

SVILUPPO ED IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO RADARGRAMMETRICO IN UN SOFTWARE SCIENTIFICO: APPLICAZIONE A DATI COSMO-SKYMED

Francesca Pieralice*

Riassunto

L'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi cartografici è un tema di grande interesse, in quanto esse rappresentano una valida alternativa al rilievo fotogrammetrico per la produzione e l'aggiornamento di prodotti cartografici a media scala, e per la generazione di modelli digitali del terreno (Digital Terrain Model - DTMs) o della superficie (Digital Surface Model - DSMs). I DTMs/DSMs sono di fondamentale importanza per il loro utilizzo in diverse applicazioni, come produzione di ortofoto, change detection, analisi spaziali, visualizzazione dei dati.

La generazione di modelli digitali 3D a partire da dati radar, acquisiti da sensori SAR (Synthetic Aperture Radar), si basa principalmente su tecniche interferometriche o radargrammetriche.

In questo momento è di crescente interesse l'utilizzo della tecnica radargrammetrica, in seguito al lancio dei satelliti SAR di nuovissima generazione che permettono l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione. In particolare la costellazione COSMO-SkyMed è dotata di una tecnologia all'avanguardia e pone l'Italia ai vertici dei sistemi di telerilevamento a livello internazionale grazie alla elevata risoluzione raggiungibile in modalità SpotLight (fino ad 1 m).

Nel software scientifico SISAR (Software Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione), sviluppato dal gruppo di ricerca dell'Area di Geodesia e Geomatica (DICEA), Università di Roma "La Sapienza", è stato implementato un modello di orientamento basato sul principio della radargrammetria.

La radargrammetria, in modo simile alla fotogrammetria, ricava l'informazione altimetrica per via stereoscopica; il modello di orientamento implementato in SISAR è basato sulle due equazioni fondamentali Range-Doppler (RD), che rappresentano il vincolo di distanza piattaforma-bersaglio e il vincolo di proiezione Zero-Doppler (in cui il bersaglio viene acquisito perpendicolarmente al moto del satellite).

Inoltre, sulla base del modello rigoroso radargrammetrico, è stato anche sviluppato un algoritmo di generazione di Rational Polynomial Coefficients (RPCs), che permettono di orientare le immagini SAR secondo il modello a Funzioni Polinomiali Razionali (RPFs) raggiungendo lo stesso livello di accuratezza del modello rigoroso.

Il modello sviluppato è stato testato su due stereo coppie acquisite dai satelliti COSMO-SkyMed in modalità SpotLight sulle zone di Maussane (Francia) e di Merano (Italia).

Abstract

At present, thanks to the very high resolution and the good radiometric quality of the imagery acquired by very high resolution satellites such as Ikonos, WorldView-1, Geo-

* Università di Roma "La Sapienza" - Area di geodesia e Geomatica (DICEA)

Eye-1, it seems possible to generate Digital Surface Models (DSMs) at an accuracy level, which is comparable to the one of DSMs derived from middle scale aerial imagery.

As regards SAR sensors, the availability of new high resolution radar spaceborne sensors offers new interesting potentialities for the acquisition of data useful for the generation of Digital Surface Models (DSMs) following the radargrammetric approach.

At present, the importance of the radargrammetric approach is rapidly growing due to the new high resolution imagery (up to 1 m GSD) which can be acquired by COSMO-SkyMed in SpotLight mode. In this respect, it is well known that the two main steps for DSMs generation from SAR imagery according to the radargrammetric approach are the stereo pair orientation and the image matching.

In this paper the topics related to image orientation of SAR stereo pairs in zero-Doppler geometry acquired by COSMO-SkyMed sensor in SpotLight mode are investigated.

The orientation model is implemented in the software SISAR (Software Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione), developed at the Geodesy and Geomatic Institute of University of Rome "La Sapienza".

The defined and implemented model performs a 3D orientation based on two range and two zero-Doppler equations, allowing for the least squares estimation of some calibration parameters, related to satellite position and velocity and to the range measure. Starting from this model, based on geometric reconstruction, also a tool for the Rational Polynomial Coefficients (RPCs) generations has been implemented. To test the effectiveness of the new model, two stereo pairs acquired by COSMO-SkyMed over the test sites of Maussane and Merano in SpotLight mode have been orientated.

1. Introduzione

Le informazioni provenienti dalla fotogrammetria aerea sono utilizzate come mezzo per l'aggiornamento e la produzione cartografica; ad oggi oltre alla classica tecnica fotogrammetrica è possibile disporre anche di immagini digitali acquisite da satelliti dotati di sensori ad alta risoluzione, capaci di acquisire immagini in modalità pancromatica e multispettrale.

Grazie alla messa in orbita dei satelliti di ultima generazione, sia dotati di sensori ottici che radar, come Ikonos II, QuickBird, WorldView-1, GeoEye-1, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X, le immagini ad alta risoluzione hanno trovato largo impiego in numerose applicazioni, come il monitoraggio del territorio per scopi ambientali ed ingegneristici.

È di particolare interesse l'utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per scopi cartografici, in quanto rappresentano una valida alternativa al rilievo fotogrammetrico per la produzione e l'aggiornamento di prodotti cartografici a media scala, e per la generazione di modelli digitali del terreno (Digital Elevation Model - DEM) o della superficie (Digital Surface Model - DSM).

Ad ogni modo la possibilità di utilizzare le immagini ad alta risoluzione per scopi cartografici dipende dalle caratteristiche del sensore (risoluzione geometrica e radiometrica), dalla tipologia di prodotti messi in commercio dalle compagnie che gestiscono la piattaforma satellitare, dal costo e dal tempo necessario per ottenere le immagini e dal costo dei software commerciali necessari per il loro processamento.

In generale i vantaggi offerti dal telerilevamento sono rappresentati da: la possibilità di eseguire rilevamenti a cadenze regolari, che dipendono dal tempo di rivisitazione del satellite utilizzato, caratteristica importante in casi di emergenze o comunque ogni volta che sia necessario monitorare con continuità l'evoluzione del territorio; la possibilità di acquisire immagini in territori difficili da raggiungere o comunque critici dal punto di vista dell'organizzazione di voli fotogrammetrici, ad esempio paesi in via di sviluppo; tempi di acquisizione e oneri economici ridotti rispetto alle tradizionali tecniche fotogrammetriche; la possibilità di riprendere zone molto estese.

Come esempi di prodotti cartografici derivati dal telerilevamento satellitare si possono citare le ortofoto per quanto riguarda le immagini ottiche, e i modelli digitali del terreno o della superficie (DTMs/DSMs) generati da stereo coppie ottiche o radar. I DTMs/DSMs, rappresentano un valido strumento per ottenere numerosi prodotti secondari come curve di livello, profili, volumi, modelli di pendenza, e costituiscono la base per la modellazione di molti fenomeni naturali e per l'esecuzione di analisi spaziali.

Le immagini satellitari sono affette da distorsioni dovute a diversi fattori, quali il sistema di acquisizione (orientamento e movimento del satellite, caratteristiche ottico-geometriche del sensore), gli effetti di rifrazione atmosferica e l'effetto della morfologia del terreno; pertanto, affinché le immagini possano essere utilizzate in ambito cartografico, è necessario sottoporle ad un processo di orientamento e ortorettificazione al fine di eliminare le distorsioni.

Per quanto riguarda i modelli di orientamento, il gruppo dell'Area di Geodesia e Geomatica (DICEA), Università degli Studi di Roma "La Sapienza", porta avanti dal 2003 lo sviluppo del software scientifico SISAR (Software Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione), dedicato all'orientamento delle immagini satellitari ad alta risoluzione, nato per le immagini ottiche ed esteso nell'ultimo biennio anche all'orientamento di immagini radar.

La generazione di modelli digitali 3D a partire da dati radar, acquisiti da sensori SAR (Synthetic Aperture Radar), si basa principalmente su tecniche interferometriche o radargrammetriche, entrambe basate sull'utilizzo di una coppia di immagini della stessa area acquisite da due punti di presa diversi (stereo coppia).

La tecnica interferometrica sfrutta l'informazione relativa alle differenze di fase per ricostruire il dato altimetrico, pertanto richiede una base di presa corta; la tecnica radargrammetrica, in modo analogo alla fotogrammetria aerea o satellitare, permette di estrarre le informazioni relative alla posizione tridimensionale dei punti sul terreno attraverso la ricostruzione della geometria della presa, in questo caso è richiesta una base di presa più lunga e vengono utilizzate immagini SAR in ampiezza.

Il modello di orientamento implementato nel software SISAR, e descritto nel presente lavoro, è basato sul principio della radargrammetria. In questo momento è di crescente interesse l'utilizzo di questa tecnica, soprattutto dopo il lancio dei satelliti SAR di nuovissima generazione che permettono l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione.

Infatti le prime applicazioni radargrammetriche sono state sviluppate a partire dai primi anni '60, ma a causa delle scarse risoluzioni spaziali dei sensori finora disponibili (decine di metri), questa tecnica non ha trovato un largo impiego, a vantaggio della tecnica interferometrica. Attualmente, con la messa in orbita di satelliti di nuova generazione, capaci di acquisire immagini ad alta risoluzione in ampiezza (fino ad 1 m), la radargrammetria trova nuove possibilità di utilizzo e si aprono nuovi campi di indagine sulle potenzialità e sulle caratteristiche dei modelli digitali del terreno generati dai dati SAR. Si intende comunque sottolineare che la radargrammetria non vuole sostituire la tecnica interferometrica, ma essere integrata ad essa al fine di estrarre il massimo contenuto informativo dai dati radar.

Particolare attenzione è stata posta verso le applicazioni radargrammetriche con immagini acquisite dalla costellazione di satelliti italiani COSMO-SkyMed. Con COSMO-SkyMed l'Italia dispone di uno dei sistemi spaziali per osservazione della Terra tecnologicamente più avanzati e all'avanguardia in campo mondiale.

2. COSMO-SkyMed

Il programma COSMO-SkyMed rappresenta il più grande investimento italiano nel settore dell'osservazione della Terra e costituisce una realizzazione all'avanguardia in campo mondiale.

Il sistema è composto da una costellazione di quattro satelliti equipaggiati con sensori SAR ad alta risoluzione operanti in banda X.

COSMO-SkyMed è un programma spaziale per applicazioni duali (civili istituzionali/commerciali e militari) pensato e finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e dal Ministero della Difesa e sviluppato da un team di industrie nazionali sotto il controllo dell'ASI.

Il sistema di satelliti ha una grande flessibilità di utilizzo, essendo in grado di operare in diverse modalità di acquisizione: ScanSAR (con uno swath compreso tra 100 e 200 km e una bassa risoluzione, da circa $100 \times 100 \text{ m}^2$ fino a $30 \times 30 \text{ m}^2$), Stripmap (con uno swath compreso tra 30 e 40 km e una media risoluzione, circa $3 \times 3 \text{ m}^2$) e SpotLight (acquisizione di aree limitate, circa $10 \times 10 \text{ Km}^2$, con una risoluzione di $1 \times 1 \text{ m}^2$).

La flessibilità del sistema lo rende particolarmente adatto anche ad acquisizioni utili in momenti di crisi ed emergenze, uno strumento valido per assistenza alle attività di soccorso e pianificazione di protezione civile nella gestione dei rischi. La possibilità di acquisizioni in ogni condizione meteorologica e di illuminazione, gli intervalli temporali di rivisitazione di poche ore, rendono COSMO-SkyMed particolarmente adatto al monitoraggio del territorio e alla gestione delle risorse ambientali.

La costellazione COSMO-SkyMed è dotata quindi di una tecnologia all'avanguardia e pone l'Italia ai vertici dei sistemi di telerilevamento a livello internazionale.

3. Il modello di orientamento implementato nel software SISAR

3.1. La tecnica radargrammetrica

La tecnica della radargrammetria nasce nei primi anni '60 (La Prade, 1963), ma fino a questo momento non ha trovato un largo impiego a causa delle basse risoluzioni spaziali disponibili sul mercato (decine di metri di risoluzione in ampiezza).

Negli ultimi decenni diversi ricercatori hanno studiato le potenzialità della generazione di DSMs con la tecnica della radargrammetria da diversi tipi di sensori, ad esempio Toutin (Toutin and Gray, 2000) ha pubblicato numerosi lavori riguardanti applicazioni con RADARSAT-1 and ERS1/2 (sensori a bassa risoluzione in ampiezza), mentre sono ancora poche le applicazioni con i sensori di nuova generazione, tra cui ad esempio è possibile ricordare gli studi di Raggam (Raggam et al., 2009), relativi al sensore TerraSAR-X.

La radargrammetria, in modo simile alla fotogrammetria, ricava l'informazione altimetrica per via stereoscopica. Per ottenere una buona configurazione stereo, la condizione migliore è quella in cui il bersaglio è osservato da due punti di vista opposti (opposite-side configuration); purtroppo tale condizione produce grosse differenze radiometriche e geometriche tra le due immagini che rendono difficile la procedura di matching, fase cruciale per la generazione di DSMs. Per questa ragione un buon compromesso è quello di avere una coppia acquisita da due punti di vista giacenti sullo stesso lato (same-side configuration) con un rapporto "base di presa su altezza" compreso tra 0.25 e 2.0 (Méric et al., 2009).

In questo lavoro è descritto il modello di orientamento per immagini SAR implementato nel software scientifico SISAR e sono riportati i risultati ottenuti in alcune applicazioni su dati COSMO-SkyMed. Partendo dal modello proposto da Leberl (Leberl, 1990), è stato proposto un affinamento della modellizzazione del segmento orbitale, necessario per sfruttare al massimo le potenzialità dei dati ad alta risoluzione.

3.2. Il modello

La tecnica della radargrammetria è basata su una ricostruzione 3D effettuata attraverso la determinazione del modello di orientamento oggetto-sensore, nel quale la posizione dell'oggetto è determinata attraverso l'intersezione dei due "cerchi Doppler" corrispondenti all'acquisizione dello stesso punto a terra (Fig. 1).

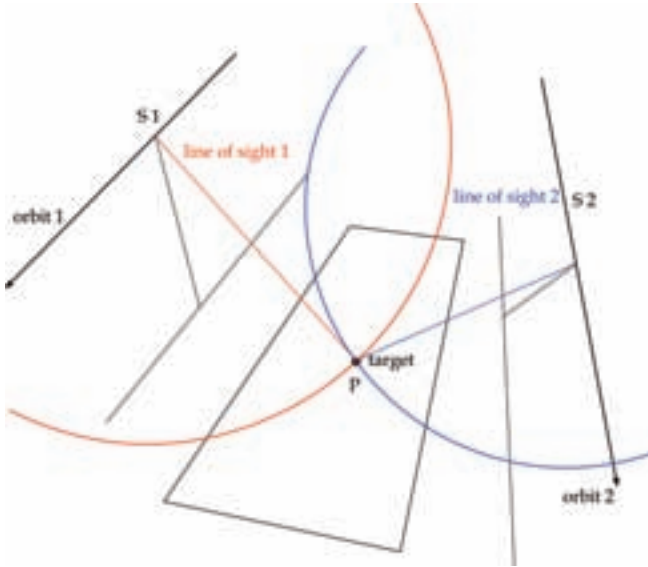


Fig. 1 – Determinazione della posizione a terra del punto P attraverso l'intersezione di cerchi Doppler.

Prima di tutto occorre richiamare la struttura del sistema di coordinate in una immagine SAR con proiezione slant range/zero-Doppler. Il sistema di coordinate è bidimensionale, l'origine è nell'angolo in alto a sinistra dell'immagine, la posizione di un punto è definita dalla sua riga (J) e colonna (I), crescenti rispettivamente verso il basso e verso destra.

La posizione di un punto lungo le righe J è relativa al suo istante di acquisizione, misurato lungo la direzione di volo del satellite, detta azimuth; la posizione lungo le colonne I è relativa allo slant range, cioè alla distanza tra il satellite e il punto a terra. In modo analogo la dimensione del pixel è caratterizzata dalla risoluzione in azimuth lungo la direzione di moto del satellite (line spacing LS) e la risoluzione in slant range (column spacing CS).

Le equazioni fondamentali del modello sono:

$$\begin{cases} \vec{v} \cdot (\vec{S} - \vec{P}) = 0 \\ |\vec{S} - \vec{P}| = RS_p \end{cases} \quad [1]$$

dove \vec{P} è la posizione del generico punto P a terra, \vec{v} è il vettore velocità del satellite, \vec{S} è la posizione del satellite corrispondente al punto P, RS_p è lo slant range relativo al generico punto P.

La prima equazione di [1] rappresenta il caso generale di proiezione in configurazione zero-Doppler, cioè in modo tale che il bersaglio sia acquisito lungo una direzione perpendicolare al moto del satellite (Fig. 2); la seconda equazione di [1] rappresenta il vincolo di slant range.

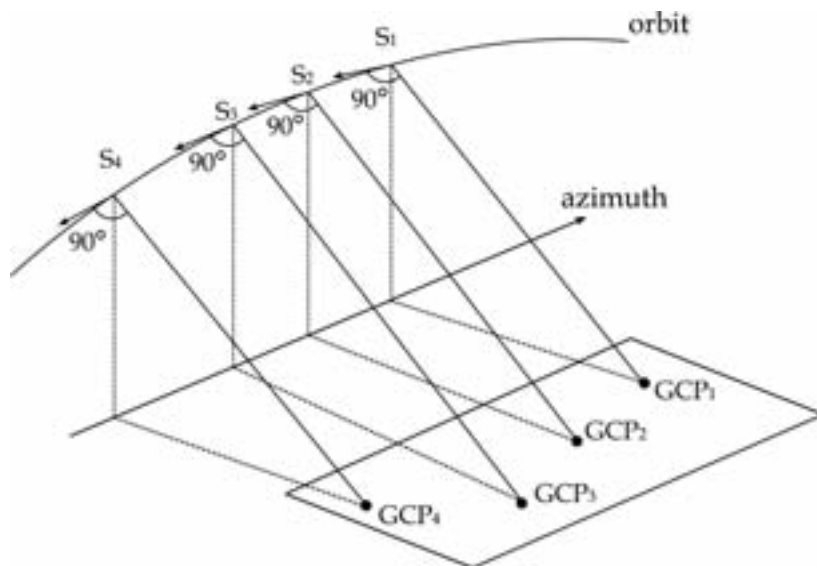


Fig. 2 – Acquisizione in geometria zero-Doppler.

Per quanto riguarda la ricostruzione dell'arco orbitale, poiché la durata dell'acquisizione è di pochi secondi e il segmento orbitale relativo è piuttosto breve (circa 10 Km), esso può essere modellizzato in modo semplice con un arco di circonferenza; i parametri dell'orbita sono stimati ai minimi quadrati sulla base delle posizioni del satellite contenute nei file di metadata dell'immagine. L'equazione [1] può essere scritta in forma esplicita:

$$\begin{cases} V_{XS} \cdot (X_S - X_P) + V_{YS} \cdot (Y_S - Y_P) + V_{ZS} \cdot (Z_S - Z_P) = 0 \\ \sqrt{(X_S - X_P)^2 + (Y_S - Y_P)^2 + (Z_S - Z_P)^2} - (D_s + CS \cdot I) = 0 \end{cases} \quad [2]$$

dove V_{XS}, V_{YS}, V_{ZS} sono le componenti cartesiane del vettore velocità del satellite (dipendenti dal tempo), X_S, Y_S, Z_S sono le coordinate cartesiane della posizione del satellite (dipendenti dal tempo), X_P, Y_P, Z_P sono le coordinate cartesiane del generico Ground Control Point (GCP) (indipendenti dal tempo), D_s è il near range, cioè la distanza relativa al bordo dell'immagine più vicino al satellite, CS è la risoluzione in slant range (column spacing), I è la posizione lungo le colonne del punto P sull'immagine.

Inoltre l'istante di acquisizione di ogni GCP è legato alla sua posizione lungo le righe J attraverso una funzione lineare:

$$t = k_{t0} + k_{t1} \cdot J \quad [3]$$

dove i parametri k_{t0}, k_{t1} sono le incognite.

La soluzione ai minimi quadrati del problema dell'orientamento è finalizzata alla stima dei parametri k_{t0}, k_{t1} e alla stima di una correzione del near range.

4. Generazione di RPC

Oltre ai modelli di orientamento basati sulla ricostruzione della geometria della presa e delle caratteristiche del sensore, comunemente detti "rigorosi" o "fisicamente basati", esiste un'altra categoria di modelli, utilizzati in modo molto diffuso, basati su funzioni puramente analitiche in cui viene espresso il legame tra le coordinate immagine e le coordinate oggetto dei punti.

L'ampia diffusione di questi modelli è dovuta principalmente alla loro semplicità di utilizzo, e alla non necessaria conoscenza, per il loro utilizzo, di informazioni sul sensore, sull'assetto e sulle effemeridi del satellite.

Il modello analitico maggiormente utilizzato è il modello a funzioni polinomiali razionali (Rational Polynomial Function – RPFs). Il modello RPFs descrive la relazione analitica esistente fra lo spazio immagine (I, J) e lo spazio oggetto (latitudine ϕ , longitudine λ e quota ellissoidica h) attraverso semplici rapporti di polinomi (fino al terzo ordine):

$$\begin{aligned} I &= \frac{P_1(\varphi, \lambda, h)}{P_2(\varphi, \lambda, h)} = \frac{a_0 + a_1\lambda + a_2\varphi + a_3h + a_4\lambda\varphi + \dots + a_{17}\lambda^3 + a_{18}\varphi^3 + a_{19}h^3}{1 + b_1\lambda + b_2\varphi + b_3h + b_4\lambda\varphi + \dots + b_{17}\lambda^3 + b_{18}\varphi^3 + b_{19}h^3} \\ J &= \frac{P_3(\varphi, \lambda, h)}{P_4(\varphi, \lambda, h)} = \frac{c_0 + c_1\lambda + c_2\varphi + c_3h + c_4\lambda\varphi + \dots + c_{17}\lambda^3 + c_{18}\varphi^3 + c_{19}h^3}{1 + d_1\lambda + d_2\varphi + d_3h + d_4\lambda\varphi + \dots + d_{17}\lambda^3 + d_{18}\varphi^3 + d_{19}h^3} \end{aligned} \quad [4]$$

dove a_j, b_j, c_j, d_j sono i coefficienti, detti RPCs (Rational Polynomial Coefficients).

Eventuali errori sistematici (bias) del modello possono essere corretti con un modello di raffinamento, introducendo un polinomio del primo ordine nelle equazioni [4]:

$$\begin{aligned} I &= A_0 + A_1I + A_2J + \frac{a_0 + a_1\lambda + a_2\varphi + a_3h + a_4\lambda\varphi + \dots + a_{17}\lambda^3 + a_{18}\varphi^3 + a_{19}h^3}{1 + b_1\lambda + b_2\varphi + b_3h + b_4\lambda\varphi + \dots + b_{17}\lambda^3 + b_{18}\varphi^3 + b_{19}h^3} \\ J &= B_0 + B_1I + B_2J + \frac{c_0 + c_1\lambda + c_2\varphi + c_3h + c_4\lambda\varphi + \dots + c_{17}\lambda^3 + c_{18}\varphi^3 + c_{19}h^3}{1 + d_1\lambda + d_2\varphi + d_3h + d_4\lambda\varphi + \dots + d_{17}\lambda^3 + d_{18}\varphi^3 + d_{19}h^3} \end{aligned} \quad [5]$$

dove A_j e B_j sono determinati con un processo di stima a minimi quadrati sulla base di un opportuno numero di GCP e descrivono o una semplice traslazione (A_0, B_0) o una trasformazione affine ($A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$) (Fraser, 2003).

Molte società che gestiscono immagini satellitari usano per l'orientamento le funzioni RPFs con gli RPCs generati segretamente a partire da un loro modello di ricostruzione della geometria della presa.

Il modello di orientamento basato su tali RPCs, universalmente accettato e validato, costituisce un'ottima alternativa al modello di orientamento del sensore per immagini satellitari ad alta risoluzione.

Attualmente la maggior parte delle immagini satellitari ottiche vengono distribuite insieme ad un file di accompagnamento contenente gli RPCs, mentre le immagini SAR COSMO-SkyMed non sono provviste di tale file utile alla fase di orientamento.

Nel software SISAR è stato sviluppato un modulo per la generazione degli RPCs anche per le immagini radar che non ne sono comunemente provviste.

L'utilizzo del modello RPCs, ormai diffuso e validato per quanto riguarda le immagini ottiche, potrebbe essere di grande utilità anche per le immagini SAR, vista la diffusione di software commerciali in cui è implementato e vista la sua grande semplicità di utilizzo.

Gli RPC sono generati usando un "terrain independent approach" (Crespi et al, 2009), nel quale la

stima dei coefficienti è realizzata sulla base del modello di orientamento radargrammetrico.

In particolare, viene costruita una griglia 2D, che ricopre l'intera immagine, i cui punti sono utilizzati per generare una corrispondente griglia 3D nello spazio oggetto, attraverso il modello di orientamento fisicamente basato (Fig. 3); a questo punto, i punti della griglia immagine e i corrispondenti punti della griglia oggetto sono utilizzati per stimare i coefficienti delle funzioni polinomiali razionali.

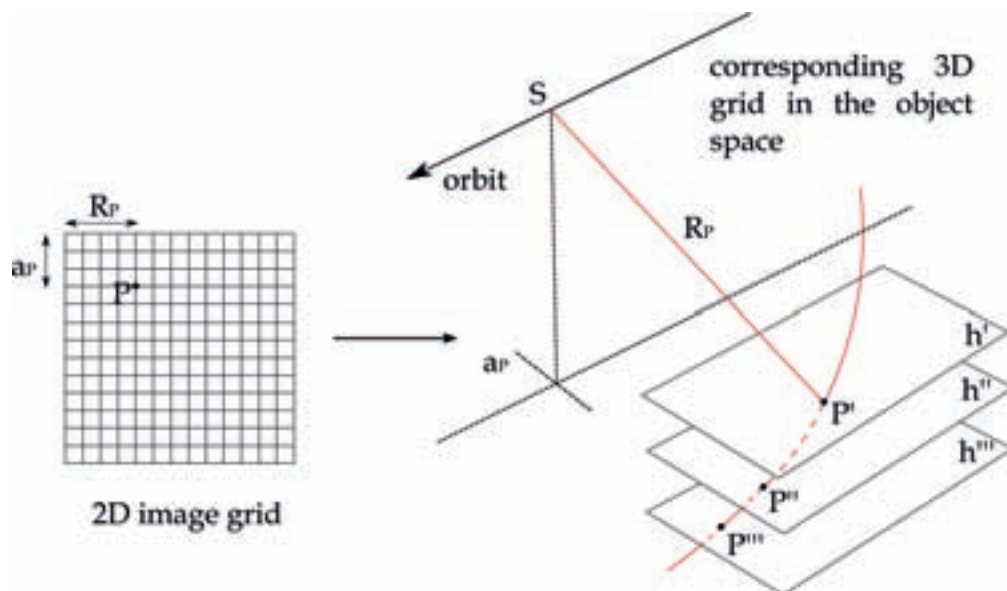


Fig. 3 – Generazione degli RPCs attraverso il modello rigoroso: griglia immagine 2D e corrispondente griglia 3D nel sistema oggetto.

Un'analisi approfondita ha evidenziato l'esistenza di alte correlazioni tra i coefficienti stimati provocando un'instabilità del modello; tale problema è risolto nel software SISAR utilizzando una procedura innovativa basata su due decomposizioni (SVD-Singular Value Decomposition e QR) per la selezione automatica dei coefficienti realmente stimabili e sul test t-Student per la selezione dei parametri significativi (Crespi et al, 2009). Tale procedura permette di stimare solo i parametri realmente stimabili e significativi, riducendo di molto il numero di coefficienti utilizzati nelle funzioni RPFs.

Si intende sottolineare inoltre che gli RPCs generati sulla base di un modello rigoroso, precedentemente calibrato su alcuni GCPs, non presenta significativi bias, pertanto non necessita della stima dei parametri di correzione visti nell'equazione [5].

5. I risultati

5.1. Data set

Il modello implementato e il modulo di generazione degli RPCs sono stati testati su due stereo coppie COSMO-SkyMed acquisite in modalità SpotLight su una zona della Francia meridionale (Maussane) e su una zona dell'Italia settentrionale (Merano) (caratteristiche delle immagini elencate nella Tabella 1).

Tutte le immagini in questione appartengono alla categoria di prodotto Level 1A (SCS), cioè dati focalizzati in formato complesso, restituiti in proiezione slant range/zero-Doppler.

Le due scene di Maussane sono state acquisite rispettivamente con un angolo di incidenza di 35.7 e 55.4 gradi lungo un'orbita ascendente e con configurazione same-side, il rapporto "base di presa su altezza" è pari 0.7.

Le due scene di Merano sono state acquisite rispettivamente con un angolo di incidenza di 25.9 e 42.3 gradi lungo un'orbita discendente, sempre con configurazione same-side, il rapporto "base di presa su altezza" è pari 0.3. La copertura di tutte le immagini è di circa $10 \times 10 \text{ Km}^2$.

L'orientamento della stereo coppia di Maussane è basato su 25 Ground Points (GPs), per i quali le coordinate sono state determinate per via fotogrammetrica, utilizzando una stereo coppia acquisita dal satellite Cartosat-1 (risoluzione 2.5 m), con un'accuratezza di circa 3 m in planimetria, e di circa 4 m per la componente verticale.

Per la stereo coppia di Merano sono stati utilizzati 20 GPs, per i quali le coordinate planimetriche e la quota sono state ricavate rispettivamente da cartografia a scala 1:5000 e da un modello digitale del terreno generato da rilievo LIDAR con accuratezza media di 0.25 m, disponibili on-line sul sito della "Provincia Autonoma di Bolzano".

TABELLA 1: CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE IMMAGINI COSMO-SKYMED

Area	Data acquisizione	Copertura [Km2]	Angolo medio incidenza [gradi]	Orbita	Look side	B/H
Maussane	13/07/2008	10x10	35.7	Ascending	Right	0.7
	14/07/2008	10x10	55.4	Ascending	Right	
Merano	30/11/2009	10x10	25.9	Descending	Right	0.3
	02/11/2009	10x10	42.3	Descending	Right	

5.2. Risultati del modello di orientamento radargrammetrico

Per testare il modello le stereo coppie sono state orientate variando il numero di GCPs ed è stato analizzato il risultato dell'orientamento in termini di accuratezza valutata come Root Mean Square Error (RMSE) calcolato sui residui di un set di Check Points (CPs).

Per ottenere risultati significativi dal punto di vista statistico, per un dato numero di GCPs usati per orientare le immagini, sono stati utilizzati diversi set indipendenti di punti uniformemente distribuiti. Nelle seguenti tabelle verrà riportata la media, la mediana e la deviazione standard degli RMSE ottenuti negli orientamenti effettuati con le diverse distribuzioni.

Il numero di GCPs usati nella fase di orientamento non è stato incrementato oltre 12 e 9 per Maussane e Merano rispettivamente, in quanto i rimanenti punti utilizzati come CPs sarebbero stati in quantità esigua per una significativa valutazione dell'accuratezza.

È importante sottolineare che l'identificazione dei punti di controllo sulle immagini SAR generalmente non è semplice e il posizionamento dei punti è affetto da un errore di 1-2 pixel o anche maggiore (Fig. 4).

Nel caso di Maussane l'accuratezza ottenuta nell'orientamento è di circa 4.0 - 5.0 m sia per le componenti planimetriche che per quella verticale (Tabella 2), tale livello di accuratezza è congruente con quella delle coordinate dei punti di controllo, considerando anche l'errore di collimazione che si compie sulle immagini radar.

Per quanto riguarda il numero di punti utilizzato per l'orientamento, il software mostra un comportamento stabile, e l'incremento del numero di punti non migliora sensibilmente il risultato.

In Fig. 5 è presentato l'istogramma in termini di RMSE sui CPs usando diversi set di GCPs per la stereo coppia di Maussane; in particolare sono state utilizzate 4 differenti distribuzioni di 6 GCPs. Il modello mostra una buona stabilità anche variando la distribuzione dei punti di controllo utilizzati.

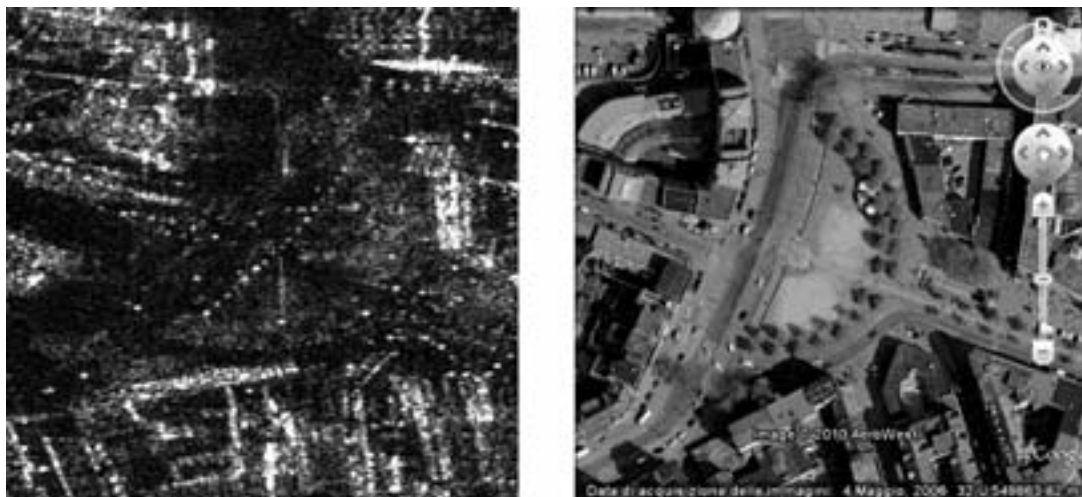


Fig. 4 – Esempio di riconoscimento di un GCP al centro di una piazza su un'immagine SAR (sinistra) e su un'immagine aerea (destra).

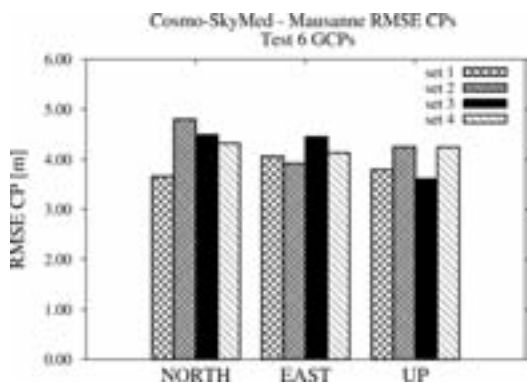


Fig. 5 – Istogramma per le diverse distribuzioni di 6 GCPs (RMSE CPs) nella stereo coppia di Maussane.

TABELLA 2 – RISULTATI DEL SOFTWARE SISAR PER LA STEREO COPPIA DI MAUSSANE

		RMSE CPs Maussane								
		media [m]			mediana [m]			deviazione standard [m]		
# GCPs	# Indip. Sets	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP
3	8	4.78	4.51	4.26	4.85	4.41	4.31	0.86	0.42	0.21
6	4	4.32	4.14	3.97	4.41	4.10	4.01	0.42	0.19	0.28
9	2	4.12	4.00	3.94	4.12	4.00	3.94	0.53	0.01	0.10
12	2	4.40	4.03	4.02	4.40	4.03	4.02	0.51	0.34	0.13

TABELLA 3 – RISULTATI DEL SOFTWARE SISAR PER LA STEREO COPPIA DI MERANO

		RMSE CPs Merano								
		media [m]			mediana [m]			deviazione standard [m]		
# GCPs	# Indip. Sets	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP
3	6	2.78	4.14	2.54	2.81	4.22	2.41	0.41	0.30	0.23
6	3	2.55	3.59	2.91	2.36	3.76	2.67	0.27	0.24	0.38
9	2	2.78	3.78	2.70	2.78	3.78	2.70	0.17	0.01	0.19

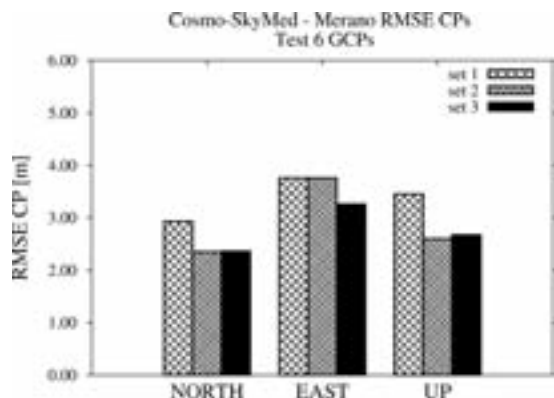


Fig. 6 – Istogramma per le diverse distribuzioni di 6 GCPs (RMSE CPs) nella stereo coppia di Merano.

TABELLA 4 – RISULTATI DEL SOFTWARE ORTHOENGINE V. 10.3 PER LE STEREO COPPIE DI MAUSSANE E DI MERANO

RMSE CPs OrthoEngine							
Maussane				Merano			
# GCPs	NORD [m]	EST [m]	UP [m]	# GCPs	NORD [m]	EST [m]	UP [m]
9	5.40	7.03	4.30	9	2.21	3.40	3.23
12	5.92	6.36	4.23	-	-	-	-

Nel caso della stereo coppia di Merano l'accuratezza in planimetria è di circa 3.0 - 4.0 m, mentre in altimetria è di circa 3.0 m (Tabella 3). Anche in questo caso l'incremento del numero di punti non migliora significativamente i risultati. In Figura 6 è presentato l'istogramma per 3 differenti distribuzioni di 6 GCPs.

Inoltre le stereo coppie sono state orientate anche con il modello di Toutin implementato nel software commerciale OrthoEngine v. 10.3 (PCI Geomatica); i migliori risultati ottenuti sono presentati nella Tabella 4. Secondo le indicazioni del manuale d'uso del software (PCI Geomatics, 2009), sono necessari almeno 8 GCPs per l'orientamento di stereocoppie SAR, pertanto si è deciso di effettuare i test con OrthoEngine utilizzando almeno 9 GCPs; ne consegue che il livello di accuratezza raggiungibile con i due software è simile, ma risulta essere significativamente diverso il numero di GCPs necessario per ottenerlo.

5.3. Risultati della generazione ed applicazione degli RPC

In questo paragrafo sono presentati i risultati della generazione degli RPCs per le immagini COSMO-Sky-Med e della loro applicazione per l'orientamento delle stereo coppie.

Per quanto riguarda la generazione, rispetto ai 78 coefficienti usati nelle RPFs di terzo ordine, viene stimato un numero inferiore di coefficienti (circa 1/4) ritenuti effettivamente stimabili e significativi, utilizzando la procedura di selezione sopra descritta ed evitando così una inutile sovrapparametrizzazione.

Gli stessi set di punti utilizzati nella procedura di valutazione del modello rigoroso sono stati utilizzati per generare gli RPC, che sono stati poi utilizzati senza alcun raffinamento nell'orientamento delle stereo coppie (risultati nelle Tabelle 5 e 6).

I risultati ottenuti, simili a quelli del modello rigoroso radargrammetrico, confermano la possibilità di utilizzo degli RPCs per le immagini SAR e del loro possibile impiego in sostituzione di un modello rigoroso, ad esempio all'interno di software commerciali.

TABELLA 5 – RISULTATI DELLA GENERAZIONE E DELLA APPLICAZIONE DEGLI RPCS PER LA STEREO COPPIA DI MAUSSANE

		RMSE CPs Maussane - RPC								
		media [m]			mediana [m]			deviazione standard [m]		
# GCPs	# Indip. Sets	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP
3	6	5.07	4.59	4.26	5.17	4.49	4.23	0.87	0.36	0.28
6	3	4.49	4.22	3.88	4.63	4.16	3.9	0.27	0.21	0.24
9	2	4.22	4.06	3.78	4.22	4.06	3.78	0.49	0.02	0.05
12	2	4.31	3.90	3.96	4.31	3.90	3.96	0.23	0.13	0.06

TABELLA 6 - RISULTATI DELLA GENERAZIONE E DELLA APPLICAZIONE DEGLI RPCS PER LA STEREO COPPIA DI MERANO

		RMSE CPs Merano - RPC								
		media [m]			mediana [m]			deviazione standard [m]		
# GCPs	# Indip. Sets	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP	NORD	EST	UP
3	6	2.79	4.23	2.63	2.72	4.09	2.61	0.37	0.49	0.21
6	3	2.58	3.62	2.67	2.33	3.79	2.42	0.46	0.4	0.37
9	2	2.79	3.77	2.71	2.79	3.77	2.71	0.23	0.02	0.02

6. Conclusioni e prospettive future

Un nuovo modello per l'orientamento di immagini SAR acquisite dal satellite COSMO-SkyMed in modalità SpotLight è stato definito e implementato nel software scientifico SISAR. Due diverse stereo coppie sono state orientate per testare e valutare le prestazioni del software; le immagini sono relative alle zone di Maussane (Francia) e Merano (Italia).

L'accuratezza, valutata come RMSE dei residui sui CPs, è dell'ordine di 4.0 - 5.0 m nel caso di Maussane e di 3.0 m nel caso di Merano. I risultati mostrano delle soddisfacenti prestazioni del software, considerando anche la non eccellente accuratezza dei punti di controllo disponibili. Ulteriori indagini, utilizzando punti di controllo più accurati, ad esempio acquisiti con rilievo GPS, dovrebbero comunque essere condotte. Il modello mostra un comportamento stabile e vengono ottenuti buoni risultati utilizzando anche pochi GCPs, mentre l'incremento del numero di GCPs non migliora significativamente i risultati.

La generazione di RPCs per le immagini radar ha dato soddisfacenti risultati, simili a quelli derivati dal modello rigoroso, confermando la possibilità di utilizzo del modello RPCs anche per le immagini radar.

Nel futuro lo sviluppo del software sarà volto all'implementazione di un algoritmo di matching sulle immagini SAR e quindi alla generazione di DSMs, nonché alla valutazione dei prodotti ottenuti.

Ringraziamenti

Si ringrazia e-Geos S.p.A., Roma (Italia) per aver reso disponibili le immagini COSMO-SkyMed; inoltre un ringraziamento va anche a Sysdeco Italia S.r.l., per aver fornito il software PCI Geomatica v. 10.3.

Bibliografia

M. CRESPI, F. FRATARCANGELI, F. GIANNONE, F. PIERALICE (2009), Chapter 4 - Overview on models for high resolution satellites imagery orientation, In: Geospatial Technology for Earth Observation data, edit by Li D., Shan J., Gong J. (Eds.), Springer, Heidelberg

FRASER C.S., HANLEY H.B. (2003), Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(1), 53-57

LA PRADE G. (1963), An analytical and experimental study of stereo for radar. *Photogrammetric Engineering* 29 (2), 294-300

LEBERL F.W. (1990), *Radargrammetric image processing*, Artech House, Norwood, USA

MÉRIC S., FAYARD F., POTTIER E. (2009), Chapter 20 - "Radargrammetric SAR image processing" In: Pei-Gee Peter Ho (Eds.), *Geoscience and Remote Sensing*, Intech

PCI Geomatics, *PCI Geomatica 10.3 User Guide*, 2009

RAGGAM H., PERKO R., GUTJAHN K. (2009), "Investigation of the Stereo-Radargrammetric Mapping Potential of TerraSAR-X", 29th EARSeL Symposium, Chania, Greece, pp. 371–380

TOUTIN T., GRAY L. (2000), "State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 55, ELSEVIER, pp. 13-33