

La simulazione del segnale da radar ad apertura sintetica

GIORGIO FRANCESCHETTI

Università di Napoli Federico II Dipartimento di Ingegneria Elettronica Via Claudio 21
e Consiglio Nazionale delle Ricerche I.R.E.C.E. Via Diocleziano 328 Napoli

MAURIZIO MIGLIACCIO

Istituto Universitario Navale Istituto Teoria e Tecnica delle Onde Elettromagnetiche Via Acton 38 Napoli

DANIELE RICCIO

CO.R.I.S.T.A. Piazzale Tecchio 80 Napoli.

In questo lavoro è messa in evidenza l'importanza della simulazione del segnale da radar ad apertura sintetica SAR (synthetic aperture radar) e sono descritte le diverse accezioni di questa tecnica. In particolare si classificano in maniera organica le diverse filosofie di simulazione alla base dei modelli presentati in letteratura. Vengono poi richiamati i principi basilari di un sistema di telerilevamento SAR, partendo dall'esame dello schema logico del simulatore per segnali grezzi SARAS (SAR raw signal simulator). Sono descritti inoltre alcuni esempi, indicando diverse misure (soggettive ed oggettive) utili per valutare le simulazioni SAR. Sono infine delineati i requisiti generali del sistema e sono illustrate alcune delle sue prospettive applicative.

1. Motivazioni

IL TELERILEVAMENTO è definito come l'acquisizione di informazioni circa un oggetto senza esserne in diretto contatto fisico. Queste informazioni sono acquisite misurando i mutamenti che la presenza dell'oggetto osservato impone al campo circostante, sia esso elettromagnetico, acustico o potenziale. L'accezione tipica del telerilevamento vuole però spesso sottintendere l'uso di tecniche elettromagnetiche per l'acquisizione delle informazioni. Tali tecniche coprono l'intero spettro elettromagnetico. Ovviamente queste sono strettamente dipendenti dalle applicazioni, ovvero dalle dimensioni e dalle dinamiche proprie del fenomeno sotto osservazione. Va però notato che la presenza di un'atmosfera circostante il nostro pianeta pone delle limitazioni sulle regioni spettrali che possono realmente essere adoperate per osservarne la superficie.

Il telerilevamento è oggi uno strumento indispensabile per il controllo globale e continuo del territorio e dei suoi mutamenti. In particolare, l'uso dei satelliti sta diventando una necessità per un gran numero di discipline geofisiche perchè permette la copertura sinottica di questi fenomeni. In molte applicazioni si richiede di acquisire delle mappe bidimensionali (immagini) ad alta risoluzione. Tradizionalmente, per il telerilevamento, sono stati in grande uso i sensori ottici passivi, sia all'infrarosso sia operanti nel visibile. Tali sensori sono particolarmente sensibili alla composizione chimica della superficie osservata. Il telerilevamento ottico comunque risulta essere strettamente vincolato alla presenza della sorgente solare di illuminazione e alla presenza di nubi. Il loro uso è oggi però di rinnovato interesse quando queste informazioni sono usate a complemento di dati a microonde (*data fusion*).

Più recentemente il telerilevamento attivo a microonde ha avuto un notevole impulso, infatti esso è in grado di operare indipendentemente dalla sorgente solare ovvero in tutte le condizioni climatiche (presenza o assenza di nubi). Anche in questo caso si possono impiegare diverse tecniche e frequenze. I radar d'immagini a microonde sono particolarmente sensibili alle caratteristiche geometri-

che della superficie terrestre e alla presenza di acqua in tutte le sue forme.

Il telerilevamento attivo a microonde, soprattutto nel caso operativo che il sensore sia montato su satellite, permette di cogliere con una prospettiva di grande e particolare valore i mutamenti del territorio e dell'ambiente. Molti studi scientifici che si interessano di geomorfologia, dello studio degli oceani, della topografia, del contenuto atmosferico del vapor d'acqua, dell'idrologia ovvero di vulcanologia hanno largamente beneficiato della disponibilità di questo tipo di missioni. In particolare, per quanto riguarda quest'ultimo aspetto notiamo che la possibilità di variare a piacere l'angolo di osservazione permette enormi potenzialità interpretative altrimenti insperabili. Utilmente va poi ricordato che la possibilità di lavorare in modo polarimetrico permette ulteriori gradi di libertà a questo tipo di sensori a microonde. È evidente perciò che alcune delle più moderne prospettive dell'impiego delle tecniche di telerilevamento sono rese possibili dalle tecniche a microonde. Si tengano presenti per tutte, quelle relative al rischio vulcanologico e al controllo dei ghiacci dove la particolare sensibilità al contenuto salino permette di classificarne l'età.

Nell'ambito più stretto delle tecniche a microonde si pone perciò in un certo rilievo la tecnica detta SAR (*Synthetic Aperture Radar*) [1] ovvero del radar ad apertura sintetica, la quale permette di ottenere considerevoli risoluzioni. È questa la tecnica di telerilevamento che ha maggiori prospettive applicative seppure, ponendosi quale tecnica di frontiera, necessita di ulteriori ricerche al fine di cogliere a pieno tutte le sue potenzialità.

È utile quindi richiamare i principi basilari di funzionamento di un sistema di telerilevamento SAR: esso può essere schematizzato come un trasduttore a microonde il cui compito è quello di operare una stima della sezione radar della scena, ovvero delle sue caratteristiche elettromagnetiche. Tale sezione radar è generalmente una funzione non lineare della geometria, della permeabilità, del-

la permittività oltre che della polarizzazione, della frequenza e dell'angolo d'incidenza del campo elettromagnetico trasmesso. Un sistema d'immagini SAR è basato su due differenti scansioni della scena: una realizzata secondo l'azimuth, ovvero *along-track*, e l'altra secondo il range, ovvero *across-track*. Tali scansioni sono realizzate a velocità completamente diverse; difatti mentre la scansione lungo il range è realizzata a metà della velocità della luce, ovvero in pratica istantaneamente, quella lungo l'azimuth è realizzata alla velocità del vettore trasportante l'antenna SAR, ovvero a una velocità sensibilmente inferiore. Questa differenza di scansione nei due canali, range e azimuth, è particolarmente delicata quando si voglia osservare una scena dinamicamente mutevole. Inoltre, tale stimatore è imperfetto e in particolare la sua abilità nel risolvere spazialmente due punti sul piano d'immagine non è arbitrariamente piccola ma definita dalla quantità denominata risoluzione. Ancora, trattandosi di un sistema coerente monocromatico, l'immagine generata (mappa della sezione radar stimata) è affetta da rumore moltiplicativo correlato (*speckle*) il quale è prodotto dall'interferenza dei diffusori elementari presenti all'interno di ogni cella di risoluzione (*fading*).

Data la complessità del processo di formazione del segnale e quindi dell'immagine, a dispetto di un gran numero di dati prodotti, è evidente che non sempre l'interpretazione o l'estrazione d'informazioni di diretto interesse applicativo risulta agevole. Questo scopo primario motiva perciò l'ideazione e la realizzazione di codici numerici di simulazione SAR. La simulazione SAR può essere basata su un modello elettromagnetico di *backscattering* della scena (*SAR raw signal simulator*) e quindi riprodurre tutta la catena di formazione del segnale, od operare direttamente a livello d'immagine SAR (*SAR image simulator*).

Scopo di questo articolo è quindi di descrivere la prospettiva generale del problema della simulazione SAR e descriverne i passi fondamentali per una sua reale applicabilità. L'articolo è strutturato come segue. Nella sezione 2 viene illustrata la simulazione SAR e le sue diverse accezioni. In particolare, per la prima volta, si classificano, in maniera organica e il più possibile omogenea, le diverse filosofie di simulazione alla base dei modelli presentati in letteratura. Nella sezione 3 si illustra brevemente l'esperienza di un simulatore di segnale grezzo SAR (SARAS) e nella sezione 4 vengono illustrati alcuni esempi e sono presentate diverse misure da introdursi per valutare le simulazioni SAR. Infine, nella sezione 5 sono riportate le conclusioni, ovvero i requisiti generali di uno schema di simulazione SAR e le sue prospettive applicative.

2. La simulazione SAR

Nel caso SAR alla voce simulazione afferisce più di un modello matematico con i conseguenti algoritmi e schemi applicativi che ne consentono l'eventuale realizzazione su sistemi di elaborazione digitale [2-13]. Questi modelli sono il frutto di interessi ed esigenze diversi tendenti alla schematizzazione e comprensione dei vari fenomeni coinvolti nel complesso meccanismo di formazione del segnale SAR e delle relative immagini. In funzione di

ciascuna scelta l'analisi metodologica cambia considerevolmente conducendo a risultati non sempre facilmente paragonabili. Nel seguito le varie tecniche di simulazione concepibili sono raggruppate in funzione della logica in esse seguite così da schematizzarne l'esposizione.

Le filosofie di simulazione possono essere classificate rispetto al prodotto in oggetto. In questo senso si può essere interessati alla determinazione del segnale radar rilevato dal sensore SAR [5,10,13], oppure alle possibili immagini esito delle procedure di elaborazione a cui viene sottoposto il segnale grezzo [2-4,6-11,13].

È assolutamente necessario osservare che le filosofie di simulazione citate sebbene siano disposte in un conseguente ordine logico non sono necessariamente da intendersi come successivi passi verso modelli sempre più complessi. In altre parole non è indispensabile procedere ad una simulazione del segnale grezzo se lo scopo è quello di ottenere la simulazione di immagini a piena risoluzione, in quanto una grande varietà di effetti introdotti dal sistema radar nella fase di acquisizione vengono in genere compensati nella successiva fase di elaborazione: se quindi lo scopo è simulare l'immagine SAR, piuttosto che il segnale, può essere sufficiente richiedere la mera determinazione, eventualmente analitica, di una funzione di trasferimento complessiva fra la riflettività della scena e la corrispondente immagine SAR. D'altro canto sembra però evidente che per conservare un carattere il più generale possibile e la maggiore flessibilità operativa, la tecnica di simulazione da perseguire debba proprio procedere attraverso la modellizzazione il più possibile completa delle fasi logicamente antecedenti il prodotto SAR interessato.

Nella simulazione del segnale grezzo il primo problema da risolvere è costituito dalla determinazione della funzione di riflettività della scena che si intende simulare. La soluzione sostanzialmente consiste nell'applicazione opportuna di modelli di *backscattering*: con il termine opportuno si vuole significare in questo caso che per le applicazioni SAR dovrebbero essere valutate sia la componente deterministica sia la componente aleatoria del campo elettromagnetico reirradiato pervenendo così ad una simulazione coerente. Modelli di *backscattering* nel caso di diffusione volumetrica da scene naturali esistono [14,15], ma la loro applicabilità alla simulazione SAR è limitata dalla complessità dei calcoli coinvolti; inoltre vista la prevalenza nelle immagini SAR del rumore moltiplicativo (*speckle*) le variazioni introdotte rispetto ai modelli superficiali sono inferiori alle attese differenze calcolabili in assenza di rumore. Per inciso risulta evidente che un buon simulatore di segnali SAR, sia esso di segnale grezzo, sia esso di immagine, dovrebbe essere concettualmente concepito con alte caratteristiche di modularità rispetto a tutti i suoi componenti a partire proprio, restando in tema, dalle procedure di valutazione della funzione di riflettività della scena da simulare. I modelli di *backscattering* superficiale, unici ad essere presenti attualmente in metodologie di simulazione SAR per scene estese, si basano su una descrizione morfologica ed elettromagnetica della superficie in esame, la quale viene generalmente divisa in faccette grandi rispetto alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica incidente, ma piccole rispetto alla risoluzione del sistema SAR. In particolare per ogni faccetta il ritorno elettromagnetico si ot-

tiene a partire dalla conoscenza del profilo della superficie in congiunzione con la conoscenza della costante dielettrica relativa e della conducibilità propri del sito in esame. Il calcolo della componente deterministica viene in genere condotto adoperando il metodo di Kirchhoff nelle sue possibili soluzioni dell'ottica fisica e dell'ottica geometrica, o mediate il metodo delle piccole perturbazioni (SPM) [16]. A questo proposito una ulteriore osservazione riguarda la forma del ritorno elettromagnetico: per l'inclusione dei fenomeni connessi alla presenza del rumore moltiplicativo sulle immagini SAR, è opportuno disporre di un metodo che permetta di calcolare tale ritorno elettromagnetico in termini di campo piuttosto che in termini di potenza. Le variazioni stocastiche associate, funzione della distribuzione microscopica interna alla faccetta, appaiono così direttamente tanto sul modulo quanto sulla fase del segnale.

In stretta successione logica dalla simulazione della funzione di riflettività si passa alla simulazione del sistema SAR ed ancora una volta due schemi logici possono essere individuati. In prima istanza si può procedere osservando che il meccanismo di funzionamento di questa classe di radar è tale da consentire in linea di principio una simulazione, detta *pulse by pulse*, intesa come sovrapposizione dei ritorni per le singole posizioni del sensore dalle quali la scena in esame viene vista; per ogni posizione cambia la geometria di vista per ciascuna faccetta, come pure il percorso propagativo della radiazione elettromagnetica impiegata. Alternativamente, ipotizzando una costanza delle caratteristiche reirradiative della scena durante il tempo in cui essa viene osservata, è possibile includere il contributo al segnale grezzo da parte del sistema radar attraverso il calcolo di una funzione risposta impulsiva propria del sistema SAR [12,17]. Il primo tipo di simulazione, che potremmo definire nel dominio del tempo, sebbene consenta l'inclusione in maniera relativamente semplice dei fenomeni tempo varianti della scena o le variazioni di moto del sensore dalla linea ideale, è praticamente inapplicabile per scene estese. Nel secondo caso, con opportune considerazioni di carattere analitico, è invece possibile riconoscere la presenza di un legame convolutivo [12,17] fra la funzione di riflettività della scena e la risposta impulsiva del sistema SAR: è possibile così applicare proficuamente l'analisi nel dominio della frequenza mediante trasformate di Fourier riducendo in corrispondenza la procedura computazionale di un numero di volte pari alle posizioni in cui il satellite ha osservato la scena. Inoltre non è comunque escluso che nella determinazione della risposta impulsiva determinati comportamenti tempo varianti, sia della scena sia del sensore, non possano essere opportunamente inclusi nella funzione risposta impulsiva a scapito di una ulteriore complicazione prevalentemente analitica del problema in esame e quasi senza inficiare l'efficienza elaborativa. A questo proposito è facile intuire che la conoscenza analitica anche nel dominio trasformato della funzione risposta impulsiva del SAR consente assai più ampie prospettive di studio ed applicazione [12,17] ed è pertanto certamente auspicabile.

Questa fase logica conclude il procedimento di simulazione del segnale grezzo ricevuto dal sensore. Da questo punto in poi sono evidenti le ricadute applicative potendo-

si adoperare il segnale simulato in effettiva sostituzione di quello reale qualunque siano le motivazioni per ciò [5,12]. Quanto presentato riguarda la simulazione del segnale SAR. L'immagine SAR può essere ottenuta elaborando successivamente il segnale grezzo. Non è questa la strada in pratica seguita in letteratura, dove si preferisce concentrare l'attenzione sulla determinazione di un legame diretto fra la funzione riflettività e l'immagine SAR [2,3,6-11]. In questo caso tale legame diretto prescrive la definizione a priori anche delle modalità, non sempre univoche, di elaborazione dei dati grezzi. Se si riesce a pervenire ad una nuova funzione di trasferimento, che possiamo definire complessiva, essa risulterà semplificata rispetto alla funzione di trasferimento fra la riflettività ed il segnale grezzo per tutti i termini che vengono compensati nella procedura di elaborazione dei dati ricevuti dal sensore; alcuni fenomeni, ad esempio la caratterizzazione statistica, possono essere inclusi direttamente a livello di immagine finale semplificando la determinazione della funzione di riflettività [2,3,6-11,13]. Questi vantaggi si pagano ovviamente in termini di una notevole riduzione di flessibilità dello strumento di simulazione: si pensi per esempio che se tale procedura sembra conveniente qualora l'elaborazione del dato grezzo sia condotta con i parametri ideali per scene stazionarie, si complica però per includere elaborazioni con parametri non ideali, diviene ardua per elaborazioni condotte con finalità particolari (tecniche di *multilook*, esaltazione di oggetti in movimento), concettualmente impossibile in altri casi (elaborazioni interferometriche).

Qualunque sia la simulazione che si intende realizzare, sia essa di segnale grezzo sia essa di immagine, un punto importante risiede nella definizione dei parametri di ingresso. Per i parametri di sistema (lunghezza d'onda portante e banda del segnale impiegato, frequenza di ripetizione degli impulsi, ecc...) o di missione (angolo di vista, altezza di volo, velocità nominale del vettore, ecc...) non vi sono problemi di sorta: la loro presenza nella simulazione è indispensabile e caratterizza il sistema SAR. Diverso il discorso per i parametri che descrivono la scena. Ogni simulatore attinge tali variabili da dei *data base* opportuni. In funzione dell'applicazione i *data base* di partenza possono variare notevolmente i principi.

Al livello più basso le funzioni in ingresso sono rappresentate dalla descrizione del profilo altimetrico della scena, dalla costante dielettrica relativa e dalla conducibilità di ciascun punto della scena stessa [12]. Si ottiene in questo modo la maggiore flessibilità possibile dall'algoritmo di simulazione in quanto la funzione riflettività può essere calcolata al variare di tutti i parametri di sistema e di missione. In questo caso si può parlare di un simulatore basato su modelli di descrizione di tipo fisico-matematico.

Ad un livello intermedio si possono assegnare in ingresso solo parte dei parametri che descrivono la scena, ad esempio quelli collegati al calcolo dei valori medi di riflettività, per poi riservarsi dei *data base* con i valori calcolati per il contributo stocastico da inserire opportunamente direttamente a livello del segnale grezzo [5].

Ad un livello più alto corrisponde l'assegnazione mediante *data base* direttamente della funzione di riflettività. In questo modo si riduce in linea di principio la mole di dati in ingresso, si semplifica e si riduce la procedu-

ra di simulazione, ma al contempo si deve disporre di dati di assai difficile misura; sostanzialmente si perde la possibilità di poter simulare affidabilmente la stessa scena con parametri di sistema e di missione diversi in quanto in pratica si necessita dell'individuazione di complicatissimi legami direttamente fra le condizioni di illuminazione e la riflettività della scena stessa [2,6,10].

Infine la simulazione della riflettività della scena in esame può essere completamente od in parte ignorata assumendo che sia costante o funzione di solo parte delle variabili in gioco. Nel primo caso [5] ci si concentra sulla simulazione di sistema, del quale interessano le caratteristiche e le prestazioni teoriche; a tale tipo di logica fanno riferimento simulatori sia di immagine sia di segnale grezzo; questi ultimi, operando generalmente in corrispondenza di scene non estese costituite da relativamente pochi punti reirradianti su fondo assorbente, prevedono l'inclusione della risposta impulsiva del radar nel dominio del tempo; per i motivi accennati essi vengono anche definiti simulatori *point scattering*. Nel secondo caso [13], simulatori geometrici, al fine di semplificare le procedure ed i modelli di simulazione si tiene per esempio conto circa il ritorno elettromagnetico dei soli contributi dovuti alla morfologia; questo ulteriore tipo di simulatori si fonda sulla convinzione che il sistema SAR in corrispondenza delle frequenze adoperate e delle sue modalità operative sia uno strumento particolarmente sensibile alla morfologia del territorio. Questa affermazione è facilmente opinabile: si pensi ad esempio alla variazione del ritorno elettromagnetico in corrispondenza di variazioni del contenuto di umidità delle zone esaminata. Nei limiti di validità ora rimarcati si perviene ad una simulazione di immagine in cui in realtà i soli fenomeni di proiezione geometrica sono correttamente inclusi; dal punto di vista applicativo ne consegue che ci si indirizza in questo caso verso la definizione dei soli parametri ottimi di missione [13].

Ad una diversa categoria appartengono le tecniche di simulazione che diremmo fenomenologiche orientate cioè alla simulazione di particolari caratteristiche della complessa interazione fra il SAR e l'ambiente circostante [4]. In questo caso per esempio ci si concentra sulla definizione di aspetti globali dell'immagine SAR come ad esempio le statistiche di vario ordine misurabili macroscopicamente sulle immagini SAR reali. Tali elementi vengono poi adoperati per descrivere scene canoniche di interesse e impiegati nella simulazione di immagini, che riproducono quelle SAR in tutti gli aspetti globali desiderati. Si sfronda così il problema di molte implicazioni non necessarie per i fini preposti, ma risulta poi più complesso determinare i meccanismi di causa-effetto per la comprensione del meccanismo di formazione dell'immagine SAR a partire da una scena assegnata. In particolare nella simulazione di immagini con preassegnate statistiche il problema risiede nella definizione di algoritmi opportuni di realizzazione dei fenomeni aleatori in esame [4]; aspetti interessanti e particolarmente difficili da risolvere in questo caso risiedono nella capacità di riuscire a controllare le funzioni densità di probabilità al primo ordine ottenendo nel contempo le funzioni di autocorrelazione desiderate [4].

Ad una differente logica vanno infine ascritti i simulatori che integrano delle reali immagini SAR con oggetti pre-

determinati. Questa volta la simulazione consiste nel determinare il contributo elettromagnetico fornito dagli oggetti considerati, stabilirne quindi l'effetto tramite il sistema radar sull'immagine finale e sommarlo infine alla scena reale SAR a disposizione [3,11]. Si può pertanto simulare la presenza di strutture, generalmente a prevalente comportamento deterministico, che necessitano di modelli di backscattering appropriati come nel caso di *corner reflector*, edifici o comunque costruzioni di natura umana e non naturale. Interessante in questo caso la possibile applicazione alla simulazione di veicoli in movimento. I limiti a tale tecnica vanno ricercati nell'operazione di sovrapposizione fra i contributi simulati e la scena sottostante; è necessario ipotizzare una qualche forma di additività che risulta essere una approssimazione convincente solo per strutture deterministiche dotate di ritorno elettromagnetico di molto superiore allo sfondo, ipotesi questa che rischia comunque di essere vanificata se gli oggetti in questione si spostano contribuendo energeticamente per ogni punto dell'immagine finale solo con una parte dell'energia ad essi associata.

La disamina effettuata segue un ordine logico di analisi dalla caratterizzazione della scena fino alla determinazione del prodotto finale. Per i simulatori presentati è inoltre fondamentale discutere in forma organica le implicazioni della determinazione ed inclusione del contributo statistico. Eventuali termini includenti rumore additivo originato dalle più svariate cause, ad esempio il rumore termico per il sistema radar, sono considerabili facilmente direttamente nel punto stesso della catena logica in cui si manifestano. Diversamente per altri contributi di origine statistica le modalità di inclusione variano in funzione del momento in cui essi sono considerati. Incertezze nella determinazione della morfologia macroscopica della scena si modellano attraverso l'assegnazione di opportune densità di probabilità e funzioni di correlazione per la descrizione del profilo geometrico, le quali generano in corrispondenza variazioni stocastiche sul profilo elettromagnetico non linearmente collegate alle precedenti. Per la descrizione del profilo microscopico, si suddivide in genere ogni faccetta in più sotto faccette; per ciascuna di esse la statistica viene imposta a livello di ritorno elettromagnetico ricorrendo a distribuzioni di tipo Rayleigh a media unitaria per il modulo ed uniforme in $(-\pi, \pi)$ per la fase. Nelle ipotesi di non validità del teorema del limite centrale, devono essere considerate, naturalmente per il modulo, opportune densità di probabilità come ad esempio la gamma. In questa maniera attraverso i successivi passi di inclusione dei fenomeni di correlazione introdotti dal sistema radar si perviene direttamente alla caratterizzazione finale delle statistiche sull'immagine SAR. In alternativa quando tali contributi statistici sono inclusi ad un livello più alto, dopo cioè aver considerato l'effetto del sistema radar, allora per una analisi corretta si devono risolvere i problemi legati alla correlazione introdotta. Esclusivamente per scene gaussiane dotate di statistiche di tipo Rayleigh si può operare generando un'immagine priva di correlazione; successivamente con un filtro della larghezza di banda adatta a rappresentare le prestazioni dell'intera catena di acquisizione del segnale grezzo e di elaborazione delle immagini si producono le statistiche dotate della correlazione voluta. In presenza di diverse

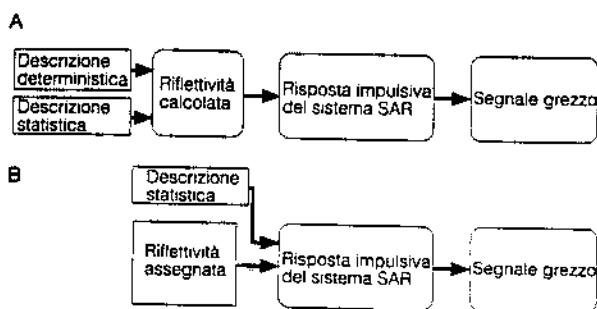


Figura 1 Schema logico dei simulatori di dati grezzi SAR.

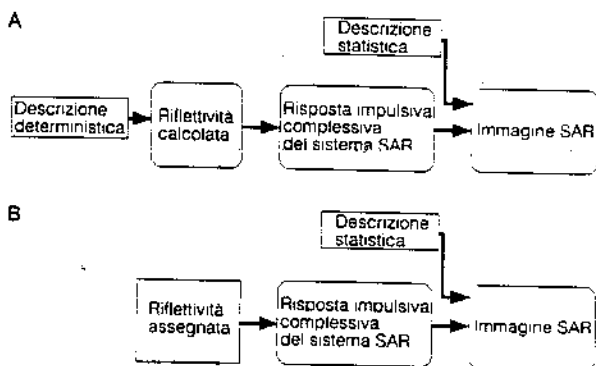


Figura 2 Schema logico dei simulatori di immagine SAR.

densità di probabilità per il modello del modulo della funzione di riflettività si ricade nel discorso prima affrontato riguardo le simulazioni di tipo fenomenologico, e relative alla generazione di statistiche non gaussiane in ordine a fenomeni di origine macroscopica.

Vista la notevole diversità esistente fra le logiche presentate, come schematizzazione estrema per i contenuti di questa sezione le figure 1 e 2 presentano i diagrammi di flusso riassuntivi delle principali filosofie di simulazione. In essi sono stati adoperati dei riquadri con angoli retti per indicare che l'acquisizione avviene tramite *data base*: angoli arrotondati sono invece adoperati dove esistono dei modelli e conseguenti algoritmi per la determinazione delle procedure in esame. I diagrammi esposti risultano scevri di tutti quei particolari che sebbene descritti nel testo non risultano significativi per una comparazione efficace quantomeno di carattere immediato.

In figura 1 sono mostrati i diagrammi di flusso relativi alle simulazioni di segnale grezzo. Alla figura 1A può essere collegato quanto descritto in [12]; alla figura 1B corrisponde quanto presente in [5,10].

In figura 2 sono mostrati i diagrammi di flusso relativi alle simulazioni di immagini SAR. Alla logica di figura 2A appartengono le filosofie di simulazione in [2,6] e il diagramma in figura 2B illustra il modello previsto in [7,9].

3. Un esempio applicativo: SARAS

In questa sezione si presenta lo schema logico del simulatore di dati grezzi SAR (*SAR raw signal simulator*) SARAS.

Prima di descriverne alcuni aspetti essenziali è utile ricordare che il SAR è un sistema di telerilevamento attivo e coerente capace di generare delle immagini ad alta risoluzione della scena esaminata, grazie alla sintesi tempo-

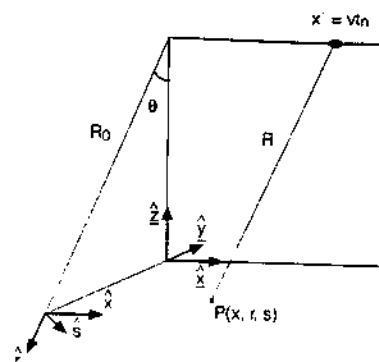


Figura 3 Relativa alla geometria del sistema SAR.

rale* di un array, lungo l'azimuth, e la trasmissione periodica di impulsi modulati, in direzione range. L'ottenimento dell'immagine SAR è dovuto a una elaborazione dei dati raccolti (*raw data*) con un'opportuna tecnica detta di compressione [1,17].

Il modo tradizionale che descrive il sistema SAR ha fatto spesso uso dell'approccio *range-doppler*, il quale, prima artificialmente separa i due canali (range ed azimuth) e poi corregge le aberrazioni introdotte [1,17]; più recentemente un altro punto di vista è prevalso: questo considera il sistema direttamente come bidimensionale e quindi intrinsecamente tiene conto dei predetti legami [17]. Questo secondo schema logico viene usato nel seguito.

Quando si consideri una scena stazionaria, ovvero per la quale la funzione di riflettività possa essere considerata temporalmente invariante rispetto ai tempi di scansione (1-10s), il segnale grezzo $s(\cdot)$ può essere scritto in questa forma generale [1]:

$$s(x', r') = \iint dx dr \gamma(x, r) g(x' - x, r' - r; x, r) \quad (1)$$

dove $g(\cdot)$ è la risposta unitaria che descrive il sistema, $\gamma(\cdot)$ la riflettività della scena ed $x, r; x', r'$ le coordinate di azimuth e di range (secondo il sistema di riferimento mostrato in figura 3) in ingresso ed uscita, rispettivamente.

L'equazione (1) non mostra un legame convolutivo e ciò in principio comporta l'impossibilità di utilizzare delle tecniche numeriche efficienti: in realtà è stato dimostrato come nel caso particolare in esame ciò può essere aggirato con opportune modifiche al classico algoritmo basato sull'uso della trasformata veloce di Fourier (FFT) [17].

La procedura di simulazione è immediatamente descrivibile in tre fasi: fase di acquisizione dati, fase di modellizzazione elettromagnetica della scena, fase di generazione dei dati d'uscita (*raw data*).

Questo schema logico è illustrato in figura 4 nel caso più semplice che $g(x' - x, r' - r; x, r)$ possa essere confusa con $g(x' - x, r' - r)$. Notiamo incidentalmente che la Trasformata di Fourier (FT) di $g(\cdot)$ è stata valutata asintoticamente in forma chiusa e ciò è di estremo interesse oltre che teorico, da un punto di vista realizzativo [12,17]. Conseguentemente è possibile una simulazione efficace ed accurata

* Il vettore ideale vola con velocità uniforme, viceversa ogni vettore reale percorrerà la linea di volo con una velocità perturbata rispetto al caso ideale; in tal caso, delle tecniche di compensazione del moto devono essere considerate nella fase di elaborazione dei dati grezzi. Per gli scopi di questo articolo viceversa si considera il caso ideale.

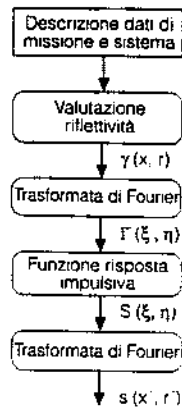


Figura 4 Diagramma di flusso del simulatore SAR di dati grezzi SARAS.

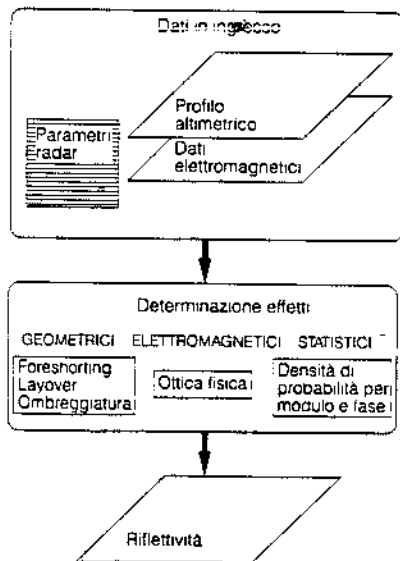


Figura 5 Schema esplicativo di come la stima della funzione di riflettività viene realizzata nel simulatore SAR di dati grezzi SARAS.

che tiene conto della *range migration*, della *range curvature* e dell'effetto della profondità di fuoco [12,17].

Rispetto a questo schema d'insieme merita maggior attenzione la seconda fase che quindi viene illustrata più in dettaglio. Utilmente si ricordi che l'aspetto di modellizzazione elettromagnetica non è sempre presente in uno schema di simulazione SAR (si veda la sezione 2). Scopo di questa fase è di fornire una mappa di riflettività della scena osservata con una precisione commisurabile con la risoluzione del sistema * (Figura 5).

Si consideri quindi un'onda piana, di ampiezza E_o e vettore di propagazione k , incidente su di una superficie descrivibile tramite una funzione aleatoria (Figura 6), si ha che il campo elettrico reirradiato E_s risulta pari a [16]:

$$E_s = \iint_S \left\{ j\omega\mu_o \underline{G} \cdot [\hat{n} \times H] + \nabla \times (\underline{G} \cdot [\hat{n} \times E]) \right\} dS \quad (2)$$

dove \underline{G} è la funzione diadica di Green, E ed H i campi elettrici e magnetici. L'equazione (2) può essere specifi-

* Si noti che l'effettiva risoluzione ottenuta dipende oltre che dal sistema SAR anche dalla fase di compressione [1].

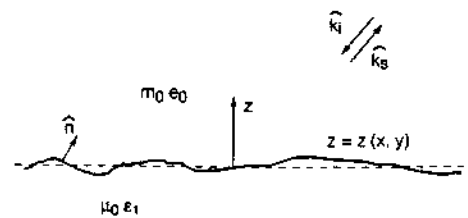


Figura 6 Relativa al problema del backscattering.

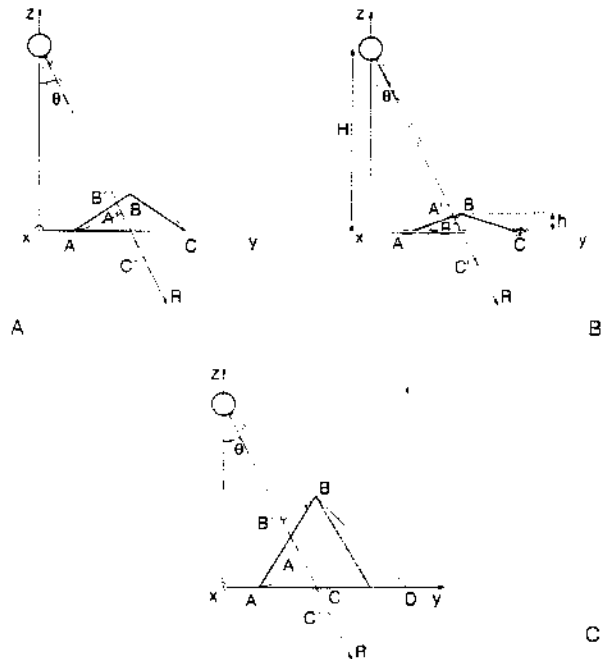


Figura 7 Illustrazione grafica degli effetti geometrici del foreshortening (A), layover (B) e ombreggiatura (C). È mostrata la sezione di un cono sovrapposto ad una superficie piana ($z = 0$). I punti A, B, C sono equamente spazati lungo y ma non lungo R . In particolare il tratto più vicino al radar (AB) è compresso rispetto all'altro (BC). (A) Fenomeno del foreshortening. Se accade un'inversione nella mappatura dei punti su R rispetto a quella su y si parla del fenomeno del layover (B).

cata nel caso che il mezzo sia omogeneo e il punto di osservazione sia a grande distanza. Una soluzione al campo scaterato può essere trovata adoperando la soluzione di Kirchhoff, giungendo quindi all'espressione [12]:

$$E_s = \frac{jke^{-jkr}}{4\pi R} E_o (\underline{I} - \hat{k}\hat{k}) \cdot \iint_A F(a, b, c) \exp[2jk \cdot \rho] dA \quad (3)$$

dove (a, b, c) sono le componenti del vettore normale alla faccetta A , ρ il vettore che la descrive [12]. Il vettore $F(\cdot)$ è una funzione dipendente dai coefficienti di Fresnel locali e tiene conto degli effetti polarimetrici [12].

Questo modo di procedere suggerisce naturalmente l'uso di un modello a faccette per la determinazione del campo reirradiato, si noti che ciò implicitamente sottintende che il profilo macroscopico (descritto dall'insieme delle faccette) sia indipendente da quello microscopico (all'interno della singola faccetta). Viceversa non accade che i suddetti contributi al backscattering risultino indipendenti [1,12].

Un altro aspetto da tener conto in maniera esplicita è la distorsione geometrica: infatti, pur essendo verosimile che la funzione altimetrica $z(x, y)$ risulti un'applicazione univoca, la sua proiezione nel sistema di riferimento naturale del radar non lo è più. L'inclusione dei fenomeni

Tabella 1 - Parametri principali relativi alla missione SIR-B

Data della missione	1984
Altezza orbitale (H)	225 [km]
Velocità della piattaforma	7,5 [km/s]
Angolo di vista	28[°]
Dimensione dell'antenna in azimuth	10,74 [m]
Dimensione dell'antenna in range	2,16 [m]
Frequenza portante	1,28 [GHz]
Banda del segnale trasmesso	12 [MHz]
Frequenza di ripetizione degli impulsi (PRF)	1539,8 [Hz]
Durata dell'impulso trasmesso	30,4 [µs]
Polarizzazione	HH

del *foreshortening*, del *layover*, e dell'ombreggiatura [1] deve essere tenuta quindi in conto. In SARAS si adopera l'ottica geometrica per simularli. Un'illustrazione grafica di questi effetti è data in figura 7 nel caso che su un terreno piatto sia presente un cono. Va infine enfatizzato che il profilo entra in maniera non lineare nell'espressione del campo retrodiffuso [1,16].

Per concludere, notiamo che è di basilare importanza per la costruzione di un simulatore SAR l'inclusione del *fading*; esso è realizzato in SARAS a livello basilare influenzando sul campo retrodiffuso. Tale campo va infatti interpretato come un segnale aleatorio il cui valor medio è stato ricavato col modello elettromagnetico suddetto. Un caso di notevole interesse applicativo è quello detto di Rayleigh [18-20]. Evidenze della bontà della strada seguita sono state riscontrate verificando le conseguenti statistiche al primo e secondo ordine dello *speckle* sul piano d'immagine (dopo la compressione) [12].

4. Esempi

Il modello elettromagnetico adoperato in SARAS fa uso di due principali matrici di ingresso (Figura 5) che descrivono, con una certa risoluzione, da un lato il profilo orografico della scena estesa e tridimensionale, e dall'altro la sua permittività e permeabilità. In particolare la superficie viene discretizzata con faccette piane le cui dimensioni risultino grandi rispetto alla lunghezza d'onda in gioco ma adeguate per descrivere il profilo orografico medio* [12]. Gli scopi immediati di un simulatore SAR possono essere dupli: simulare delle situazioni canoniche di riferimento, riprodurre delle situazioni reali complesse.

Nel caso che si intenda simulare delle superfici canoniche



Figura 8 Immagine 4-look relativa ai dati grezzi simulati con SARAS riguardanti un cono posto su di una superficie piana. Parametri di sistema relativi alla missione SIR-B, azimuth orizzontale, range verticale.

* Questo deve essere infatti pensato come un processo aleatorio [12].



Figura 9 Immagine 4-look relativa ai dati grezzi simulati con SARAS riguardanti la zona del Vesuvio. Parametri di sistema relativi alla missione SIR-B, azimuth orizzontale, range verticale. Nel caso (A) gli scarsi dati altimetrici sono stati infittiti tramite la tecnica di interpolazione bilineare, mentre nel caso (B) l'interpolazione effettuata è stata di tipo frattale.

è possibile quindi prima indicarle in maniera analitica e successivamente campionarle al tasso richiesto. Per quanto riguarda i dati *ancillari* questi possono essere indicati a piacimento. L'impiego quindi del simulatore è immediato. Un caso del genere è quello del primo esempio dove si è simulato il segnale grezzo di un cono posto su di una scena piatta. I dati elettromagnetici sono stati considerati costanti sulla scena così da mettere in evidenza gli aspetti geometrici. Si è considerata la simulazione di una missione SIR-B i cui parametri fondamentali sono illustrati in tabella 1. In figura 8 è rappresentata l'immagine SAR conseguente nella versione 4-look. L'azimuth è orizzontale ed il range verticale; tutte le immagini seguenti sono presentate in accordo a questo formato. Notiamo che in questo primo esempio non si è tenuto in conto del *fading* e quindi l'immagine finale risulta priva di *speckle*.

Diverso è il caso si voglia simulare una scena reale la cui descrizione è inevitabilmente non estremamente dettagliata rispetto alle risoluzioni in gioco. In tale caso vanno adoperate delle opportune tecniche di interpolazione per l'infittimento dei dati. Nel caso che il profilo orografico risulti scarsamente dettagliato, l'interpolazione frattale [21] ha dato i migliori risultati [21].

Un caso di questo tipo è illustrato nel secondo esempio riguardante ancora la missione SIR-B e la zona del Vesuvio. I dati elettromagnetici descriventi la scena sono stati ancora una volta considerati omogenei. In figura 9 è quindi rappresentata l'immagine SAR prodotta dai dati grezzi simulati, nel caso che l'interpolazione per l'infittimento dei dati altimetrici, sia stata di tipo bilineare (Figura 9A) o frattale (Figura 9B). Si nota anche visivamente come nel primo caso si perviene ad un risultato decisamente più lontano dal caso reale.

Per concludere, è utile puntualizzare che delle misure di qualità, specificamente pensate per le immagini SAR, sono necessarie al fine di valutare e comparare i diversi risultati [22].

Una prima suddivisione può essere operata tra misure soggettive ed oggettive. Nell'ambito delle misure oggettive si riconoscono quelle strutturali e quelle statistiche. Fra le prime si pone, per esempio quelle basate sulla misura e rilevazione dei bordi, mentre tra le seconde va posta, per esempio quelle basate sui livelli di grigio. Notiamo inoltre che tali misure possono diversamente essere definite a partire dai dati complessi o reali. È possibile poi classificare queste misure tra quelle basate sulla risposta di bersagli puntiformi (PSLR, ISLR ecc.) [22] o di zone omogenee estese (risoluzione radio-metrica ecc.) [22].

5. Conclusioni

È stata illustrata l'importanza della simulazione SAR e una rassegna sui vari approcci. Specificatamente all'esperienza degli autori è stato descritto nelle sue linee essenziali il simulatore di dati grezzi SARAS e alcuni esempi relativi.

È possibile quindi definire alcuni requisiti generali e convenienti per ogni schema di simulazione. Il primo re-

quisito è la fisicità dell'approccio, così da poter controllare i parametri (cause) rispetto alle misure (effetti). Il secondo è l'accuratezza, ovvero la capacità di rappresentare la realtà adeguatamente. Tale aspetto è strettamente legato alla metrica che si adopera per misurare le eventuali discrepanze e al fatto che si ha a che fare con processi aleatori e non deterministici.

Inoltre, è utile richiedere una certa modularità allo schema di simulazione così da poterlo aggiungere alle diverse situazioni; infine, per un'effettiva realizzazione numerica, è indispensabile richiedere che la procedura di simulazione risulti efficiente.

Le prospettive applicative di un simulatore SAR sono quindi evidenti. Esso, può esser visto dal lato del sistema come uno strumento per la definizione ottima di alcuni dati di volo (angolo di vista, polarizzazione ecc.), ovvero dal lato della scena come uno strumento per la piena comprensione e validazione dei modelli di backscattering. Inoltre, potendo realizzare delle condizioni ideali (assetto di volo imperturbato) e canoniche (scene controllate) può essere di notevole ausilio per l'interpretazione dei dati SAR ovvero in tutte le tecniche di post-elaborazione [23].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Harger R O: *Synthetic aperture radar system: theory and design*. Academic Press, New York 1970.
- [2] Holtzman J C, Frost V S, Abbott J L, Kaupp V H: Radar image simulation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1978, GE-16, p. 296-303.
- [3] Wohlers M R, Hsiao S, Mendelsohn J, Gardner G: Computer simulation of synthetic aperture radar images of three-dimensional objects. *IEEE Trans. Aerospace and Elec. Sys.*, 1980, vol. AES-16, p. 258-271.
- [4] Oliver C J: A model for non-Rayleigh scattering statistics. *Optica Acta*, 1984, vol. 31, p. 701-722.
- [5] Pike T K: SRSIM: a synthetic aperture radar system simulation model. *DFVLR-Mit.*, 1985, vol. 11.
- [6] Smutn U J: *SAR product simulation*. CCG Report, 1985.
- [7] Hart P, Nahvi M J, Rieger S, Wiesbeck W, Scivier M S, Corr D G, Sieber A J: Simulation of synthetic aperture radar data products. *Proc. ESA-ESRIN SAR Applications Workshop*, Frascati (Roma), 1986, p. 47-59.
- [8] Corr D G: SAR simulation for land use. *Proc. EARSeI Workshop SAR Simulation Models*, 1988, Capri (NA), p. 5-17.
- [9] Raney R K, Wessels G J: Spatial considerations in SAR speckle simulation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1988, vol. GE-26, p. 666-672.
- [10] Camporeale C, Galati G: Digital computer simulation of synthetic aperture systems and images. *ETT*, 1991, vol. 2, p. 343-352.
- [11] Nasr J M, Vidal-Madjar D: Image simulation of Geometric Targets for Spaceborne Synthetic Aperture Radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1991, vol. GE-29, p. 986-996.
- [12] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, Schirizzi G: SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, vol. GE-30, p. 110-123.
- [13] Guindon B: Development of a SAR data acquisition planning tool (SARPLAN) based on image simulation. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, vol. 14, p. 333-344.
- [14] Fung A K: A review of volume scatter theories for modeling applications. *Radio Sci.*, 1982, vol. 5, p. 1007-1017.
- [15] Ulaby F T, Sarabandi K, McDonald K, Whitt M, Dobson M C: Michigan Microwave Canopy Scattering Model. *Int. J. Remote Sensing*, 1990, vol. 7, p. 1223-1253.
- [16] Tsang L, Kong J A, Shin R T: *Theory of microwave remote sensing*. Wiley-Interscience, New York 1985.
- [17] Franceschetti G: SAR processing techniques. In: *Remote Sensing Reference Book*, D. Sloggett Ed.
- [18] Goodman J W: Some fundamental properties of speckle. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, vol. 66, p. 1145-1150.
- [19] Beckmann P, Spizzichino A: *The scattering of electromagnetic waves from rough surface*. Norwood, MA: Artech House, 1987.
- [20] Ulaby F T, Dobson M C: *Handbook of radar scattering statistics for terrain*. Norwood, MA: Artech House, 1989.
- [21] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D: SAR simulation of actual ground sites described in terms of sparse input data. Sottoposto a *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*.
- [22] CEOS SAR/CAL/VAL Working Group: *Radar image quality white paper*.
- [23] Migliaccio M, Riccio D: Use of SARAS in post-processing techniques. *Proc. IGARSS'92*, Houston, TX, p. 1328-1330.