

## Sensori radar innovativi per il telerilevamento

G. Alberti, L. Ciofaniello, M. Della Noce, S. Esposito, G. Galiero, S. Vetrella

CO.RI.S.T.A. - Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati  
Piazzale Tecchio 80, 80125 Napoli - Tel. 081-5939073, Fax 081-5933576, e-mail. corista@unina.it

### Sommario

Il presente lavoro intende descrivere alcuni dei sistemi di telerilevamento che il consorzio CO.RI.S.T.A. (Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati) ha sviluppato negli ultimi anni, mettendone in risalto le grandi potenzialità applicative offerte nel campo dell'osservazione a distanza.

In particolare, questo articolo presenta un sistema radar scatterometrico da aereo, che può essere considerato il precursore di un avanzato sistema SAR in fase di progettazione, e un sistema radar integrato da aereo e da terra per l'osservazione del sottosuolo per applicazioni archeologiche.

### Abstract

*This paper is aimed to describe some of the main remote sensing systems recently developed by consortium CO.RI.S.T.A. (Consortium for Research on Advanced Remote Sensing Systems). An airborne scatterometer system and an integrated ground penetrating radar system for archaeological applications are presented in the following.*

### Introduzione

Negli ultimi anni, i sensori a microonde stanno svolgendo un ruolo sempre più importante nel panorama mondiale del telerilevamento. I sostanziosi investimenti destinati dai Paesi più progrediti, tra cui l'Italia, allo sviluppo di sensori a distanza innovativi e alla programmazione di nuove missioni aerospaziali, testimoniano il crescente interesse della comunità scientifica verso i dati telerilevati a microonde. Il motivo principale di quest'interesse è da ricercarsi nelle notevoli potenzialità applicative che offrono questi sensori sia nel settore militare che in quello civile.

Con il passare del tempo, le richieste sempre più stringenti della comunità scientifica di prodotti accurati ad un più basso costo, ha fatto nascere l'esigenza di realizzare sensori che unissero prestazioni più spinte con dimensioni e peso contenuti in modo da essere facilmente alloggiati su piattaforme aerospaziali di basso costo operativo.

In questo ambito, ormai da tempo sono finalizzati gli sforzi del consorzio CO.RI.S.T.A. che riunendo in sé le capacità di ricerca dei due atenei Napoletani e di quello Barese con quelle ingegneristiche e realizzative della Finmeccanica S.p.A. e della Laben ha avviato numerose iniziative nazionali ed internazionali dedicate alla realizzazione di sistemi di telerilevamento aerospaziale e di rilevamento in situ.

Tra questi, nei paragrafi successivi sono descritti un sistema scatterometrico da aereo, che costituisce un primo passo verso un avanzato sistema SAR interferometrico da realizzare a breve, ed un sistema integrato di penetrazione del suolo composto da un sensore da aereo ed uno da terra.

### Scatterometro

Su finanziamento dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) il consorzio CO.RI.S.T.A. ha realizzato, nei laboratori di Napoli, un prototipo di un avanzato scatterometro da montare a bordo di piccole piattaforme aeree. La scelta di realizzare un sistema da aereo si sposa con l'esigenza di avere uno strumento capace di acquisire informazioni di backscattering su ampie aree, quali quelle coperte dai moderni sistemi SAR da aereo e da satellite, in breve tempo.

Inoltre, la possibilità di acquisire dati da aereo rende il sistema più versatile, poiché, mentre da una parte è possibile utilizzare lo strumento per caratterizzare elettromagneticamente l'area osservata con un'accuratezza molto spinta, dall'altra, applicando procedure di elaborazione di tipo SAR, è possibile ottenere immagini dell'area osservata con una migliore risoluzione spaziale a discapito di quella radiometrica.

Uno strumento di questo tipo è molto richiesto dalla comunità scientifica poiché può trovare varie ed importanti applicazioni (Ulaby et al., 1981) quali lo studio della conformazione dei suoli per scopo modellistico, l'analisi del contenuto di umidità del terreno, lo studio delle correnti marine superficiali, l'analisi di suoli nudi e rocciosi (vulcanici), lo studio dell'ambiente con particolare riguardo allo stato della vegetazione o più in generale della biomassa che ricopre la superficie terrestre, nonché, in concomitanza a campagne di telerilevamento fatte con radar ad apertura sintetica (SAR), a fini validativi e di calibrazione.

Per soddisfare nel migliore modo possibile queste applicazioni, lo scatterometro è stato progettato per operare non solo in banda C (5.3 GHz) ma anche in banda Ku (13.575 GHz), acquisendo le quattro possibili combinazioni di polarizzazioni lineari (HH, HV, VH, VV) in entrambe le bande trasmesse.

Il sistema d'antenna è progettato in modo da orientare meccanicamente in volo il fascio d'antenna in modo da ottenere un intervallo di funzionamento dell'angolo d'incidenza tra 5° e 60° con una quota operativa di 1000 m che ben si adatta ad aerei di piccola dimensione su cui montare lo strumento.

Il prototipo realizzato è un sistema *ranging FM-CW* (Hallikainen et al., 1993), ovvero che sfrutta il movimento della piattaforma per ottenere una buona risoluzione radiometrica e la modulazione di frequenza per raggiungere un'alta risoluzione geometrica. Il risultato sono delle immagini di elevata risoluzione geometrica dove il valore del generico pixel rappresenta, con buona precisione, il valore dell'energia irradiata dalla zona di terreno che il pixel rappresenta. In tabella 1 sono riassunti i principali parametri operativi del sensore. Il segnale trasmesso è continuo e modulato linearmente in frequenza. Per entrambe le bande C e Ku esso è realizzato a partire da un generatore di chirp a radiofrequenza, traslando in alto la frequenza mediante successivi moduli di *up-conversion*. Il componente scelto come generatore di chirp è un nuovo modello basato sulla sintesi digitale diretta di frequenza. Ciò costituisce un elemento di una certa innovatività del prototipo e aggiunge flessibilità in quanto è possibile programmare in maniera ampia la rampa lineare di frequenza in termini di durata e frequenze di start e stop.

Per quanto riguarda il sistema di antenne, per ottimizzare l'alloggiamento a bordo della piattaforma aerea in termini di ingombro, peso e minore turbativa possibile all'aerodinamica, si è pensato all'utilizzo di un'antenna a parabola di tipo Cassegrain per la banda C e un'antenna a parabola classica per l'antenna Ku che viene appoggiata sull'iperbole che funge da riflettore secondario per la parabola Cassegrain in banda C. La configurazione finale è mostrata in figura 2.

Segnale trasmesso		Filtro IF	
Tipo	Chirp digitale	Tipo	Ellittico
Banda	300 MHz	Ordine	14
Tempo di modulazione	1 ms	Banda passante	2-4.25 MHz
<b>Antenne</b>		Ripple in banda	0.1 dB
Diametro banda Ku	0.28 m	Stopband	1.5 - 5.5 MHz
Diametro banda C	0.84 m	Attenuazione (in stopband)	-83 dB
Angolo di incidenza	5° ÷ 60°	<b>Sottosistema digitale</b>	
<b>Piattaforma aerea</b>		Campionamento	12.5 MHz
Quota di volo	1000 m	Lunghezza FFT	8192
Velocità operativa	80+90 m/s	A/D converter	12 bit

Tabella 1 – Principali parametri operativi dello scatterometro

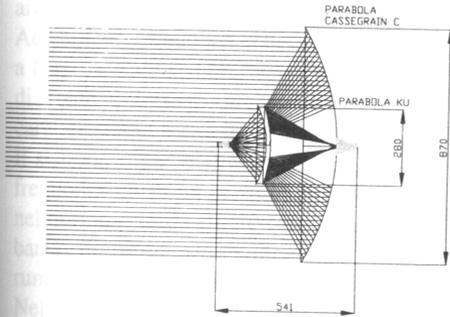


Figura 2 – Configurazione del sottosistema d'antenna per lo scatterometro (dimensioni in mm)

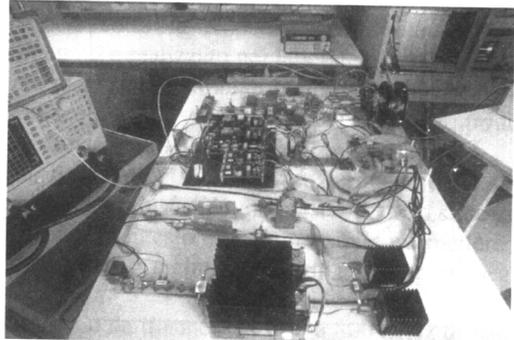


Foto 3 – Prototipo dello scatterometro in fase di test e misura in laboratorio

Il progetto della parte a frequenza intermedia (IF) è stato eseguito attraverso simulazioni software in base ai parametri delle antenne, le caratteristiche operative della piattaforma aerea, i diversi angoli di incidenza desiderati, cercando di ottimizzare al meglio le prestazioni del sistema.

La scelta adottata è stata quella di avere un unico filtro che coprisse l'intera banda d'interesse al fine di consentire una variazione continua dell'angolo di off-nadir e di semplificare la realizzazione ed i costi della sezione ad IF. Lo svantaggio di avere un unico filtro è nel maggior rumore termico che interessa la catena di ricezione, in quanto esso potrebbe essere molto minore per piccoli angoli di off-nadir. Bisogna però osservare che nell'ottica di avere un sistema con prestazioni in termini di SNR invariante in funzione dell'angolo di off-nadir, il maggior rumore è più che compensato dalla maggiore potenza ricevuta dal sistema per piccoli angoli di off-nadir.

La risultante risoluzione in *ground range* e l'estensione dello *swath* ottenibili sono riportati in figura 4 al variare dell'angolo di off-nadir.

Il software di controllo e temporizzazione è stato sviluppato sotto LabVIEW al fine di rendere più semplice ed immediata l'interfaccia con l'utente e prevede l'utilizzo di un PC commerciale. Il sottosistema di acquisizione è costituito da un *A/D converter* commerciale su *bus PCI*, mentre quello di temporizzazione e controllo è stato sviluppato dal CO.RI.S.T.A. con l'utilizzo di microcontrollori e *Complex Programmable Logic Device (CPLD)*.

Al fine di valutare le reali prestazioni dello scatterometro in termini di precisione nella misura del coefficiente di *backscattering* ( $\sigma^0$ ) sono state effettuate molte analisi teoriche considerando i parametri di sistema riportati in tabella 1 ed i valori noti di  $\sigma^0$  per vari tipi di terreni riportati in letteratura (Ulaby, Dobson, 1989). In base a queste analisi teoriche e tenendo conto dei vincoli temporali imposti dal sottosistema di acquisizione si è dimensionato il sistema in modo da mediare 20 misure consecutive per ciascuna polarizzazione, ottenendo una precisione nella misura di  $\sigma^0$  di  $\pm 1.5$  dB per il 90 % del tempo di acquisizione. L'effetto della media porta la risoluzione *along-track* ad un aumento di 7.2 m nel peggiore dei casi che è del tutto trascurabile rispetto la dimensione del *foot-print* come si può desumere dalla figura 4.

Infine, la procedura di calibrazione messa a punto per questo sistema è innovativa rispetto a quelle esistenti in quanto prevede l'utilizzo di una sorgente speculare a quella in trasmissione che, opportunamente ritardata rispetto la primaria, permette di simulare tutte le condizioni reali di funzionamento dello strumento.

Nel laboratorio del CO.RI.S.T.A., oltre alla caratterizzazione dei singoli componenti del sistema, sono stati effettuati una serie di test al fine di valutare le reali prestazioni del sistema. La foto 3 mostra il prototipo dello scatterometro durante la fase di *test* e misura in laboratorio.

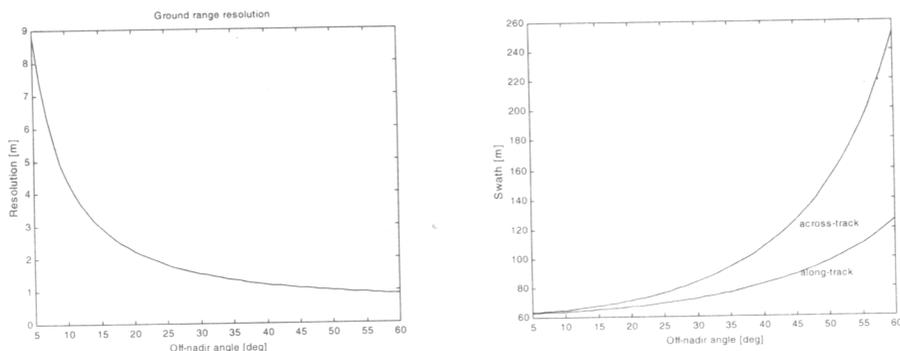


Figure 4 – Prestazioni ottenibili con lo scatterometro: risoluzione a terra e swath

Il primo parametro valutato è stato la dinamica che è risultata superiore ai 60 dB delle specifiche progettuali dello strumento. Le altre misure effettuate, in varie condizioni operative, relative alla risoluzione del sistema, l'accuratezza del tempo di ritardo e la precisione nella misura della potenza ricevuta sono altrettanto buone ed in accordo con i requisiti di sistema.

### Sistema SAR interferometrico

Partendo dalle esperienze accumulate durante la realizzazione dello scatterometro, la cui progettazione è stata anche indirizzata a permettere un'eventuale elaborazione sintetica dei dati a patto di rinunciare ad una spinta precisione radiometrica, il consorzio CO.R.I.S.T.A., su finanziamento del Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.), ha avviato la fase di progettazione di un avanzato sistema ad apertura sintetica SAR. Questo sensore sarà realizzato per operare in multi-banda, multipolarizzazione ed in modalità di acquisizione classica, *spotlight* nonché interferometrica, con risoluzione geometrica, angolo di *off-nadir* ed estensione dello swath variabile.

I suoi impieghi sono svariati: dalle applicazioni militari di riconoscimento, sorveglianza e inseguimento alle applicazioni civili di monitoraggio e pianificazione territoriale, gestione dei disastri naturali, controllo e gestione dell'ambiente nonché di ricostruzione dei profili altimetrici del suolo.

### Sistema radar a penetrazione

L'esplorazione del sottosuolo mediante tecniche non invasive e non distruttive può sicuramente rientrare nell'ambito del telerilevamento. In questo caso si tratta di "rilevare" oggetti di interesse e di trarne informazioni circa la loro conformazione fisico-chimica e geometrica stando a distanza ed avendo come mezzo di separazione non l'atmosfera, come nel telerilevamento classico, ma terreni e materiali più disparati.

Le applicazioni pratiche sono vastissime (Daniels, 1996) spaziano nel campo civile, militare, sociologico ed umanistico, come l'individuazione e la caratterizzazione di falde acquifere, giacimenti petroliferi e di gas, le esplorazioni mineralogiche e geotecniche, il tracciamento di tubi e cavi sotterranei, l'individuazione di reperti archeologici, l'individuazione di mine e altri reperti bellici, le ricerche legali.

In questo campo il consorzio CO.R.I.S.T.A. è molto attivo da alcuni anni e, su finanziamento del M.U.R.S.T., sta realizzando un sistema integrato di radar a penetrazione da aereo e da terra per applicazioni archeologiche.

I due sistemi sono integrabili soprattutto dal punto di vista della risoluzione e della capacità di osservazione e, quindi, si specializzano per applicazioni diverse ma complementari. Il sistema da aereo è dedicato all'individuazione e delimitazione di un sito di interesse archeologico, mentre il sistema da terra ha come obiettivo l'individuazione e caratterizzazione di singoli reperti

archeologici. Il prototipo del sistema da aereo è sotto la responsabilità diretta dell'Alenia Aerospazio, mentre il sistema da terra è stato progettato e realizzato nei laboratori del CO.RI.S.T.A. a Napoli. Tale sistema verrà validato nei prossimi mesi su siti simulati opportunamente realizzati e di reale interesse archeologico appositamente scelti nella regione Campania. Le principali caratteristiche tecniche del sistema da terra sono espresse in tabella 5.

Il sistema radar è *stepped-frequency* (Koppenjan, Bashforth, 1993), ovvero trasmette delle singole frequenze entro un certo intervallo e con un fissato passo riuscendo, in questo modo, a sintetizzare, nel dominio della frequenza, un impulso molto stretto. In questo modo è possibile trasmettere delle bande di frequenza molto ampie in maniera flessibile e raggiungere degli alti rapporti segnale-rumore e, quindi, un'alta sensibilità e dinamica.

Nel caso specifico il sistema è stato progettato in modo da trasmettere fino a 800 MHz di banda in un intervallo 100-900 MHz, valore che offre un buon margine rispetto i 500 Mhz necessari a raggiungere il requisito applicativo di 10 cm in terreni medi ( $\epsilon_r=9$ ).

La catena di ricezione è stata progettata in modo da assicurare un livello molto basso di rumore di fase e termico in modo da raggiungere un rapporto segnale-rumore finale molto alto (> 20 dB) necessario al fine di ottenere una precisa misura di fase anche in presenza di segnali molto deboli.

Il radar è in grado di lavorare in maniera continua ed interrotta (Stickley et al., 1996), impiegando, in quest'ultima modalità, impulsi di 10 ns per ogni frequenza per eliminare il segnale di accoppiamento diretto tra le antenne, che è uno dei problemi maggiori per questo tipo di sistemi bistatici.

Il sistema è stato dimensionato in modo da trasmettere la potenza sufficiente (5 W) a rilevare oggetti fino a 3 m di profondità in terreni medi, come dettato dai requisiti applicativi.

Il sistema radiante è stato progettate in modo da coprire l'intervallo di frequenza che va dai 100 ai 900 MHz con un'unica antenna. La scelta è caduta sull'antenna log-spirale il cui diametro è stato scelto pari a 38 cm in modo da soddisfare le suddette specifiche. Quest'antenna opportunamente schermata offre contemporaneamente un efficiente trasferimento della potenza verso la zona da osservare ed un ottimo isolamento dall'ambiente esterno.

Il sottosistema di acquisizione è costituito da un avanzato A/D *converter* commerciale su *bus VXI* capace di raggiungere 18 bit effettivi che offrono un certo margine di sicurezza rispetto i 16 bit effettivamente necessari per l'elevata dinamica del sistema.

Tutta la parte a radio-frequenza è stata realizzata nei laboratori del CO.RI.S.T.A. utilizzando sia componenti commerciali opportunamente scelti che alcuni componenti *custom* come i filtri dello stadio a frequenza intermedia. Anche il sottosistema di temporizzazione e controllo è stato realizzato interamente dal consorzio facendo uso di microcontrollori e CPLD.

L'architettura del sistema, in modalità continua, si basa su una conversione eterodina a frequenza di 1 MHz per evitare il problema del rumore *flicker*, mentre, in modalità interrotta, sono necessarie due successive conversioni che portano il segnale prima a 100 MHz e poi ad 1 MHz per problemi di *aliasing* del segnale ricevuto. Lo schema di principio è riportato in figura 6.

	Sistema da terra	Sistema da aereo
Tipo	Bistatico <i>stepped-frequency</i>	<i>Stepped-frequency chirped</i>
Intervallo di frequenze	100 MHz to 900 MHz	100 MHz to 500 MHz
Banda trasmessa	Fino a 800 MHz	300 MHz
Banda chirp		4 MHz
Lunghezza dell'impulso	> 100 $\mu$ s	0.2-5 $\mu$ s
Dinamica	> 100 dB	> 90 dB
Modalità di funzionamento	Continuo ed interrotto	
Potenza trasmessa	5 W	500 W
Antenne	Log-spirali	Log-periodica
Piattaforma aerea		VIATOR AP68TP-600

Tabella 5 – Principali caratteristiche del sistema integrato di radar a penetrazione

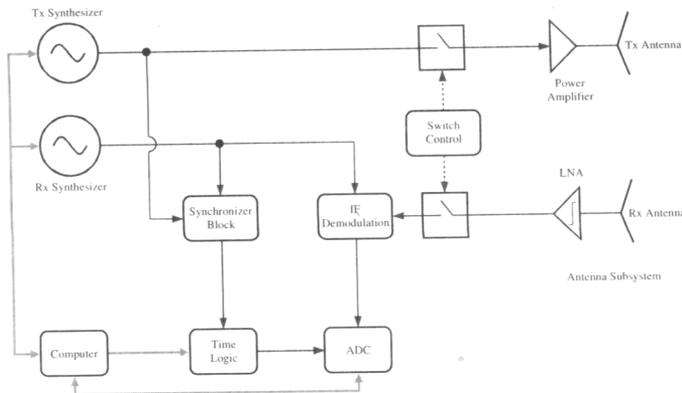


Figura 6 – Architettura di principio del radar a penetrazione da terra

La base dei tempi per consentire una corretta demodulazione del segnale è realizzata con una opportuna catena di sincronismo che è stata progettata in modo da risultare robusta rispetto variazioni delle caratteristiche dei componenti e delle sorgenti. Queste ultime sono state scelte in modo da assicurare un elevato livello di purezza e brevi tempi di assestamento dopo ogni commutazione di frequenza. Inoltre, i due sintetizzatori scelti sono completamente programmabili in termini di intervallo e numero di frequenze, conferendo al prototipo una notevole flessibilità operativa. L'intero sistema è controllato da un software sotto LabVIEW che gira su scheda Pentium su bus VXI.

Il radar è, inoltre, dotato di un sistema di posizionamento automatico che permette il movimento indipendente delle due antenne trasmittente e ricevente in maniera tridimensionale.

Questo sistema di posizionamento permette di velocizzare in maniera significativa la fase di misura sul campo e di raggiungere la precisione e la ripetitività necessaria per soddisfare il requisito applicativo di 30 cm di risoluzione orizzontale.

Per quanto riguarda il sistema da aereo, le sue principali caratteristiche sono espresse in tabella 5.

Il principio di funzionamento è lo stesso di quello da terra, ma in questo caso la banda trasmessa è minore (fino a 300 MHz) ma sufficiente per raggiungere l'obiettivo di 30 cm di risoluzione orizzontale richiesta dall'applicazione. In questo caso, per problemi di velocità di commutazione, la banda da trasmettere è realizzata traslando in frequenza un segnale *chirp* di base di 4 MHz di banda. L'obiettivo di 3-5 m per la risoluzione orizzontale sarà raggiunta con tecniche di elaborazione ad apertura sintetica o con tecniche di inversione elettromagnetica tri-dimensionali.

## Bibliografia

- F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Funk (1981) – *Microwave remote sensing* – Vol. 2.  
 M. Hallikainen, J. Hyypä, J. Haapanen, T. Tares, P. Ahola, J. Pulliainen, M. Toikka (1993) – *A Helicopter-Borne Eight-Channel Ranging Scatterometer for Remote Sensing. Part I: System Description* – IEEE TGRS, Vol. 31, No. 1, 161-169.  
 F. T. Ulaby, M. C. Dobson (1989) - *Handbook of Radar Scattering Statistics For Terrain* - Artech House.  
 D. J. Daniels (1996) – *Surface-Penetrating Radar* – Electronics & Communication Engineering Journal, 165-182.  
 S. Koppenjan, M. Bashforth (1993) – *Underground and Obscured Object Imaging and Detection* – SPIE Proceeding, Volume 1942, 44-55.  
 G. F. Stickley, D. A. Noon, M. Cherniakov, I. D. Longstaff (1996) – *Current Development Status of a Gated Stepped-Frequency GPR* - Proceeding of GPR'96, 311-315.