SIMULAZIONE DI SEGNALI SAR GREZZI IN MODALITÀ SPOTLIGHT RELATIVI A SCENE ESTESE

Giorgio Franceschetti, Antonio Iodice, Daniele Riccio, Giuseppe Ruello

Dipartimento di Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni,
Università di Napoli "Federico II", Via Claudio 21, 80125 Napoli.
e-mail: {gfrance, iodice, daniele.riccio, ruello}@unina.it

Abstract

Spotlight Synthetic Aperture Radar (SAR) technique [1] is able to obtain a high geometric resolution by steering the radar antenna beam during the raw data acquisition, to obtain a longer synthetic array. In this paper a spotlight SAR raw signal simulator is presented. The proposed procedure is based on a Fourier domain analysis, and allows the use of efficient FFT codes. Accordingly, the computational load is strongly reduced with respect to a time-domain simulation, and this makes spotlight simulation of extended scenes feasible.

1. INTRODUZIONE

Il radar ad apertura sintetica (SAR) consente di ottenere immagini (da aereo o da satellite) ad elevata risoluzione di ampie zone della superficie terrestre, in qualunque condizione atmosferica e indipendentemente dall'illuminazione solare [1]. Nella modalità di funzionamento tradizionale e più usata, la modalità *stripmap*, il fascio irradiato dall'antenna reale è puntato in una direzione fissa (solitamente perpendicolare alla linea di volo), cosicché esso illumina zone a terra diverse man mano che il sensore si sposta. In questo caso, la lunghezza dell'antenna sintetizzata è uguale alla dimensione (lungo la direzione di volo) dell'impronta a terra del fascio irradiato dall'antenna reale. Tuttavia, per evitare problemi di ambiguità [1], l'ampiezza del fascio non può essere aumentata a piacere. Per aumentare la lunghezza dell'antenna sintetizzata (e dunque migliorare la risoluzione) senza aumentare l'ampiezza del fascio irradiato, è possibile usare la modalità *spotlight*, in cui il puntamento dell'antenna reale viene cambiato con continuità durante il volo del sensore, in modo da illuminare sempre la stessa zona a terra [1,2]. Il miglioramento di risoluzione così ottenuto viene pagato con una riduzione della ampiezza dell'area osservata e con una maggiore complessità degli algoritmi di elaborazione necessari per ottenere l'immagine finale a partire dal segnale ricevuto a bordo (*segnale grezzo*). Per verificare gli algoritmi di elaborazione, per verificare l'impatto delle scelte progettuali sull'immagine finale per vari tipi di scena osservata, ed infine per fornire un ausilio alla pianificazione delle missioni, sarebbe molto utile avere a disposizione un simulatore di segnali SAR grezzi in modalità spotlight per scene estese. Un tale simulatore ad oggi non esiste: sono stati in passato utilizzati simulatori spotlight basati su algoritmi operanti nel dominio del tempo, ma, a causa della enorme complessità di calcolo, essi sono in grado di simulare il segnale grezzo relativo ad una scena costituita solo da uno o, al più, qualche punto diffondente (*simulatori di punto*). In questo lavoro viene presentato il primo simulatore di segnali SAR grezzi in modalità spotlight per scene estese: esso è basato sull'analisi nel dominio della frequenza illustrata nella Sezione 2, e fa uso di algoritmi di Fast Fourier Transform (FFT) che consentono di ridurre significativamente il tempo di elaborazione.

2. IL SEGNALE GREZZO IN MODALITA' SPOTLIGHT

Il segnale SAR grezzo in modalità spotlight può essere espresso nel modo seguente [1]:

$$h_{spot}(x',r') = \iint g(x,r)\exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R\right]\exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\frac{\Delta f/f}{c\tau}(r'-r-\Delta R)^2\right]\cdot \\ \cdot\, w^2\left(\frac{x}{X}\right)\mathrm{rect}\left[\frac{x'}{X_1}\right]\mathrm{rect}\left[\frac{(r'-r-\Delta R)}{c\tau/2}\right]dx\,dr \tag{1}$$

dove $\Delta R = R - r = \sqrt{r^2 + (x'-x)^2} - r$; inoltre, x, r e θ (*azimut*, *range* e angolo di vista locale) sono le coordinate nel sistema di riferimento cilindrico con asse coincidente con la linea di volo del sensore, $A\equiv(x',0,0)$ è la posizione dell'antenna, $g(x,r)$ è la mappa di riflettività, λ ed f sono rispettivamente la lunghezza d'onda e la frequenza del segnale portante, R è la distanza tra A ed il generico punto $(x,r,\ \theta(x,r))$ della scena, $\theta=\theta(x,r)$ è l'equazione della superficie osservata, R_0 è la distanza del centro della scena dalla linea di volo, Δf è la banda dell'impulso "chirp" trasmesso, τ è la sua durata, c è la velocità della luce, $w(\cdot)$ è il diagramma di illuminazione in azimut dell'antenna reale, $X = \lambda R_0/L$ la dimensione in azimut dell'impronta a terra del fascio irradiato dall'antenna reale (assumiamo che $w(\cdot)$ sia trascurabile quando il valore assoluto del suo argomento è maggiore di 1/2), L la lunghezza in azimut dell'antenna reale, rect[t/T] la funzione finestra rettangolare, r' è $c/2$ volte il tempo trascorso dalla trasmissione dell'impulso, e X_1 è la lunghezza del tratto di traiettoria di volo usato per acquisire il segnale grezzo, ossia la lunghezza dell'antenna sintetica.

La trasformata di Fourier della (1) può essere valutata analiticamente applicando il metodo della fase stazionaria, ottenendo così il segnale grezzo nel dominio della frequenza [1]:

$$H_{spot}(\xi,\eta) = \iint g(x,r)w^2\left(\frac{x}{X}\right)G_{spot}(\xi,\eta;x)\exp[-j\xi x]\exp[-j(\eta\Omega(\xi)+\mu(\xi))r]\,dx\,dr \tag{2}$$

dove

$$G_{spot}(\xi,\eta;x) = \exp\left[j\frac{\eta^2}{4b}\right]\exp\left[j\frac{\xi^2}{4a(1+\eta\lambda/(4\pi))}\right]\mathrm{rect}\left[\frac{\eta}{2bc\tau/2}\right]\mathrm{rect}\left(\frac{\xi-2ax}{2aX_1}\right) \quad , \tag{3}$$

$a = \dfrac{2\pi}{\lambda R_0}$, $\quad b = \dfrac{4\pi}{\lambda}\dfrac{\Delta f/f}{c\tau}$. Inoltre, $\Omega(\xi)$ e $\mu(\xi)$ tengono conto dell'effetto di variazione della profondità di fuoco [1], e la loro espressione completa è riportata in [1].

Le (2-3), pur essendo interessanti perché mostrano immediatamente le ampiezze di banda, e quindi le risoluzioni, in range e azimut, non possono essere utilizzate per effettuare una simulazione nel dominio della frequenza a causa della dipendenza di G_{spot} dalla coordinata azimut x del punto a terra. Per superare questo problema, riscriviamo la (1) nel seguente modo:

$$h_{spot}(x',r') = \mathrm{rect}\left[\frac{x'}{X_1}\right]\tilde{h}_{spot}(x',r') \tag{4}$$

con

$$\tilde{h}_{spot}(x',r') = \iint g(x,r)\exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R\right]\exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\frac{\Delta f/f}{c\tau}(r'-r-\Delta R)^2\right]\cdot$$
$$\cdot\, w^2\left(\frac{x}{X}\right)\mathrm{rect}\left[\frac{x'-x}{X+X_1}\right]\mathrm{rect}\left[\frac{(r'-r-\Delta R)}{c\tau/2}\right]dx\,dr \quad . \tag{5}$$

E' da notare che l'inclusione di $\mathrm{rect}[(x'-x)/(X+X_1)]$ non altera la (1) perché questo fattore è pari a zero se almeno uno tra $\mathrm{rect}[x'/X_1]$ e $w^2(x/X)$ è nullo, altrimenti esso è pari a uno. Effettuando la trasformata di Fourier della (5) si ottiene

$$\tilde{H}_{spot}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h}) = \tilde{G}_{spot}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h})\overline{\Gamma}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h}\Omega(\boldsymbol{x})+m(\boldsymbol{x})) \quad , \tag{6}$$

dove

$$\tilde{G}_{spot}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h}) = \exp\left[j\frac{\boldsymbol{h}^2}{4b}\right]\exp\left[j\frac{\boldsymbol{x}^2}{4a(1+\boldsymbol{h}\lambda/(4\pi))}\right]\mathrm{rect}\left[\frac{\boldsymbol{h}}{2bc\tau/2}\right]\mathrm{rect}\left(\frac{\boldsymbol{x}}{2a(X+X_1)}\right) \tag{7}$$

e $\overline{\Gamma}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h})$ è la trasformata di Fourier di $\gamma(x,r)\,w^2(x/X)$. La (6) mostra che è possibile generare $\tilde{h}_{spot}(x',r')$ operando nel dominio della frequenza, utilizzando algoritmi efficienti di FFT. Il segnale grezzo $h_{spot}(x',r')$ può essere poi ottenuto semplicemente moltiplicando per $\mathrm{rect}[x'/X_1]$. Le (6-7) mostrano anche che la banda in azimut complessiva del segnale grezzo è $2a(X+X_1)$.

3. IL SIMULATORE

Noti i dati di sistema, la geometria di acquisizione, il profilo altimetrico della scena e le caratteristiche elettromagnetiche e di rugosità microscopica del terreno, il simulatore genera anzitutto la mappa di riflettività $\gamma(x,r)$ del terreno, così come avviene nel simulatore stripmap descritto in [3]. Dopo la moltiplicazione per la funzione di illuminazione $w^2(x/X)$ viene effettuata una trasformata di Fourier usando algoritmi di FFT. Tale operazione è seguita da una interpolazione nel dominio trasformato, per ottenere $\overline{\Gamma}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h}\Omega(\boldsymbol{x})+m(\boldsymbol{x}))$ a partire da $\overline{\Gamma}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h})$ [3]. Il segnale così ottenuto viene quindi moltiplicato per $\tilde{G}_{spot}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{h})$ e antitrasformato, in modo da ottenere $\tilde{h}_{spot}(x',r')$. Questo segnale grezzo modificato ha una lunghezza complessiva in azimut pari ad almeno $X+X_1$. Tuttavia, i campioni esterni all'intervallo centrale di lunghezza X_1 vengono posti a zero. Questa operazione corrisponde alla moltiplicazione per $\mathrm{rect}[x'/X_1]$, e consente di ottenere il segnale grezzo $h_{spot}(x',r')$.

Occorre notare che, per evitare effetti di aliasing, tutti i segnali, compreso il segnale grezzo finale simulato, vengono campionati in azimut ad una frequenza $(1+X_1/X)\mathrm{PRF}/v$, dove PRF è la frequenza di ripetizione degli impulsi e v è la velocità del sensore. Questa

frequenza corrisponde ad una PRF pari a g = (1+ X_1/X) volte quella del segnale grezzo reale. E' dunque necessaria una operazione finale di decimazione.
Sottolineiamo infine che in una simulazione nel dominio del tempo, basata direttamente sulla (1), il sovracampionamento in azimut non è necessario; tuttavia l'efficienza degli algoritmi di FFT non viene sfruttata. Non è difficile verificare che il numero di moltiplicazioni complesse necessarie per la simulazione nel dominio trasformato si riduce rispetto alla simulazione nel dominio del tempo di un fattore

$$\frac{N_{TD}}{N_{FD}} \approx \frac{N_x N_r}{g\left[1+\log_2\left(N_x N_r\right)+\log_2 g\right]} \quad , \tag{8}$$

dove N_{FD} e N_{TD} sono il numero di moltiplicazioni complesse rispettivamente nel dominio della frequenza e del tempo, mentre N_x ed N_r sono le dimensioni in pixel, in azimut e range, del segnale grezzo spotlight finale. Per un segnale grezzo spotlight di 4096x4096 pixel, se g=8 si ottiene un fattore di riduzione del tempo di elaborazione dell'ordine di 75000. Ciò rende fattibile la simulazione spotlight di scene estese.

4. RISULTATI

Per verificare il corretto funzionamento del simulatore, è stato anzitutto verificato che il segnale grezzo simulato corrispondente ad un singolo punto diffusore sia in accordo con quello ottenuto direttamente dalla (1). Sono stati quindi simulati i segnali grezzi spotlight relativi ad alcune scene estese canoniche. Ad esempio, in Fig.1 è mostrata l'immagine ottenuta elaborando il segnale grezzo spotlight corrispondente ad un cono rugoso posto su un piano rugoso. I principali parametri di sistema impiegati in questa simulazione sono riportati in Tabella 1.

5. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato un simulatore di segnali SAR grezzi in modalità spotlight. La simulazione viene effettuata passando per il dominio della frequenza. Nonostante la necessità di un sovracampionamento che eviti l'aliasing, l'impiego di algoritmi di FFT comporta tempi di calcolo notevolmente inferiori rispetto ad una simulazione effettuata nel dominio del tempo, rendendo così possibile la simulazione di scene estese.

Riferimenti bibliografici

[1] G.Franceschetti, R.Lanari, *Synthetic Aperture Radar Processing*, CRC Press, 1999.

[2] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms*. Norwood, MA: Artech House, 1995.

[3] G.Franceschetti, M.Migliaccio, D.Riccio, G.Schirinzi, "SARAS: a SAR raw signal simulator", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 110-123, 1992.

Tabella 1: Principali parametri di sistema

Angolo di vista	28°
Dimens. antenna in azimut	8,5 m
Frequenza della portante	1,282 GHz
Banda del chirp	14 MHz
X_1/X	3

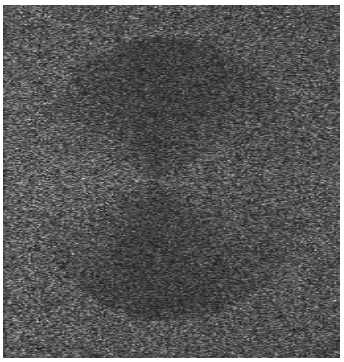

Fig.1: Immagine SAR spotlight simulata di un cono rugoso.