Dalla Fotogrammetria alla Radargrammetria

Un passaggio generazionale in atto

A prima vista potrà sembrare strano il termine Radargrammetria, ma è quello più adatto alla descrizione di una tecnica che si sta velocemente affermando ed è oggi in grado di sostituire efficacemente la Fotogrammetria nella descrizione del Territorio. L'una deriva cartografia da immagini fotografiche, l'altra da immagini radar, ma la produzione e l'uso delle due è un po' diverso.
L'utilizzazione inizialmente a scopo militare è oggi trasportata nel civile per la creazione prima di DTM e poi sempre più spinta fino alla creazione di cartografia del tipo ortofotografica. La risoluzione raggiunge i 10 cm e inoltre sono visibili elementi invisibili all'occhio umano.

La prima cosa che colpisce all'osservazione di un'immagine radar è che a scala ridotta sembra abbastanza simile ad una fotografia aerea bianco nera. Ma più ci si addentra nell'osservazione attenta ingrandendola, più si notano alcune differenze importanti, come ad esempio le ombre che sono date non dall'illuminazione solare, ma dalla riflessione del radar.

Per la comprensione di tali differenze è utile una introduzione alla tecnologia SAR (Synthetic Aperture Radar).

Il radar SAR a banda X lavora su una lunghezza d'onda molto più lunga della luce visibile che colpisce i sensori ottici.

Lo schema di funzionamento di un SAR Interferometrico è basato sull'osservazione di un impulso radar trasmesso a terra ed al ritorno del riflesso ricevuto da due antenne riceventi separate (*Figura 1*). Tale ritorno di segnale, ricevuto in due posizioni separate da una distanza conosciuta, fornisce la base per derivare i dati di altezza. In termini topografici potremmo dire che è lo stesso schema geometrico di intersezione in avanti. Oppure potremmo dire: due immagini dalle prospettive differenti, in definitiva un concetto familiare ai fotogrammetristi.

In completa analogia alle immagini ottiche aeree è possibile ottenere immagini SAR ortorettificate utilizzando lo stesso DEM (Modello Digitale del Terreno) generato con l'elaborazione interferometrica. In pratica l'immagine SAR si può presentare geometricamente corretta come una ortofoto. Bisogna però tenere sempre presente che le caratteristiche che si osservano al suolo sono dovute alla riflessione del radar ricevuta sotto un particolare angolo. L'analogia con una fotografia obliqua è opportuna.

Qui troviamo la prima vera differenza tra immagini ottiche e SAR. Non stiamo osservando il suolo da un punto di vista nadirale come in una fotografia aerea e ciò ha una influenza fondamentale nella rappresentazione delle caratteristiche del terreno.

Il primo fattore che salta all'occhio è la distorsione d'immagine diversa.

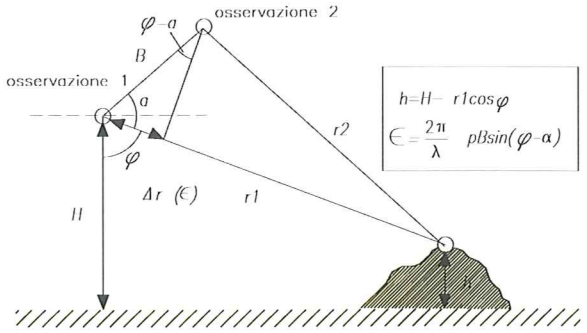
La distorsione del terreno è perpendicolare alla traiettoria di volo, quindi gli oggetti alti sono spostati verso il sensore, mentre nelle fotografie aeree gli oggetti alti sono spostati radialmente rispetto al punto nadirale.

La distorsione di un elemento dipende dalla sua posizione sull'immagine relativa alla distanza dal radar. Le categorie primarie di queste distorsioni nell'immagine SAR sono:

- l'accorciamento delle distanze (*foreshortening*),
- il ripiegamento riflesso (*layover*)
- le ombre (*shadowing*).

Nelle immagini tradizionali ottiche vediamo la quantità di luce solare riflessa da un oggetto ed il sistema si definisce passivo. Al contrario l'immagine radar viene da un sistema attivo: un'antenna trasmittente fornisce la fonte di energia per illuminare l'obiettivo interessato e un'antenna ricevente registra la radiazione di ritorno riflessa dalla superficie. E' chiaro che la fonte di energia solare e quella del radar verranno diversamente assorbite dalle superfici al suolo, generando quindi una evidente diversità tra le due.

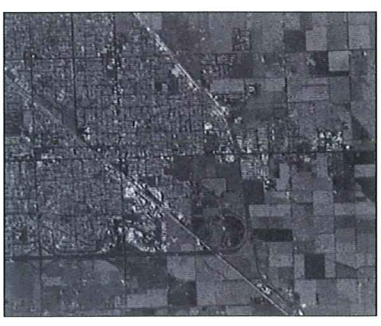
La riflessione dell'energia irradiata è influenzata da vari parametri; alcuni dipendenti dal sistema, altri dalle caratteristiche del suolo.



B: baseline length (separazione tra due centri di fase dell'antenna)
α: baseline angle (angolo di inclinazione rispetto alla base)
φ: angolo di vista dall'osservazione 1
Δr: campo differenziale, proiezione della baseline B lungo r1
$\in$: fase interferometrica, differenza di fase tra due osservazioni
p: numero di canali di trasmissione

Figura 1 Schema geometrico del Sar interferometrico

Foto aerea



Corrispondente immagine SAR

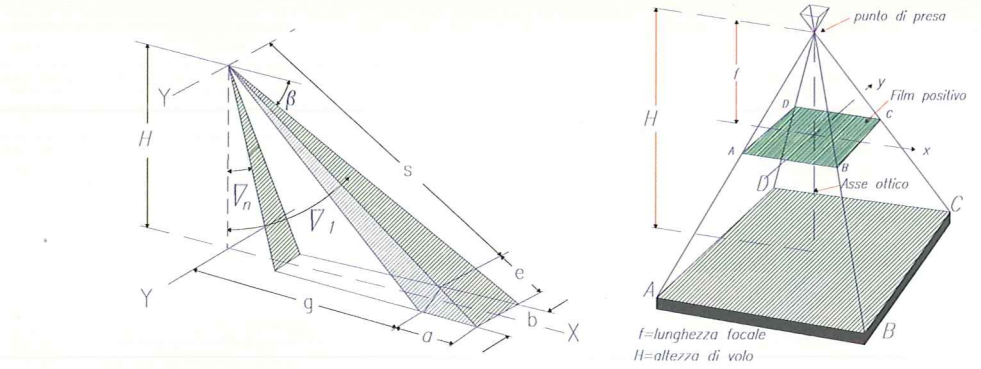


Figura 2: Presa SAR e presa fotogrammetrica: diverse geometrie.

L'**angolo locale di incidenza** *(Local Incidence Angle)* è uno dei principali parametri relazionato alla pendenza o conformazione della superficie del suolo riflettente. Più forte è il segnale radar riflesso alla ricevente, più luminosa è l'immagine. Le parti colpite più rivolte verso il radar avranno un più piccolo angolo locale di incidenza, più ritorno di energia del radar e quindi un pixel più luminoso. Per contro, l'immagine è più scura quando ad esempio i pendii non sono rivolti verso l'antenna.

Il **riflesso** *(Backscatter)* è la parte del segnale radar che ritorna all'antenna emittente. Le superfici del suolo causano una dispersione diffusa del segnale e rappresentano i toni medi in un'immagine: le varie densità grigie della scala fra nero e bianco. Le superfici regolari (acqua ad esempio) si comportano più come uno specchio e rimbalzano il segnale radar angolare via dall'antenna, con conseguente ritorno nullo e produzione di un'immagine scura. Naturalmente l'acqua turbolenta produce alcuni angoli locali di incidenza che riflettono bene il segnale all'antenna producendo una specie di "rumore" visibile sull'immagine della superficie dell'acqua.

Un ritorno molto forte (pixel luminosi o chiari) è dato da una superficie liscia inclinata (*corner reflector*). E' il caso di elementi che si elevano ad angolo retto rispetto alla superficie, come i lati degli edifici. In questi la maggior parte del segnale radar è riflesso di nuovo all'antenna di ricezione.

Per questo gli edifici hanno un effetto visivo particolare, con i lati che sono più pronunciati rispetto ai terrazzi e ai profili del tetto diversamente dalle immagini tradizionali ottiche.

La **costante dielettrica complessa** *(Complex dielectric properties, CDC)* è una misura delle caratteristiche elettriche degli oggetti riflettenti. Un più alto CDC aumenta la riflessione del radar. La presenza di umidità della vegetazione o del terreno risulta in un più alto CDC e può aumentare la riflessione del radar con conseguente maggiore luminosità del pixel. Gli oggetti metallici quali i ponti in metallo, i binari ferroviari ed i tetti d'acciaio delle costruzioni forniscono più alti ritorni del radar.

La **deformazione di altezza** *(Relief Displacement)* nell'immagine SAR si presenta sotto tre tipi di modalità chiamate rispettivamente: *Foreshortening, Layover e Shadows*.

La **compressione** *(Foreshortening)* agisce sulle superfici degli oggetti che sono inclinati verso il radar. Ciò inoltrre causa una immagine relativamente più luminosa dei pendii inclinati in questa direzione.

Ciò è illustratato meglio con lo schema in figura 3.

La vera distanza al suolo fra la base della montagna A, il picco B e la base C è approssimativamente uguale. A causa della posizione del punto di osservazione laterale dell'immagine SAR, il ritorno del radar dal punto B sarà ricevuto prima rispetto alla sua distanza da A. Il risultato è una compressione dell'immagine tra A e B rappresentata dal rettangolo blu e rosso nella parte superiore dello schema.

Gli effetti di *Foreshortening* si accentuano per gli oggetti più vicini al radar e si riducono a distanze superiori.

Il **Ripiegamento** *(Layover)* è il caso estremo di *foreshortening* e si presenta con forti angolazioni dei pendii, spece in oggetti più vicini al radar.

Nella figura 4 il ritorno del segnale radar dal picco B è ricevuto prima della base A, il che induce il picco ad essere spostato o ripiegato sopra la base A della montagna. Come il foreshortening, il layover tende a ridursi allontanandosi dalla posizione di emissione del segnale radar.

Nel processo di ortorettifica delle immagini SAR le deformazioni del layover sono ricondotte di nuovo alle loro posizioni corrette, il pixel viene quindi allungato o spalmato ed a volte l'allungamento è talmente forte da generare vuoti totali di pixel. Queste zone vengono denominate spesso cornflakes (in funzione del loro aspetto). La situazione è molto simile alla stessa deformazione di pixel che si ha nella ortorettifica di immagini ottiche su ripidi pendii.

L'**ombra** *(Radar Shadow)* è analoga all'immagine ottica ove sono più scure le zone dove nessun segnale di ritorno è stato rice-

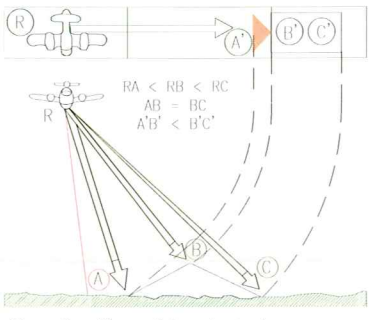


Figura 3 : effetto di Foreshortening

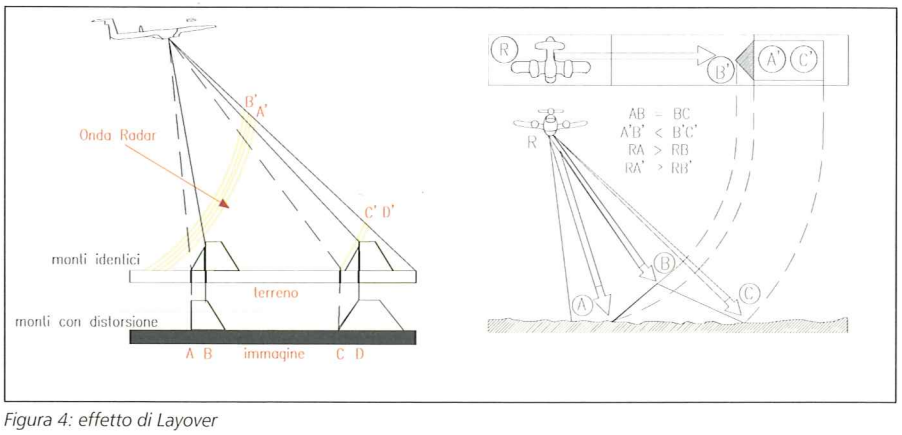


Figura 4: effetto di Layover

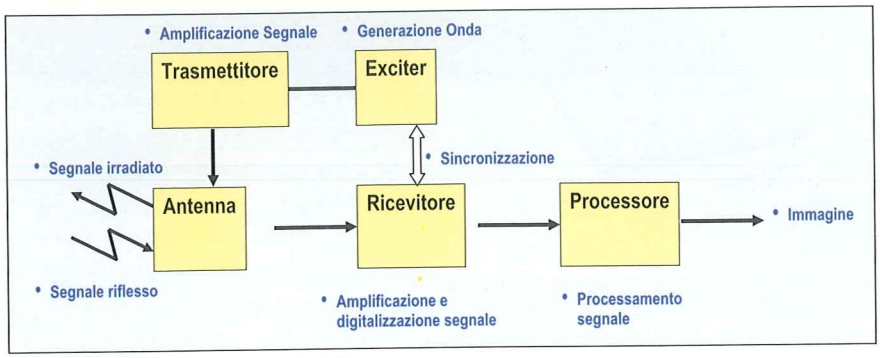


Figura 5 Schema di funzionamento del SAR

Le tecnologie SAR oggi sviluppate con interferometria, che consente di acquisire la terza dimensione, in completa analogia alla fotogrammetria stereoscopica, nate inizialmente per scopi militari, come d'altronde anche la fotogrammetria aerea, sono finalmente al servizio degli scopi civili, consentendo di analizzare porzioni di territorio vastissimo in pochi secondi e con risoluzioni che arrivano e superano i 30 cm.

vuto. Le ombre del radar si presentano dietro gli oggetti alti e sono più accentuate per gli oggetti più distanti dalla sorgente di emissione.

A questo punto è evidente che le immagini SAR presenteranno problemi di interpretazione diversi, ma riconducibili, a quella delle tradizionali immagini ottiche con conseguente affinità dei procedimenti geometrici.

Ma come è realizzato un sistema radar SAR? E' evidentemente diverso dalle camere fotogrammetriche. Uno schema sommario si riporta nella figura 5.

Il peso è notevole e solo aerei particolarmente attrezzati sono in grado di sopportare il sistema. Il processo di acquisizione necessita inoltre di "presegnalizzazione" con dei Ground Control Points, punti di appoggio a terra, realizzati con particolari riflettori, che vengono posizionati e determinati con tecniche GPS prima del volo. Il volo è comunque realizzato sempre con sistema di posizionamento GPS e inerziale al fine di avere la posizione in continuo delle antenne emettitrici.

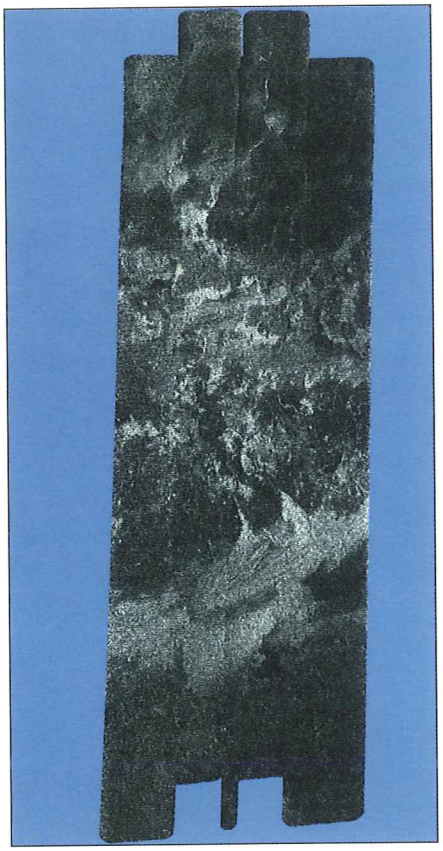


Immagine SAR di Titano

BANDE DI FREQUENZA RADAR

Designazione	*Intervallo di frequenza in Gigahertz*	*Intervallo di lunghezza d'onda in centimetri*
Banda P	*0.225 - 0.390*	*140.0 - 76.9*
Banda L	*0.390 - 1.550*	*76.9 - 19.3*
Banda S	*1.550 - 3.900*	*19.3 - 7.69*
Banda C	*3.900 - 5.750*	*7.69 - 5.20*
Banda X	*5.75 - 10.90*	*2.75 - 0.834*
Banda K	*10.90 - 36*	*2.75 - 0.834*
Banda Q	*36 - 46*	*0.834 - 0.652*
Banda V	*46 - 56*	*0.652 - 0.536*
Banda W	*56 - 100*	*0.536 - 0.300*

Riferimenti

R. E. Crawford, *Making the transition from photogrammetry to Radargrammetry,* INTERMAP

K. Chang, *Introduction to HISAR*, RAYTHEON

Autore

RENZO CARLUCCI

Glossario

RADAR

Acronimo di RAdio Detection And Ranging (Rilevamento e misura delle distanze per mezzo di radioelettricità). Tecnica o apparecchiatura - costituita da un trasmettitore, un'antenna e un ricevitore - che invia impulsi di radiazione elettromagnetica di una determinata lunghezza d'onda dell'ordine dei centimetri e raccoglie gli impulsi riflessi dal bersaglio. La tecnica radar viene perciò detta tecnica attiva. L'intervallo di tempo che intercorre tra l'emissione dell'impulso dall'antenna e la sua ricezione, da parte della stessa antenna, permette di misurare la distanza tra l'antenna e il bersaglio. L'analisi dell'intensità della radiazione riflessa dal bersaglio permette di ricavare informazioni circa la natura del bersaglio stesso. Nel telerilevamento la tecnica radar viene usata perché, oltre a fornire informazioni sulla riflettività delle superfici a quella determinata lunghezza d'onda, fornisce anche informazioni relative alla loro costante elettrica e al coefficiente di diffusione. Nella tecnica radar si utilizzano spesso impulsi di radiazione con polarizzazione orizzontale e polarizzazione verticale per avere possibilità di distinguere i diversi tipi di riflessione mediante il confronto fra la radiazione polarizzata inviata e la componente polarizzata riflessa. Inoltre la radiazione elettromagnetica a questa lunghezza d'onda ha la proprietà di attraversare la nebbia e gli strati di nubi permettendo quindi rilevamenti anche notturni e con qualsiasi condizione atmosferica. Il rilevamento radar risulta particolarmente utile per gli studi delle zone equatoriali che, come ben si sa, sono molto spesso coperte da nuvole. Le onde elettromagnetiche utilizzate dal radar hanno una profondità di penetrazione nel suolo molto più grande delle lunghezze d'onda della banda del visibile e dell'infrarosso. In casi particolarmente favorevoli di mancanza di umidità nel terreno si raggiunge la profondità di penetrazione di alcuni metri, come è avvenuto nell'esperimento SIR-A condotto nel deserto del Sahara tra il Sudan e l'Egitto che ha permesso di scoprire l'esistenza di un antico drenaggio.

RADAR AD APERTURA SINTETICA

- Synthetic aperture radar / SAR

Radar che utilizza la tecnica dell'antenna sintetica integrando molteplici impulsi riflessi dalla stessa cella di risoluzione a terra e che sfrutta l'effetto Doppler per produrre un film o un nastro magnetico della storia di fase che può essere elaborata in forma ottica o digitale per produrre una immagine.

ANTENNA SINTETICA

- Synthetic antenna

Processo che utilizza in modo particolare i segnali radar ricevuti da un'antenna al fine di simulare i segnali che sarebbero ricevuti se l'antenna avesse dimensioni molto maggiori. Sfruttando questo particolare sistema, per esempio nel caso del satellite SEASAT, con un'antenna la cui lunghezza era di 12 m si sono eseguiti rilevamenti come se la lunghezza dell'antenna fosse di 16 km. Il procedimento consiste nel memorizzare e confrontare i segnali di ritorno dalla superficie investigata, mentre il sistema di riferimento si sposta (antenna che viaggia lungo la linea di volo): sfruttando così l'effetto Doppler si ottiene la maggiorazione delle dimensioni dell'antenna. In conclusione l'antenna sintetica serve per ottenere immagini con una risoluzione nella direzione di azimut maggiore di quella ottenibile con l'antenna reale. In genere maggiori sono le dimensioni d'antenna, migliori sono sia la risoluzione radiometrica che quella geometrica.

CELLA DI RISOLUZIONE

- Resolution cell

In una scena è la più piccola area considerata come sorgente unitaria di dati. Per il sensore MSS della serie Landsat la cella di risoluzione nominalmente è un rettangolo di lati 56 m x 59 m, corrispondente a circa mezzo ettaro (0.44 ha). Per il sensore TM dei Landsat 4 e 5, è un quadrato di 30 m x 30 m. Per i sensori del satellite SPOT è un quadrato di 20 m x 20 m in modalità multispettrale, o di 10 m x 10 m in modalità pancromatica.

CELLA DI RISOLUZIONE RADAR

- Radar resolution cell

In una scena è la più piccola area considerata come sorgente unitaria di dati. Le sue dimensioni sono determinate dalla risoluzione nella direzione dell'azimut e dalla risoluzione nel campo a terra che a loro volta dipendono dalle caratteristiche di funzionamento e costruzione del sistema.

RISOLUZIONE NELLA DIREZIONE DI AZIMUT

- Azimuth resolution

Nella tecnica radar ad antenna laterale è determinata dalla larghezza angolare della striscia di terreno illuminata dal fascio radar. In concreto due bersagli vengono risolti se nella direzione di azimut sono separati da una distanza maggiore della larghezza del fascio radar. La larghezza del fascio a terra è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione emessa dall'antenna e alla distanza antenna-bersaglio, mentre è inversamente proporzionale alla lunghezza dall'antenna.

RADIANZA

- Radiance

In un punto di una superficie ed in una direzione data è il rapporto tra l'intensità raggiante, nella direzione data, di un elemento infinitesimo di superficie che circonda il punto considerato, e l'area della proiezione ortogonale di questo elemento su un piano perpendicolare a questa direzione. Si misura in Watt al metro quadrato allo steradiante: [W m-2 sr-1].

RADIAZIONE

- Radiation

Energia emessa o propagata attraverso un mezzo materiale o attraverso lo spazio vuoto sotto forma di onde. Si hanno, per esempio, le onde elettromagnetiche o fotoni, le onde corpuscolari o raggi a e b, le onde sonore ed elastiche.

RADIAZIONE ASSORBITA

- Absorbed radiation

Radiazione che non viene né trasmessa né riflessa quando incide su materiali trasparenti od opachi. Tale radiazione viene trasformata, all'interno del materiale, in un altro tipo di energia, spesso energia termica.

EFFETTO DOPPLER

- Doppler effect

Cambiamento nella frequenza osservata di energia elettromagnetica causato da un moto relativo tra la sorgente e l'osservatore. Sfruttato nella tecnica radar per ottenere l'antenna sintetica.

INTENSITA' RAGGIANTE

- Radiance intensity

Flusso raggiante emesso da una sorgente puntiforme per unità di angolo solido in una direzione data. Si misura in Watt per steradiante (W sr -1).

FLUSSO RAGGIANTE

- Radiant flux / Radiant power

Potenza emessa, trasmessa o assorbita sotto forma di radiazione elettromagnetica. Indica la quantità di energia raggiante da un punto a un altro nell'unità di tempo. Il flusso raggiante si misura in Watt.

BANDE DI FREQUENZA RADAR

- Radar frequency band

Intervalli di frequenza della radiazione elettromagnetica utilizzati dai sistemi radar. Tali bande di frequenza vengono ancora designate con lettere dell'alfabeto originariamente usate per coprire un segreto militare.

INTERFEROGRAMMA

- Interferogramme

È l'immagine differenza di fase ottenuta sottraendo pixel a pixel i valori di fase di due immagini SAR.

INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE

- Differential inteferometry

Questa tecnica interferometrica necessita di almeno tre immagini SAR della stessa area: la prima e la seconda immagine vengono ustae per produrre un interferogramma della topografia del terreno, la seconda e la terza immagine per produrre un secondo interferogramma. I due interferogrammi sono quindi elaborati con la tecnica della differenza ottenendo così un interferogramma differenziale, che mette in evidenza qualsiasi cambiamento verificatosi sulla superficie dell'area in esame. Con l'ERS-1 si possono rilevare variazioni nella topografia dell'ordine dei centimetri, cioè alla scala delle lunghezze d'onda radar (5.7 cm) in gioco.

INTERFEROMETRIA SAR

- SAR inteferometry

Il segnale radar è rappresentabile da un numero complesso a, costituito da un'ampiezza o intensità r ed una fase j secondo la relazione: a = r e ij Ogni pixel di una immagine SAR contiene quindi informazioni sia sull'intensità che sulla fase del segnale retrodiffuso dalle superfici: l'intensità è legata alle caratteristiche di retrodiffusione del bersaglio, e la fase alla lunghezza del percorso antenna-bersaglio, ossia alla loro distanza. L'interferometria SAR è una tecnica che permette di estrarre informazioni precise sulla topografia terrestre mediante l'elaborazione dell'informazione di fase relativa a due o più immagini SAR acquisite sulla stessa area durante due orbite separate da una determinata distanza. Tale distanza è detta base della ripresa interferometrica (interferometry baseline) e per il satellite ERS-1 deve essere inferiore a 600 m. I valori di fase per ogni pixel corrispondente alla stessa area a terra nelle due riprese vengono sottratti l'uno dall'altro ottenendo un interferogramma, cioè una immagine che contiene solo l'informazione sulle differenze di fase: esse sono una misura della differenza di distanza di ogni pixel dalle due posizioni dell''antenna SAR. Conoscendo con precisione i parametri orbitali, è possibile ricostruire pixel a pixel la loro altezza e generare il modello numerico del terreno (Digital Elevation Model), per l'ERS-1 con un accuratezza dell'ordine di alcuni metri.

Estratto da http://milano.irea.cnr.it/3gloss/glossario.htm

SAR

Immagine SAR risoluzione 6m Range 74 Km

Il radar ad apertura sintetica o Synthetic Aperture Radar (SAR), in uso ormai da più di mezzo secolo, non solo è diventato uno degli strumenti più versatili per la ricognizione, la sorveglianza ed il rilevamento di bersagli da velivoli e satelliti militari, ma si è affermato anche come valido strumento per il mapping territoriale. L'iniziale sviluppo dei principi che stanno alla base della produzione di immagini tramite i radar si può far risalire agli studi condotti dalla Goodyear Aircraft Corporation, nel giugno 1951, mentre le prime immagini furono realizzate dall'Università dell'Illinois l'8 giugno 1953. Questa nuova tecnologia fu inizialmente sfruttata per applicazioni militari e rimase coperta dal segreto fino al 1964. Gli apparati, denominati all'inizio SLAR (Side Looking Airborne Radar - radar ad esplorazione laterale), furono utilizzati per la prima volta verso la fine degli anni '50, a bordo dei ricognitori strategici americani RB-47H ed RB-57D e fu solo nel 1968 che apparve il primo progetto non militare per produrre immagini radar, realizzato dalla Westinghouse Electric Corporation e Raytheon. L'elaborazione moderna dello SLAR è il radar SAR, che si differenzia dal precedente perché nel primo caso, la ricezione delle immagini si basava sull'ampiezza del fascio di emissione di energia elettromagnetica dell'antenna, mentre nel secondo sfrutta l'elaborazione digitale del segnale. Grazie a questa particolarità, il SAR permette di ottenere fotografie direttamente dalle onde radio.

Il sensore offre una risoluzione inferiore a 30 centimetri a distanze di centinaia di chilometri. Una particolare versione è stato ottimizzata per poter tenere sotto controllo aree coperte da fitta vegetazione. Il FOPEN SAR (Foliage Penetrator SAR) è montato su piattaforme aeree costrette, peraltro, a volare ad alta quota, a causa delle limitazioni imposte dalle lunghezze d'onda piuttosto lunghe impiegate dal sistema. Solo in questo modo, grazie ad un'apertura radar sufficiente, è possibile ottenere immagini intelligibili degli oggetti sotto al fogliame. Il radar ad apertura sintetica è stato adattato anche per l'impiego sui nuovi velivoli senza pilota UAV, come ad esempio il Predator, in dotazione anche all'Aeronautica Militare Italiana. In particolare, per questi mezzi è stato sviluppato il TESAR (Tactical Endurance Synthetic Aperture Radar), capace di garantire una ripresa di immagini continua delle dimensioni di 33 cm (1 ft). L'immagine completa si forma a bordo del Predator, dove viene anche compressa ed inviata alla stazione di controllo a terra. Per il prossimo futuro, sono diversi gli studi in corso e con il progetto Moving and Stationary Acquisition and Recognition (MSTAR), si sta puntando a sistemi d'acquisizione bersagli in grado di identificare obiettivi articolati o parzialmente nascosti, facendo ricorso ad una banca dati nella quale sono stati inseriti modelli tridimensionali dei bersagli, come ad esempio dei veicoli.

Quando è necessario disporre di una visione del terreno per rilevare dati di un bersaglio nelle tre dimensioni, si ricorre al SAR Interferometrico. Il sistema, comparando due o più immagini raccolte, con l'accorgimento di impiegare per ciascuna di esse geometrie diverse, permette di estrarre le differenze di fase dei segnali causate dalla differenza di altezza degli oggetti presenti sulla scena.

E' il caso del sistema NEXTmap Britain, dove la INTERMAP, in accordo con l'Ordnance Survey britannico, ha realizzato una mappatura completa dell'Inghilterra con un DTM a risoluzione di ca 2,5 m, disponibile per acquisto anche via Internet a prezzi di circa 12 $ a Km2.

Un innovativo sistema radar ad altra risoluzione LISA (Linear Synthetic Aperture) viene impiegato, per monitorare i movimenti dei vulcani ed in particolare dello Stromboli, per conto del Dipartimento italiano della protezione civile. Il sistema LISA si serve di un radar SAR interferometrico, particolarmente indicato per rilevare dati utili importanti per il monitoraggio di deformazioni di dighe e ponti e l'osservazione di spostamenti telluri-ci, come frane, cedimenti e spostamenti di monumenti storici, ma soprattutto per determinare i cambiamenti che si producono nella vasta struttura di un vulcano. Il sistema, unito ad un software appositamente elaborato, permette di trattare ed analizzare i dati raccolti, fornendo agli utilizzatori un'importante contributo alla prevenzione delle catastrofi.