

Algoritmi per il telerilevamento

Marco Gonnelli (*), Giovanni Spaccavento (**), Fabio Sarti (***)

(*) Accademia Navale M.M. di Livorno, Direzione Studi, Dipartimento Capitanerie di Porto
Viale Italia 72, 57127 Livorno, Tel. 0586.238765, marco.gonnelli@marina.difesa.it

(**) Accademia Navale M.M. di Livorno, Direzione Studi, Dipartimento Capitanerie di Porto
Viale Italia 72, 57127 Livorno, Tel. 0586.238765, giovanni-spaccavento@marina.difesa.it

(***) Accademia Navale M.M. di Livorno, Direzione Studi, Dipartimento Capitanerie di Porto
Viale Italia 72, 57127 Livorno, Tel. 0586.238366, fabio-sarti@marina.difesa.it

Riassunto

Algoritmi per la correzione di immagini affette da errori imputabili a deriva termica dei corpi neri in sensore Sensytech. Tecnica di correzione basata sull'analisi dei file ancillari prodotti dallo scanner multispettrale. Riduzione del disturbo presente nelle righe di scansione con un algoritmo basato sull'attenuazione di picchi in frequenza successivamente alla segmentazione terra-mare automatica. Strumenti per la corretta rappresentazione dell'immagine tele rilevata tramite algoritmi di correzione geometrica across ed along track che tengano conto degli elementi del moto del vettore. Pianificazione di missione basata su algoritmi di previsione del sunglint.

Abstract

Remote sensed images restoration and enhancement algorithms. Correction technique of errors due to thermal drift of the sensor Sensytech black bodies based on the analysis of ancillary files produced by the multispectral scanner. Reduction of the noise present in the scan lines with an algorithm based on attenuation of peaks in frequency after the land-sea automatic segmentation. Tools for geometric correction algorithms across and along track, taking into account the elements of motion of the carrier. Scheduling algorithms based on mission estimates of sunglint

Premessa

Nelle acque comprese tra il golfo di Cecina e Monterosso, nei giorni 7 e 8 luglio 2010, è stata condotta una esercitazione complessa di telerilevamento con finalità didattico-scientifiche. Tale attività si inserisce nel piano di studi della Laurea Specialistica in "Scienze del governo e dell'amministrazione del mare" quale esperienza di "gestione e tutela delle risorse marine" e rientra, perciò, a pieno titolo nella formazione che gli Ufficiali del Corpo delle Capitanerie di Porto, conseguono presso l'Accademia Navale.

I Guardiamarina intervenuti hanno partecipato concretamente ad una attività istituzionale che scaturisce dall'ampliamento dei compiti del Corpo previsto dal D.lgs 152/2006.

Il cosiddetto "Testo Unico dell'Ambiente", infatti, agli artt. 135-C.2, 195-C.4 e 296 -C.9, estende le competenze storiche della Guardia Costiera attribuendole il mandato di sorvegliare ed accertare quegli atti illeciti dai quali possano derivare danni o situazioni di pericolo per l'ambiente marino e costiero. Tale indirizzo, rafforzato dalle disposizioni del D.Lgs n. 202/2007 con il quale è stata innovata la normativa finalizzata alla lotta agli inquinamenti marini derivanti da navi, è recepito nei Piani Triennali 2007-2009 e 2010-2012 per l'implementazione delle linee di attività svolte dal Corpo.

In tale ambito, l'esercitazione condotta, rappresenta un prototipo di missione a supporto delle autorità marittime periferiche, con potenziali numerosi risvolti operativi e di Polizia Giudiziaria finalizzata alla tutela dell'ambiente.

Nell'attività istituzionale dell'Accademia Navale rientrano lo studio e la ricerca finalizzati al mi-

gioramento delle competenze tecnico-scientifiche a disposizione del Corpo. Ciò si concretizza nell'individuazione di tecnologie per l'assolvimento dei compiti di istituto, nella collaborazione con istituzioni scientifiche, nella partecipazione ad eventi culturali e scientifici e nel consolidamento delle esperienze condotte tramite la redazione di guide operative.

Raggiunto il primario scopo di formazione e addestramento del personale coinvolto, la missione ha offerto i dati raccolti all'analisi del Laboratorio di Telerilevamento dell'Accademia Navale, sostenendo, così, le accennate attività di miglioramento tecnico-scientifico.

I dati acquisiti

Mentre il team a terra effettuava misure spettro radiometriche in siti costieri e l'unità navale scientifica CP406 Scialoja, dotata di sonda multiparametrica, raccoglieva i dati di verità "in situ" e prelevava campioni delle acque, l'aeromobile Manta02, equipaggiato con uno scanner multispettrale Sensytech ATM 1268-E effettuava il sorvolo ed il contestuale rilievo delle undici tratte in cui era stata suddivisa la costa interessata dalla missione. Le scansioni, acquisite con il sensore CZCS e strutturate in 11 bande spettrali comprese tra il visibile e l'infrarosso termico sono risultate affette da errori, imputati a deriva dei corpi neri di riferimento nelle bande dell'infrarosso termico, oltre che deteriorate da rumore interno ad ogni singola riga di scansione attribuito a radiointerferenze raccolte dai cablaggi. Al fine di ridurre gli effetti dell'instabilità dei corpi neri e recuperare l'informazione contenuta nei dati è stato sviluppata una tecnica di correzione basata sull'analisi dei file ancillari prodotti dallo scanner multispettrale. Ciò ha condotto alla realizzazione di un algoritmo di individuazione e compensazione della deriva dei riferimenti.

Il rumore presente nelle righe di scansione è stato ridotto con un altro algoritmo, sviluppato ad hoc, in grado sopprimere il contributo spettrale delle porzioni di terra riprese durante la scansione in modo da rendere più affidabile la riduzione del contributo di picchi in frequenza. L'attività svolta nel laboratorio di telerilevamento richiede frequentemente correzioni geometriche delle immagini trattate, tuttavia, non disponendo in loco del software opportuno, queste devono essere inviate, attraverso la via gerarchica a quei comandi (Centrale operativa presso il Comando Generale, II Nucleo Aereo di Catania e III Nucleo Aereo di Pescara) dotati delle licenze d'uso di tale software.

Una simile procedura aggraverebbe i comandi cooperanti con attività che esulano dai compiti operativi oltre a rallentare gli studi svolti nel laboratorio. Le licenze d'uso, che non prevedono il rilascio del codice sorgente, impediscono di conoscere con esattezza quali operazioni siano effettuate sui dati e, di conseguenza, se vi sia una funzione associante il dato restituito alla misura rilevata dal sensore. Per tali motivi l'insieme di strumenti per la corretta rappresentazione dell'immagine telerilevata è stato completato con algoritmi di correzione geometrica across ed along track che tengano conto degli elementi del moto del vettore.

L'esigenza di una agevole ed efficace pianificazione di missione ha condotto all'implementazione di un algoritmo di previsione della presenza di sunglint lungo le tratte di sorvolo. Questo strumento riceverà ulteriore impiego in software dedicati al restauro di immagini compromesse da sovraesposizioni derivanti dalla geometria di osservazione.

Individuazione e compensazione della deriva dei corpi neri di riferimento

Il malfunzionamento del sottosistema di controllo della temperatura dei corpi neri di riferimento ha causato forti variazioni di luminosità nelle bande dell'infrarosso termico delle immagini telerilevate. Queste mostravano larghe strisce trasversali alla direttrice di volo che rendevano pressoché inutilizzabili vaste porzioni delle scansioni.

Canale	Sensore ATM Banda (μm)	Sensore CZCS Banda (μm)
1	0,42 – 0,45	0,43 – 0,45
2	0,45 – 0,52	0,48 – 0,50
3	0,52 – 0,60	0,50 – 0,53
4	0,60 – 0,62	0,54 – 0,57
5	0,63 – 0,69	0,58 – 0,63
6	0,69 – 0,75	0,63 – 0,70
7	0,76 – 0,90	0,71 – 0,81
8	0,91 – 1,05	0,83 – 0,94
9	1,55 – 1,75	
10	2,08 – 2,35	
11	8,50 – 14,00 (basso guadagno)	
12	8,50 – 14,00 (alto guadagno)	

Tabella 1 – Risoluzione spettrale Sensytech 1268 ATM-E.

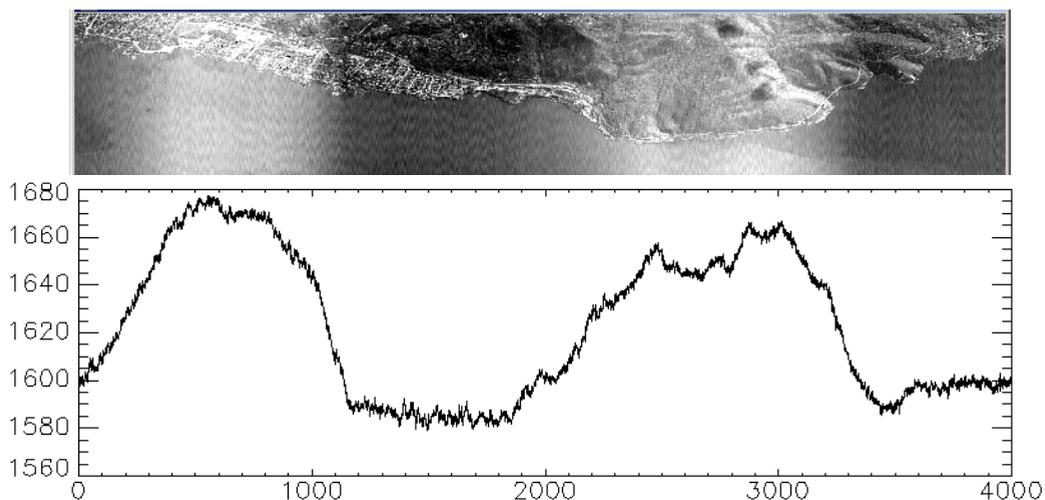


Figura 2 – Immagine degradata e valore medio delle linee di scansione (l'immagine è stata ruotata di 90°).

L'analisi dei trend eventualmente presenti nei file ancillari ha mostrato che i corpi neri di riferimento avevano sofferto di instabilità nel controllo della temperatura, e che l'andamento era compatibile con i disturbi oggetto di studio.

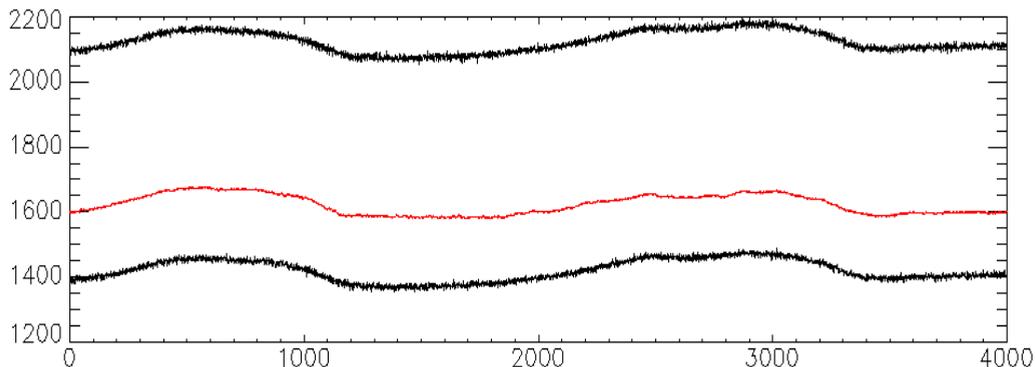


Figura 3 – Confronto tra valori (DN) di riferimento assunti dai corpi neri (in nero) e il valore medio delle linee di scansione (in rosso).

Un primo tentativo di intervento è stato condotto con l'intenzione di sostituire il riferimento del corpo nero più freddo con il suo valore minimo e di decrementare i campioni di ogni linea di scansione di una quantità pari alla differenza tra il nuovo riferimento ed il corrispondente precedente valore di riferimento. Tuttavia tale approccio non è risultato soddisfacente in quanto i contributi in alta

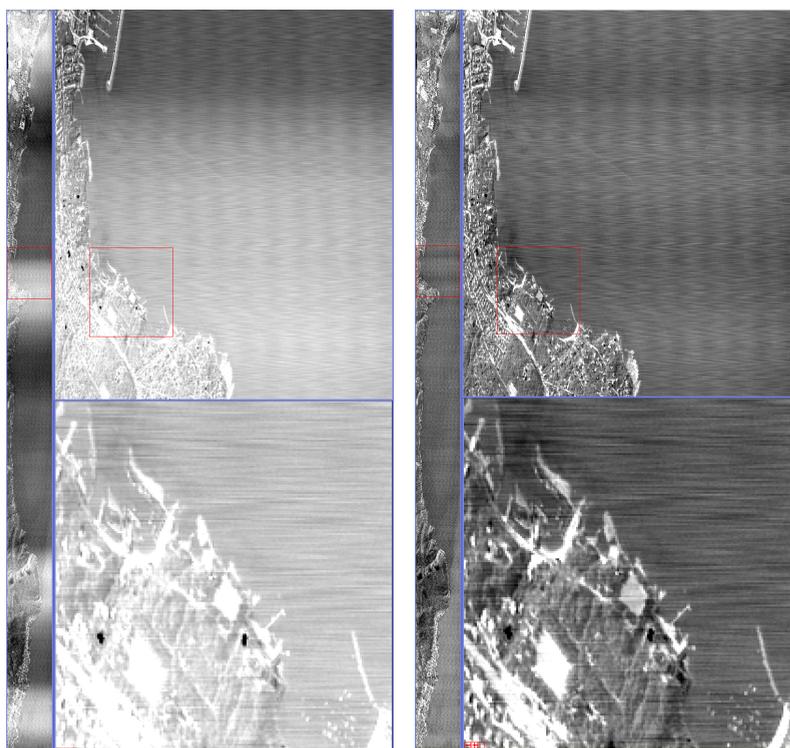


Figura 4 – Confronto tra una immagine degradata ed una restaurata.

rimosso riga per riga, lo scostamento in bassa frequenza del riferimento dal minimo dei riferimenti, preservando, gli altri contributi spettrali. Le immagini, altrimenti inutilizzabili, così restaurate hanno restituito informazioni, di buona qualità e nuovamente impiegabili ai fini dell'esercitazione.

frequenza del riferimento, normalmente presenti, avrebbero originato decrementi a loro volta “rumorosi”, affliggendo in maniera non determinabile e non uniforme le linee di scansione trattate.

La necessaria separazione dell'informazione legata alla deriva dei riferimenti da ogni altro eventuale segnale è stata conseguita ipotizzando che i fenomeni di deriva dei riferimenti fossero gli unici presenti nelle basse frequenze e che fossero quasi completamente descritti al loro interno. Pertanto con un filtro passabasso è stato evidenziato e poi

Attenuazione di rumore previa individuazione di picchi spettrali

Le scansioni effettuate nel corso delle più recenti missioni del sensore multispettrale Sensytech ATM 1268-E mostrano un progressivo deterioramento della qualità dei dati rilevati nelle bande dell'infrarosso termico a causa di un rumore che appare come una “marezzatura” del territorio inquadrato. Tale disturbo, nelle aree di ripresa più omogenee (ad esempio gli specchi acquei), è particolarmente evidente all'occhio dell'osservatore che lo percepisce come forte discontinuità tra le linee di scansione adiacenti. Ciò, in un primo tempo, ha condotto i tentativi di riduzione del rumore a concentrarsi, infruttuosamente, nella ricerca di componenti spettrali nelle alte frequenze. Tuttavia il progressivo aggravarsi del fenomeno e i conseguenti interventi di ricerca del guasto nell'apparato hanno spostato l'attenzione verso il deterioramento dei cablaggi rendendo plausibile l'ipotesi che in queste condizioni essi raccogliessero radio interferenze. L'analisi spettrale dell'immagine si è, conseguentemente, focalizzata sulle singole righe. Sebbene la presenza di elementi marini e terrestri determinasse una varietà di contributi in un ampio intervallo di frequenze, una volta effettuata la segmentazione mare/terra e condotta l'analisi sulle sole aree acquatiche, è stato agevole individuare alcuni picchi caratteristici, riconducibili a portanti radio, il cui contributo è stato ridotto con filtri stoppa banda. L'algoritmo sviluppato si articola su più passi, il primo dei quali consiste nella accennata segmentazione mare/terra. Una volta disponibile la porzione marina dell'immagine offre un ottima base per condurre una analisi in frequenza su ogni linea di scansione. Per ciascuna di queste il contributo in continua viene eliminato passando da una rappresentazione dei campioni nello spa-

zio dei numeri naturali a quello degli interi e centrando la media dei campioni sul valore zero. Successivamente i picchi evidenziati da una FFT sono impiegati per sintonizzare un filtro stoppa banda centrato sulle frequenze così individuate.

Le linee di scansione filtrate restituiscono un'immagine privata dell'informazione contenuta nelle sole frequenze "disturbate".

Al momento attuale assume particolare rilevanza, ai fini del risultato finale, la sub-attività di segmentazione, in quanto questa permette di depurare lo spettro oggetto di successiva analisi da tutti i contributi derivanti dalle forti variazioni del paesaggio costiero.

La scelta sin qui adottata di impiegare a tale fine il rapporto tra i dati rilevati nell'infrarosso vicino (banda 8) e quelli al limite dell'ultravioletto (banda 2), successivamente applicare un filtro mediano e costruire una maschera a soglia, non è sufficientemente robusta nei tratti costieri più in ombra. Gli artefatti, conseguenti all'analisi in frequenza inficiata da una errata segmentazione, saranno ridotti ricorrendo ad una migliore distinzione terra/mare.

Correzione geometrica

Come accennato in premessa la necessità del laboratorio di procedere frequentemente a correzioni geometriche delle scansioni ha condotto il personale ad implementare un algoritmo che affrontasse tale questione. Nonostante ciò si riduca a determinare le caratteristiche dell'osservazione e ad applicare le conseguenti trasformazioni (determinate dalle geometrie proiettiva), sono state impiegate alcune accortezze che possono costituire elemento di interesse. In particolare nell'eseguire la correzione si è tenuto conto non solo della posizione del sensore e dei suoi dati di targa, ma anche degli elementi del moto del vettore.

Il problema della correzione è stato scisso in due sottoproblemi: la correzione trasversale (*across-track*) e quella longitudinale (*along-track*), avendo queste origini ed effetti differenti sui campioni.

La correzione trasversale mira a compensare l'effetto "panoramico" che si determina quando da quote elevate si osservano porzioni della scena che da prossime al Nadir si allontanano, via via, verso l'orizzonte. Poiché i campioni raccolti durante la scansione sottendono ad un angolo (IFOV *instantaneous field of view*) costante, verso le estremità delle linee di scansione l'area inquadrata per campione è maggiore che non al centro; gli oggetti prossimi al nadir del sensore (al centro della linea di scansione) appaiono più grandi rispetto a quelli vicini al limite del campo di vista (FOV *field of view*).

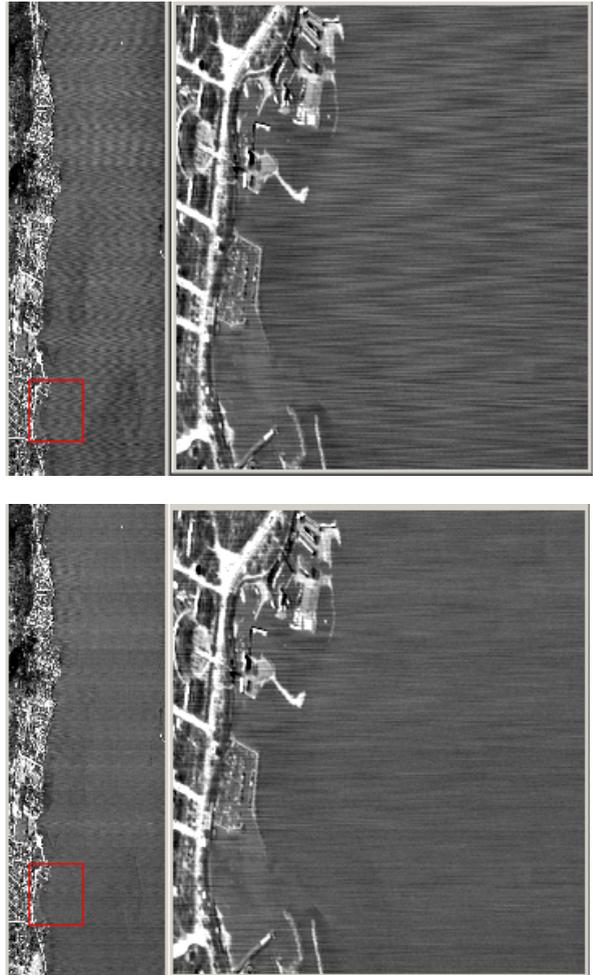


Figura 5 – Confronto tra una immagine "marezzata" ed una restaurata.

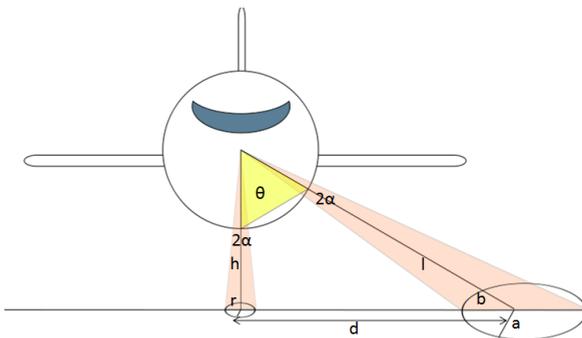


Figura 6 – Effetto panoramico.

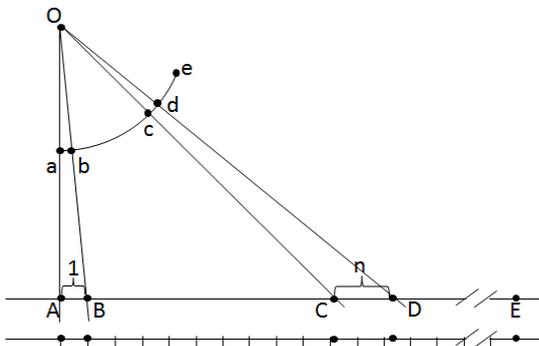


Figura 7 – Schema di distribuzione dei campioni.

ricampionamento si consideri la fig.7. Il sensore divide uniformemente l'arco ae (corrispondente alla metà del FOV e pertanto ampio θ), in modo da raccogliere, sotto forma di radiazione em, l'informazione proveniente dal suolo. Ogni settore, così determinato, dell'arco ae pur avendo ampiezza costante (e pari a 2α) individuerà un segmento di dimensioni crescenti; in particolare, assumendo come unità di misura il segmento AB, si avrà che i punti C e D, estremi del segmento n-esimo, saranno individuati dalle ascisse:

$$x_n = \frac{v \cdot t_n}{v_0} \quad [7]$$

Costruita in tal modo la griglia di ricampionamento, si è deciso di implementare un algoritmo che permettesse all'utente finale di scegliere tra una interpolazione lineare o ai minimi quadrati.

Il problema della correzione longitudinale (along-track) nasce dal fatto che la ripresa della scena non è istantanea, al contrario l'immagine viene costruita riga per riga mentre il vettore effettua il sorvolo dell'area. Come visto, la distorsione panoramica fa sì che ai pixel dell'immagine corrispondano aree di dimensioni non uniformi, per tale motivo, tollerando scansioni parzialmente sovrapposte, ma non aree scoperte, il sensore viene impiegato in modo che si generi una sovrascansione della zona ripresa. Il vettore inoltre procede con velocità non perfettamente costante, tuttavia il sistema ne registra la velocità istantanea e consente, quindi, di determinare l'estensione in senso longitudinale di ogni area campionata. Anche in questo caso la correzione geometrica viene effettuata ricampionando i dati su una griglia non uniforme, i cui punti sono determinati dal tratto effettivamente percorso dal vettore nel tempo del ciclo di scansione. L'ascissa del punto n-esimo sarà perciò pari all'ascissa del punto precedente incrementata del prodotto della velocità istantanea al suolo per il tempo di scansione.

Le relazioni intercorrenti tra le grandezze evidenziate in Fig.6 sono tali che:

$$r = h \sin(\alpha) \quad [1]$$

$$\alpha = l \sin(\alpha) \quad [2]$$

$$l = h \sec(\theta) \quad [3]$$

$$d = h \tan(\theta) \quad [4]$$

Da [2] e [3] discende:

$$\alpha = h \sec(\theta) \sin(\alpha) \quad [5]$$

Con ragionamenti analoghi si ottiene:

$$b \quad [6]$$

Dove con α si indica la semiapertura dell'IFOV, con θ la semiapertura del FOV e con h la quota del sensore. Mentre al nadir l'IFOV determina un cono di osservazione ortogonale al terreno e pertanto raccoglie informazioni da un'area circolare con raggio r (tanto più piccolo quanto migliore è la risoluzione spaziale del sensore), i coni di osservazione prossimi ai limiti del FOV intercettano il suolo generando ellissi con assi (magiori e minori) più grandi di r . Al fine di ricostruire una immagine in cui oggetti delle stesse dimensioni siano rappresentati con lo stesso numero di pixel è necessario effettuare un ricampionamento su una griglia irregolare (cioè con punti di campionamento non uniformemente distribuiti). Per determinare la griglia di

I risultati ottenuti dall'applicazione dell'algorithmo complessivo di correzione geometrica sui dati sperimentali sono ritenuti soddisfacenti ed il confronto delle riprese effettuate con mappe virtuali (Google Earth) ne ha confermato la qualità.

Previsione di condizioni di sunglint

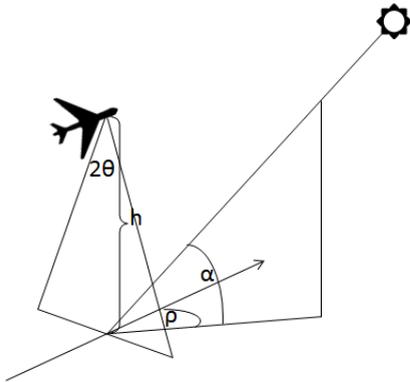


Figura 8 – Geometria di osservazione.

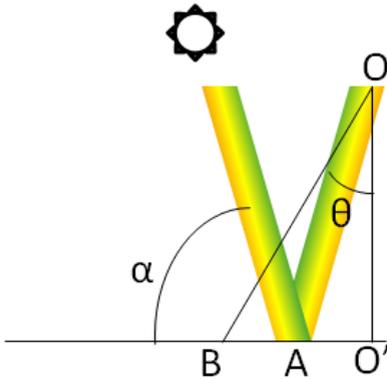


Figura 9 – Sole al traverso.

$$\alpha = \theta / \tan(\rho) \quad [10]$$

Pertanto, l'indesiderata condizione

Può essere controllata verificando che

$$\frac{\alpha}{\theta} = \frac{1}{\tan(\rho)} \quad [11]$$

Rispetti i vincoli imposti da [11].

Per facilitare tale compito agli operatori incaricati della pianificazione, è stato realizzato un algoritmo che, noti data e luogo (longitudine e latitudine) approssimativi della missione, computa le posizioni in elevazione ed azimut assunti dal Sole nell'arco della giornata e tabula 5 valori assunti dal rapporto [12] lungo le direttrici possibili nell'arco della giornata.

In condizioni di ripresa particolari, superfici molto riflettenti, come quelle delle distese marine, inviano in direzione del sensore un quantitativo di radiazione elettromagnetica tanto elevato da saturarne la dinamica.

Questa condizione, nota come sunglint affligge le riprese causando, quando non l'imbiancamento dell'immagine conseguente alla saturazione dei sensori, un forte disturbo.

Considerando la superficie del mare come un insieme di elementi riflettenti, ciascuno dei quali inclinato in maniera lievemente diversa da quelli circostanti, si può facilmente intuire come anche condizioni approssimanti quella rappresentata in figura 9 possano condurre all'abbagliamento del sensore.

Al fine di ottenere riprese il più possibile libere da questo fenomeno, occorre pianificare la missione di volo facendo in modo che il punto A della figura 9 cada il più lontano possibile dal segmento BO'.

I parametri disponibili per variare la geometria di osservazione corrispondono agli angoli α e ρ, a loro volta determinati da data, ora e direttrice della tratta.

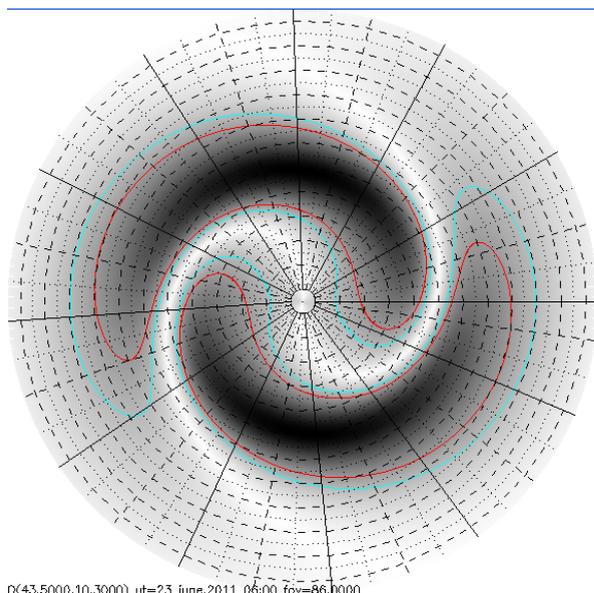
Generalizzando la condizione illustrata in figura 9, in cui si ha che, detta a la misura di AO' e b la misura di BO',

$$[8]$$

$$[9]$$

a tutti quei casi in cui ρ non sia un angolo retto si ottiene che:

$$[11]$$



O(43.5000,10.3000) ut=23 iune.2011 06:00 fov=86.0000

Figura 10 – Previsione del sunglint.

Mentre l'attività condotta in laboratorio è caratterizzata dall'approfondimento delle analisi condotte sui dati telerilevati (pertanto scarsamente ripetitiva), i Comandi Operativi necessitano di elaborare in maniera standard e continua una quantità di dati provenienti dalle missioni. Per tale motivo, oltre ad avere sviluppato i precedenti algoritmi, il laboratorio ha avuto cura di approntare piccole utility che consentissero una facile organizzazione delle elaborazioni in procedure batch. Tutti gli strumenti sviluppati sono stati dotati di una interfaccia a linea di comando che permette di organizzare un flusso sequenziale di operazioni. In tal modo il personale operativo stabilisce quali insiemi di dati debbano essere analizzati, secondo procedure, redatte dal personale di laboratorio, che a loro volta impiegano algoritmi già disponibili o sviluppati ad hoc da programmatori del laboratorio o, eventualmente, esterni.

Bibliografia

- Nicolas Reul, Joseph Tenerelli, Bertrand Chapron, and Philippe Waldteufel, *Modeling Sun Glitter at L-Band for Sea Surface Salinity Remote Sensing With SMOS*, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 45, no. 7, July 2007.
- Pietro A. Brivio, Giovanni Lechi, Eugenio Zilioli, *Principi e metodi di telerilevamento*, 1ªed.(2006), CittaStudi Edizioni .
- AA.VV. a cura di A. Argentieri, A.Fianchini, L.Rossi, *Telerilevamento ed ecologia marina: dal problema all'applicazione*, (2006) ESA/ESRIN.
- William K. Pratt, *Digital Image Processing*, 2ªed.(1991), Wiley - Interscience Publication.

Il risultato viene presentato in forma di diagramma polare ponendo in evidenza le condizioni che sicuramente genereranno sunglint e quelle in cui saranno riscontrabili effetti di minore entità.

L'operatore potrà in tal modo verificare quali siano le rotte o le finestre temporali entro cui condurre efficacemente il sorvolo.

Per questo algoritmo è previsto un futuro ulteriore impiego all'interno di un software dedicato al restauro di immagini affette dal sunglint. In questo caso l'indice, calcolato come sopra descritto, concorrerà a quantificare l'eccesso di radiazione ricevuta dal sensore nelle porzioni di immagine, purché non completamente saturate.

L'automazione dell'elaborazione