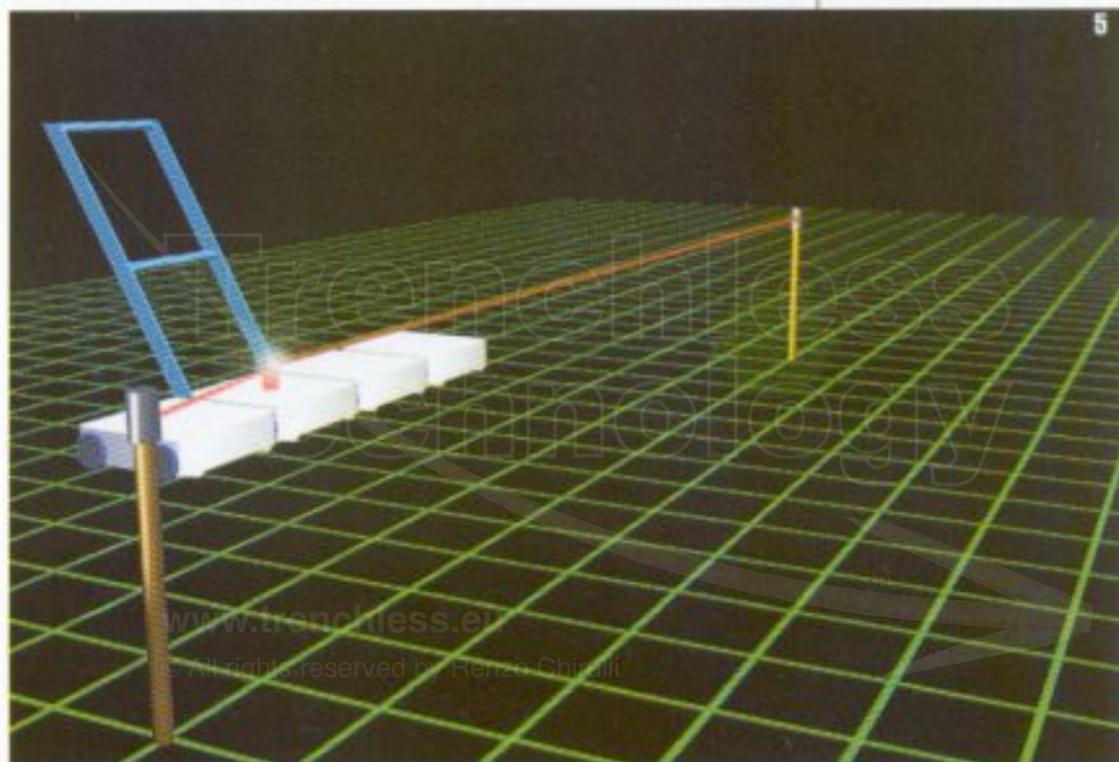
La detezione si traduce infatti in un dato posizionale relativo ai sensori dell'apparato radar. Questo dato posizionale relativo deve essere quindi trasformato in un dato posizionale relativo a punti di riferimento noti presenti sul sito (tipicamente cigli stradali, spigoli degli edifici ecc.) dai quali sia possibile risalire, in sito, alla posizione dei sottoservizi localizzati. Inoltre tutte queste informazioni (di carattere tridimensionale) devono essere integrate in un supporto sintetico e tecnicamente utilizzabile come una planimetria integrata da qualsivoglia sezioni trasversali e/o longitudinali. Questa caratteristica del sistema poteva essere risolta, apparentemente, in vari modi che, come vedremo, non avrebbero offerto la stessa efficacia ed affidabilità.

Riferendoci alla storia del sistema RIS, la prima ipotesi presa in considerazione, per ottenere una referenziazione dell'indagine radar, fu quella di ricorrere, come correntemente si procede nelle indagini radar dedicate alla mappatura di siti archeologici in aree extraurbane, all'impiego di sistemi GPS (Global Positioning System).

Con un sistema GPS differenziale, ovvero costituito da una stazione madre remota ed una stazione mobile, costantemente referenziata alla stazione madre, dopo un buon

3. Nella ricerca servizi l'integrazione tra GPS e apparato radar non risolve il problema della georeferenziazione dell'indagine radar.

4. Con sistemi di tipo RIS/MF durante una singola scansione vengono estratte fino ad 8 sezioni radar, a differenza di quanto accade con sistemi monoantenna, con le quali è possibile estrarre una singola sezione per scansione: (a) sistema radar monoantenna; (b) sistema radar multiantenna.



settaggio è possibile raggiungere tolleranze pari a ± 2 cm, nella restituzione delle coordinate planimetriche assolute della stazione mobile (figura 4).

Due fattori hanno però giocato a sfavore di questa prima iniziale ipotesi:

1. l'ambiente d'uso dell'apparato doveva essere quello urbano;
2. l'informazione doveva essere comunque riportata su un supporto cartografico.

Il primo fattore pose in evidenza i limiti fisici operativi dei sistemi GPS differenziali (che ricordiamo sono tra quelli certamente più evoluti ed affidabili).

Si verificarono infatti quattro problemi essenziali che hanno portato ad escludere l'uso dei sistemi GPS, per referenziare l'indagine radar:

- a. per restituire le minime tolleranze nella misura delle coordinate, la stazione madre aveva bisogno di un tempo di setting (ovvero il tempo occorrente per calcolare con la massima precisione la propria posizione assoluta) variabile dalle 6 alle 12 ore, in funzione della posizione geografica del sito di interesse e del livello di inquinamento elettromagnetico presente localmente;
- b. dato il raggio limitato di azione della stazione madre (tipicamente 2 mila metri) l'operazione di setting doveva essere ripetuta con una certa frequenza nella copertura di percorsi di media lunghezza, oppure occorreva impiegare più stazioni madre disseminate lungo il percorso, con notevoli problemi di integrazione e di incremento dei costi della dotazione base;
- c. il livello di inquinamento elettromagnetico presente nel

sito e dovuto a trasmissioni radio e telefoniche, ai campi elettromagnetici creati dalle linee elettriche o da veicoli in transito ecc., disturbava notevolmente la comunicazione tra stazione mobile e stazione madre con effetti sulla precisione e sull'affidabilità delle misure;

d. la presenza di zone d'ombra (fabbricati, pensiline, oggetti ecc.) disturbava la stazione mobile, sino ad interrompere il collegamento, e condizionava fortemente il posizionamento iniziale della stazione madre;

e. la necessità di utilizzare una stazione non presidiata avrebbe posto, durante l'impiego, problemi di sicurezza, occupazione di suolo pubblico ecc.

Inoltre, la necessità di dover comunque referenziare l'indagine radar ad un supporto cartografico, obbligava ad una doppia referenziazione, non essendo praticabile l'idea di dotare enti di gestione, proprietari dei sottoservizi ed imprese esecutrici, di sistemi GPS differenziali, analoghi a quello impiegato sull'apparato, per ritrovare in sito le posizioni dei sottoservizi così come determinate dal radar. Una seconda ipotesi fu quella di dotare l'apparato di un sistema di referenziazione basato su una triangolazione ottica, operata a mezzo di fari laser, con registrazione in tempo reale delle coordinate relative misurate (figura 5).

A livello teorico questa soluzione, a patto che si procedesse comunque ad un rilievo topografico di superficie entro cui posizionare con precisione due fari laser locali, poteva essere efficace perché avrebbe restituito con precisione centimetrica (tolleranza ± 1 cm) la posizione relativa dell'apparato rispetto a due stazioni localmente georeferenziate (i fari laser). In realtà anche questo sistema presentava taluni limiti fisici che hanno determinato, nello sviluppo del RIS, l'abbandono di quest'ipotesi.

I principali limiti erano costituiti dalla visibilità dei fari laser, specie in situazioni di particolare soleggiamento, ed alla loro facile ed accidentale schermabilità (bastava il passaggio di un passante o di un veicolo, o la posizione sfavorevole di un'auto in sosta a disturbare o rendere impossibili le misure).

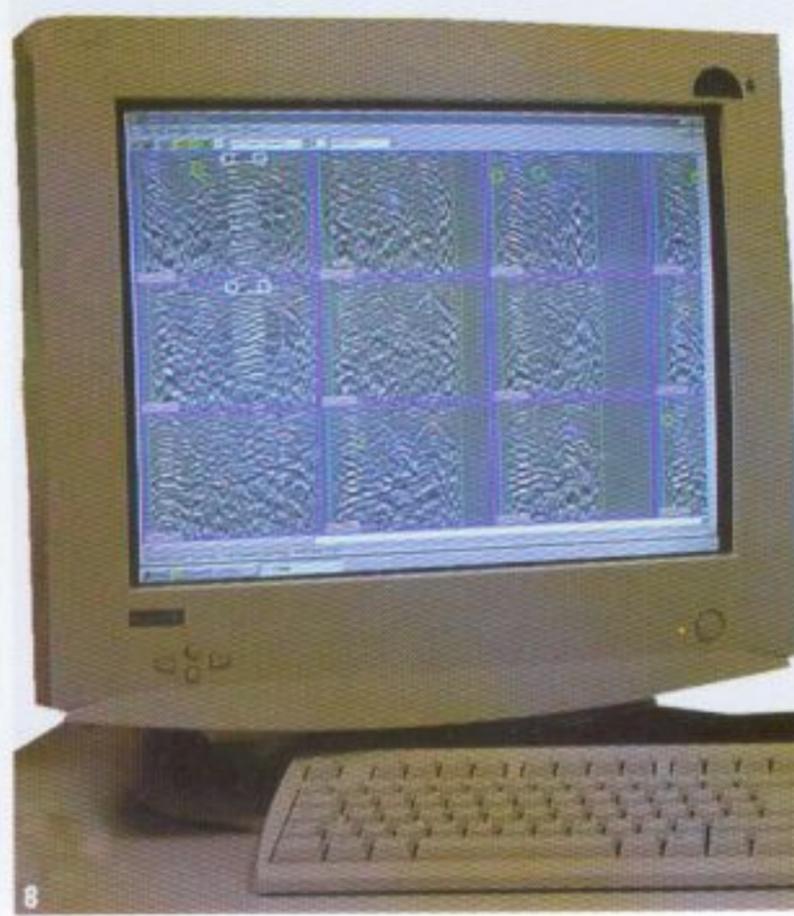
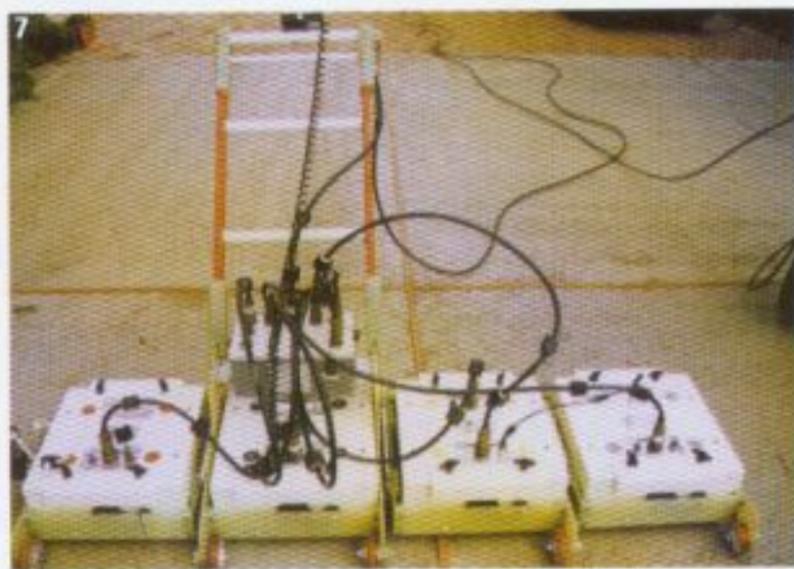
Pertanto la soluzione che è stata adottata si basa sull'impiego di odometri (ruote solidali all'apparato, collegate ad encoders che ne registrano il movimento, simili a quelli presenti nei mouse dei computer) e su una procedura d'indagine basata sul tracciamento a terra, e quindi sul riferimento cartografico, di una linea di riferimento (ad anda-

5. La triangolazione ottica a mezzo di sistemi laser presenta notevoli problemi di utilizzo, nella georeferenziazione di indagini radar, specie quando si opera in zona urbana.

6. Nei sistemi RIS la georeferenziazione dell'indagine radar viene operata mediante il tracciamento a terra e quindi nella cartografia, di un'opportuna griglia ortogonale di riferimento.

7. Sistema radar ad array RIS/MF.

8. La visualizzazione contemporanea su doppio schermo dei radargrammi e delle tomografie sovrapposte alla cartografia, costituisce uno degli ausili più significativi nel processo di riconoscimento dei sottoservizi interrati.



mento anche curvilineo) che in genere viene fatta coincidere con un elemento fisico del tracciato (ciglio della strada, bordo di un marciapiede ecc.).

Il riferimento cartografico si ottiene ottimalmente da un rilievo topografico di superficie.

Secondo questa procedura (figura 6), adottata tra l'altro dalla Telecom Italia in una specifica norma tecnica dedicata alle indagini radar, nell'area oggetto d'indagine viene tracciata una griglia ortogonale costituita dalla linea di riferimento e da una serie di linee ad essa parallele (longitudinali o linee L) nonché da una seconda serie di linee a queste perpendicolari distanziate tra di loro di circa 2 metri (trasversali o linee T). Una volta tracciate nella cartografia queste linee, l'apparato viene spostato lungo queste, con la possibilità, attraverso opportuni markers, di attuare le necessarie procedure di correzione del dato posizionale durante le operazioni di post-elaborazione.

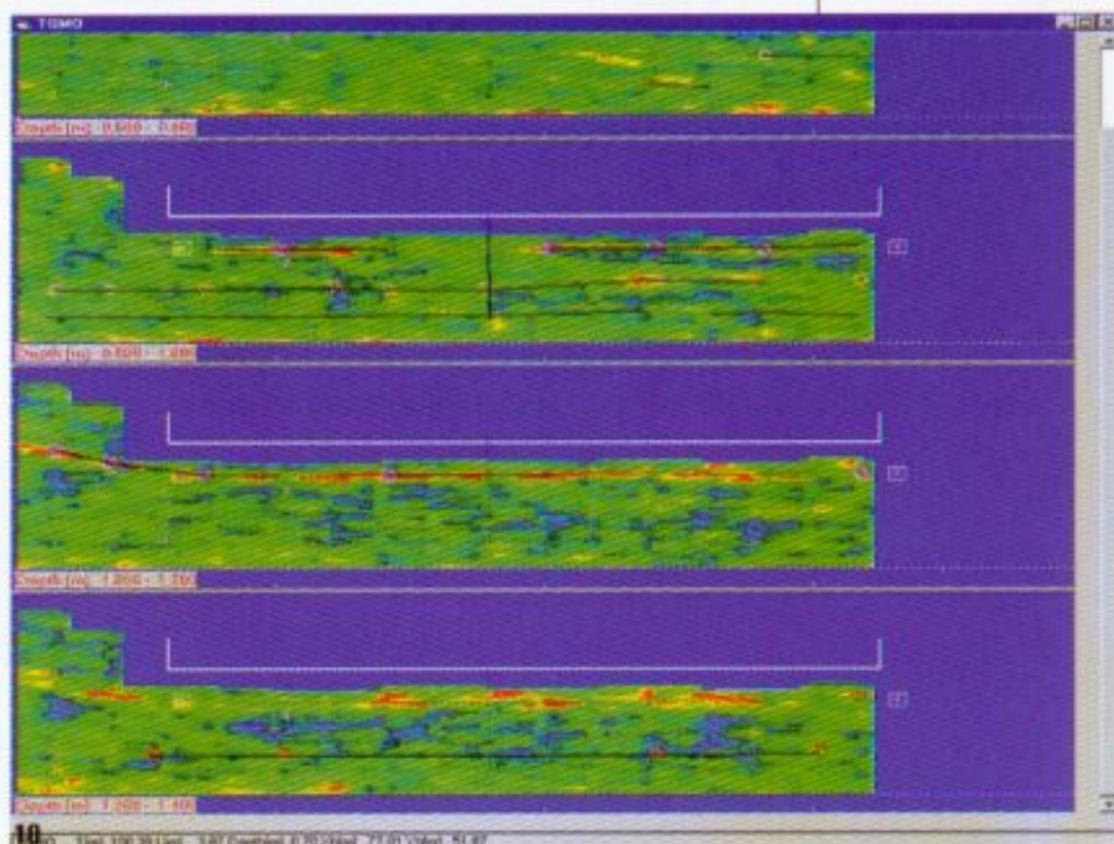
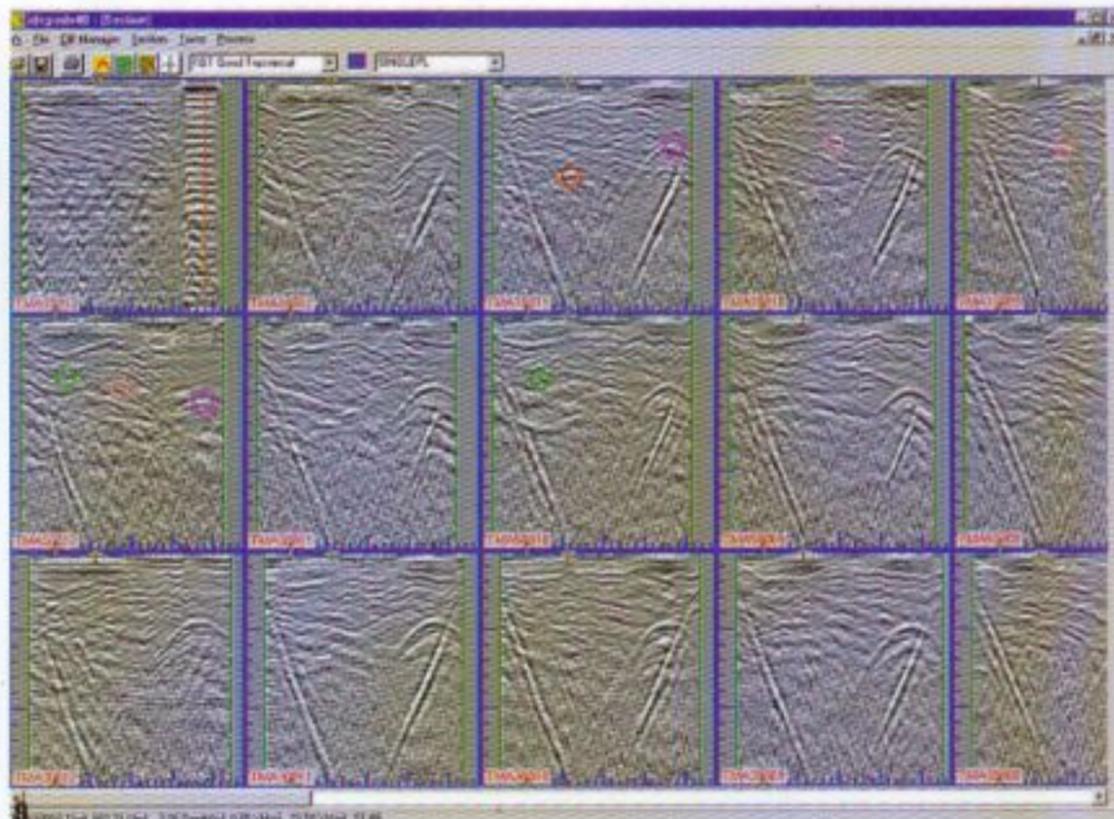
Inoltre la cartografia, ottenuta da rilievo topografico di dettaglio, oppure opzionalmente proveniente da altra sorgente (cartografia aerofotogrammetrica preesistente ecc. - anche se questo è sconsigliabile per le scarse precisioni di cui sono affetti i rilievi aerofotogrammetrici), viene importata in un ambiente CAD integrato con il software di processazione ed interpretazione dei dati radar. Ed è rispetto a questa cartografia che tutti i dati radar processati vengono riferiti. Non si ritiene opportuno approfondire oltre quest'aspetto, che riguarda evidentemente l'utilizzo degli apparati RIS (figura 7).

È invece importante sottolineare che affinché un sistema radar realizzi una effettiva mappatura del sottosuolo, è necessario che il dato radar oltre ad essere referenziato ad una cartografia che abbia una precisione almeno dello stesso ordine di grandezza dell'informazione che su questa cartografia si intende rappresentare, riporti anche quei dati, come la posizione di chiusini, apparecchi di presa o di derivazione, valvole, camerette, che possono risultare di grande utilità durante la fase di interpretazione dei segnali radar, specie se in tempo reale è possibile integrare la visione delle sezioni radar, con il dato cartografico. Questa possibilità nei sistemi RIS esiste, ed è quella che viene chiamata correntemente: interpretazione assistita da computer.

Si tratta in sostanza di un software estremamente sofisticato e potente, ma dotato di un'interfaccia utente veramente semplice ed agevole, grazie al quale, oltre a disporre di tutti gli strumenti per una processazione assistita del segnale (tipicamente ottimizzazione delle velocità di propagazione, ed altre funzioni tipiche dell'analisi radar), è possibile visualizzare contemporaneamente, su due schermi differenti (figura 8), da una parte i radargrammi (figura 9), e dall'altra la cartografia di riferimento sulla quale vengono sovrapposte le così dette sezioni tomografiche, che non sono altro che delle "fette" orizzontali del volume indagato, estratte a profondità e con spessori stabiliti dall'utente, equivalenti, cioè, a viste in pianta del sito oggetto di indagine a varie profondità (figura 10).

L'immagine tomografica è il risultato di una elaborazione automatica del sistema, basata sull'impiego di particolari algoritmi di processazione ed integrazione dei segnali. Il risultato è costituito da immagini planimetriche, cromaticamente molto suggestive, nelle quali la presenza di un tubo, ad esempio sub-orizzontale, viene rappresentata da una traccia di colore differente dal contesto che, a seconda della profondità che il tubo stesso raggiunge, possiamo ritrovare in tomografie estratte a profondità differenti.

Quest'immagine, per quanto suggestiva, va intesa rigorosamente solo come ausilio all'interpretazione del dato radar. Solo in aree particolarmente poco popolate (quindi con pochi sottoservizi e poche derivazioni) può essere assimi-



lata ad una sorta di "radiografia" planimetrica dell'area indagata. Pertanto in generale nessuna elaborazione che sia estratta direttamente dalle tomografie, piuttosto che dalle sezioni radar, può essere considerata completamente affidabile.

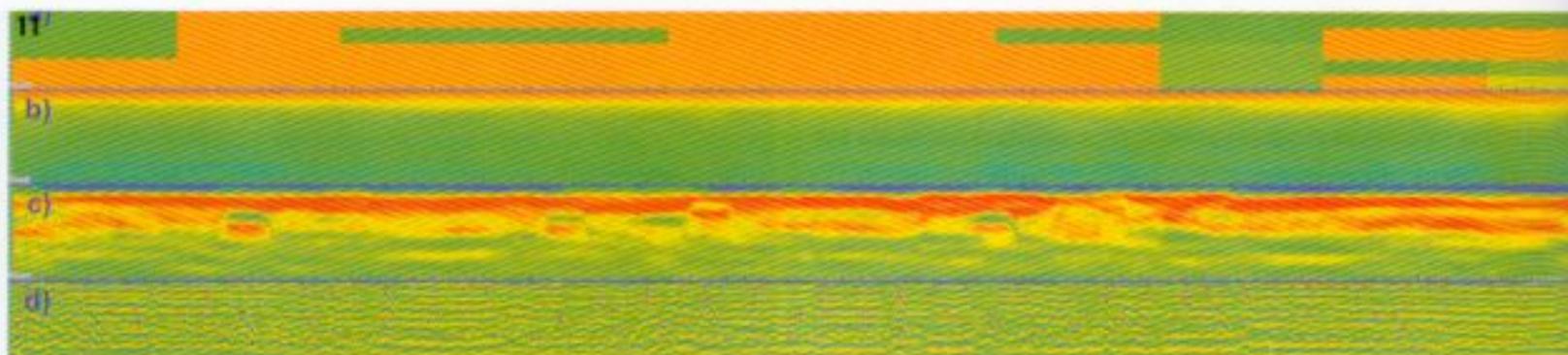
Sicuramente disporre, contemporaneamente all'esame dei radargrammi, della visione delle tomografie sovrapposte alla cartografia, risulta un ausilio determinante in quanto, mentre si insegue la probabile immagine radar di un tubo su radargrammi consecutivi, si può nello stesso tempo verificare se, sulla tomografia, si sta inseguendo una traccia indicante la probabile presenza di un tubo.

Se poi l'inseguimento incrocia anche chiusini rappresentati nella cartografia ed identificati in superficie durante il rilievo, o altri elementi di superficie che identificano univocamente un determinato sottoservizio, si dispone di almeno tre informazioni di qualità differente che convergono verso un unico risultato: l'identificazione di quel determinato sottoservizio. Questo è ciò che nei sistemi radar dell'ultima generazione si intende per interpretazione assistita da computer.

Le attuali frontiere nella ricerca, in corso in questo settore, guardano verso un'automazione completa di queste fasi, nelle quali attualmente entra ancora in gioco l'esame visivo dei radargrammi da parte dell'operatore, sebbene ciò

9. Esempio di radargrammi generati da un sistema RIS/ME.

10. Dettaglio delle tomografie estratte da un sistema RIS/ME.



avvenga in forma massicciamente assistita da parte del software, con il risultato che, rispetto ai primi sistemi di questo tipo, oggi non è più necessario che a condurre l'indagine e l'interpretazione sia personale dotato di qualifiche e capacità molto particolari.

Ciò significa, in sostanza che con i sistemi radar più avanzati la competenza richiesta agli operatori non è più quella specialistica attinente ai radar, ma quella relativa all'uso di software e tipicamente di sistemi CAD.

RICONOSCIMENTO TERRENI

Un'ulteriore capacità che questi sistemi radar sviluppano, è quella legata al riconoscimento terreni. Occorre immediatamente chiarire che parlando di riconoscimento terreni, non si vuole intendere una funzionalità che consente di ottenere una canonica classificazione di tipo geologico; quanto piuttosto la possibilità di attuare quello che nella tecnica dell'analisi dei segnali viene detto clustering, ovvero letteralmente raggruppamento in classi omogenee, definite secondo un criterio che risulti fisicamente discriminabile per il radar, e quindi riconoscimento dell'appartenenza di un dato terreno ad una delle classi predefinite.

Questa capacità del sistema è legata quindi, inizialmente, ad una procedura di preclassificazione, quindi ad una verifica di applicabilità, alla costruzione di data base di riferimento ed infine ad una validazione della funzionalità di riconoscimento.

In termini più concreti, si stabilisce anzitutto secondo quale criterio i terreni (o in generale il mezzo di propagazione) debbano essere classificati. Quindi si verifica che il criterio scelto sia discriminabile dal radar: ad esempio il contenuto d'acqua è un criterio discriminabile, il colore del terreno no; la consistenza (roccia compatta, materiale sciolto più o meno grossolano, terreno tenero) è un criterio discriminabile, la qualità chimica dei costituenti no.

Definito e quindi verificata la validità del criterio di classificazione (mediante opportuni esperimenti condotti su un insieme base di campioni o di siti di caratteristiche note a priori) si eseguono una serie di determinazioni su un insieme, il più grande possibile, di campioni o siti con caratteristiche note, di cui sia ben nota anche l'appartenenza ad una delle classi predefinite. Queste de-

terminazioni consistono da una parte nella esecuzione di un'indagine radar e dall'altra un una serie di prove geotecniche di correlazione dei risultati ottenuti. Questo insieme costituisce il data base di riferimento.

Nel processo di riconoscimento il sistema confronta i dati radar raccolti istante per istante in sito, con quelli contenuti nel data base, assegnando al terreno presente in sito, secondo un criterio di minima distanza, una classe di appartenenza, tra quelle predefinite nel data base. Il risultato è costituito da una serie di sezioni nelle quali il terreno viene scomposto in classi di appartenenza, ciascuna delle quali evidenziata cromaticamente in maniera differente. Inoltre, questo genere di analisi consente di ricavare anche affidabili stratigrafie del sito indagato (figura 11)

SVILUPPI FUTURI

Le funzionalità esaminate rappresentano ciò che, allo stato dell'arte attuale, è oggi in grado di fare un sistema radar per la detezione servizi, la mappatura del sottosuolo ed il riconoscimento dei terreni. È fondamentale aver compreso che le principali e più avanzate funzionalità di questi sistemi, molto lontane da quelle che possono essere riprodotte dai tradizionali apparati georadar (la cui destinazione d'uso, si ribadisce, è ben differente), possono essere ottenute solo impiegando apparati dotati di componenti ed architetture specializzate per quest'impiego.

Per lo sviluppo futuro di questi sistemi molto, in futuro, potrà derivare dall'ulteriore miniaturizzazione e compattazione dei componenti che costituiscono l'apparato, nell'ottica di una più facile manovrabilità sul campo degli stessi.

Ma lo sviluppo futuro più rilevante, che oggi è possibile intravedere, potrà derivare soprattutto dalla messa a punto di procedure di riconoscimento automatico dei bersagli, e quindi in ultima analisi dall'automazione completa di tutte le fasi di post-elaborazione.

Quando questo obiettivo verrà raggiunto si disporrà di apparati che in modo automatico potranno processare enormi quantità di dati radar, con la velocità propria dei sistemi di elaborazione computerizzati, quindi con un impressionante incremento di produttività, lasciando all'operatore le sole funzioni di supervisione e controllo finale del risultato.

11. Riconoscimento terreni: a) mappa di riconoscimento terreni (ciascun colore rappresenta una classe differente di terreno); b) mappa di segmentazione; c) layering (ovvero estrazione degli strati identificati); d) sezione radar convenzionale.

12. Risultato finale di un'indagine radar eseguita con un sistema radar dedicato alla detezione servizi, alla mappatura del sottosuolo ed al riconoscimento terreni.

