Radar Altimeria da satellite

Renato Croci

4 Aprile 1998

Questi particolari tipi di radar, di grande importanza per l'osservazione della Terra dallo spazio, sono tuttavia quasi sconosciuti al di fuori della cerchia degli 'addetti ai lavori'. Scopo del presente articolo è di illustrarne il principio di funzionamento e le relative applicazioni. Nota: il presente articolo presume la conoscenza dei concetti fondamentali del funzionamento di un sistema radar, per i quali si rimanda all'articolo **'Introduzione al Radar'.**

1 Introduzione

A cosa può servire un radar-altimetro, cioè un radar che misura a che altezza si trova il satellite che lo porta ? Per rispondere a questa domanda dobbiamo rovesciare il punto di vista che essa implica: se l'orbita del satellite è nota - ed oggi sono possibili determinazioni estremamente accurate - uno strumento del genere è in grado di fornirci l'elevazione della superficie sorvolata. Se poi tale macchina è in grado di fornire (almeno su superfici 'relativamente' piatte come quella oceanica) risoluzioni ed accuratezze misurabili in centimetri, allora i dati che essa può fornire sono estremamente utili per le più disparate applicazioni.

Il livello del mare, infatti, è ben lungi dall'essere costante: il suo livello è influenzato, sia spazialmente che temporalmente, da anomalie del campo gravitazionale, dalle maree, dalla presenze di correnti e di rilievi sottomarini.

Un radar-altimetro è un radar che, grazie ad una risoluzione in distanza estremamente spinta, è in grado di rivelare, su scala globale, queste variazioni - in genere estremamente piccole - dell'altezza (media) della superficie oceanica. Inoltre, dall'analisi degli echi raccolti, è possibile inferire l'altezza delle onde e la velocità del vento a livello del mare, dati che rivestono anch'essi una non trascurabile importanza sia scientifica che applicativa.

Il primo radar-altimetro 'operativo' ha volato nel 1978 a bordo del satellite SeaSat della NASA (andato sfortunatamente perso dopo soli 100 giorni di missione a seguito di un'avaria al sistema di gestione della potenza elettrica). Radar-altimetri sono impiegati a bordo dei satelliti europei ERS-1 ed ERS-2, e del franco-americano Topex, ed altri sono in realizzazione o in studio per i futuri satelliti da osservazione della terra.

2 Applicazioni

I profili di livello oceanico ottenuti a mezzo di radar-altimetri (che, combinati su diverse orbite, permettono di realizzare vere e proprie mappe globali), opportunamente elaborati per separarne le diverse componenti statiche e dinamiche, permettono di ottenere numerose informazioni di importanza scientifica e pratica:

Misura del Geoide Il geoide è la superficie equipotenziale alla quale tende a porsi, in condizioni statiche, il livello del mare. La forma del geoide è determinata dal campo gravitazionale terrestre e dall'effetto centrifugo dovuto alla sua rotazione: esso si discosta dall'elissoide di riferimento a causa delle disomogeneità del campo gravitazionale stesso. Lo studio di tali variazione fornisce indicazioni di interesse geofisico: le variazioni a grande scala (~ 1000 km) sono correlate ai fenomeni che avvengono in profondità nel mantello, quelle a media scala (~ 100 km) sono invece utili per lo studio della litosfera. Variazioni a scala più piccola sono normalmente correlate alla topografia dei fondali oceanici (i principali rilievi subacquei sono perfettamente riconoscibili nelle mappe radar-altimetriche).

Circolazione oceanica Il livello della superficie oceanica devia dal geoide sia a causa delle maree che di effetti dovuti alla circolazione oceanica. Per esempio, le correnti oceaniche producono dislivelli di diverse decine di centimetri che sono così perfettamente rilevabili ai radar-altimetri. Le mappe della circolazione oceanica ottenibili con tali strumenti sono preziose in climatologia per lo studio degli scambi termici a livello planetario.

Venti e moto ondoso La possibilità di disporre di informazioni sulla distribuzione a livello globale dell'intensità del moto ondoso e dei venti è di interesse sia per gli oceanologi che per i metereologi.

3 Principio di funzionamento

Cercheremo di seguito di fornire una breve spiegazione di come queste macchine sono in grado di estrarre le informazioni sopra indicate, con l'avvertenza che la trattazione è relativa al caso particolare (peraltro il più diffuso) di un altimetro *nadir-pointing*, cioè che osservi direttamente lungo la verticale, e *pulse limited*, ovvero in cui la superficie illuminata ad un certo istante sia determinata solamente dalla risoluzione in distanza e non dall'apertura del fascio d'antenna (si veda la descrizione della geometria del sistema più avanti), e che operi su superfici oceaniche (o comunque, di pendenza trascurabile).

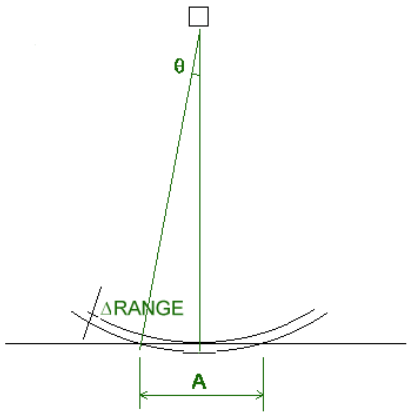

FIG 1 - GEOMETRIA DI OSSERVAZIONE

La geometria del sistema è rappresentata in fig 1: Δ-range è la dimensione della cella di risoluzione in distanza (determinata dalla banda del segnale); se l'apertura del fascio di antenna è maggiore di +/- θ (cosa che si ottiene per dimensioni della cella di risoluzione in distanza molto piccole, corrispondenti a risoluzioni temporali dell'ordine dei nanosec), l'altimetro è deto *pulse limited*, e il segnale incidente illuminerà quindi, inizialmente, una superficie circolare di diametro A. Successivamente, mano a mano che il fronte dell'onda si sposta in avanti, la superficie illuminata sarà una corona circolare che si allarga via via, fino al limite corrispondente all'apertura del fascio di antenna.

Per un sistema del tipo descritto, l'eco da una superficie oceanica è descritto analiticamente dal cosiddetto *modello di Brown*. L'andamento tipico di tale eco è mostrato in fig. 2.

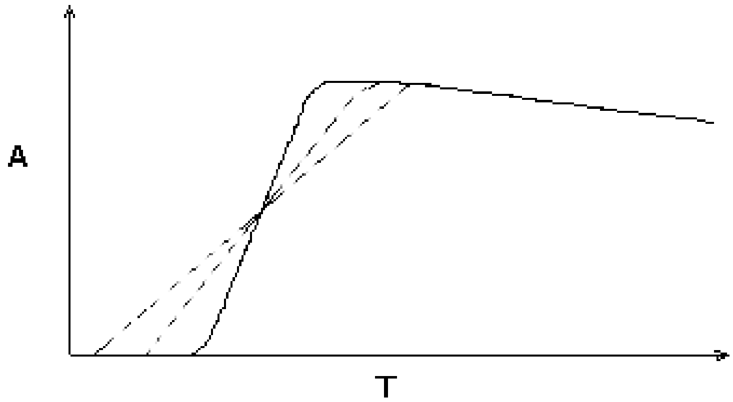

FIG 2 - ECHO DI BROWN

La posizione del centro del fronte di salita corrisponde alla distanza (media) dalla superficie oceanica. Senza discutere il modello analitico è possibile mostrare come invece la **pendenza** di tale fronte e **l'ampiezza** del segnale di ritorno siano rispettivamente correlati all'altezza delle onde ed alla velocità del vento.

3.1 Altezza delle onde

La curva continua di Fig 2 è rappresentativa di una situazione di mare 'piatto'. In presenza di onde, il fronte del segnale emesso investirà inizialmente le creste delle onde stesse, per poi gradualmente interessare tutta la superficie, in un tempo proporzionale alla loro altezza.

Nell'eco ricevuto, questo corrisponde ad una minore pendenza del fronte di salita, come rappresentato dalle linee tratteggiate in fig 2, corrispondenti ad altezze delle onde crescenti.

3.2 Velocità del vento

L'effetto del vento su una superficie marina è quello di produrre increspature la cui ampiezza è, in prima approssimazione, proporzionale alla velocità del vento stesso.

Una superficie perfettamente liscia tende a comportarsi, nei confronti delle onde elettromagnetiche, grosso modo come uno specchio: l'energia incidente viene riflessa quasi totalmente secondo l'angolo complementare a quello di incidenza. Nel nostro caso (osservando al nadir, quindi perpendicolarmente alla superficie) l'energia è quindi riflessa in massima parte verso il trasmettitore.

Se sulla superficie sono presenti increspature, queste hanno l'effetto di allargare il 'lobo di radiazione' del segnale riflesso, ovvero l'energia tende ad essere distribuita su un angolo più ampio intorno allo zenith e, contestualmente, a ridurre l'ampiezza del picco del lobo stesso. La riflettività della superficie (σ_0) diminuisce. L'effetto di 'allargamento' del lobo di radiazione per una sorgente che si trovi allo zenith è raffigurato in figura 3.

L'effetto osservabile sull'eco è quindi una variazione di ampiezza: all'aumentare della velocità del vento, l'ampiezza del segnale riflesso diminuisce. Se il radar altimetro è adeguatamente calibrato, è quindi possibile ricavare l'informazione di velocita' del vento.

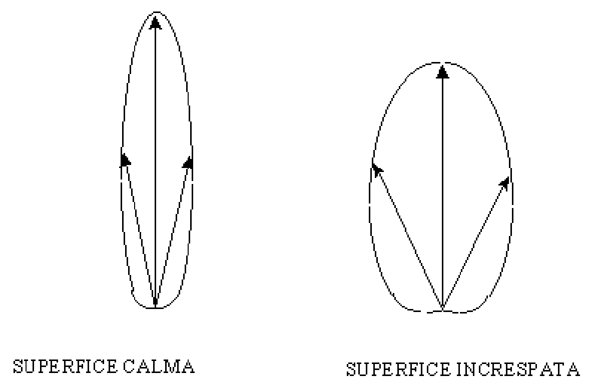

FIG 3 - DIAGRAMMI DI RIFLESSIONE PER OSSERVAZIONE ZENITALE

4 Implementazione

Per essere in grado di interpolare il modello di Brown con accuratezze dell'ordine dei centimetri, e' necessario che il radar esibisca una risoluzione in distanza dell'ordine delle decine di centimetri. Questo implica l'uso di bande estremamente larghe (centinaia di MHz), cosa non facile da realizzare in pratica. D'altro lato, un radar-altimetro non deve analizzare tutta la PRI, ma solo la ristretta porzione occupata dall'eco, in quanto si attende una sola eco (quella della superficie), la cui distanza varia con continuità. Questo ovviamente richiede che il sistema sia in grado di 'inseguire' in distanza l'eco, spostando la sua finestra di analisi al variare della distanza.

Questa limitazione della finestra in distanza che deve venire processata permette di impiegare una speciale tecnica, chiamata *deramping*, per utilizzare impulsi trasmessi di banda estremamente elevata, mantenendo nel contempo la larghezza di banda del ricevitore entro valori facilmente gestibili (valori elevati comporterebbero l'impiego di bande percentuali molto grandi nelle sezioni a frequenza intermedia, con conseguenti problemi di distorsione, nonchè la necessità di convertitori Analogico-Digitali ed elaboratori digitali di segnale ad altissima velocità)

La tecnica di deramping prevede l'impiego di un segnale trasmesso di tipo *chirp*, cioè modulato linearmente in frequenza: negli stadi iniziali del ricevitore, l'eco di ritorno viene confrontata in frequenza (utilizzando un normale mixer) con un altro chirp identico (normalmente translato in frequenza, in modo che la frequenza differenza sia nell'intorno di una frequenza *portante* successiva elaborazione a frequenza intermedia).

La situazione è raffigurata in fig 4 (per un bersaglio puntiforme).

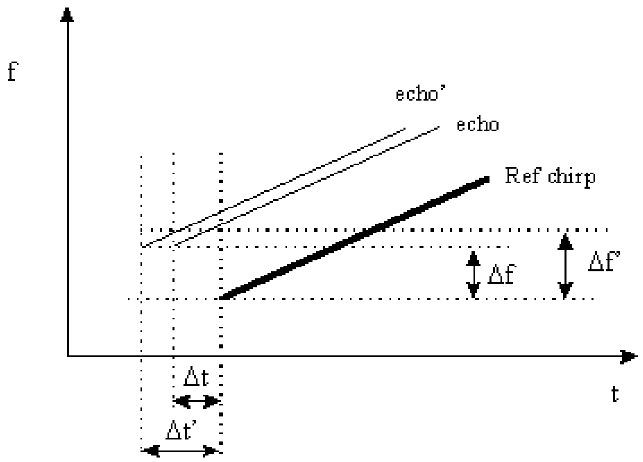

FIG. 4 - DERAMPING DI SEGNALI CHIRP

Come si può vedere, uno spostamento temporale dell'eco di ritorno rispetto al segnale di riferimento farà variare la corrispondente differenza di frequenza. Sarà quindi possibile determinarne la posizione, in tempo, rispetto al segnale di riferimento misurando la frequenza portante dell'impulso risultante.

Il ragionamento fatto nel caso di bersagli puntiformi può essere facilmente esteso al caso di bersagli complessi, come l'eco di Brown riflessa da una superficie oceanica. Infatti, un bersaglio complesso può essere visto come composto da tanti bersagli puntiformi elementari, ognuno dei quali produrrà come eco un segnale chirp più o meno ritardato, a cui corrisponderà, a dopo l'operazione di deramping, una diversa frequenza.

Ne consegue che il risultato dell'operazione di deramping sarà non più un tono singolo ma uno **spettro** la cuidistribuzione di ampiezza, in funzione della frequenza corrisponde all'andamento temporale dell'eco di Brown, e che può venire ricostruito utilizzando tecniche standard di analisi del segnale (trasformata di Fourier).

Uno schema a blocchi generale di un radar-altimetro è raffigurato in fig 5.

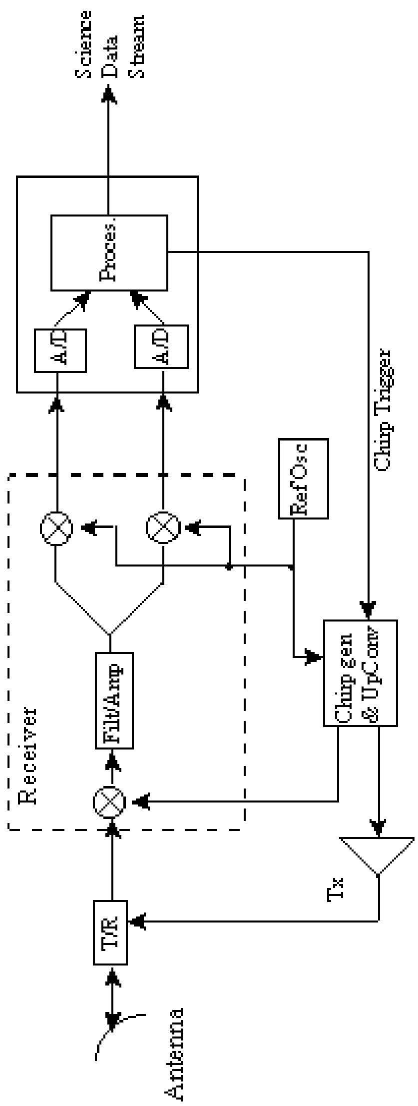

FIG 5 - SCHEMA FUNZIONALE DI RADAR-ALTIMETRO

Il 'Chirp Generator and UpConverter' genera il segnale chirp che, amplificato dal trasmettitore (Tx) è inviato in antenna tramite il commutatore trasmissione/ricezione (T/R).

Il segnale ricevuto, all'interno del ricevitore, è confrontato con il chirp di riferimento di deramping, prodotto anch'esso dal 'Chirp Generator and UpConverter'. Lo spettro cosi' ottenuto è amplificato e filtrato, e quindi demodulato coerentemente per estrarne le componenti seno e coseno. Queste vengono convertite in forma digitale dagli A/D converter ed inviate al processore di segnali, dove viene effettuata la trasformata di Fourier sul segnale, l'integrazione degli echi ed eventuali altre elaborazioni. I dati così ottenuti sono resi disponibili all'uscita del sistema per la trasmissione a terra.

Il processore provvede inoltre a controllare i segnali di sincronizzazione per la generazione dei segnali di trasmissione e deramping ('Chirp Trigger') in modo da mantenere il chirp di deramping sovrapposto all'eco ricevuta.

5 Prospettive

Le missioni radar-altimetriche effettuate negli ultimi anni (da SeaSat a Geosat, a ERS-1/2 a Topex) hanno fornito un notevole mole di dati di grande importanza scientifica. L'ultima generazione di radar altimetri ha raggiunto accuratezze intrinseche di pochi centimetri.

L'attuale tendenza, più che verso un ulteriore aumento dell'accuratezza, va verso l'abolizione della necessità di correzioni esterne (p. es., impiegando una seconda frequenza di lavoro, è possibile determinare il ritardo introdotto dalla propagazione nella ionosfera - dipendente dalle frequenza - svincolandosi dalla necessità di dati di correzione forniti dall'esterno).

Altre linee di tendenza per il futuro sono:

- Altimetri estremamente leggeri e compatti, ottimizzati per l'impiego su minisatelliti da impiegarsi in costellazioni per migliorare la copertura e la frequenza di aggiornamento dei dati, eventualmente impiegando anche tecniche multistatiche (un trasmettitore e molti ricevitori separati).

- Aumento della risoluzione angolare utilizzando tecniche di apertura sintetica e/o interferometriche. Ciò permetterebbe di avere un'impronta a terra del fascio estremamente ridotta (elevata risoluzione spaziale) indipendentemente dall'effetto di 'pulse limiting', rendendo l'altimetro utilizzabile anche per la mappatura topografica su terra e su ghiaccio.