

SOMMARIO

<u>INTRODUZIONE</u>	5
<u>1. FUNZIONAMENTO DI UN RADAR</u>	8
<u>1.1. Concetti generali</u>	8
<u>1.2. Principio di funzionamento</u>	9
<u>1.3. Chirp radar</u>	13
<u>1.4. Risoluzione in azimuth: RAR e SAR</u>	14
<u>1.5. Effetto Doppler</u>	17
<u>1.6. Range Migration</u>	25
<u>2. COSMO – SkyMed</u>	
<u>(Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation)</u>	27
<u>2.1. Introduzione</u>	27
<u>2.2. Concetto di “DUAL USE”</u>	28
<u>2.3. Architettura del COSMO – SkyMed</u>	29
<u>2.4. Segmento spaziale</u>	30
<u>2.5. G/S Architettura generale</u>	32
<u>2.6. Scenario di co-operazione</u>	34
<u>2.7. Risultati ottenuti in analisi di trade-off e di design</u>	34

2.7.1. Caratteristiche operative e limitazioni	37
2.8. Algoritmi di processing	42
2.8.1. ScanSAR mode	42
2.8.2. Stripmap mode	43
2.8.3. Spotlight mode	44
2.8.4. Lo stato del programma COSMO-SkyMed	45
3. LETTURA DEI DATI	48
3.1. Introduzione	48
3.2. CiFus	49
3.3. Leader file	51
3.4. Analisi degli spettri	53
4. L'ALGORITMO DI CHIRP SCALING	57
4.1. Introduzione	57
4.2. Funzionamento	58
4.3. Geometria d'acquisizione	59
4.4. Algoritmo di CS	64
4.4.1. Primo stadio dell'algoritmo di chirp scaling	66
4.4.2. Secondo stadio dell'algoritmo di CS	67
4.4.3. Terzo stadio dell'algoritmo di CS	69

4.4.4.	Quarto stadio dell'algoritmo CS	72
4.4.5.	Quinto stadio dell'algoritmo CS	74
5.	CSA PER DATI DA SATELLITE	77
5.1.	Introduzione	77
5.2.	Metodi di risoluzione	78
5.3.	Velocità effettiva a partire dal Doppler rate	80
5.3.1.	Algoritmi di calcolo dei parametri Doppler	82
5.4.	Velocità effettiva come velocità del beam	91
6.	ANALISI DELLE IMMAGINI	97
6.1.	Introduzione	97
6.2.	Immagini da X-SAR	101
6.3.	Errori dovuti alla variazione di alcuni parametri	111
6.3.1.	Variazione della velocità	112
6.3.2.	Variazione del range gate delay	114
7.	CONCLUSIONI	116
	BIBLIOGRAFIA	119

INTRODUZIONE

Nello scenario internazionale odierno una grande importanza è rivestita dai sistemi di informazione e di controllo dell'informazione stessa. Sia in ambito civile che in quello militare, si risente la necessità di avere un controllo globale del territorio con l'acquisizione nel tempo minore possibile di informazioni il più precise possibili.

Tutto ciò si può ottenere grazie a sistemi di telerilevamento sempre più avanzati in termini di risoluzione e di velocità di trasmissione ed elaborazione dati.

Uno dei progetti italiani che sta per diventare operativo in questo ambito è il sistema COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for Mediterranean Basin Observation), missione duale tra mondo civile e militare, sviluppata dall'ASI tramite l'Alenia Spazio. Le applicazioni di questa costellazione sono quindi di interesse sia militare che civile e vanno dal controllo dell'esecuzione dei trattati internazionali, al controllo ambientale, alla stesura di mappe di larga scala, etc.

Il COSMO-SkyMed opera tramite un SAR (*Synthetic Aperture Radar* che, come verrà spiegato in seguito, è un sistema avanzato di acquisizione dati) e prevede tra le varie modalità di processing dei dati quella del *Chirp Scaling Algorithm (CSA)*.

In questa tesi vengono processati, tramite il CSA, dei dati satellitari provenienti da X-SAR, costellazione di satelliti che utilizza anch'essa un SAR e che opera in banda X, banda prevista anche dal COSMO-SkyMed.

I dati riguardano due passaggi in due giorni consecutivi su una zona che va dall' Etna alle coste della Calabria.

Per il processing dei dati verrà utilizzato il CiFus (Citarella-Fusco), processore sviluppato dal CORISTA (Consorzio di Ricerca su Sistemi di Telesensori Avanzati) per la focalizzazione di dati da aereo. Sarà dunque necessaria una correzione dell'algoritmo per rispondere in maniera ottimale al processing dei dati da satellite.

Questo lavoro porterà alla focalizzazione di due immagini dello stesso sito visto in due momenti diversi. Quindi, sarà in seguito possibile, grazie a questo lavoro, un'analisi interferometrica con la creazione di un DEM (Digital Elevation Model) e lo studio del territorio tramite strumenti più accurati.

La successiva fase di simulazione della missione COSMO-SkyMed sarà quindi agevolata dalle prove effettuate e dall'esperienza maturata grazie a questa serie di studi.

Si può quindi considerare quello effettuato un primo passo verso un lavoro più ampio che dovrà necessariamente prendere spunto da quanto proposto.

Il lavoro si svilupperà attraverso i seguenti capitoli:

1. FUNZIONAMENTO DI UN RA.D.A.R
2. COSMO-SkyMed
3. LETTURA DEI DATI
4. L'ALGORITMO DI CHIRP SCALING
5. CSA PER DATI DA SATELLITE
6. ANALISI DELLE IMMAGINI

7. CONCLUSIONI

1. FUNZIONAMENTO DI UN RADAR

1.1. Concetti generali

RADAR è l'acronimo delle parole inglesi RAdio Detection And Ranging, e significa radiorilevamento e determinazione della distanza a mezzo di onde radio.

I primi studi sul radar ebbero inizio in America e in Europa contemporaneamente negli anni trenta, poi l'imminenza del secondo conflitto mondiale accelerò ma ne rese segrete le ricerche, che si svilupparono separatamente nei vari stati interessati al conflitto e ne rivolse l'interesse principalmente a scopi militari, come avviene di solito in queste circostanze.

Gli studi furono particolarmente approfonditi in Inghilterra, negli USA e in Germania così, ad esempio, l'Inghilterra fu protetta da una catena di radar per intercettare gli aerei tedeschi che dalla Germania la sorvolavano per bombardarla e si può dire che questo dispositivo ebbe certamente un ruolo determinante sull'esito di quella battaglia.

1.2. *Principio di funzionamento*

Il radar è essenzialmente un sistema di rilevamento funzionante sul principio dell'eco, in cui il trasmettitore irradia periodicamente energia sotto forma di impulsi di microonde di grande potenza, ma di durata molto breve.

Gli impulsi radar vengono irradiati da un'antenna parabolica fortemente direttiva che li trasmette alla velocità della luce verso il bersaglio, come descritto nella Figura 1.1.

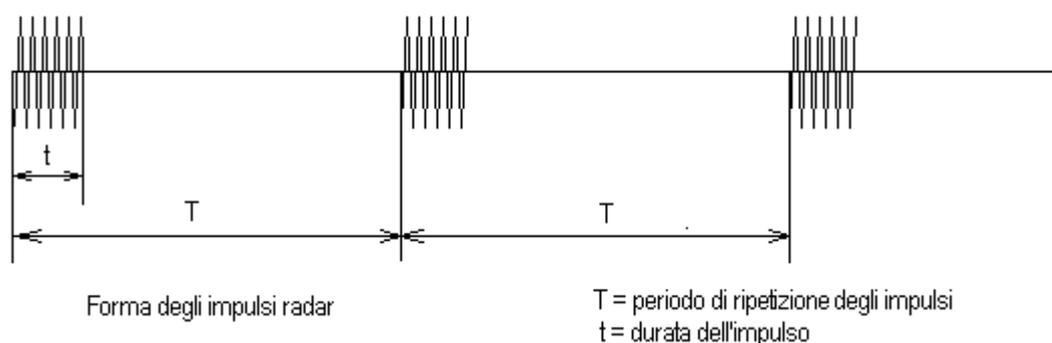
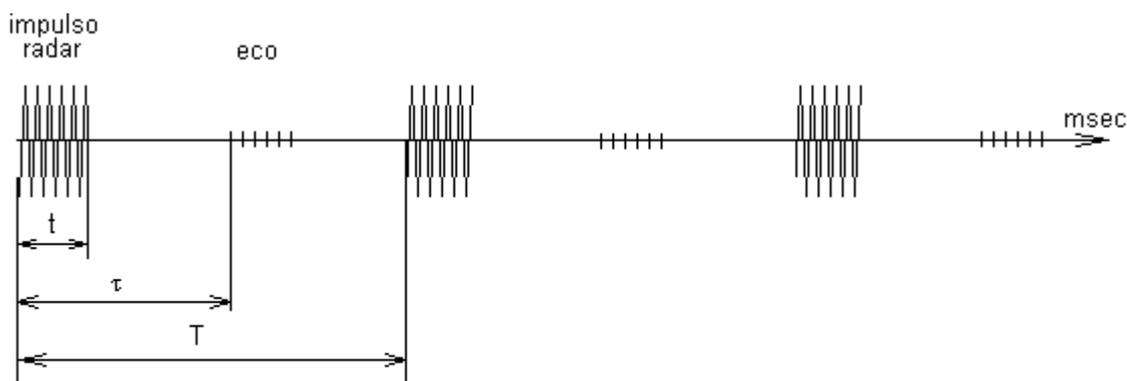


Figura 1.1 : generazione degli impulsi radar

Se gli impulsi trasmessi non incontrano alcun ostacolo, non tornano più indietro, mentre se incontrano un aereo, una nave, una montagna, una piccola parte dell'energia irradiata ritorna all'antenna trasmittente dopo un tempo brevissimo sotto forma di eco, come descritto nella Figura 1.2.



T = periodo di ripetizione degli impulsi
 τ = tempo di arrivo dell'eco
 t = durata dell'impulso

Figura 1.2 : ritorno degli eco del segnale emesso dal radar

Poiché la velocità di propagazione degli impulsi radar è perfettamente nota, dal tempo impiegato dal segnale a raggiungere il bersaglio e a ritornare indietro, si può ricavare la distanza dello stesso.

Se c è la velocità della luce, r è la distanza del bersaglio e t è il tempo dopo il quale ritorna l'eco dell'impulso all'antenna che lo ha trasmesso, sarà:

$$c = \frac{2r}{t} \quad (1.1)$$

e quindi:

$$r = \frac{ct}{2} \quad (1.2)$$

La direzione del bersaglio è individuata dall'orientamento dell'antenna parabolica del trasmettitore per mezzo dell'angolo di azimuth e dell'angolo di elevazione che ne determinano la posizione rispetto all'antenna radar come è descritto nella Figura 1.3.

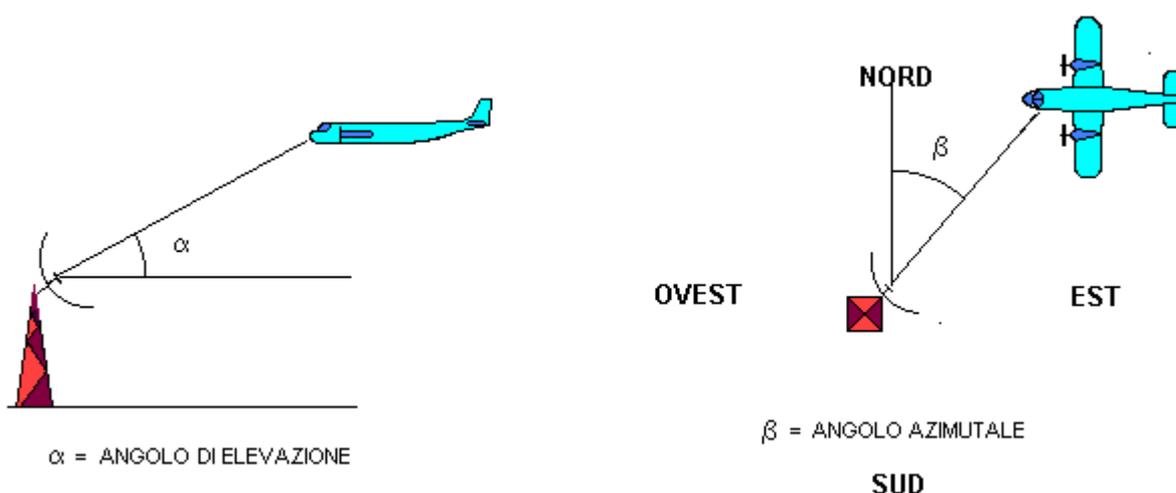
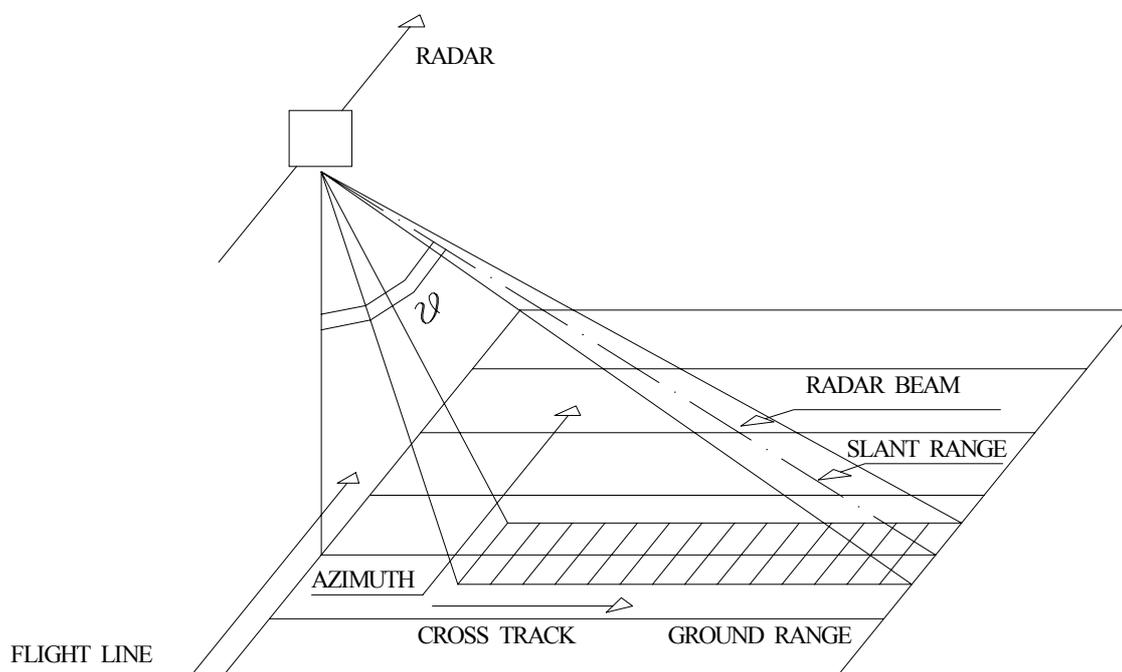


Figura 1.3 : individuazione della direzione del target

La direzione along track è detta di *azimuth*, quella across track è detta di *range*. Si parla di *slant range* riferendosi alla direzione di trasmissione in linea d'aria del segnale e di *ground range* riferendosi a quella riportata a terra. Chiaramente, queste due direzioni sono legate da una relazione tramite il seno dell'angolo "di vista" (θ). Infatti, i radar cosiddetti ad immagine, cioè che danno in uscita un'informazione riguardante la posizione dell'oggetto e la sua forma, sono sempre *side looking*, in quanto il principio stesso di funzionamento dei radar non permetterebbe, in caso di antenna nadirale, di riconoscere da quale lato è posto il target.



Per quanto riguarda la risoluzione in range [IV], è possibile discriminare tra di loro due echi e quindi due target se la differenza dei loro ritardi è maggiore della durata τ degli impulsi stessi. Nel caso ideale di impulso di Dirac, la risoluzione è quindi infinitamente alta (d'ora in poi, per "alta" risoluzione si intenderà un "piccolo" valore della minima distanza tra due target distinguibili, ρ), ed è quindi quello a cui si tende. Nel caso reale, l'impulso trasmesso ha comunque una durata nel tempo, seppur brevissima ($O[10^{-6}$ s]). La risoluzione in slant range è quindi pari a:

$$\rho_{sr} = \frac{\tau \cdot c}{2} \quad (1.3)$$

ed in ground range:

$$\rho_{gr} = \frac{\tau \cdot c}{2 \sin \vartheta} \quad (1.4)$$

Per ottenere una migliore risoluzione in ground range, è opportuno utilizzare angoli di vista molto inclinati, in quanto per ϑ minori di 90° , il seno è crescente e quindi ρ_{gr} diminuisce.

È inoltre necessario accorciare l'impulso, allargandone la banda (si dimostra [I] che il contenuto informativo, in questo caso la risoluzione in distanza, è proporzionale alla banda del segnale) : questo però equivale a diminuirne l'energia, riducendone quindi la portata a parità di altre condizioni.

Ciò pone notevoli difficoltà nella realizzazione di radar aventi risoluzioni spinte : infatti, il limite tecnologico nella realizzazione dei trasmettitori è relativo soprattutto alla potenza di picco, piuttosto che alla potenza media e all'energia del singolo impulso. In pratica, un trasmettitore che eroghi un

impulso da 2 kW di picco per 10 μ s è molto più facile da realizzare di uno che emetta 20 kW per 1 μ s, anche se l'energia dell'impulso rimane la stessa.

1.3. Chirp radar

Per conciliare l'esigenza di elevate risoluzioni in distanza con l'impiego di impulsi "lunghi" con limitata potenza di picco, si ricorre spesso alla cosiddetta codifica dell'impulso. Tale tecnica consiste nell'introdurre una qualche forma di modulazione in un impulso di lunga durata, allargandone la banda. In questo modo è possibile distinguere due echi parzialmente sovrapposti grazie alla modulazione presente nell'impulso.

Infatti, se viene utilizzato un segnale linearmente modulato in frequenza, tramite una correlazione del ritorno dal target con una replica del segnale trasmesso memorizzato nel sistema, si ottiene una *sinc* che meglio approssima il Dirac rispetto alla finestra rettangolare.

Questo tipo di segnale è chiamato *chirp*, da cui nasce il concetto di *chirp radar*.

La risoluzione in tempo di un sistema del genere è in prima approssimazione pari a $T' = 1/B$, dove B è la banda del chirp (che nel caso di un impulso non modulato di durata T, avendo questo una banda $1/T$, si riduce a $T' = T$), da cui si ricava che la risoluzione geometrica in range di un chirp radar è:

$$\rho = \frac{c}{2B} \quad (1.1)$$

1.4. Risoluzione in azimuth: RAR e SAR

La risoluzione ρ_{az} lungo l'azimuth corrisponde alla minima distanza a cui deve trovarsi (nella direzione di volo della piattaforma, ossia lungo l'azimuth) un punto P' dal punto P affinché essi appaiano separati. Essa dipende dall'ampiezza β del fascio dell'antenna lungo l'azimuth, ossia [II] :

$$\rho_{az} = r \cdot \beta = \frac{h \cdot \beta}{\cos \vartheta} \quad (1.1)$$

dove r è lo *slant range*, distanza tra il radar ed il punto P. Ricordando che l'ampiezza di fascio a 3dB per un'antenna ad apertura la cui lunghezza nella direzione di volo della piattaforma sia L è esprimibile come:

$$\beta = \frac{\lambda}{L} \quad (1.2)$$

si ottiene, per la risoluzione in azimuth, il valore:

$$\rho_{az} = \frac{h \cdot \lambda}{L \cdot \cos \vartheta} \quad (1.3)$$

direttamente proporzionale alla quota ed inversamente proporzionale alla lunghezza dell'antenna. Questo tipo di radar d'immagine, la cui risoluzione in

azimuth è legata all'ampiezza di fascio azimutale dell'antenna, si chiama *radar ad apertura reale* (RAR, *Real Aperture Radar*).

Consideriamo, ad esempio, un RAR posto su piattaforma aerea ed avente le seguenti caratteristiche:

- $\lambda = 3.1$ cm (Banda X)
- $L = 10$ metri
- $h = 7$ km
- $\vartheta = 29^\circ$

In tal caso la risoluzione lungo l'*azimuth* sarà pari a circa 24 metri. Lo stesso radar a bordo di un satellite, ad un'altezza di 700 km avrebbe una risoluzione lungo la direzione del moto 100 volte peggiore, ossia di circa 3 km.

E' questa la ragione principale per la quale un RAR su piattaforma satellitare è improponibile.

Una tecnica che permette di ottenere immagini radar con risoluzione azimutale buona e, soprattutto, indipendente dalla quota della piattaforma (come la risoluzione in *range*) è la tecnica del **Radar ad Apertura Sintetica (SAR)**. I SAR [V] sono sistemi in cui l'acquisizione dei segnali lungo la direzione del moto della piattaforma viene integrata per una lunghezza sufficientemente grande. In tal modo viene prodotta sinteticamente, in tale direzione, un'antenna lineare molto più grande dell'antenna ad apertura reale, permettendo di ottenere così un'elevata risoluzione nella direzione del moto.

Il miglioramento della risoluzione in *azimuth* in un SAR è ottenuto sfruttando opportunamente lo scostamento Doppler di echi radar ricevuti da

bersagli differenti (nel 1957, quando la tecnica SAR fu brevettata dal suo inventore, J. Wiley, questo tipo di radar si chiamava “*Doppler beam-sharpening radar*”, per evidenziare l’effetto di “restringimento” del fascio dell’antenna attraverso l’analisi Doppler degli echi azimutali). E’ necessaria a questo punto, per completezza, una piccola digressione sull’effetto Doppler.

1.5. Effetto Doppler

L’effetto Doppler [II], ben noto in ottica e in acustica, si basa sul cambiamento della frequenza, osservato quando c’è un moto relativo radiale, cioè lungo la congiungente fra un trasmettitore ed un ricevitore. Se la distanza tra radar e bersaglio è r (il *range*), il numero totale di lunghezze d’onda λ contenuto nel cammino (andata e ritorno) tra il radar e il bersaglio è $2r/\lambda$, e, siccome una lunghezza d’onda corrisponde ad un’escursione di 2π della fase del campo, la fase totale φ “percorsa” da un’onda elettromagnetica a frequenza f_0 è $4\pi r/\lambda_0$ radianti, con $\lambda_0=c/f_0$.

Ovviamente, se il bersaglio è in movimento, sia r che φ dipendono dal tempo, e un cambiamento nel tempo della fase equivale ad una frequenza istantanea f_D che si aggiunge alla frequenza f_0 :

$$2\pi f_D = \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} \quad (1.1)$$

Questo scostamento di frequenza (lo scostamento Doppler, appunto, o *Doppler shift*, scoperto nel 1842 dal fisico austriaco Christian J. Doppler) è quindi direttamente proporzionale alla velocità relativa radiale (cioè alla componente lungo la congiungente radar-bersaglio) fra trasmettitore e ricevitore, V_r , ed è espresso, se la velocità relativa è molto minore della velocità della luce c (come nel nostro caso), da:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = -\frac{2V_r}{\lambda} \quad (1.2)$$

La (1.10) è diagrammata parametricamente, per vari valori di V_r , in Figura 1.1.

La geometria di osservazione del SAR nella direzione azimutale (in *range* non cambia nulla rispetto ad un RAR, naturalmente) è schematizzata in Figura 1.2.

Se indichiamo con r_0 l'altezza del triangolo con il quale è rappresentato il fascio dell'antenna, la generica distanza r tra una "stazione" della piattaforma (il punto x_i sulla traiettoria di volo) ed un bersaglio posto nel punto P varierà al variare della posizione della piattaforma ($r = r(s)$), e varrà:

$$r = \sqrt{r_0^2 + V^2 s^2} \quad (1.3)$$

dove V è la velocità della piattaforma, ed il tempo s è valutato a partire da una stazione iniziale, presa come riferimento (per esempio, la stazione x_1).

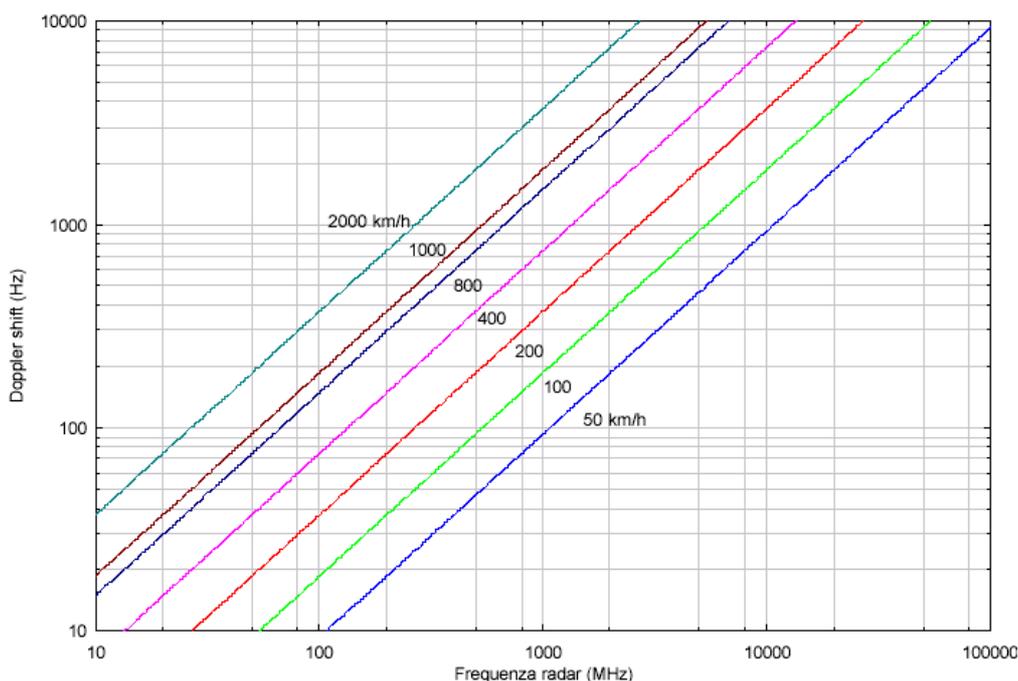


Figura 1.1 : Doppler shift in funzione della frequenza radar trasmessa a varie velocità radiali

Man mano che il sensore si muove, è possibile registrare lungo la linea di volo i segnali di ritorno nei punti x_1, x_2, \dots, x_n . In corrispondenza di ogni stazione (con una cadenza dettata dalla PRF) il radar emette un impulso, e subito dopo (la scala dei tempi è “veloce”, nel senso che la propagazione è governata dalla velocità dell’onda elettromagnetica, cioè c) riceve l’energia retroirradiata dalla scena illuminata. Si fa spesso, nel modellare il funzionamento in azimuth del SAR, la cosiddetta *approssimazione stop-start*: si ritiene cioè che la piattaforma resti ferma durante il tempo necessario a trasmettere e ricevere l’impulso, e che si porti istantaneamente sulla posizione della stazione successiva, dopo un tempo $1/PRF$.

$$f_D = \frac{2V^2 s \lambda}{r_0} \quad (1.5)$$

Il SAR registrerà coerentemente (cioè immagazzinando ampiezza e fase dell'eco ricevuto) tutti gli echi radar provenienti dal bersaglio per tutto il tempo in cui sarà “inquadrato” dall'antenna reale, e cioè in tutte le stazioni x_1, \dots, x_n . Questo processo corrisponde a “sintetizzare” n antenne in posizioni diverse, ed a combinare i segnali ricevuti in modo da formare un “allineamento” (o *array*) di antenne reali, che prende il nome di “antenna sintetica”. Il corrispondente tempo di “inquadramento” (noto come *tempo di integrazione*) T_i sarà legato alla dimensione D della *swath* a terra, che a sua volta dipende dall'ampiezza del fascio azimutale (β) dell'antenna reale.

$$T_i = \frac{r_0 \lambda}{VL} \quad (1.6)$$

Al variare di s , quindi, l'eco ricevuto avrà una “storia Doppler”, nel senso che lo scostamento Doppler $f_D(s)$ ad esso associato dipenderà dal tempo (linearmente, in questo caso). Se il radar è in grado di registrare non solo l'ampiezza dell'eco ricevuto (come fa un RAR) ma anche la “storia di fase”, o *phase history* (1.4), ad ogni pixel nella direzione di *azimuth* sarà possibile associare un diverso valore di f_D . Sarà quindi possibile associare biunivocamente ad ogni pixel la coppia (r, f_D) , e costruire un'“immagine” associata a queste coppie di coordinate.

Lo scostamento Doppler (in prima approssimazione lineare nel tempo) varierà tra un massimo ed un minimo, e sarà nullo in corrispondenza della distanza r_0 da P (r_0 si chiama anche *closest approach*). E' importante valutare, a questo punto, l'intervallo di scostamenti Doppler (la **banda Doppler** B_D)

dell'eco ricevuto durante la formazione dell'"antenna sintetica", cioè durante l'acquisizione degli echi dalle n stazioni.

Valutando la (1.13) in T_i si ottiene:

$$B_D = f_D(T_i) = \frac{2V}{L} \quad (1.7)$$

La banda Doppler esprime anche il massimo scostamento Doppler rilevato dal radar, ed il suo reciproco ha il significato fisico del "minimo tempo rilevabile", ovvero di una risoluzione temporale: scostamenti Doppler maggiori di $2v/L$ non sono rilevabili dal sistema, ovvero, tempi più piccoli di $1/B_D$ non sono registrabili durante il movimento della piattaforma. Allora, due oggetti che in azimuth si trovano ad una distanza tale che i loro scostamenti Doppler siano maggiori del valore (1.15) non sono "risolvibili" dal SAR. Questa "distanza limite" è appunto la risoluzione in *azimuth*:

$$\rho_{az} = \frac{V}{B_D} = \frac{L}{2} \quad (1.8)$$

Potendo utilizzare un'antenna reale di lunghezza L piccola, è possibile ottenere, quindi, una risoluzione ρ_{az} lungo l'*azimuth* molto fine. In aggiunta, essa è anche indipendente dalla distanza del sensore.

Negli ultimi anni i SAR hanno praticamente sostituito i RAR anche su piattaforma aerea. Essi, oltre che avere una risoluzione lungo l'*azimuth* di gran lunga superiore, hanno tutte le peculiarità dei RAR in termini di sensibilità alle variazioni della rugosità superficiale e della costante dielettrica, di sostanziale indipendenza dalla presenza di nuvole, di potenzialità di acquisizione dei dati sia di giorno che di notte, e, entro certi limiti, di capacità

di penetrazione (vegetazione, ghiaccio e terreni asciutti). Ciò consente di fare studi dettagliati della superficie terrestre, comprese le misure di biomassa e di umidità dei suoli.

I successi ottenuti dal primo satellite con a bordo un SAR (il Seasat-A, lanciato nel 1978) e dalla serie di missioni Shuttle denominate SIR (Shuttle Imaging Radar) a partire dagli anni '80 hanno aperto una nuova era nel Telerilevamento dallo spazio. Il riconoscimento dei notevoli benefici ottenibili con l'uso di tali sensori ha dato un notevole impulso allo sviluppo di sistemi SAR, le cui principali applicazioni sono:

- *Rilevamento idrografico*
- *Inventario delle risorse idriche e forestali*
- *Rilevazione delle zone umide (paludi)*
- *Mappatura morfologica dei bacini dei fiumi*
- *Analisi del drenaggio*
- *Rilevamento di ghiacciai*
- *Studio e rilevazione dei moti ondosi marini*
- *Rilevazione e controllo di fenomeni d'inquinamento delle acque*

- *Analisi, classificazione e definizione delle superfici boschive e coltivate*
- *Controllo degli sviluppi urbani e rurali*
- *Analisi geologiche strutturali*

Nell'ultimo decennio sono stati messi in orbita diversi satelliti con a bordo un SAR: nell'estate del 1991 fu lanciato il satellite europeo **ERS-1** (**E**uropean **R**emote sensing **S**atellite-1); nel febbraio del 1992 fu messo in orbita il satellite giapponese **JERS-1** (**J**apanese **E**arth **R**esources **S**atellite). Nel 1995 assistiamo al lancio di altri due satelliti equipaggiati con SAR: il satellite europeo **ERS-2**, gemello dell'ERS-1, ed il **RADARSAT**, di origine canadese, che fornisce immagini con diverse risoluzioni spaziali e angoli d'incidenza. È inoltre da poco più di un anno (maggio 2002) avvenuto il lancio del satellite **ENVISAT** (**E**nvironmental **S**atellite) dell'agenzia spaziale europea (ESA) a bordo del quale è presente il SAR avanzato (**ASAR**, *Advanced SAR*) a che ha catturato il disastro ecologico in Galizia del novembre 2002.

Tra le tante missioni con a bordo SAR, ci sono quelle effettuate dai due sistemi **SIR-C/X-SAR** (**S**huttle **I**maging **R**adar-**C/X**-band **S**ynthetic **A**perture **R**adar), organizzate in cooperazione tra NASA, Germania e Italia a bordo dello Space Shuttle nel 1994. E proprio dall' X-SAR sono tratti i dati su cui sarà incentrato il lavoro di questa tesi, che quindi sono in banda X.

Nel prossimo futuro, sarà lanciata in orbita un'altra costellazione di satelliti utilizzando un SAR: **COSMO-SkyMed**. La banda di frequenza utilizzata dal

COSMO-SkyMed è proprio la banda X, che, come abbiamo visto, è la banda di frequenza dei dati focalizzati.

1.6. *Range Migration*

Quello della range migration è uno dei problemi fondamentali da affrontare nel processing di dati SAR se si vuole ottenere un'immagine focalizzata correttamente. Infatti, come si può notare dalla (1.16) [I], per ogni punto il range varia al variare di s e ciò causa la natura bidimensionale del problema della compressione dei dati. La range migration può essere divisa in due termini:

- *range walk*
- *range curvature*

Il primo è un termine lineare, mentre il secondo è di tipo quadratico.

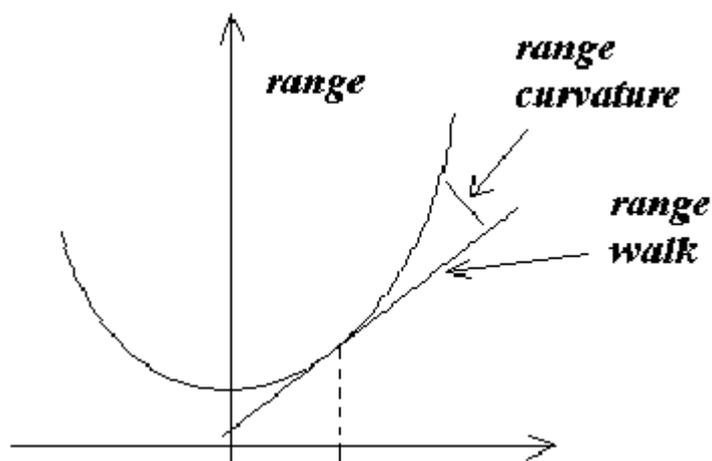


Figura 1.1 : range migration

Nella Figura 1.1 [VIII] viene mostrato come in prima approssimazione l'andamento della RM può essere considerato parabolico [IX], [X].

In termini computazionali, è quello che richiede un dispendio di forze maggiori, dato che nei più comuni algoritmi viene risolto tramite un'interpolazione dell'immagine.

In seguito verrà studiato un tipo di algoritmo, il Chirp Scaling, che corregge la RM tramite una correzione della fase del segnale, e quindi, tramite una semplice moltiplicazione nel dominio di Fourier.

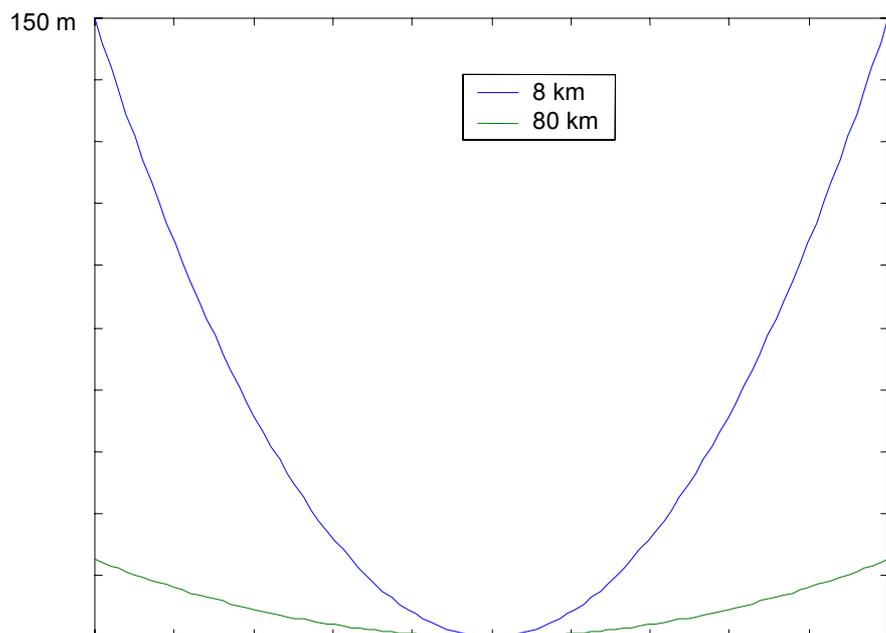


Figura 1.2 : andamento della RM al variare della quota

Inoltre, la quota del sistema X-SAR è di circa 213 Km e la sua PRF è di 1736 Hz, quindi si può notare come gli effetti della RM sono abbastanza contenuti.

2. COSMO – SkyMed

(Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation)

2.1. *Introduzione*

COSMO – SkyMed [XI] è un end to end Earth Observation System italiano, sviluppato dall' Alenia Spazio (come primo imprenditore) per l'ASI (Agenzia Spaziale Italiana). Il sistema è stato programmato per un Dual Use, “militare – civile” e quindi a finanziare il progetto sono sia l'ASI che il Ministero della Difesa. Dual Use significa che due differenti classi di utenza hanno accesso al sistema, nel rispetto delle regole di utilizzo stabilite per ciascun utente in termini di sicurezza e riservatezza delle informazioni.

Il sistema è composto da un segmento spaziale, una costellazione di satelliti SAR , e un segmento di terra che include i servizi riservati all'utenza.

Scopo principale della missione è l'ottenimento di dati e servizi relativi a:

- *Sorveglianza e lavoro di intelligence ed applicazioni di tipo militare sotto coordinamento del Ministero della Difesa*

- *Monitoraggio ambientale, sorveglianza e applicazioni di risk management sotto coordinamento delle istituzioni nazionali*
- *Gestione delle risorse ambientali, controllo marittimo, stesura delle mappe topografiche della terra, controllo del rispetto dei trattati internazionali, applicazioni scientifiche sotto coordinamento di altri enti istituzionali, scientifici e commerciali*

E' utile sottolineare che i più importanti user needs sono quelli relativi alla Difesa, Sicurezza Nazionale e alla gestione del rischio, campi in cui le risorse spaziali possono dare un contributo non indifferente per migliorare il settore dell'intelligence, per minimizzare la vulnerabilità ai disastri, etc.

Per quanto riguarda le applicazioni civili, il COSMO – SkyMed può essere utilizzato nel campo della geologia, agricoltura e controllo di foreste, di acque marine e terrestri, dei ghiacci, del territorio e del paesaggio ecologico, nell'adeguamento legislativo, etc; inoltre, data l'alta risoluzione e la larghezza dello swath, COSMO – SkyMed può essere utilizzato anche per servizi di routine, come aggiornamento delle mappe topografiche, delle mappe urbane e mappe a larga scala.

2.2. *Concetto di “DUAL USE”*

Come già detto, il sistema sarà in grado di supportare uno scenario di tipo duale, che prevede diverse classi di utenza nel settore civile e in quello militare, in contesto nazionale ed internazionale. In altre parole, il sistema sarà in grado di provvedere al servizio richiesto da ciascun utilizzatore, con un adeguato livello di performance, con la capacità e la flessibilità necessarie per adattarsi a diverse esigenze e supportare nuovi users. Il sistema di coordinazione dei servizi sarà basato su regole di priorità precedentemente stabilite.

2.3. *Architettura del COSMO – SkyMed*

La missione del COSMO – SkyMed sarà basata su un sistema di Earth Observation tramite controllo remoto di dati caratterizzati da alta qualità dal punto di vista spettrale, temporale, spaziale e radiometrico.

In particolare, le caratteristiche che rendono il sistema così performante nei due campi di utilizzazione possono riassumersi di seguito:

- *Copertura globale (“imaging everywhere”) in ogni condizione meteorologica, giorno/notte*
- *Alta velocità di risposta (fino all’utente finale)*
- *Ottima qualità dell’immagine, che permette una concreta interpretazione dell’immagine stessa*
- *Capacità di acquisizione dati tramite un singolo passaggio con raccolta di dati stereo*
- *Capacità di acquisizione di aree sufficientemente ampie durante un singolo passaggio*
- *Possibilità di analisi a differenti scale grazie alla risoluzione spaziale e spettrale adattabile*

2.4. *Segmento spaziale*

Il segmento spaziale di COSMO – SkyMed è costituito da una costellazione di quattro satelliti SAR [XII]. I principi guida più importanti del progetto sono due:

- *disponibilità di potenza DC*
- *performance dei satelliti in termini di robustezza, navigazione, agilità e autonomia*

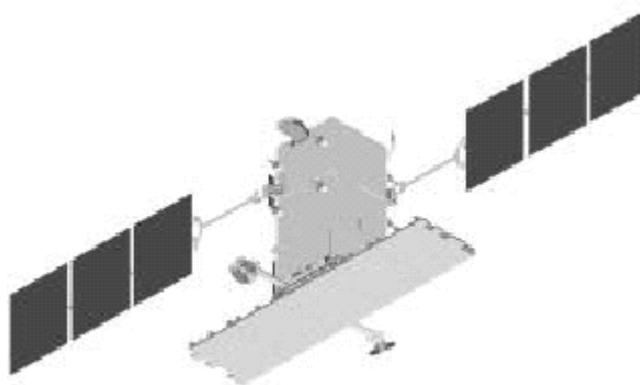


Figura 2.1 : satellite SAR

Fino a pochi mesi fa, altro target prefissato era quello della compatibilità con il lanciatore italiano VEGA-K. Ma la volontà di abbattere i costi e l'aumento delle dimensioni di COSMO porteranno a decisioni probabilmente differenti: si è orientati verso una soluzione che prevede un lanciatore russo. Questo, come già accennato, permetterebbe un minore costo di lancio e un'affidabilità maggiore data la maggiore esperienza del lanciatore.

Il satellite utilizza la banda X ed è completamente stabilizzato intorno ai tre assi ed ottimizzato per la sua orbita nominale (619,6 km).

E' inoltre progettato per gestire autonomamente la sua missione almeno nell'orizzonte delle 24 ore. Un piano di comando, costruito dalle ground stations disponibili, detta tutte le operazioni che il satellite deve compiere, in accordo con una sequenza temporale ordinata.

Le performance di navigazione in real-time più importanti sono garantite da un ricevitore GPS a bordo e da un Precise Orbit Determination SW che si muove al passo con l' Integrated Control System (ICS). Le ottime performance di puntamento permettono il corretto sfruttamento delle immagini ad alta risoluzione SAR. È quindi garantito al massimo 1 Km di errore sull'elaborazione dei targets desiderati.

Infine, la presenza di un veloce Attitude Control System permette di implementare in pochi minuti la manovra di roll necessaria per passare dal nominal right looking imaging mode al left looking mode. Questo strumento è fondamentale per concedere il massimo tempo di rivisitazione richiesto e per diminuire sensibilmente il suo valore medio.

2.5. *G/S Architettura generale*

Questo livello di architettura prevede le seguenti soluzioni:

- *È stato identificato un centro CPCM . La località proposta è Fucino. Il simulatore G/S è interfacciato solo con il CPCM e sarà locato in questo centro.*
- *I tre sottosistemi del Core Ground Segment, per esempio la stazione principale TT&C, il CCS e il FDS saranno locati nello stesso centro. Una richiesta specifica vuole che la principale stazione TT&C sia sul territorio nazionale italiano. Per massimizzare il riutilizzo delle infrastrutture esistenti e per assicurare l'ottimizzazione delle capacità di controllo del satellite, lo Space Center di Fucino sembra la soluzione più adeguata per ospitare questi sottosistemi.*
- *Il CREDO civile e la sua principale stazione di acquisizione sono locati a Matera.*
- *Il CREDO militare è locato a Pratica di Mare.*

- *Sono dette MAPS le stazioni mobili di acquisizione e processing dei dati (Mobile Acquisition and Processing Station)*
- *È sotto valutazione di fattibilità l'uso di stazioni TT&C e ACQ polari per raggiungere al meglio il livello necessario di performance e disponibilità del sistema.*

2.6. Scenario di co-operazione

Il programma COSMO-SkyMed è stato concepito sin dal suo inizio per essere implementato in uno scenario internazionale che comprende sia lo sviluppo delle infrastrutture sia l'utilizzo del sistema stesso.

In accordo con questa policy l' ASI ha iniziato alcuni contatti bilaterali di natura formale, per identificare e definire il livello di interesse e di implicazione delle altre agenzie/autorità spaziali nazionali.

In questo contesto uno studio comune ha iniziato il suo sviluppo sull'ossatura dell'accordo intergovernativo Italia-Francia.

2.7. Risultati ottenuti in analisi di trade-off e di design

La banda X offre, per un obiettivo SAR, il miglior compromesso tra le limitazioni dovute ai problemi di natura tecnologica, i costi di missione e le applicazioni. In particolare, c'è una grande varietà di componentistica spaziale qualificata presente attualmente sul mercato che, tra l'altro, ora si affaccia con una policy commerciale molto aperta sul panorama mondiale, con prodotti di qualità elevata a costi ridotti (A/D converters, wide band mixers, stable oscillators, etc).

L'eredità di una tecnologia sviluppata in ambito militare, rende conveniente l'adozione di un sistema ad alta risoluzione e di trasmissione dati in real-time, in quanto le spese risultano accettabilmente basse.

La necessità di riconoscere i dettagli in strutture costruite dall'uomo, o di conoscere gli effetti di una piccola frana, è strettamente correlata alla necessità di una buona risoluzione a terra (al massimo 5 metri).

D'altra parte, risoluzioni molto elevate (in senso positivo, cioè meno di 1.5 metri) implicano un'elettronica molto complessa, antenne pesanti, e difficoltà per le autorizzazioni all'utilizzo di quel tipo di banda di frequenza. Inoltre, avere risoluzioni più alte significa anche piccoli swaths a terra (2-5 Km) a causa delle limitazioni esistenti per il down-link dei dati (< 300 Mbps).

Quindi, da ciò si evince che il valore di risoluzione scelto (3 m) è il miglior compromesso tra limitazioni tecnologiche e necessità operative.

La necessità del GPS nasce invece dalla richiesta di una capacità autonoma di riferire il prodotto processato in una grid-map a terra, usando solo conoscenze a priori sulle coordinate dei pixels.

Gli strumenti a disposizione degli odierni SAR per applicazioni civili non permettono ciò, ed impongono un post-processing lungo e difficile e servirebbero ore o addirittura giorni per arrivare ad un risultato decente. Il GPS consente una generazione di vettori di stato in real-time e relativi tag-time con una precisione dell'ordine dei 100 metri e di 1 ms nel caso di dati grezzi.

Quindi, si può fare uso di più informazioni contemporaneamente ed avere una conoscenza accurata della situazione.

Le caratteristiche prima menzionate permettono al sistema di generare dei risultati compatibili con ulteriori capacità di processing. Prima di tutto, l'interferometria può essere applicata secondo metodi differenziali su targets puntuali conosciuti (per esempio corner reflector) per individuare e misurare piccole alluvioni e rigonfiamenti della superficie terrestre in diverse tipologie di ambienti. In questo modo, rischi di frane e terremoti possono essere efficientemente monitorati. Inoltre, l'alta qualità dell'immagine rende possibile la visione stereoscopica del SAR, che in missioni come Venus o Magellano è stata di vero successo. La visione stereoscopica è basilare per l'ottenimento di una modellizzazione 3D precisa e indipendente dalle caratteristiche di fase della banda X che limitano la potenza che l'interferometria avrebbe "naturalmente" su obiettivi estesi.

Il payload del SAR deve soddisfare almeno due imaging modes base, così come riportato in Tabella 2.1. L'alta risoluzione geometrica in corrispondenza

di una Single Look Image richiede una banda di radio frequenza non minore di 160 MHz. D'altra parte, una copertura con un grande swath impone una dura limitazione sulla risoluzione ottenibile. Perciò l'elettronica deve offrire una grandissima flessibilità per quanto riguarda la generazione dell'impulso radar e l'acquisizione per soddisfare le differenti richieste. Quindi, è facile capire che gran parte degli studi ha riguardato l'analisi di trade-off e il raggiungimento delle performances necessarie, fermo restando le limitazioni proposte. In alcuni casi questa policy sembrerebbe addirittura banale, ma la crescente complessità dell'hardware la rende di primaria importanza.

Per dare un esempio, questo è il caso della generazione del chirp, l'implementazione della cui forma d'onda non è completamente digitale, come sembrerebbe conveniente da un punto di vista tecnologico, ma sfrutta soluzioni analogiche derivate matematicamente dall'accoppiamento di onde acustiche, il che semplifica tantissimo il design. Considerando aspetti finanziari, si può affermare che questa situazione è notevolmente più conveniente.

2.7.1. *Caratteristiche operative e limitazioni*

Il sistema garantisce una capacità di accesso world-wide, anche a partire dal momento in cui sarà impiegato un solo satellite. Il sistema di creazione immagini è principalmente caratterizzato da due parametri di tempo: il *tempo*

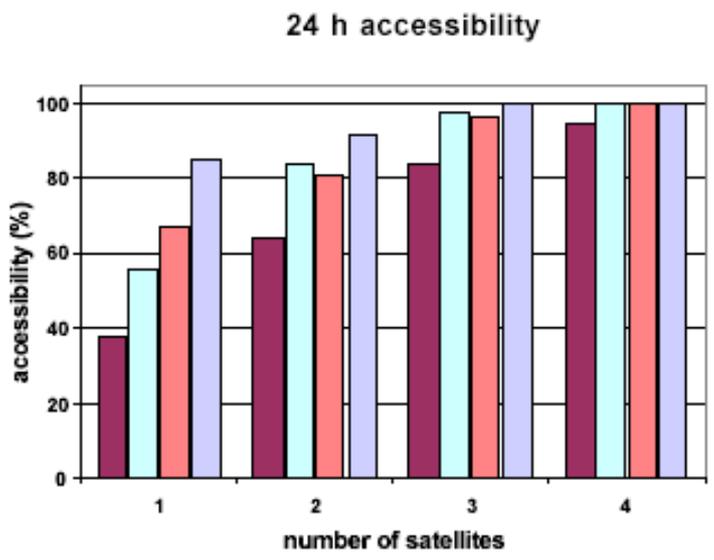
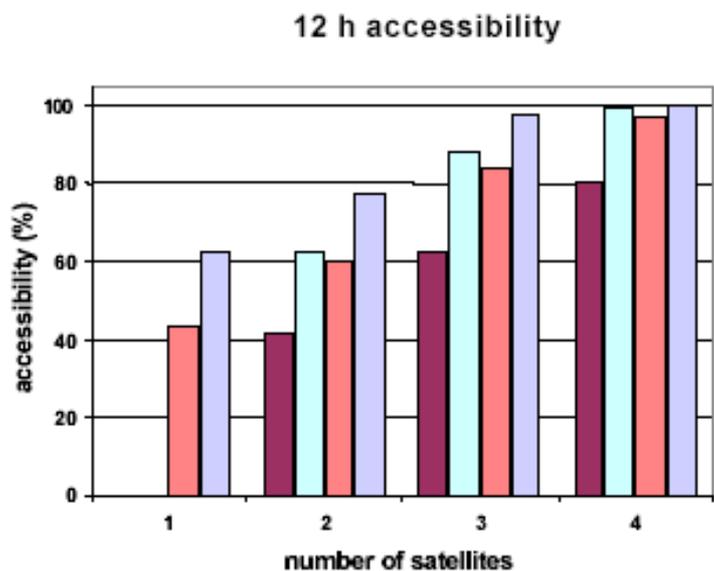
di rivisitazione e il tempo di risposta del sistema. Quest'ultimo è la somma del programming delay, access delay e data oldage delay .

Il tempo di rivisitazione è definito come l'intervallo di tempo tra due passaggi successivi sullo stesso sito. Dipende dal design della costellazione di satelliti e va incontro alle richieste di copertura globale dell'Utilizzatore.

Il tempo di risposta del sistema è il ritardo complessivo tra la richiesta di un Utente e la consegna del prodotto finito all'Utente stesso. Questo parametro dipende sia dal design della costellazione, sia dalla posizione delle ground stations. L'allocazione sul territorio italiano del TT&C e delle ground stations che ricevono la banda X soddisfa i requisiti AD-01 che regola la posizione di queste strutture sul territorio europeo. Bassi tempi di risposta (circa 2-3 ore come tempo medio) possono essere ottenute grazie a una stazione TT&C polare.

Le seguenti figure mostrano i valori dei parametri sopra definiti, considerando tutti i contributi che concorrono alle performance del sistema end-to-end (vari ritardi interni).

Nella tabella di seguito, sono presenti i valori di tutti i parametri che caratterizzano il sistema COSMO-SkyMed. Come già in precedenza detto, questi parametri sono il frutto di un'analisi di trade-off che ha cercato di ottenere il meglio per le prestazioni richieste, date le limitazioni imposte.



Right-Nominal
 Right-Extended
 Right&Left-Nominal
 Right&Left-Extended

Figura 2.1 [XI]

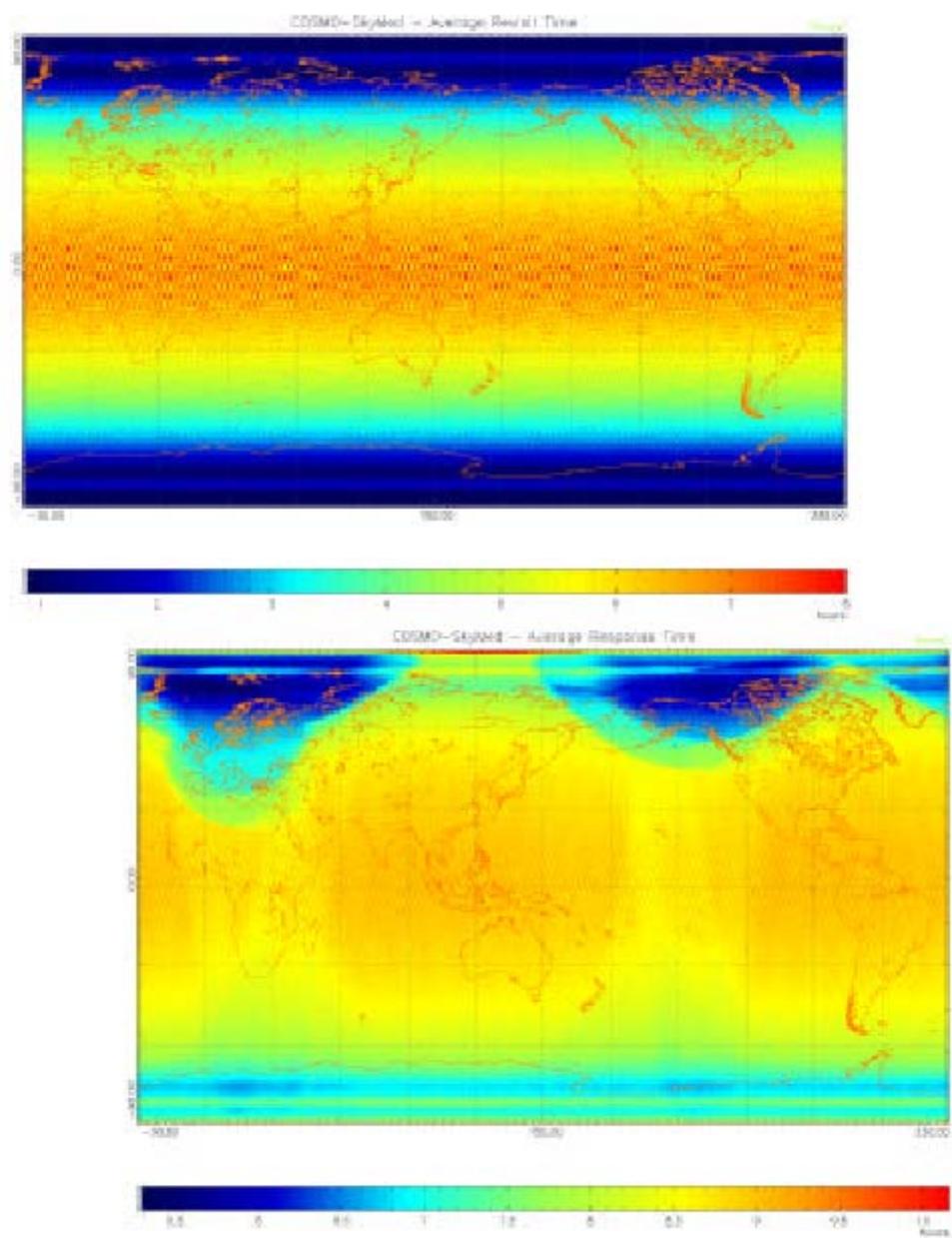


Figura 2.2 : tempo di rivisitazione medio e tempo di risposta – 4 satelliti [XI]

PARAMETER	UNIT	VALUE
<i>Orbit inclination</i>	°	97.5
<i>Orbit altitude</i>	Km	619 +/- 5
<i>Ground track velocity</i>	Km/s	7.3 +/- 0.05
<i>Carrier frequency</i>	GHz	9.6
<i>Antenna size</i>	cm	135x560
<i>Off nadir angle</i>	°	21-44
<i>Incidence angle</i>	°	25-51
<i>Ground swath</i>	Km	24-42
<i>PRF</i>	Hz	2850-3230
<i>Sampling frequency</i>	MHz	288
<i>Pulse bandwidth</i>	MHz	65-118
<i>Geometric resolution</i>	m	2.8(range) x 3.2 (azimuth)
<i>Data rate</i>	Mbps	265
<i>Mass</i>	Kg	480

Tabella 2.1

2.8. *Algoritmi di processing*

Il payload di COSMO- SkyMed è costituito da una antenna fissa con capacità di scanning elettronico sia nel piano di azimuth che nel piano dell'elevazione. È stata progettata per implementare tre differenti operation mode, allo scopo di acquisire le immagini con la risoluzione richiesta: Spotlight mode, Stripmap mode e ScanSAR mode [XIII], [XIV].

Nel seguito verranno spiegati gli algoritmi utilizzati per la focalizzazione dei dati acquisiti nelle diverse modalità. Inoltre, verranno commentati i primi risultati ottenuti grazie a simulazioni o dati reali. L'importanza delle simulazioni è facilmente intuibile, in quanto sia il cliente che il fornitore del servizio hanno bisogno di garanzie sul funzionamento dello strumento e di indicazioni sui miglioramenti da apportare.

2.8.1. *ScanSAR mode*

ScanSAR è un particolare tipo di SAR che ottiene uno swath molto ampio con un particolare tipo di movimento periodico del puntatore dell'antenna che illumina così diversi subswath più piccoli. Questa caratteristica singolare rende la modalità ScanSAR molto utile.

2.8.2. *Stripmap mode*

Questa modalità è quella più comune nei vari sensori SAR. È ottenuta puntando l'antenna lungo una fissata direzione rispetto al flight platform path. Lo spostamento della piattaforma fa sì che l'impronta a terra dell'antenna percorra una striscia che è limitata in range ed illimitata in azimuth.

Gli algoritmi utilizzati per la focalizzazione di questo tipo di acquisizioni sono due:

- *Algoritmo Range Doppler*
- *Algoritmo di Chirp Scaling*

Algoritmo Range Doppler:

L'algoritmo *Range Doppler* è quello di uso più comune nel processing di dati SAR provenienti da una piattaforma spaziale. Il punto cruciale dell'algoritmo è la correzione della range migration.

Algoritmo di Chirp Scaling

Per quanto riguarda l'algoritmo di Chirp scaling, i cui risultati si potranno apprezzare nella focalizzazione dei dati X-SAR affrontata nei capitoli seguenti, rimandiamo il lettore al capitolo 4, nel quale questo algoritmo verrà affrontato in maniera esaustiva.

2.8.3. *Spotlight mode*

Durante l'acquisizione dati in modalità spotlight, il sensore ruota il fascio della sua antenna in modo da illuminare continuamente la parte di suolo da rilevare. Questa modalità offre una risoluzione in azimuth migliore di quella raggiungibile nella modalità stripmap con la stessa antenna.

Il problema principale in questo tipo di modalità è lo sfocamento delle immagini dovuto all' MTCR (motion through resolution cell).

Inoltre, l'antenna rettangolare ha una forte limitazione: infatti, per evitare MTCR significativi e quindi forti degradazioni delle immagini, bisogna processare una zona abbastanza piccola.

Polar Format Algorithm

L'algoritmo da utilizzare deve tener conto del problema e deve compensare l'MTCR. Un valido approccio è costituito da un algoritmo in forma polare che immagazzina i dati connessi ad ogni impulso lungo linee radiali. Questo tipo di algoritmo rimuove quasi del tutto l'MTCR da ogni punto nella scena lasciando un effetto residuo chiamato *range curvature* che viene eliminato tramite una trasformazione di Fourier bidimensionale, che produce l'immagine.

I dati, disposti secondo un format polare, devono essere prima ricampionati nel format rettangolare per poter utilizzare la FFT. Questo viene fatto tramite tecniche di interpolazione che però risultano dispendiose dal punto di vista computazionale.

Il futuro del processing nella modalità spotlight è, ragionevolmente, il CSA e il Range Migration Algorithm.

2.8.4. *Lo stato del programma COSMO-SkyMed*

L'Agenzia Spaziale Italiana, allo scopo di creare un supporto tecnologico allo sviluppo dell'intero sistema COSMO-SkyMed, ha commissionato all' ALS due contratti per programmi per preparare tecnologicamente la missione, PRIMA (Piattaforma Riconfigurabile Italiana Multi-Applicativa) e SAR 2000 (SAR radar instrument).

Perciò, l'approccio allo sviluppo del progetto COSMO-SkyMed ha il vantaggio di sfruttare l'eredità lasciata da questi due programmi per adempiere alle richieste in termini di performance e qualificazione. Entrambi i programmi sono in fase di completamento.

La Figura 2.1 descrive tutte le operazioni di supporto programmate, e mostra come il lancio del primo satellite sia pianificato per l'inizio del 2005.

Il successo dell'intera programmazione prevede un impegno di tutte le parti in gioco, dalle Agenzie Spaziali ai partners industriali, etc.

Il Ground segment è in grado di supportare contemporaneamente le differenti operazioni (i diversi modi operativi LEOP del satellite, commissioning, gli eventi di routine) proprio per realizzare lo spiegamento dell'intera costellazione.

Alla fine della prima fase di operazioni del primo satellite, il sistema entra in una fase detta Pre-Operational che terminerà quando anche il quarto satellite sarà operativo e dopo il System-In flight Acceptance Review (Fine della fase E-1).

Durante questa fase, sarà possibile provvedere ai servizi dei clienti, usando quei satelliti che hanno completato la fase di commissioning senza interferire con le altre operazioni necessarie per la vita della costellazione e il completamento della fase suddetta.

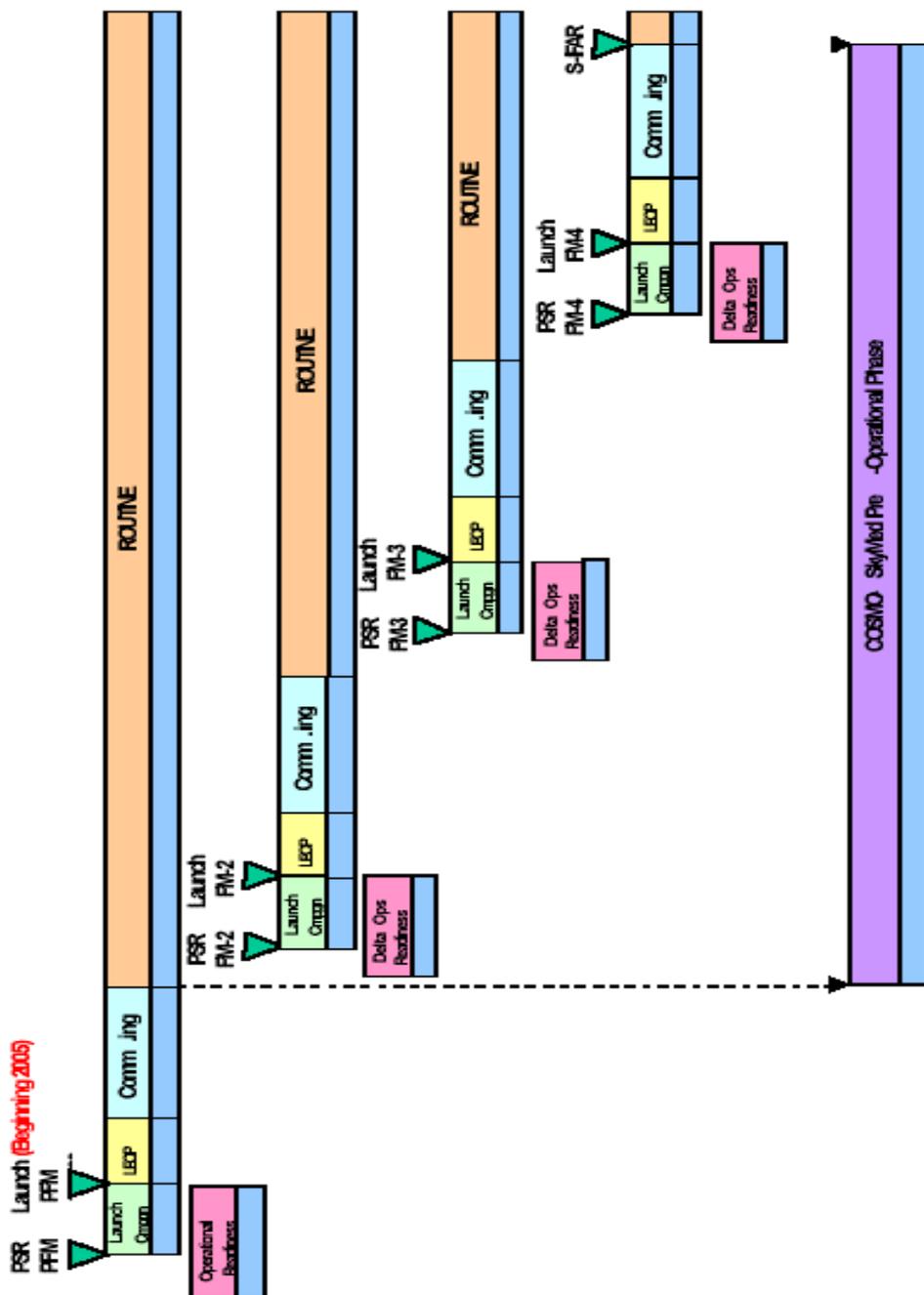


Figura 2.1: programmazione per il sistema COSMO – SkyMed [XI]

3. LETTURA DEI DATI

3.1. *Introduzione*

I dati in possesso sono dati X-SAR relativi ad un passaggio sullo Stretto di Messina ed uno sull'Etna. I file di interesse, per ogni passaggio, sono due:

- *uno di essi è il leader in cui sono presenti le informazioni relative alla missione, ai parametri del SAR, alla posizione ed assetto della piattaforma, etc.*
- *l'altro è il file dei raw data relativi all'immagine vera e propria.*

La lettura di questi due file è stata fatta tramite due programmi implementati in ambiente Matlab, che hanno permesso l'acquisizione delle informazioni necessarie alla focalizzazione.

Tali informazioni sono necessarie in quanto serviranno come input nel processore utilizzato (CiFus).

3.2. CiFus

Il CiFus (Citarella – Fusco) [XV], [XVI], [XVII] è un processore di dati SAR che utilizza come algoritmo di processing il Chirp Scaling. Questo processore è nato per la focalizzazione di dati da aereo, quindi presuppone le ipotesi di traiettoria rettilinea e di terra piatta. Come input prevede un file di configurazione in cui immettere tutti i valori dei parametri utili al processing, come si può vedere nella tabella di seguito:

```
MASTERSOURCE D:\tesi\rasterdata.dat
DATATYPE 8
RANGESINRECORD 2152
RANGEFROM 0
RANGETO 2152
FIRSTAZIMUTH 14000
AZIMUTHTOPROCESS 2048
SPEED 7524 (m/s)
WAVELENGTH 0.03122285 (m)
PRF 1736 (Hz)
CHIRPBANDWIDTH 19e6 (Hz)
VIDEOOFFSETFREQUENCY 0 (Hz)
```

SAMPLINGRATE 44.98e6 (Hz)
CHIRPDURATION 40.0025602e-6 (s)
REFERENCERANGE 318000 (m)
RANGEGATEDELAY 0.00212 (s)
MASTERSLC d:\tesi\prova.slc

Tabella 3.1 : parametri di input del CiFus

Spieghiamo i parametri più importanti della Tabella 3.1:

- *Mastersource*: è il file di input dei dati raw, organizzato in matrice ($n_rangexn_azimuth$).
- *Datatype*: rappresenta il tipo di formato dei dati.
- *Azimuthtoprocess*: è il numero di azimuthes da processare; è conveniente far processare sempre una potenza di 2 di azimuthes, in quanto il processore lavora proprio con la potenza di 2.
- *Speed*: questo parametro nel caso di airborne SAR rappresenta la velocità dell'aereo. Nel caso da satellite ci sono alcune considerazioni da fare e di questo si discuterà nel capitolo 5.
- *Wavelength*: è la lunghezza d'onda di esercizio del radar
- *PRF*: è la Pulse Repetition Frequency.
- *Chirpbandwidth*: rappresenta la banda del chirp. Più è grande questo valore, migliore è la risoluzione dell'antenna. Infatti, una banda maggiore permette una compressione del segnale migliore [V].
- *Chirpduration*: è la durata del segnale. Anche questo valore è importante per la risoluzione dell'antenna.
- *Videooffsetbandwidth*: è la frequenza intorno alla quale è centrato il chirp.

- *Samplingrate*: è il rate di campionamento reale.
- *Referencerange*: è un valore di riferimento per il range. Serve per far capire a che distanza di massima si trova il target.
- *Range gated delay*: rappresenta il tempo che impiega il segnale ad andare e tornare dall'antenna.

Tra questi valori ve ne sono alcuni che saranno da ricercare nel leader file, altri che bisognerà calcolare dopo aver fatto alcune considerazioni e calcoli.

3.3. *Leader file*

Per la lettura del leader ci si è avvalsi dell'aiuto di un descrittore dei campi esistenti, tramite il quale ogni campo è associato ad una posizione ed al numero di bytes che viene occupato.

In questo modo è stato possibile leggere i dati necessari per svolgere il lavoro successivo di focalizzazione.

Innanzitutto, è stata valutata la grandezza del file e il numero di righe e colonne (azimuth e range) delle immagini. Le due immagini sono composte da 2152 linee in range e 26040 in azimuth, ed i dati sono salvati in complex unsigned. Quindi, per prima cosa i dati sono stati letti e salvati con media nulla in un file con estensione *.dat* come richiesto dal processore.

In seguito sono stati valutati parametri come il track angle per conoscere l'orbita seguita dal satellite, il GMT e l'MET che fissano la data e il tempo in secondi al centro dell'immagine, e la latitudine e longitudine geodetica al centro dell'immagine.

Il satellite compie un'orbita near circular ascendente, con inclinazione di 43.90° dall'equatore, e i dati sono relativi ad due passaggi ad una latitudine e ad una longitudine di circa 38° e 15° rispettivamente, per un tempo totale di $(azimuth\ lines)/PRF=15\ sec.$

La risoluzione nominale raggiungibile è di 6 metri in azimuth e 5 metri in range

Ogni striscia coperta è di 109 x 14 Km, che geograficamente rappresentano parte della Sicilia che va dal Monte Etna allo stretto di Messina, e piccola parte della Calabria.

Tramite una lettura binaria del file, sono stati valutati parametri come la posizione del satellite e la sua velocità azimuth per azimuth, che sono espressi in un sistema di riferimento solidale con la Terra (Greenwich true of date). Come sarà specificato in seguito, la velocità da inserire come input nel processore non sarà questa ricavata dalla lettura del leader file, ma dovrà subire delle variazioni a causa della geometria dell'orbita.

Inoltre, tramite un tool appropriato, è stato convertito il valore della posizione del satellite in coordinate polari (longitudine, latitudine e quota).

A questo punto conoscendo l'angolo di vista e la quota, è stato possibile valutare il range di riferimento e il range gate delay ($rgd=2r_{ref}/c$).

I valori rimanenti (PRF, wavelength, chirp bandwidth, chirp duration, sampling rate) sono stati facilmente letti nel leader o comunque calcolati.

La video offset frequency è nulla in quanto i dati sono in banda base.

3.4. *Analisi degli spettri*

Per avere una panoramica sulla situazione in merito ai segnali trasmessi e quelli ricevuti, si può fare un'analisi spettrale sui segnali in range ed in azimuth.

Per quanto riguarda il segnale in range, quello che otterremo sarà il chirp, e quindi avremo un'idea della forma del segnale sparato dall'antenna.

In azimuth, avremo la storia Doppler del segnale e quindi potremo valutare anche il centroide Doppler e la sua variazione col range.

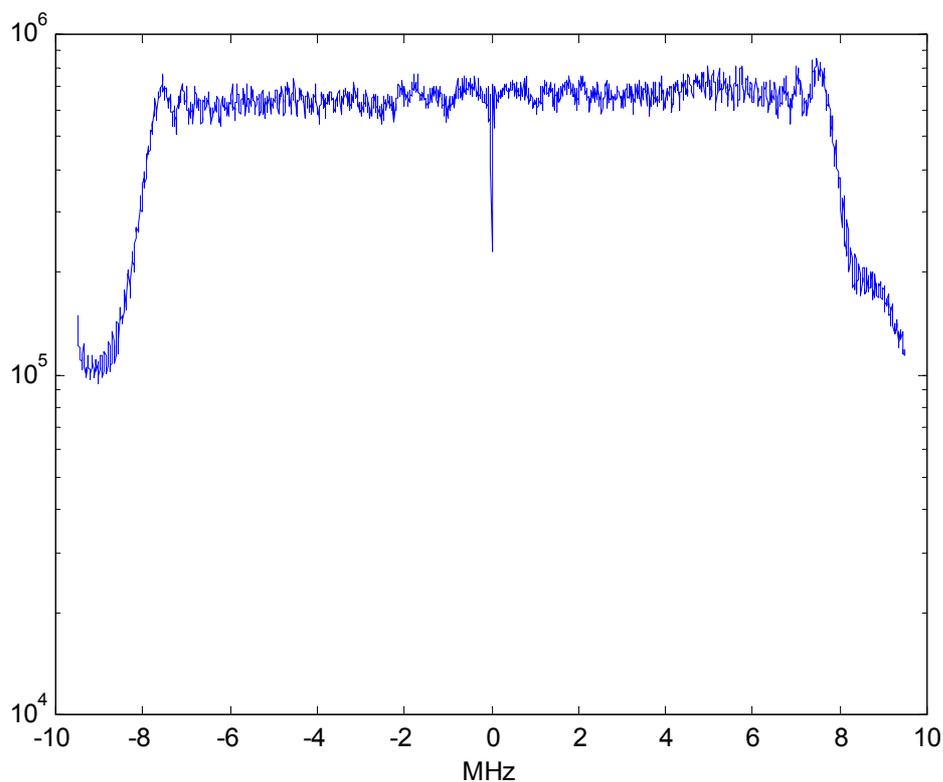


Figura 3.1 : visualizzazione dello spettro del chirp

Come si può vedere dalla Figura 3.1 la banda del chirp va circa dai -9,5 MHz ai 9,5 MHz, e quindi è confermata la bandwidth di 19 MHz, valore ritrovato in precedenza nel leader file.

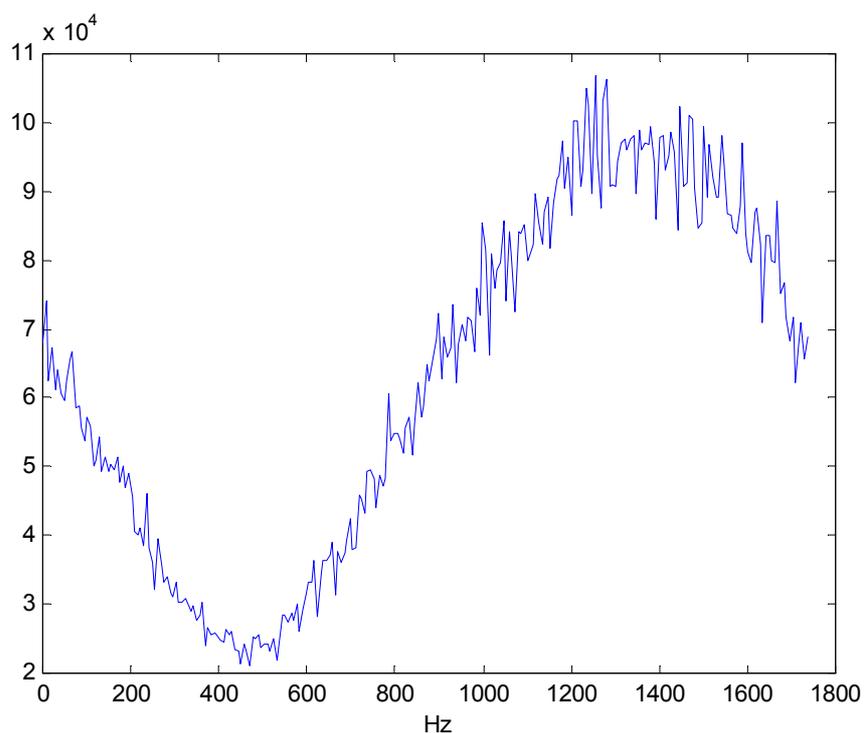


Figura 3.2 : spettro del segnale in azimuth

Dalla Figura 3.2 si può notare l'andamento del Doppler che non è simmetrico, come invece dovrebbe essere per centroide nullo. L'asimmetria è però dovuta a problemi di assetto. Verifichiamo questa asserzione con un calcolo.

Se chiamiamo α l'angolo di squint, il valore del centroide Doppler è dato da:

$$f_{DC} = \frac{2}{\lambda} V \sin \alpha \quad (3.1)$$

e quindi,

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{f_{DC}\lambda}{2V}\right) \quad (3.2)$$

il valore del centroide Doppler trovato dalla figura è $f_{DC}=1330 \text{ Hz}$, da cui $\alpha=0.0014^\circ$.

Si deve però dire che la fft operata sui dati in azimuth considera solo PRF valori; quindi, è vero che è stato trovato che il centroide Doppler a 1330 Hz, ma bisognerebbe calcolare a quante PRF di questo valore si trova realmente.

Per spiegarsi meglio, la fft opera su una finestra di PRF valori. Si dovrebbe calcolare a quante PRF finestre si trova quella dove il centroide Doppler vale 1330 Hz.

Quindi, il centroide Doppler vale $f_{DC}=(1330 \times PRF) \text{ Hz}$.

Questo si può fare confrontando due range diversi nello stesso azimuth e quindi calcolando un Δf_{DC} dai dati e dall'equazione (3.3):

$$f_{DC} = \frac{2}{\lambda} \frac{V}{\sqrt{1 + \frac{\text{tg}^2 \alpha'}{1 - \left(\frac{H-h}{r_0}\right)^2}}} \quad (3.3)$$

dove $(H-h)$ è la distanza del punto dall'antenna e α' è la proiezione a terra di α .

Dal confronto dei due valori si ottiene l'angolo di squint reale.

In ogni modo, questo non è di interesse del nostro studio ed è quindi lasciato alla curiosità del lettore. In Figura 3.3 si può vedere come il centroide Doppler si sposti verso sinistra. Ciò sta a significare che lo squint è arretrato, cosa che giustificherebbe ulteriormente la considerazione che lo squint presente sia dovuto a problemi di assetto.

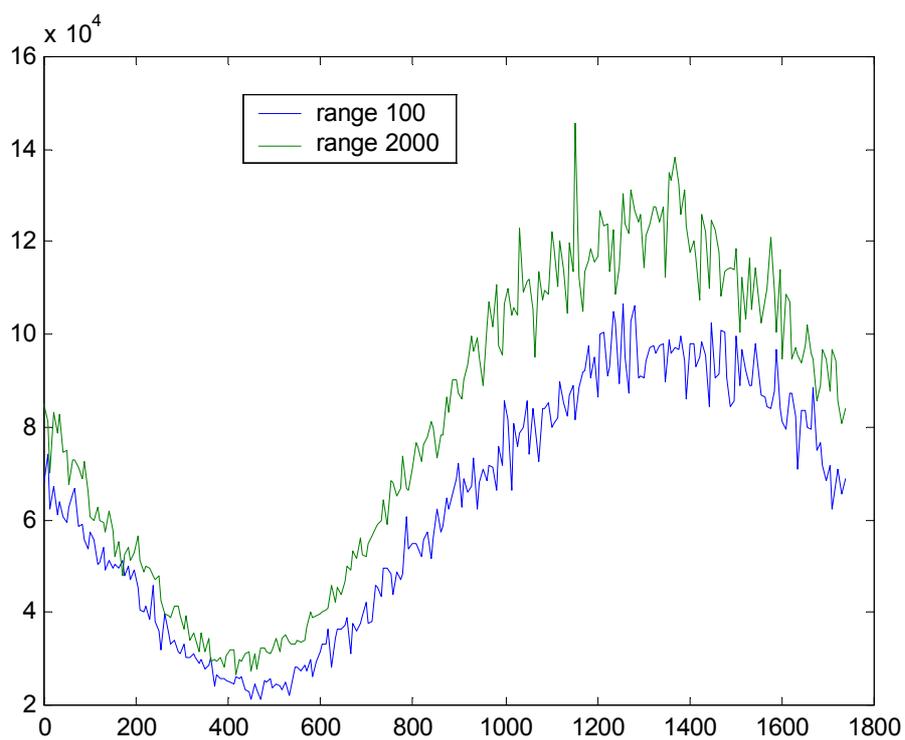


Figura 3.3 : differenza nell'andamento Doppler tra near range e far range

4. L'ALGORITMO DI CHIRP SCALING

4.1. Introduzione

Questa tecnica permette l'elaborazione dei dati acquisiti da un sistema SAR. Negli algoritmi tradizionali utilizzati per la compressione dei dati si può osservare [XV], [XIV] come il fenomeno della RM (Range Migration) è responsabile della natura bidimensionale del problema della compressione in azimuth. In particolare, una perfetta focalizzazione dell'immagine si può ottenere solo tenendo conto della variazione spaziale (in range) della RM. Come è già stato visto in precedenza, non è l'unico tipo di algoritmo, ma sia nei processori RD (Range – Doppler) che in quelli " ω -k", che operano nel dominio bidimensionale trasformato di Fourier dei dati, per ottenere risultati ottimali bisogna utilizzare degli interpolatori, i quali oltre ad essere difficili da implementare, costituiscono una delle maggiori fonti di errori (i coefficienti del polinomio interpolatore devono essere adattati a ciascun campione processato e, quindi, per avere risultati accettabili, occorrono kernel abbastanza grandi).

Il risultato finale è quello di avere una degradazione della qualità dell'immagine e un notevole aumento dei tempi computazionali.

L'algoritmo del Chirp Scaling è privo di qualsiasi passo di interpolazione ed ha risultati non inferiori, in termini di qualità e prestazioni, a quelli degli altri sopraccitati algoritmi.

Infatti, esso conserva proprio in questo la sua attrattiva: richiede solo FFT e moltiplicazioni nel dominio complesso.

Esso, inoltre, conserva la sua efficacia con grandi angoli di squint ed è di semplice implementazione.

È da tenere in considerazione però che il Chirp Scaling non ha la stessa efficacia su tutti i range, ma focalizza meglio un particolare range detto di riferimento e peggiora il suo risultato allontanandosi da esso. Quindi, per grandi beamwidth (in range) si può incorrere in errori nei range più estremi.

4.2. Funzionamento

Il funzionamento del Chirp Scaling [XV], [XX] può essere sintetizzato in poche parole: l'algoritmo del CS equalizza la Range Migration rispetto ad una certa distanza in range di riferimento r_{ref} ; in seguito, insieme alla compressione in azimuth, questa RM viene recuperata rispetto alla r_{ref} , con il

risultato finale che tale compensazione ha effetto su tutti i punti, indipendentemente dalla distanza in range.

4.3. Geometria d'acquisizione

Consideriamo la geometria di Figura 4.1 l'ipotesi fatta alla base della teoria del CS da aereo è la traiettoria rettilinea dell'aeromobile. Questo porta a determinare conclusioni che potremo in seguito apprezzare e che si differenziano da quelle che si avranno in assenza di questa ipotesi semplificativa (orbite satellitari).

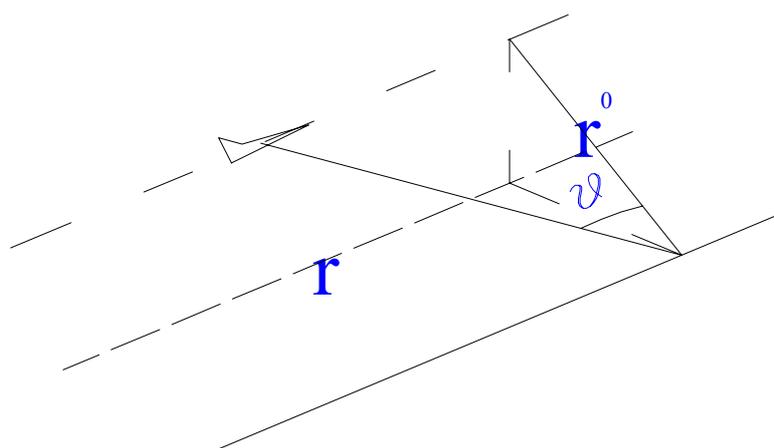


Figura 4.1 : geometria di acquisizione del CSA da aereo

Detto r_0 il range di minima distanza, che si ha quando $\theta = 0$, si può facilmente trovare che la distanza tra bersaglio e sensore in qualsiasi azimuth è

$$r(s) = \sqrt{r_0^2 + V^2 s^2} \quad (4.1)$$

Con s si è indicato il tempo in azimuth, cioè il cosiddetto "tempo lento".

Il segnale trasmesso si può esprimere in questo modo:

$$s(t) = \exp\left(j2\pi\left(f_t t + \frac{K}{2} t^2\right)\right) \Pi\left(\frac{t}{\tau_p}\right) \quad (4.2)$$

Dove si definiscono:

$K =$ *fattore di compensazione del chirp*

$f_t =$ *frequenza della portante del segnale*

$\tau_p =$ *durata del segnale*

Dalla figura si evince che un bersaglio posto in T produce un'eco che è la replica del segnale trasmesso ritardato di un tempo $2r(s,r_0)/c$, dove:

$c = \text{velocità della luce}$

$$h(s,t,r_0) = \exp\left(j2\pi\left(f_t\left(t - \frac{2r(s,r_0)}{c}\right) + \frac{K}{2}\left(t - \frac{2r(s,r_0)}{c}\right)^2\right)\right) \Pi\left(\frac{\left(t - \frac{2r(s,r_0)}{c}\right)}{\tau_p}\right) \quad (4.3)$$

dopo aver rimosso la portante, il segnale può essere riscritto come segue:

$$h(s,t,r_0) = \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}r(s,r_0)\right) \exp\left(j\pi K\left(t - \frac{2r(s,r_0)}{c}\right)^2\right) \Pi\left(\frac{\left(t - \frac{2r(s,r_0)}{c}\right)}{\tau_p}\right) \quad (4.4)$$

Dalla Figura 2.1 segue che la frequenza Doppler di un generico target può essere scritta come segue:

$$v_D = \frac{2V}{\lambda} \sin(\vartheta) \quad (4.5)$$

dove :

$\lambda =$ lunghezza d'onda

Se si indica con ν la generica frequenza in azimuth si ha :

$$\sin(\vartheta) = \frac{\lambda \nu}{2V} \quad (4.6)$$

e quindi:

$$\cos(\vartheta) = \sqrt{1 - \sin^2(\vartheta)} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \nu}{2V}\right)^2} \quad (4.7)$$

da cui discende:

$$r(r_0, s) = \frac{r_0}{\cos(\vartheta(s))} \quad (4.8)$$

se operiamo una trasformazione nel dominio delle frequenze in azimuth mediante una trasformazione di Fourier, si ha

$$r(r_0, \nu) = \frac{r_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \nu}{2V}\right)^2}} = r_0(1 + \alpha(\nu)) \quad (4.9)$$

dove:

$$\alpha(v) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda v}{2V}\right)^2} - 1 = \beta(v) - 1 \quad \beta(v) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda v}{2V}\right)^2} \quad (4.10)$$

Il termine $r_o\alpha(v)$ nella (4.9) è la Range Migration espressa nel dominio range-Doppler.

4.4. Algoritmo di CS

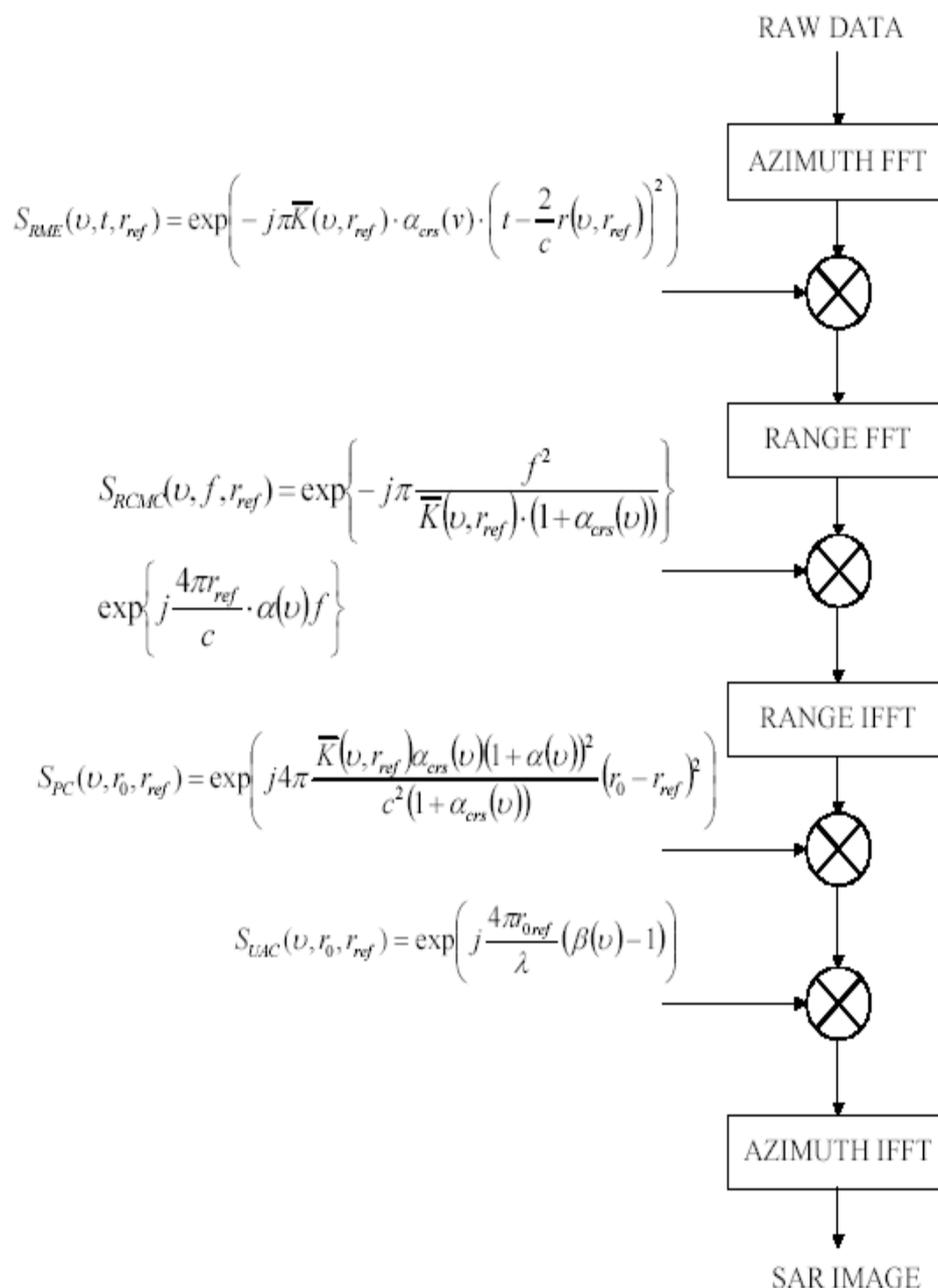


Figura 4.1 : algoritmo di Chirp Scaling [XV]

Come è stato già precedentemente detto, l'algoritmo di CS serve ad ottenere un'immagine compressa a partire da dati grezzi senza bisogno di interpolazioni. Questo viene reso possibile grazie allo studio del fenomeno nel dominio trasformato, e quindi il problema della Range Migration può essere affrontato tramite una semplice correzione di fase.

Il Chirp Scaling si compone di cinque stadi, che in Figura 4.1 sono rappresentati dai diversi blocchi.

La situazione di partenza è rappresentata in Figura 4.2

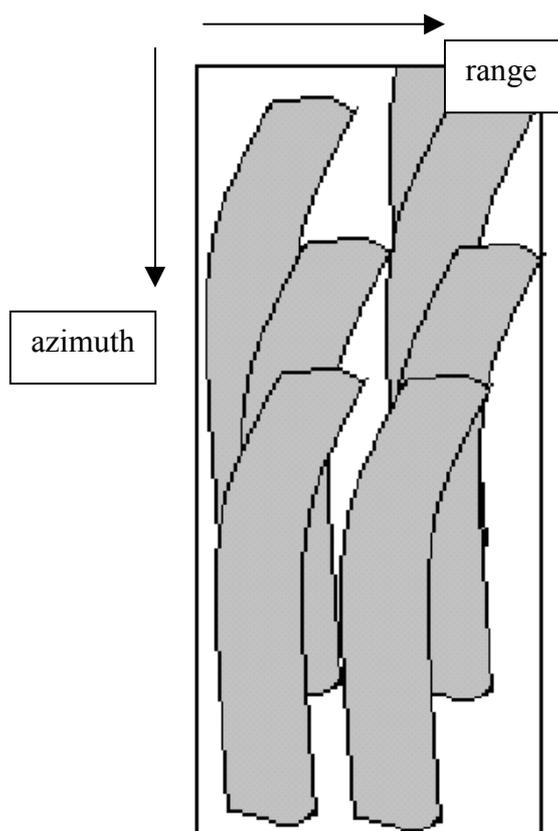


Figura 4.2 : risposta dei punti a terra prima del CSA per una geometria squintata

4.4.1. *Primo stadio dell'algoritmo di chirp scaling*

Il primo stadio dell'algoritmo è quello di una trasformazione in azimuth dei dati grezzi. La parte principale dell'algoritmo consta di una equalizzazione di tutti gli echi che si ricevono rispetto ad un riferimento comune che verrà indicato con r_{ref} . Questa operazione ha come risultato finale una compensazione che ha effetto su tutti i punti, indipendentemente dalla loro distanza in range.

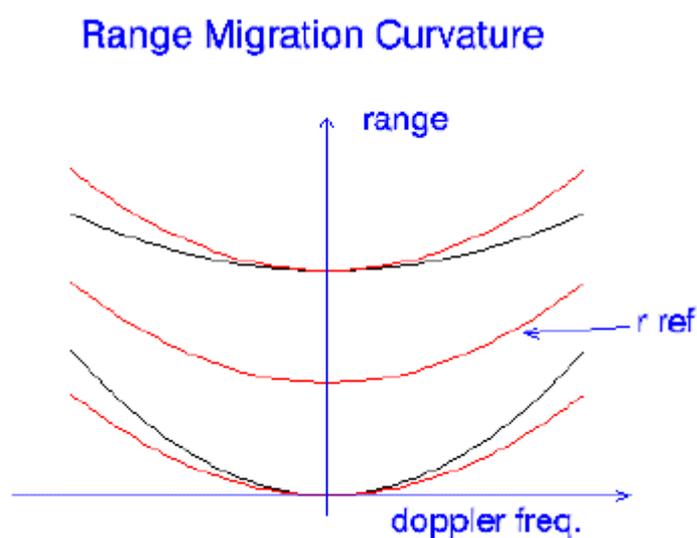


Figura 4.1 : equalizzazione della Range Migration

È prevista anche una scalatura dell'immagine in range di un fattore a : nel caso di interferometria, infatti, questo è necessario per avere le due immagini a confronto con le stesse dimensioni.

Tutto ciò è possibile tramite una moltiplicazione per la seguente funzione di fase:

$$S_{RME}(\nu, t, r_{ref}) = \exp \left(-j\pi \bar{K}(\nu, r_{ref}) \cdot \alpha_{crs}(\nu) \cdot \left(t - \frac{2r(\nu, r_{ref})}{c} \right)^2 \right) \quad (4.1)$$

dove $\alpha_{crs}(\nu)$ rappresenta il termine $\alpha(\nu)$ della (4.10) corretto per la scalatura geometrica dell'immagine dovuta ad **a**.

Quindi, la prima parte dell'algoritmo prevede lo studio del segnale nel dominio *azimuth-frequenza/range-tempo*, e l'equalizzazione del chirp rispetto ad una distanza di riferimento in range. Dopo questa operazione, tutti i punti scatteratori avranno la stessa curvatura, come mostrato in Figura 4.1.

4.4.2. *Secondo stadio dell'algoritmo di CS*

Il secondo passo dell' algoritmo prevede una FFT in range dei dati. Per il calcolo della FFT in range si applica il Principio della fase stazionaria (PSP) [XV].

In Figura 4.1 è rappresentato lo schema del secondo stadio.

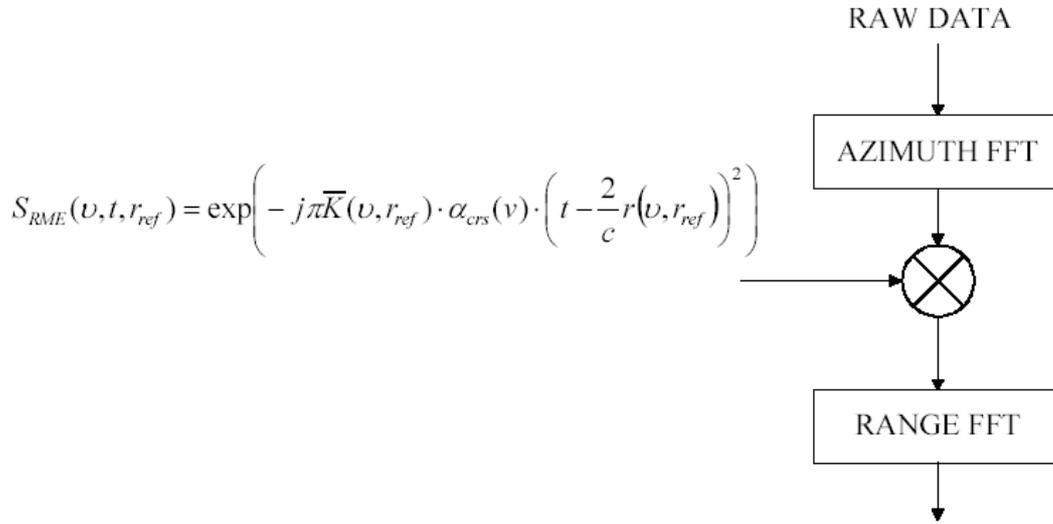


Figura 4.1 : secondo stadio dell'algoritmo di CS [XV]

Questo porta a riscrivere il segnale in questo modo:

$$S_F(\nu, f) = -j\frac{4\pi}{\lambda}r_0\beta(\nu) - \frac{j\pi\alpha_{crs}(\nu)\bar{K}(r_{ref}, \nu)\left(\frac{2}{c}\right)^2(r(\nu, r_{ref}) - r(\nu, r_0))^2}{(1 + \alpha_{crs}(\nu))} - \frac{j\pi f^2}{\bar{K}(r_{ref}, \nu)(1 + \alpha_{crs}(\nu))} - j2\pi f \left(\frac{\frac{2}{c}r(\nu, r_0) + \alpha_{crs}(\nu)\frac{2}{c}r(\nu, r_{ref})}{1 + \alpha_{crs}(\nu)} \right) \quad (4.1)$$

4.4.3. Terzo stadio dell'algoritmo di CS

Dopo aver fatto la FFT, il passo seguente è quello della compressione dei dati in range e della Range Cell Migration Correction (RCMC), che rimuove la curvatura equalizzata in range da tutti i punti. Questa operazione si ottiene moltiplicando la $S_F(v, f)$ con la seguente funzione di fase bidimensionale (matched filter):

$$S_{RCMC}(v, f, r_{ref}) = \exp\left\{\frac{j\pi f^2}{\bar{K}(r_{ref}, v)(1 + \alpha_{crs}(v))}\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi r_{ref}}{c} \alpha(v) f\right\} \quad (4.1)$$

Se si osserva la struttura della formula, si può facilmente intuire che l'effetto della moltiplicazione è l'eliminazione del terzo termine di fase e nella modificazione del quarto termine, che diventa dopo una serie di passaggi pari a:

$$-j \frac{4\pi}{c} f (r_{ref} + a(r_0 - r_{ref})) \quad (4.2)$$

In Figura 4.1 è riportato lo schema del terzo stadio dell'algoritmo.

Il segnale originale è quindi ora diventato:

$$S_F(v, f) S_{RCMC}(v, f) = \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \beta(v)\right) \cdot \exp\left(-\frac{j\pi \alpha_{crs}(v) \bar{K}(r_{ref}, v) \left(\frac{2}{c}\right) (r(v, r_{ref}) - r(v, r_0))^2}{(1 + \alpha_{crs}(v))}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f (r_{ref} + a(r_0 - r_{ref}))\right) \quad (4.3)$$

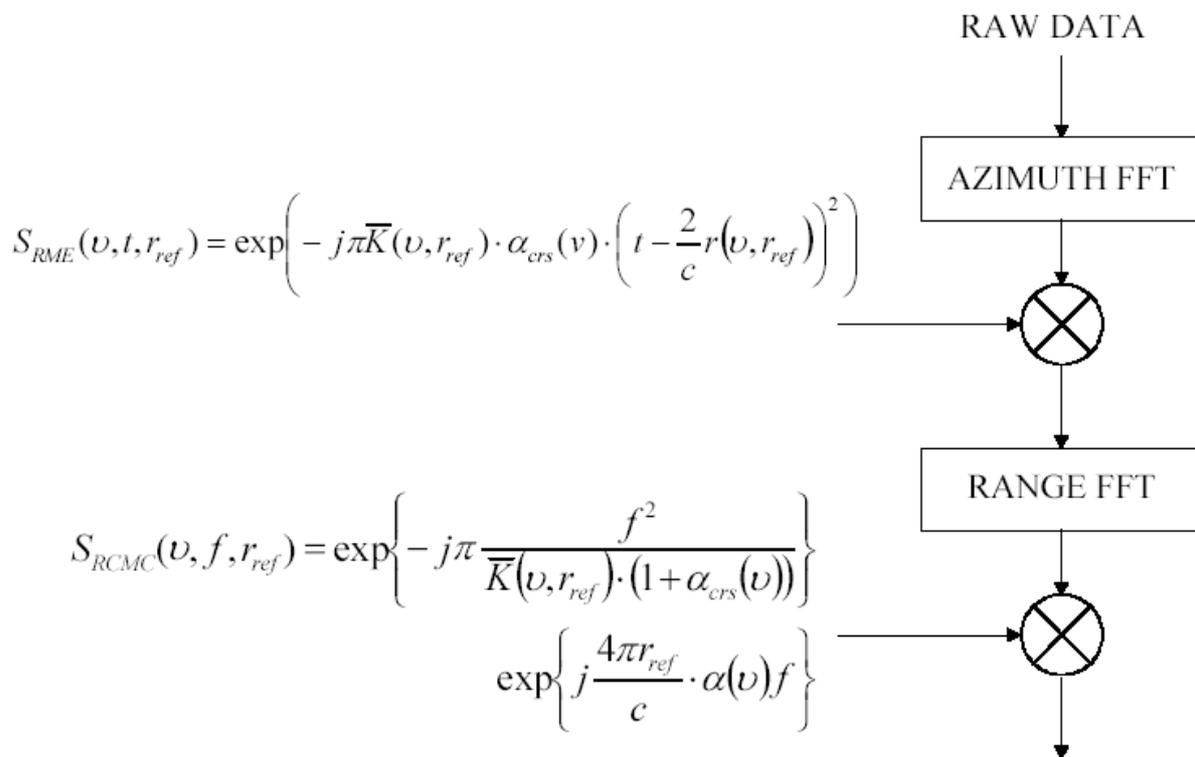


Figura 4.1 : terzo stadio dell'algoritmo di CS [XV]

da cui si evince che l'unico termine dipendente dalla frequenza è l'ultimo, e che quindi il risultato di una IFFT è una sinc con centro in $(r_{ref} + a(r_0 - r_{ref}))2/c$ e la cui ampiezza dipende dalla banda del segnale trasmesso secondo la seguente relazione:

$$S_F(\nu, t) = \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \beta(\nu)\right) \cdot \exp\left[-\frac{j\pi\alpha_{crs}(\nu)\bar{K}(r_{ref}, \nu)\left(\frac{2}{c}\right)(r(\nu, r_{ref}) - r(\nu, r_0))^2}{(1 + \alpha_{crs}(\nu))}\right] \cdot \text{sinc}\left[\pi B_t\left(t - \frac{2}{c}(r_{ref} + a(r_0 - r_{ref}))\right)\right] \quad (4.4)$$

Quindi, nel terzo stadio dell'algoritmo quello che si fa è una compressione in range dei dati, dopo che essi sono stati equalizzati rispetto al range di riferimento.

La situazione è quindi rappresentata in Figura 4.2.



Figura 4.2 : effetto della RCMC

4.4.4. Quarto stadio dell'algoritmo CS

Il secondo termine di fase viene eliminato con una moltiplicazione per la seguente funzione:

$$S_{PC}(\mathbf{v}) = \exp \left[j4\pi \frac{\overline{K}(\mathbf{v}, r_{ref}) \alpha_{crs}(\mathbf{v}) (1 + \alpha(\mathbf{v}))^2}{c^2 (1 + \alpha_{crs}(\mathbf{v}))^2} (r_0 - r_{ref})^2 \right] \quad (4.1)$$

Quindi dopo questa operazione il segnale che si ottiene ha la seguente forma:

$$S_S(\mathbf{v}, t) = \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \beta(\mathbf{v}) \right) \cdot \text{sinc} \left[\pi B_t \left(t - \frac{2}{c} (r_{ref} + a(r_0 - r_{ref})) \right) \right] \quad (4.2)$$

dove:

$t = 2r/c =$ tempo "veloce" che il segnale impiega a tornare all'antenna dal momento in cui è stato lanciato.

$r =$ vettore delle posizioni in range dell'immagine

Si è così giunti alla situazione di Figura 4.1

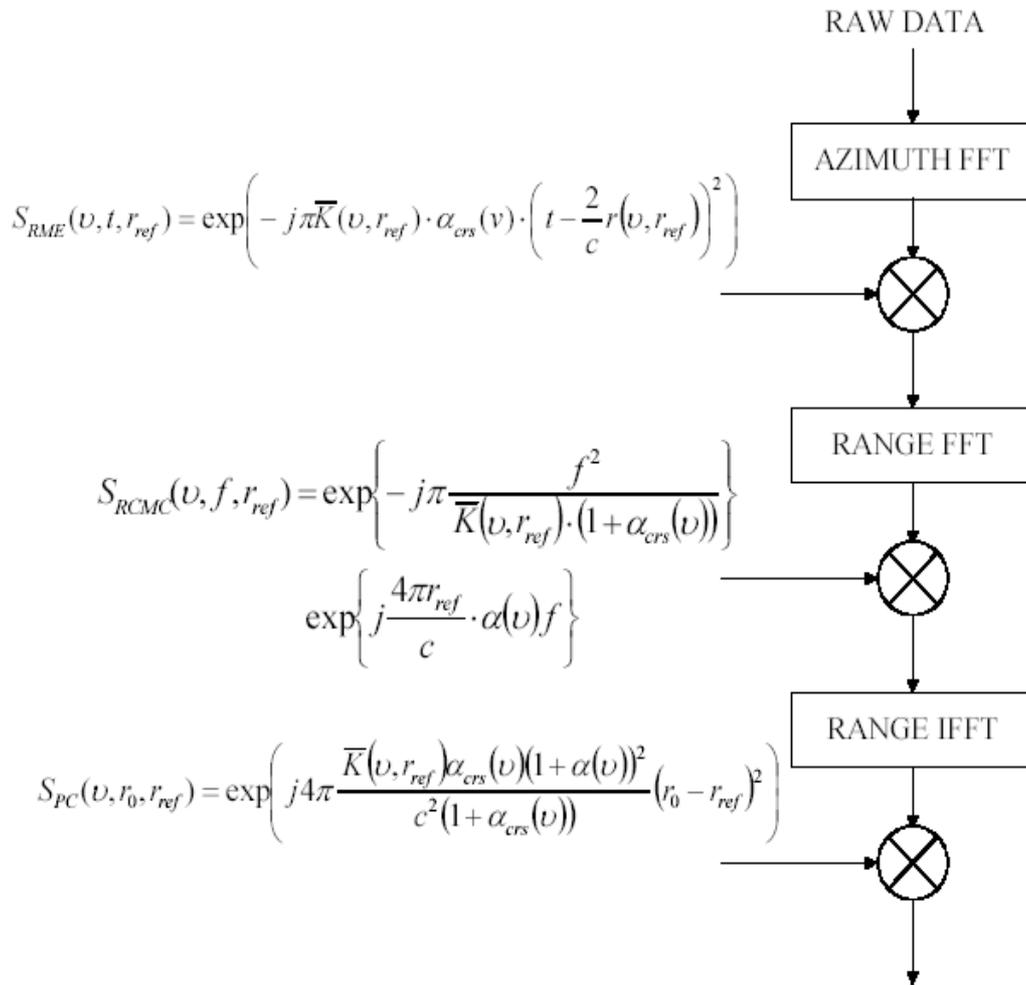


Figura 4.1 : quarto stadio dell'algoritmo di CS [XV]

Come si può notare dalla (4.18), il punto in considerazione è localizzato in $(r_{ref} + a(r_0 - r_{ref}))$; se $\mathbf{a} = 1$, non si ha nessuna scalatura geometrica, e questo è il caso del normale Chirp Scaling.

Se $\mathbf{a} > 1$ allora l'immagine viene espansa in range, altrimenti viene compressa.

Se si considera il caso di un'immagine reale, la variabile r_0 è la locazione dello scattering point nella direzione in range. Durante il processing, la

posizione relativa in range è stata variata e quindi si ha un termine di fase nell'equazione (4.18). Questa posizione non è relativa a quella esatta dell'immagine scalata; quindi bisogna ricostruire l'immagine corretta. Quello che si farà sarà riscalarlo in direzione opposta a quella introdotta dal processing sia il vettore delle posizioni r , sia la posizione dello scattering point. L'espressione da utilizzare è la seguente:

$$\begin{aligned} r_{scl} &= r_{ref} + \frac{(r - r_{ref})}{a} \\ r_{0,scl} &= r_{ref} + \frac{(r_0 - r_{ref})}{a} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Quindi, a questo punto avremo invece della (4.18), la seguente espressione:

$$S_{S,scl}(\mathbf{v}, t) = \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_{0,scl} \beta(\mathbf{v})\right) \cdot \text{sinc}\left[\pi B_t \left(\frac{2}{c} \left(r_{ref} + \frac{(r_0 - r_{ref})}{a} - r_0\right)\right)\right] \quad (4.4)$$

4.4.5. Quinto stadio dell'algoritmo CS

L'ultima formulazione calcolata ci evidenzia che la *sinc* rimane ancora centrata in $(r_{ref} + a(r_0 - r_{ref}))$, per cui bisogna modificare la posizione del

punto nell'immagine finale, variando ancora una volta la fase dell'espressione. Questo può essere fatto moltiplicando il tutto per:

$$S_{UAC}(v, r_0, r_{ref}) = \exp\left(j \frac{4\pi r_{0,scl}}{\lambda} (\beta(v) - 1)\right) \quad (4.1)$$

questa operazione ci permette di avere un'espressione della fase costante con v , il che elimina il problema della Range Migration che volevamo affrontare. Quindi, i dati sono stati compressi in range e azimuth correggendo la RM, e il risultato finale è quello che i punti a terra sono rappresentati da *sinc* bidimensionali.

Dopo queste operazioni otteniamo una funzione che è una *sinc* centrata in zero, la cui ampiezza dipende dalla banda Doppler del segnale acquisito.

Facendo ora l' IFFT in azimuth, quello che otteniamo è una *sinc* bidimensionale (4.22) le cui ampiezze dipendono da parametri di sistema quali Banda Doppler B_D e Banda del segnale trasmesso B_t .

$$\exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_{0,scl}\right) \cdot \text{sinc}(\pi B_D s) \cdot \text{sinc}\left[\pi B_t \left(\frac{t}{a} + \frac{2}{c} (r_{ref} + a(r_0 - r_{ref}))\right)\right] \quad (4.2).$$

Quindi, un termine fondamentale nell'algoritmo di chirp scaling è proprio la Banda Doppler che deve essere coerente con il fenomeno in studio

La Figura 4.1 mostra l'algoritmo completo di Chirp Scaling.

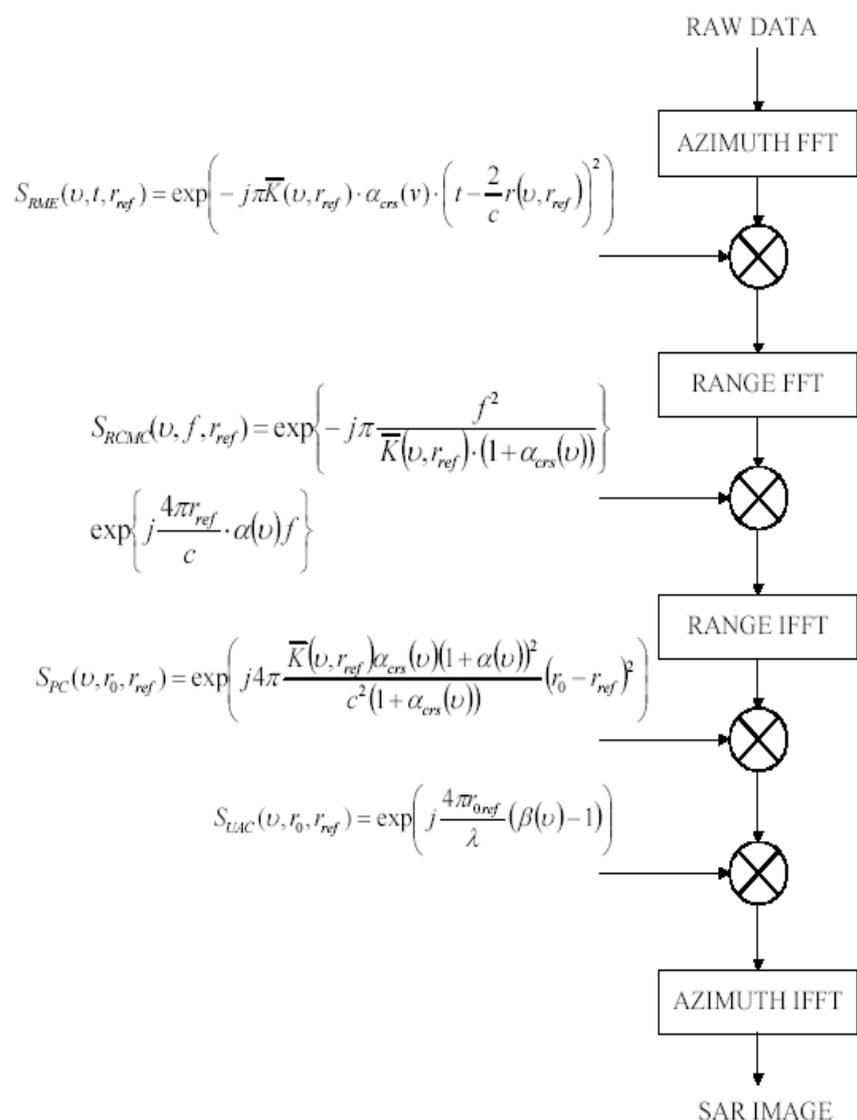


Figura 4.1 : quinto stadio dell'algoritmo di CS [XV]

5. CSA PER DATI DA SATELLITE

5.1. *Introduzione*

L'ipotesi fatta a riguardo della traiettoria rettilinea e della non sfericità della terra (flat Earth) per il CSA da aereo, cade in difetto per quanto riguarda il CSA da satellite, ed in genere causa errori notevoli nella focalizzazione dell'immagine.

Questo perché bisogna tenere in conto che il satellite percorre un'orbita non rettilinea rispetto alla terra che, inoltre, nel frattempo ruota su se stessa. Nel caso di SAR, il tipo di orbita utilizzata è quella *near circular* (che nei calcoli può essere approssimata ad un'orbita circolare) che chiaramente differisce dal tipo di percorso seguito dall'aereo (rettilineo).

Tutto ciò comporta una Banda Doppler differente dal caso di moto rettilineo: ci aspettiamo, infatti, che per orbite circolari il Doppler vari più lentamente, in quanto il coseno dell'angolo formato dalla velocità della piattaforma e dal vettore r , distanza tra punto scatteratore e spacecraft, varia in maniera minore, il che può influire considerevolmente sulla successiva focalizzazione.

Infatti, il processore calcola la distanza in azimuth del punto scatteratore basandosi proprio sul valore del parametro Doppler.

Verrà dimostrato che, a causa di questo problema, l'utilizzo della semplice velocità relativa tra piattaforma e punto a terra può causare perdita di risoluzione, soprattutto nei SAR con grandi beamwidth ed a quote elevate.

Quindi, per correggere questo tipo di errore bisogna utilizzare una velocità differente da quella utilizzata nelle espressioni (4.1) e seguenti del capitolo precedente.

5.2. *Metodi di risoluzione*

Come è stato detto in precedenza, per correggere l'errore dovuto alle approssimazioni usate dal CS da aereo bisogna agire sulla stima della velocità effettiva che entra in gioco nel fenomeno.

Per il calcolo della velocità sono stati utilizzati due approcci:

- *È stata valutata la dipendenza della velocità effettiva dal Doppler rate, calcolando il valore di quest'ultimo tramite appropriati algoritmi. [XXVII]*

Storia Doppler \longrightarrow ***Velocità effettiva***

- *È stata valutata direttamente la velocità effettiva come la velocità del footprint dell'antenna e da questa formulazione è stata ricavata la Banda Doppler del segnale. [XXI]*

Velocità effettiva \longrightarrow ***Storia Doppler***

Di seguito saranno sviluppati i due approcci sopraindicati e ne saranno confrontati i risultati tramite delle prove di focalizzazione dei dati in possesso.

5.3. *Velocità effettiva a partire dal Doppler rate*

Noi sappiamo che la Range Migration può essere espressa come una funzione del Doppler rate, e quindi, anche la velocità può esprimersi come funzione di questo parametro. Una volta conosciuta la relazione che lega V e f_r , basterà trovare il valore del Doppler rate nel caso in esame per ottenere ciò che ci siamo prefissati.

Questo approccio prevede in prima approssimazione le facilitazioni indotte dalla geometria rettilinea, e dall'ipotesi di terra piatta, e quindi potrebbe essere considerato un approccio semplificato.

Vediamo ora come dal calcolo della derivata seconda del Range nel punto di closest approach r_o abbiamo il legame tra velocità effettiva e Doppler rate.

Dalla geometria dell'orbita, come già visto nel capitolo sul Chirp Scaling, vediamo che:

$$r = \sqrt{r_o^2 + V^2 s^2} \quad (5.1)$$

Derivando la (5.1) e utilizzando la seguente espressione, che sarà utilizzata nel caso di calcolo della velocità dal Doppler:

$$f_r = -\frac{2V^2(r)}{\lambda r_o} \quad (5.2)$$

otteniamo la (5.3), che verrà utilizzata in seguito :

$$r''(s, r)|_{s=0} = -\frac{\lambda f_r}{2} \quad (5.3)$$

la velocità effettiva della piattaforma diventa allora:

$$V(r_0) = \sqrt{\frac{-\lambda r_0 f_r}{2}} \quad (5.4)$$

Ora, quindi, diventa essenziale la stima del Doppler rate, che può essere effettuata tramite diversi algoritmi di calcolo a partire dai dati raw.

Il calcolo del Doppler rate però, come sarà evidenziato in seguito, comporta un dispendio di energie abbastanza elevato, soprattutto se da implementare in un software già in uso, come nel caso in esame.

Vediamo un tipo di algoritmo molto comune che può servire per il calcolo dei parametri Doppler nel nostro caso.

5.3.1. *Algoritmi di calcolo dei parametri Doppler*

S.A.C. ALGORITHM

Come appena visto, la stima della velocità effettiva e quindi del Doppler rate è di fondamentale importanza per la qualità dell'immagine da processare. Molti processori prevedono la stima dei parametri Doppler tramite algoritmi che fanno uso di operazioni di Shift e Correlazione (SAC) [XVIII], [XIX].

Per piccoli beamwidth la storia Doppler associata al punto scatteratore è un segnale modulato linearmente in frequenza. Quello che ci interessa per il nostro studio è il suo valore per $s=0$ e quindi nel punto di closest approach.

L'algoritmo SAC realizza due looks del segnale Doppler per mezzo di filtri passa banda [XV]. Successivamente, un look viene traslato in frequenza e correlato col secondo look nel dominio del tempo. La cross correlazione dei due segnali restituisce un impulso compresso e il Doppler rate viene ottenuto considerando la posizione del picco risultante.

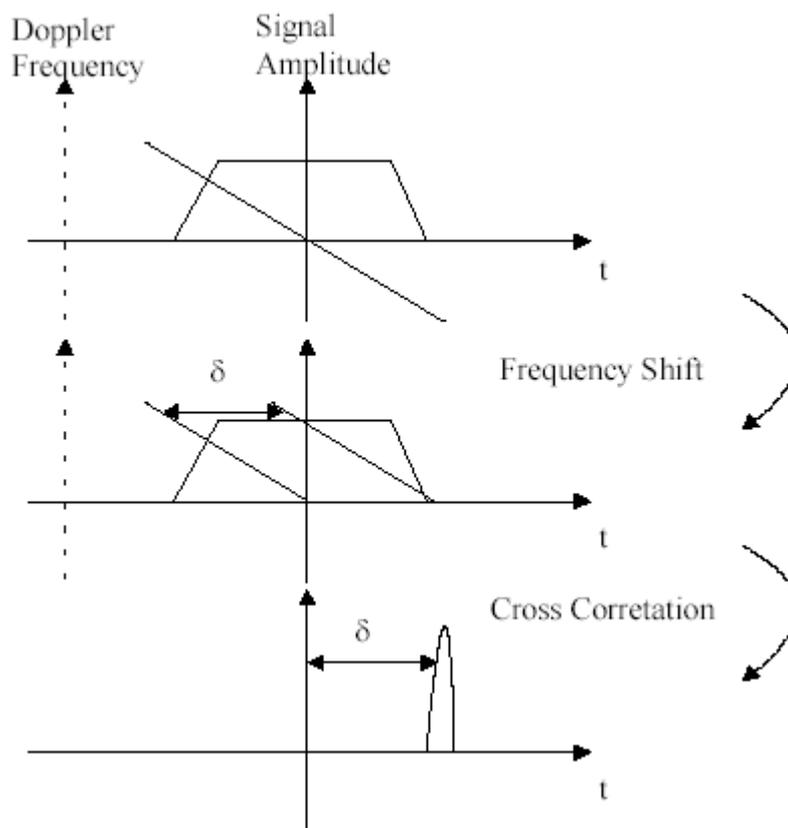


Figura 5.1 : schema di implementazione del SAC algorithm

La Figura 5.1 illustra lo schema di principio per l'implementazione dell'algoritmo SAC.

CALCOLO DEL DOPPLER RATE DAI DATI

Dalla (5.3), e dalla (5.4) si può evidenziare come la velocità nel punto di closest approach si possa esprimere anche come:

$$V(r_0) = \sqrt{r_0 r''|_{s=0}} \quad (5.1)$$

quindi, può essere valutata calcolando il valore di R'' nel punto $s=0$.

Se nel calcolo di $r''(s)$ effettuiamo l'approssimazione di orbita rettilinea, otteniamo nient'altro che la velocità dello spacecraft, come è intuitivo comprendere. Se invece omettiamo questa approssimazione e consideriamo la variazione del range reale, otteniamo un valore più basso dovuto proprio al fatto che il range varia in maniera minore nel caso di orbita circolare.

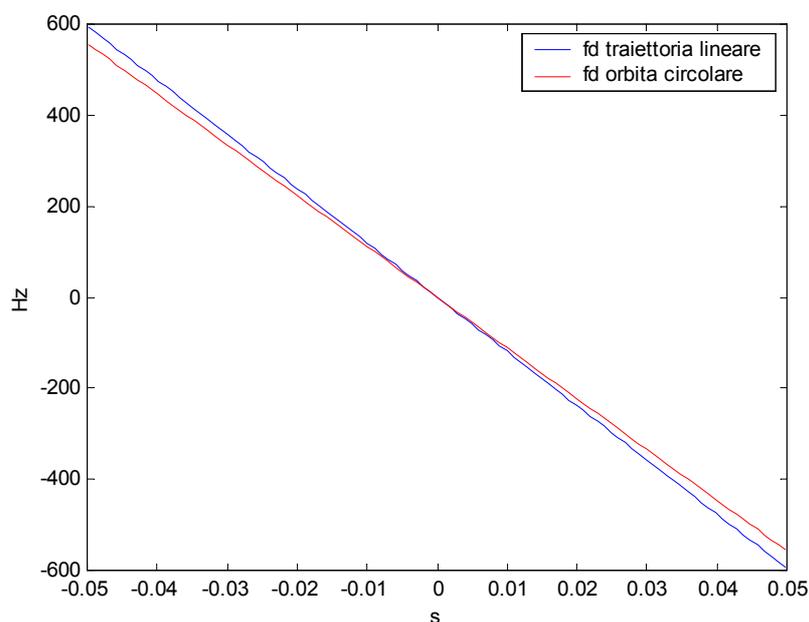


Figura 5.2 : frequenza Doppler calcolata nel caso di traiettoria rettilinea e circolare

Dalla Figura 5.2 si evince che il Doppler rate e la banda Doppler sono più piccoli nel caso dell'orbita circolare.

Calcoliamo dunque il valore del range e le sue derivate.

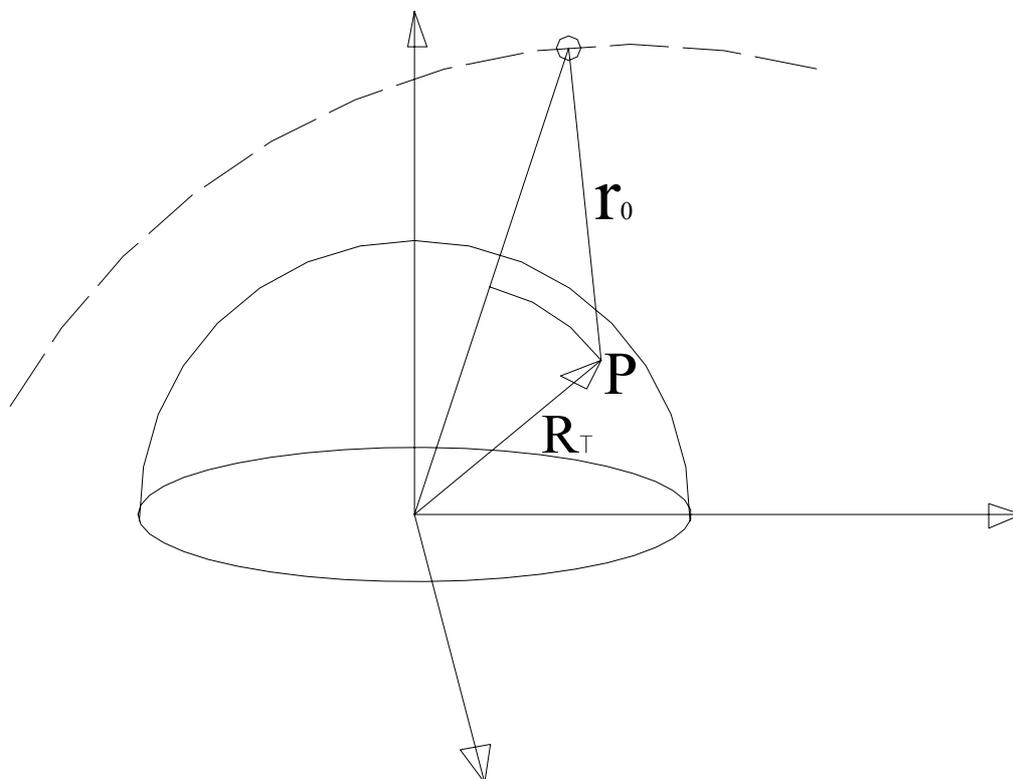


Figura 5.3 : geometria di acquisizione del fenomeno

Dobbiamo calcolare $r''(s)$ a partire dall'espressione analitica di $r(s)$.

$$r(s) = \sqrt{(x(s) - x_p)^2 + (y(s) - y_p)^2 + (z(s) - z_p)^2} \quad (5.2)$$

dove ovviamente (x_p, y_p, z_p) sono le coordinate del punto P intercettato dal beam sulla superficie terrestre e (x, y, z) le coordinate del satellite, variabili col tempo s .

$r(s)$ viene così ad essere scritto come:

$$r(s) = \sqrt{\frac{3}{2}(R_T + r_0)^2 + \left(\frac{R_T^2 - r_0^2 - 2R_T r_0}{2}\right) - (R_T + r_0) \cdot \left[(R_T + r_0) + \sqrt{R_T^2 - r_0^2 - 2R_T r_0}\right] \cos\left(\frac{Vs}{(R_T + r_0)}\right)} \quad (5.3)$$

o più sinteticamente:

$$r(s) = \sqrt{b - c \cdot \cos\left(\frac{Vs}{a}\right)} \quad (5.4)$$

con:

$$a = (R_T + r_0)$$

$$b = \frac{3}{2}(R_T + r_0)^2 + \left(\frac{R_T^2 - r_0^2 - 2R_T r_0}{2}\right)$$

$$c = (R_T + r_0) \cdot \left[(R_T + r_0) + \sqrt{R_T^2 - r_0^2 - 2R_T r_0}\right] \quad (5.5)$$

A questo punto bisogna valutare la derivata prima e seconda della (5.8):

$$r'(s) = \frac{cV}{2a} \cdot \frac{\sin\left(\frac{Vs}{a}\right)}{\sqrt{b - c \cdot \cos\left(\frac{Vs}{a}\right)}} \quad (5.6)$$

$$r''(s) = \frac{V^2 c}{2a^2} \cdot \frac{b \cdot \cos\left(\frac{Vs}{a}\right) - c}{\left[b - c \cdot \cos\left(\frac{Vs}{a}\right)\right]} \quad (5.7)$$

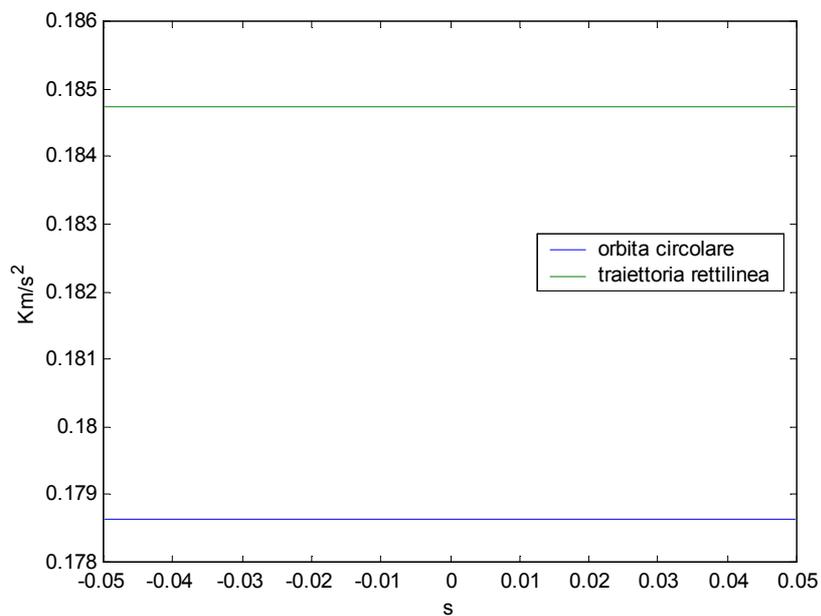


Figura 5.4 : differenza tra r'' per orbita circolare e traiettoria rettilinea

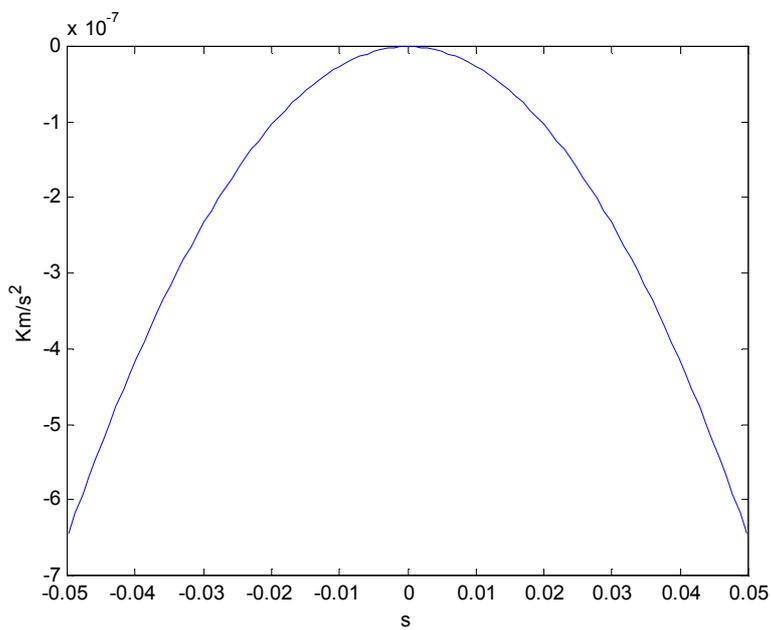


Figura 5.5 : andamento di r'' per orbita circolare

Come si può notare dalla Figura 5.4, nel caso di orbita circolare il valore di r'' si abbassa rispetto al caso da aereo e questo causa una velocità da immettere nel processore minore di quella dello spacecraft. Inoltre, la Figura 5.5 ci testimonia come l'andamento di r'' sia "a campana" e che quindi quello di r' , strettamente legato alla frequenza Doppler, sia ad "esse". Questa cosa, legata all'andamento della r'' , ci testimonia che la Banda Doppler del segnale nel caso di orbita circolare è più bassa, come avevamo anticipato nel paragrafo 5.1 e come si può notare dalla Figura 5.2.

È chiaro che quanto detto si è sempre più valido quanto più il tempo di integrazione è lungo.

Il valore da sostituire nella (5.5) è allora $r''|_{s=0}=0.1786 \text{ (Km/s}^2\text{)}$, ottenendo, in questo modo, una velocità pari a:

$$V(r_0) = \sqrt{(306.4496) \cdot (0.1786)} = 7.398 \text{ (Km/s)} \quad (5.8)$$

che è circa del 2% minore a quella della piattaforma.

La variazione percentuale della velocità effettiva rispetto a quella reale è nel caso in esame relativamente piccola, a causa del basso tempo di integrazione ottenuto con un beamwidth in azimuth molto ristretto e della bassa quota del sistema X-SAR che permette una perdita di risoluzione comunque limitata. Questo è sempre meno vero quanto più la quota del satellite aumenta. Il sistema COSMO – SkyMed, per esempio, ha un'orbita nominale che giace alla quota di 619.6 km e quindi necessita di un'attenzione particolare riguardo a questi problemi. Quello che si può notare dalle prove di focalizzazione è che la variazione di velocità comporta un miglioramento nella qualità dell'immagine che risulta meglio compressa nella direzione di azimuth.

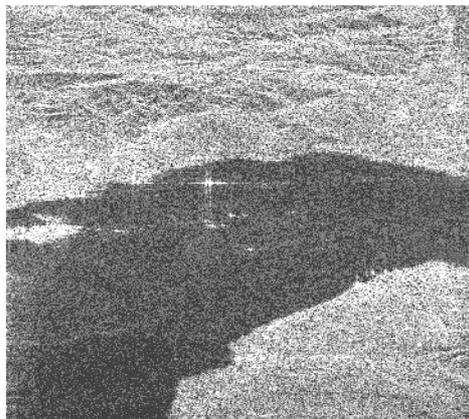


Figura 5.6 : particolare di una delle immagini focalizzata con $V=7.398\text{Km/s}$

Nel parte di immagine scelta in Figura 5.6 è presente un punto riflettente (presumibilmente una nave) che può essere scelto come termine di paragone delle focalizzazioni.

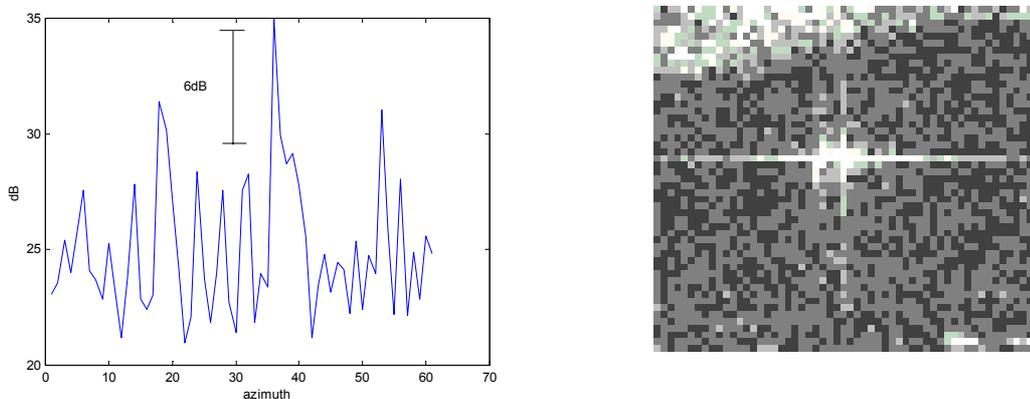


Figura 5.7 : particolare della focalizzazione a $V=7.524\text{Km/s}$, con relativo diagramma 1D dell'intensità lungo l'azimuth

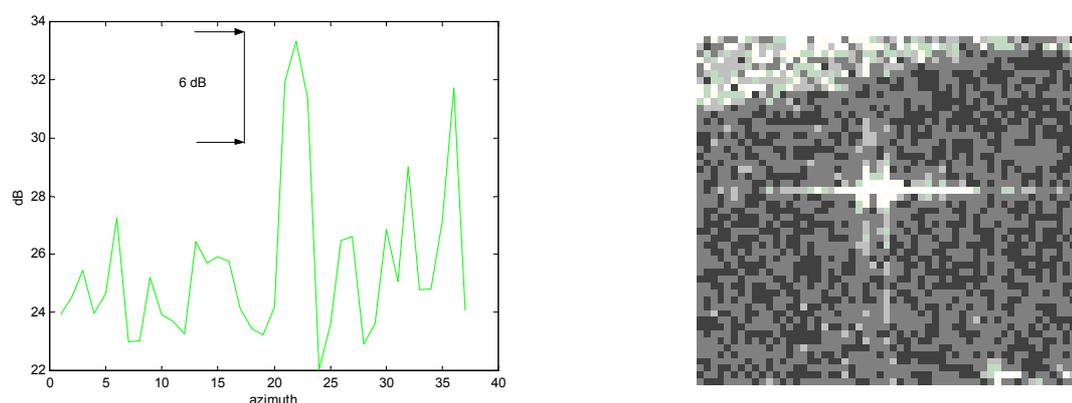


Figura 5.8 : particolare della focalizzazione a $V=7.398\text{Km/s}$, con relativo diagramma 1D dell'intensità lungo l'azimuth

Come può essere visto dall'immagine, operando con tale velocità come parametro (7.388 Km/s), la focalizzazione risulta abbastanza corretta. Sono visibili delle navi nel golfo e la costa è riprodotta fedelmente. Si possono notare le differenze con l'immagine focalizzata con la velocità dello spacecraft nei due diagrammi di Figura 5.7 e Figura 5.8.

Dall'analisi delle immagini rappresentate in Figura 5.7 e Figura 5.8, si nota come il punto scatteratore venga rappresentato meglio nella seconda focalizzazione. In effetti, i dati vengono ad essere compressi con un tempo di integrazione più vicino alla realtà e, quindi, la visualizzazione stessa del punto è più vicina alla realtà. Si nota infatti dal diagramma dell'intensità, che con una velocità effettiva più bassa, il lobo principale della sinc si confonde meno con i lobi secondari rispetto a quando si focalizza con una velocità effettiva pari a quella reale dello spacecraft.

5.4. *Velocità effettiva come velocità del beam*

Come già detto, le ipotesi di *flat Earth* e di traiettoria rettilinea sono alla base degli errori sulla stima della velocità da inserire come parametro nell'algoritmo di CS e quindi sulla successiva stima della Banda Doppler.

Questo perché, sostanzialmente, il CSA agisce sulla storia Doppler del punto scatteratore in un certo intervallo di tempo, detto *Tempo di integrazione* [XXIV].

Il *Tempo di integrazione* è definito come l'intervallo di tempo durante il quale lo scattering point si trova all'interno del beam dell'antenna. Può, quindi, sorgere il dubbio che quello che a noi interessa è la velocità del beam, e non quella dello spacecraft.

Nel caso da aereo, le cose risultano notevolmente semplificate dalla geometria del fenomeno. Infatti, data la quota non elevata, le due ipotesi di *flat Earth* e traiettoria rettilinea, permettono di confondere la velocità dell'aeromobile con la velocità del suo footprint. Quindi, nel caso da aereo, la velocità effettiva da immettere è giustamente V_{aereo} e possiamo calcolarci *Range*, *tempo di integrazione*, *Banda Doppler*, e *risoluzione* abbastanza facilmente dalle equazioni note:

$$r(s) = r_0 + \frac{s^2}{2r_0} \quad (5.1)$$

$$T_{aereo} = \frac{r_0 \beta}{V_{aereo}} \quad (5.2)$$

$$B_{aereo} = \frac{2\beta V_{aereo}}{\lambda} \quad (5.3)$$

$$\rho_{aereo} = \frac{\lambda}{2\beta} \quad (5.4)$$

Di queste equazioni è opportuno considerare le equivalenti nel caso da satellite.

È ovvio infatti che queste grandezze varieranno nel secondo caso e che questa variazione comporterà differenze nella focalizzazione.

Secondo il Raney [XXI], [XXVI] le grandezze in gioco diventano:

$$r(s) = r_0 + \frac{V_b}{V_s} \frac{s^2}{2r_0} \quad (5.5)$$

$$T_s = \frac{r_0\beta}{V_b} \quad (5.6)$$

$$B_s = \frac{2\beta V_s}{\lambda} \quad (5.7)$$

$$\rho_s = \frac{V_b}{V_s} \frac{\lambda}{2\beta} \quad (5.8)$$

Come si può notare dalle equazioni precedenti, un ruolo fondamentale è occupato dal rapporto $\frac{V_b}{V_s}$ che interviene prima di tutto nell'espressione del range, oltre che dalla semplice velocità del beam. Il *tempo di integrazione* è

invece dipendente dalla velocità del beam a terra, come scaturisce proprio dalla sua definizione.

La *Banda Doppler* è invece funzione della velocità dello spacecraft, cosa che porta ad avere un *Doppler rate* dipendente dalle due velocità:

$$|f_r| = \frac{B}{T} = \frac{2V_s V_b}{\lambda r_0} \quad (5.9)$$

La *risoluzione* è anch'essa dipendente dal rapporto $\frac{V_b}{V_s}$, in quanto rapporto tra la larghezza del beam in azimuth e il prodotto tra *tempo di integrazione* e *Banda Doppler*.

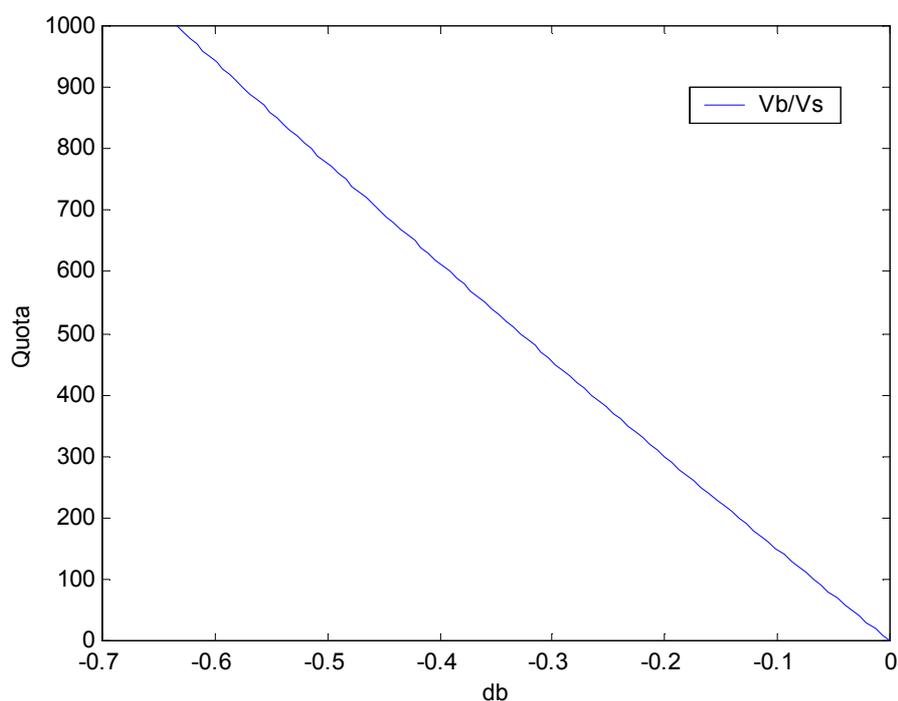


Figura 5.1 : $\frac{V_b}{V_s}$ espresso in decibel in funzione della quota

Come si può vedere dalla Figura 5.1 e come avevamo già evidenziato in altre parti del lavoro, l'effetto è sempre più grande quanto più aumenta la quota.

Gli errori che vengono commessi non riguardano solo la focalizzazione dell'immagine, ma anche le fasi di calibrazione o comunque quelle in cui si rende necessaria un'analisi quantitativa della situazione. Quindi, il risultato finale è inficiato da una somma di errori.

Vediamo come si può ricavare la storia Doppler partendo dalle relazioni (5.17) e seguenti.

La fase del segnale corrispondente all'equazione che regola la variazione del range è:

$$\varphi(s) = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(r_0 + V_b V_s \frac{s^2}{2r_0} \right) \quad (5.10)$$

La storia doppler del punto scatteratore può essere trovata derivando la (5.10), e quindi:

$$f_D(s) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(s) = -\frac{2}{\lambda} V_b V_s \frac{s}{r_0} \quad (5.11)$$

ed è quindi giustificata la (5.19), ricordando la (5.18) e che la Banda Doppler è espressa da:

$$B = |f_D(T)| \quad (5.12)$$

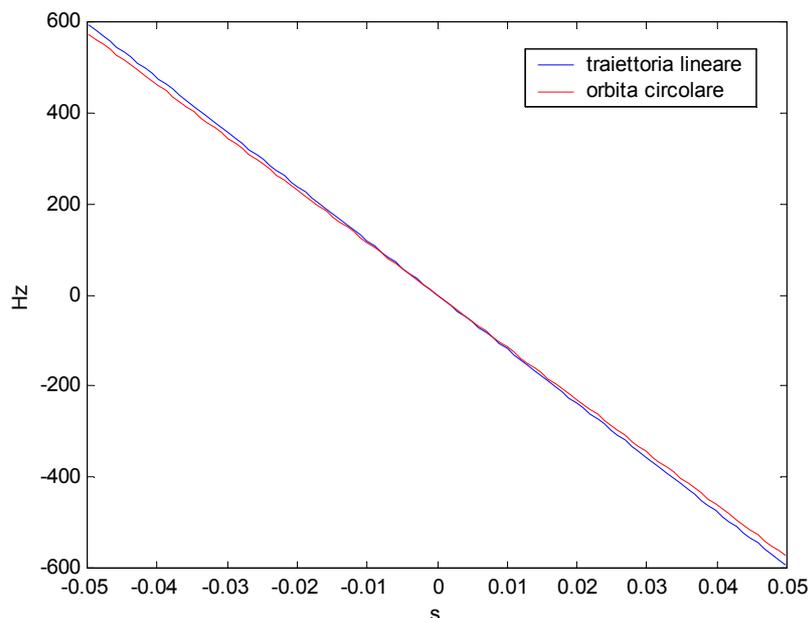


Figura 5.2 : frequenza Doppler calcolata nel caso di traiettoria rettilinea e tramite la (5.24)

La Figura 5.11 ci mostra come la focalizzazione migliori utilizzando un approccio differente al problema.

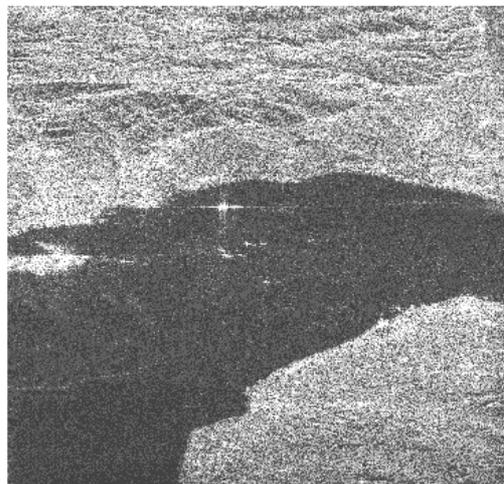
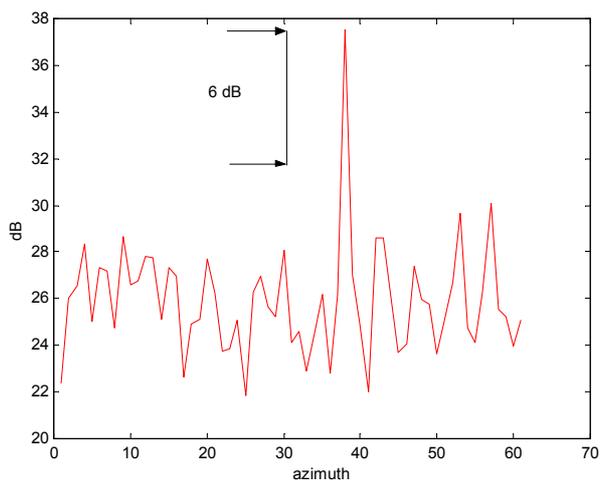


Figura 5.3 : particolare di una delle immagini focalizzata con $V=7.278\text{Km/s}$

La sinc rappresentata nel diagramma 1D dell'intensità evidenzia come nei 6 dB intervenga solo il lobo principale.

6. ANALISI DELLE IMMAGINI

6.1. Introduzione

Lo studio effettuato ha portato ad una focalizzazione ottimale dei dati. Gli errori dovuti alla Range Migration sono stati corretti tramite l'algoritmo di Chirp Scaling, e tramite la correzione della velocità in base alla teoria di Raney è stata opportunamente operata la compressione dei dati in azimuth.

L'uso delle immagini SAR è molto ampio, e va dalla stesura di mappe al controllo ambientale.

Ma cosa rappresenta effettivamente un'immagine SAR?

Un'immagine SAR è il risultato della risposta delle superfici illuminate dal beam ai segnali emessi dall'antenna. Ogni oggetto ha un suo modo di rispondere, in base alla rugosità della sua superficie che ne varia la riflessione del raggio.



Figura 6.1 : risposta delle diverse superfici al fascio radar (a),(b),(c),(d)

In Figura 6.1 sono qualitativamente descritte le varie risposte delle superfici al fascio radar. Chiaramente, se il fascio viene riflesso come in (a), allora l'energia scatterata verso l'antenna è zero. Se, al contrario, l'oggetto avesse una forma tale da permettere uno scattering come in (d), allora l'energia che tornerebbe all'antenna sarebbe molto più alta.

Nell'immagine SAR, i toni più scuri testimoniano un piccolo scattering, mentre quelli più chiari uno grande.

È da dire, inoltre, che lo scattering è anche influenzato dalla banda del segnale. Infatti, la banda del segnale ne caratterizza la penetrabilità, e quindi, come si può intuire, anche la riflessione. Questo perché, ovviamente, segnali a banda diversa subiscono uno scattering diverso.

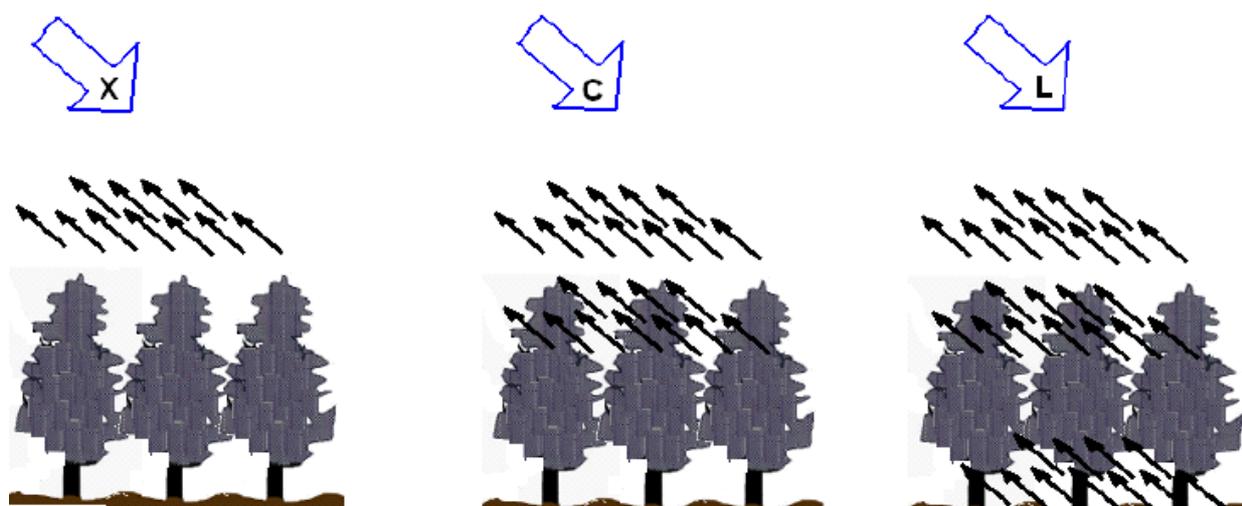


Figura 6.2 : penetrazione delle differenti bande del segnale

La Figura 6.2 illustra ciò che è stato appena detto.

La riflessione, come è facilmente intuibile, non dipende sempre solo direttamente dall'oggetto colpito, ma subisce anche l'influenza di tutto l'ambiente circostante come si può notare in Figura 6.3. Questo tipo di fenomeno è chiamato *riflessione volumetrica*.

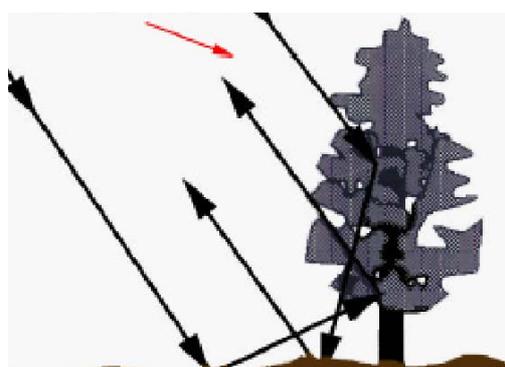


Figura 6.3 : riflessione volumetrica

Il radar riesce a riconoscere a che distanza si trova un oggetto dal tempo di ritorno del beam. Quindi, chiaramente, riconoscerà alla stessa distanza tutti i targets che si trovano su una sfera di raggio r (range). È quindi ovvio che se

l'inclinazione dell'oggetto a terra è maggiore dell'angolo di off-nadir (angolo di vista laterale), allora il suo ritorno sarà precedente a quello di un oggetto a terra. Questo fenomeno di aliasing comporta un cosiddetto lay-over. Quanto più il fascio è inclinato, tanto più questo fenomeno è pronunciato.

Altro tipo di fenomeno si incontra quando invece la superficie ha un'inclinazione concorde a quella del beam, in quanto il segnale non può essere riflesso verso l'antenna. Questo fenomeno crea delle zone di ombra in cui non si hanno informazioni sull'immagine (vedi per esempio le bocche dell'Etna in Figura 6.17).

Per quanto riguarda la calibrazione dei radar, vengono utilizzati dei corner reflectors, che sono delle superfici metalliche (che quindi danno luogo ad una riflessione molto concentrata) costruite in modo da riflettere la quasi totalità del fascio.

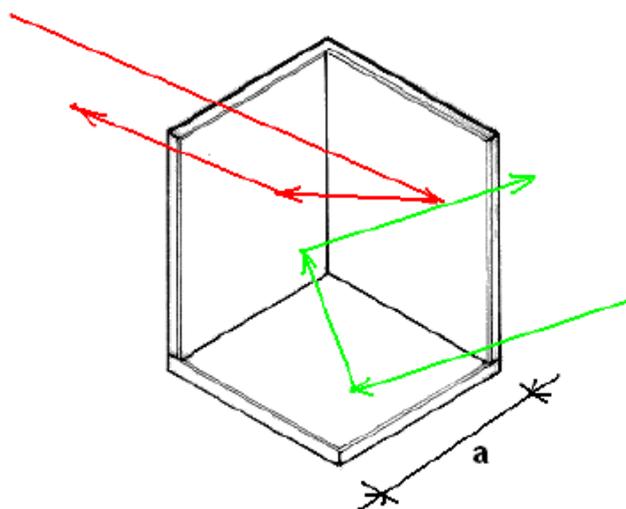


Figura 6.4 : schema di corner reflector



Figura 6.5 : corner reflector

Bisogna però precisare che nel caso di SAR la riflessione è di tipo dinamico e non statico, come nel caso di RAR. Questo perché il SAR analizza lo stesso target da più punti di vista e, quindi, riceve dallo stesso target scattering differenti e ne fa una sorta di media.

6.2. Immagini da X-SAR

Possiamo ora iniziare un'analisi qualitativa delle immagini ottenute cercando di comprendere a cosa corrispondono determinati tipi di risposta.

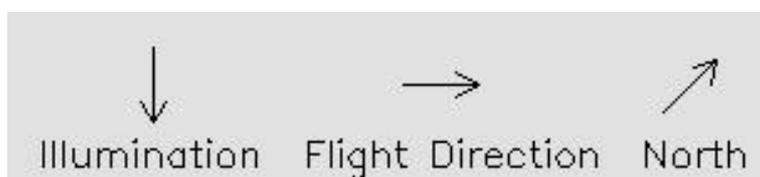
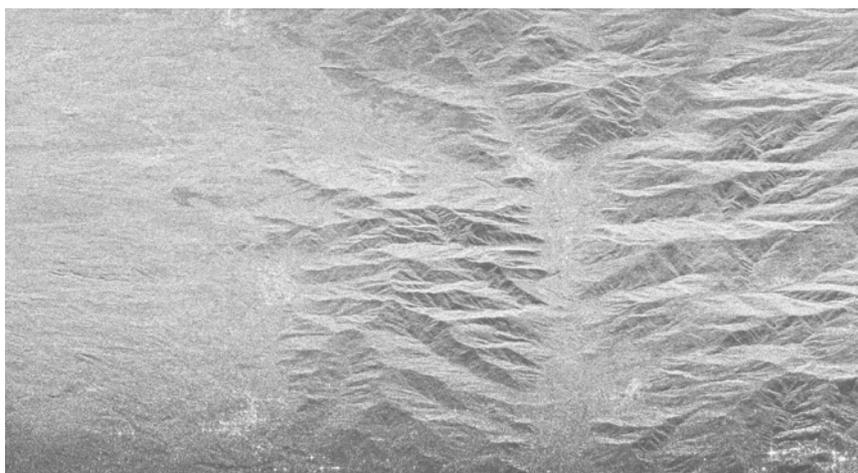


Figura 6.1 : immagine Single Look

Ricordiamo che lo shuttle ha un'orbita inclinata di 43° rispetto all'orizzontale, e che quindi, la direzione del nord è quella indicata in Figura 6.1.

Come si può vedere dalla Figura 6.1, la prima parte dell'immagine rappresenta la valle ai piedi dell'Etna e la zona dei Monti Peloritani che va da Taormina a Messina.

Nella Figura 6.2 è ben riconoscibile il Fiume Alcantara che sfocia nei pressi di Taormina, di cui si possono apprezzare zone con fondale più o meno profondo, ovvero zone più o meno scure.

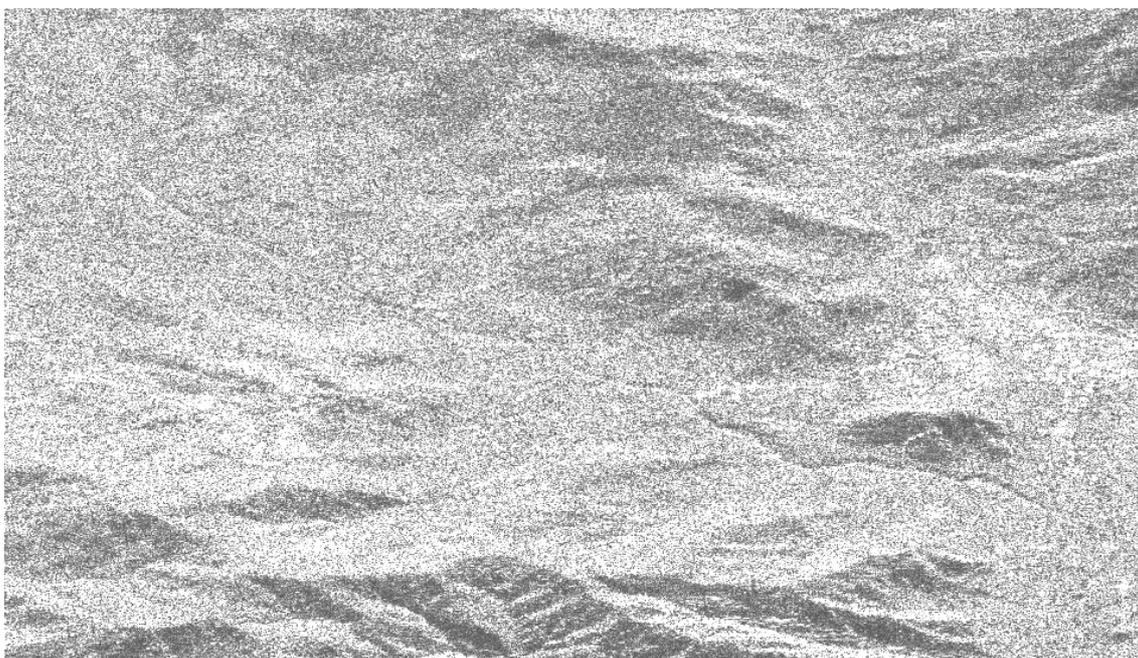


Figura 6.2 : Fiume Alcantara

Nell'immagine rappresentata in Figura 6.3 : immagine Single Looksi inizia a scorgere la costa e alcuni paesi sul mare.

Figura 6.3 : immagine Single Look

Il SAR permette addirittura di poter riconoscere moti ondosi e mare agitato. Infatti, la risposta ad una zona di mare calmo è praticamente nulla, in quanto la superficie di mare si comporta da specchio per il fascio emesso dal radar e non consente alcun ritorno di energia all'antenna. Se è presente un moto ondoso allora parte del fascio di ritorno avrà la direzione necessaria per impattare l'antenna e quindi quella zona risponderà con un puntino luminoso sull'immagine (Figura 6.4 e Figura 6.5).

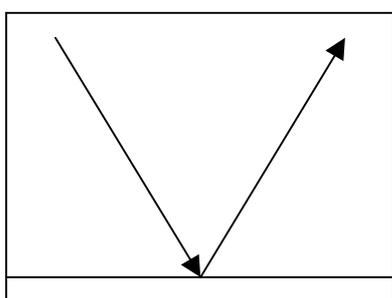


Figura 6.4 : risposta del mare calmo

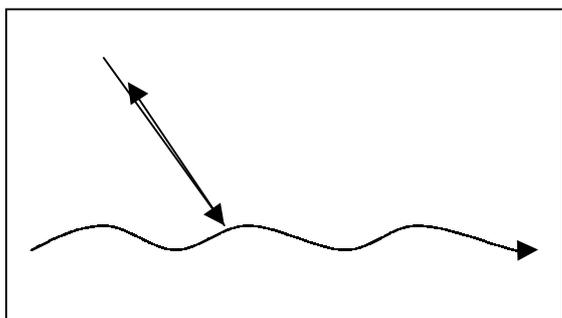


Figura 6.5 : risposta del mare agitato

Nella Figura 6.6 si nota la zona di mare mosso in prossimità della costa. Si possono inoltre notare i paesi costieri e quello che sembra essere un torrente.

Figura 6.6 : moto ondoso

Andiamo a considerare lo Stretto di Messina che è rappresentato in Figura 6.7.

Figura 6.7 : Stretto di Messina

Questa parte dell'immagine è tra le più interessanti, in quanto in essa sono visibili molti particolari che necessitano una spiegazione.

Per esempio, come si può vedere nel particolare di Figura 6.8, si riconosce il porto di Messina. Il contorno frastagliato è causato dal mare agitato, dalle imbarcazioni presenti e dalla probabile presenza di edifici e

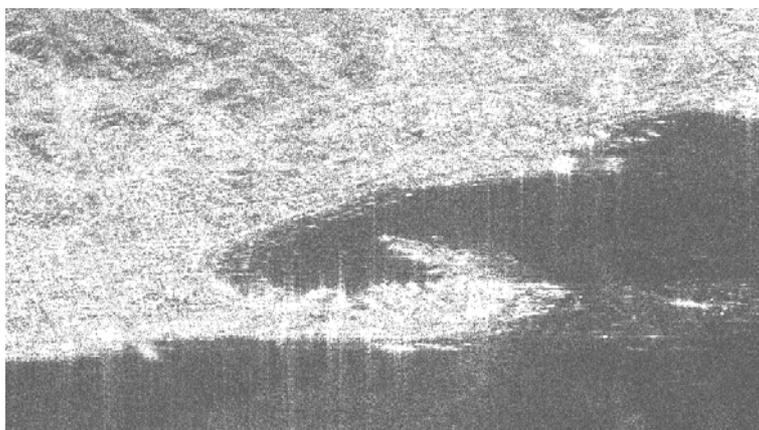


Figura 6.8 : porto di Messina

containers metallici disposti in maniera tale da riflettere il segnale di partenza verso l'antenna.

Si può confrontare la Figura 6.8 con la cartina di Figura 6.9 in cui è rappresentato il porto con la sua forma particolare.

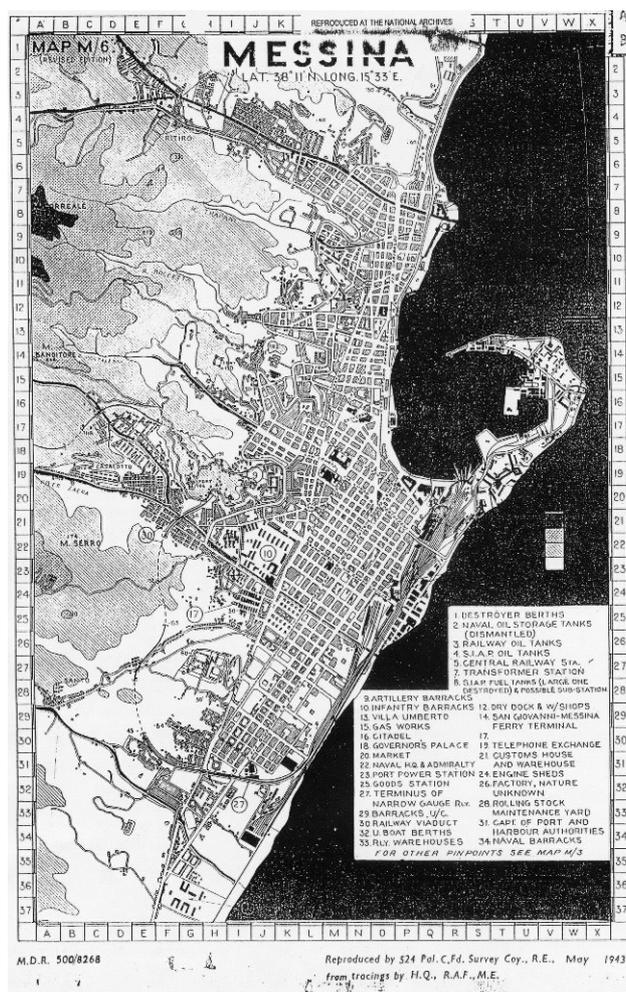


Figura 6.9 : cartina del porto di Messina

Nella Figura 6.7 e nella Figura 6.8, sono presenti delle navi rappresentate da punti luminosi. Questo perché la struttura delle navi, spigolosa e di materiale metallico, consente al fascio di essere riflesso verso l'antenna. Inoltre, lo sfondo praticamente nero dovuto al mare fa risaltare questo effetto. Alcune navi sono oltretutto dotate di corner reflectors e quindi ecco spiegata la grande "luminosità" di alcuni punti.

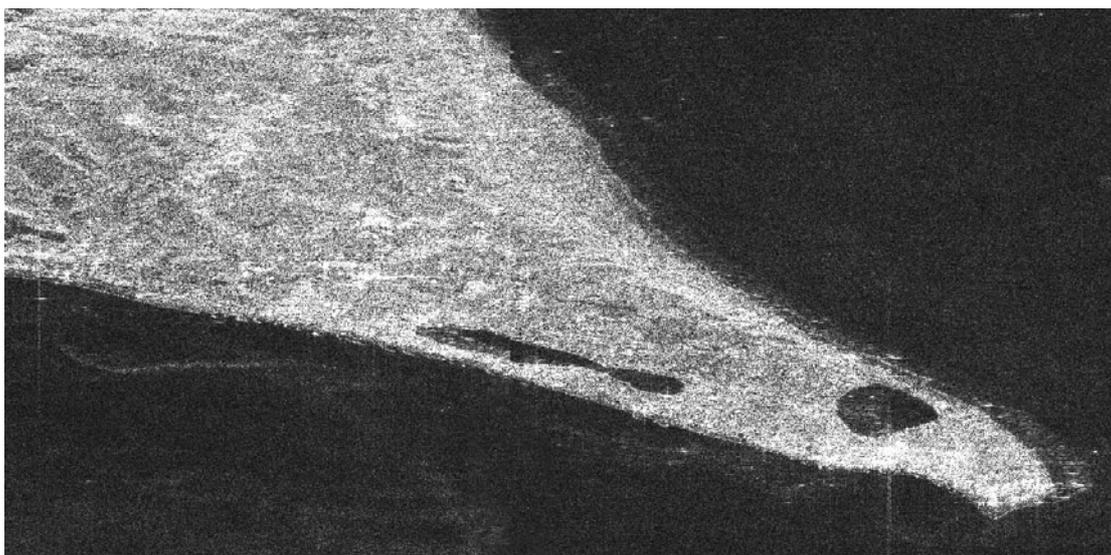


Figura 6.10 : particolare dello Stretto di Messina

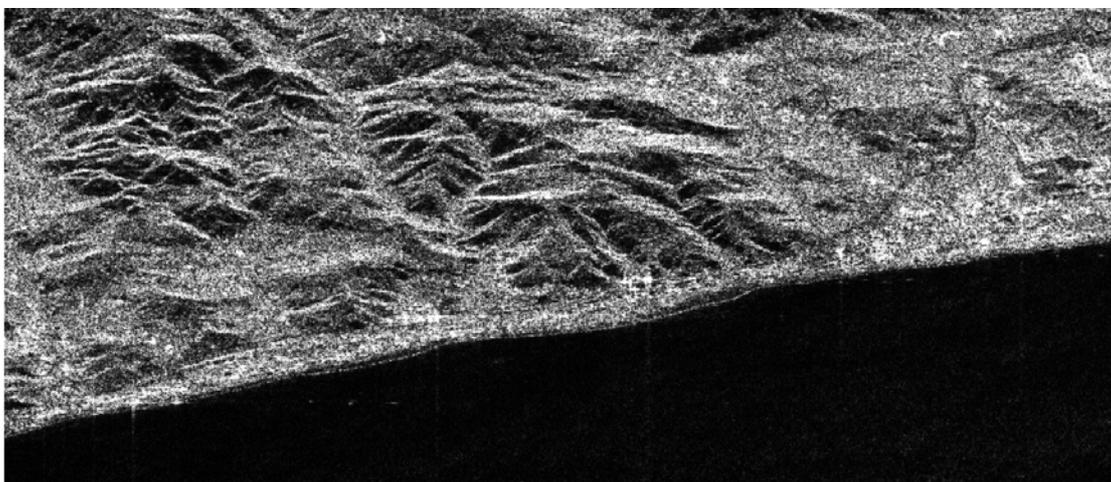


Figura 6.11 : superstrada e paesi costieri

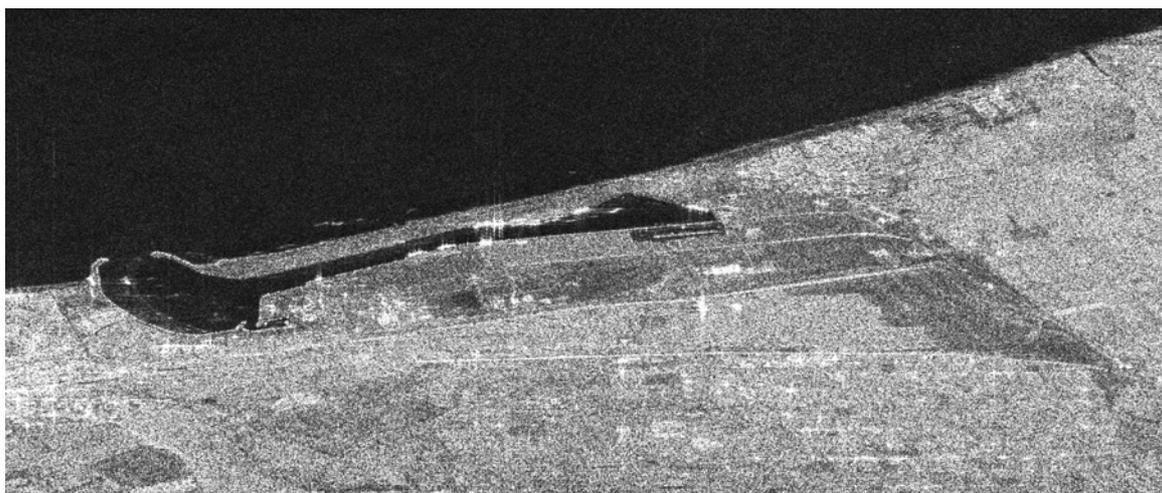


Figura 6.12 : porto di San Ferdinando

Questa figura del porto di San Ferdinando (Figura 6.12) testimonia l'alta risoluzione dei dati e l'ottima compressione operata.



Figura 6.13 : foto aerea del porto di San Ferdinando

Si riesce a vedere, a parte la forma particolare del porto, anche la presenza di navi ormeggiate, di strade costeggianti il porto, di containers ed edifici portuali, di un fiume a nord del porto e della cittadina di San Ferdinando.

Inoltre, si nota la diversità tra la zona dei campi coltivati e quella boschiva: i campi coltivati hanno una componente d'acqua molto maggiore rispetto a quella dei boschi, che quindi risultano più chiari.

Si può confrontare l'immagine radar con la foto in Figura 6.13.

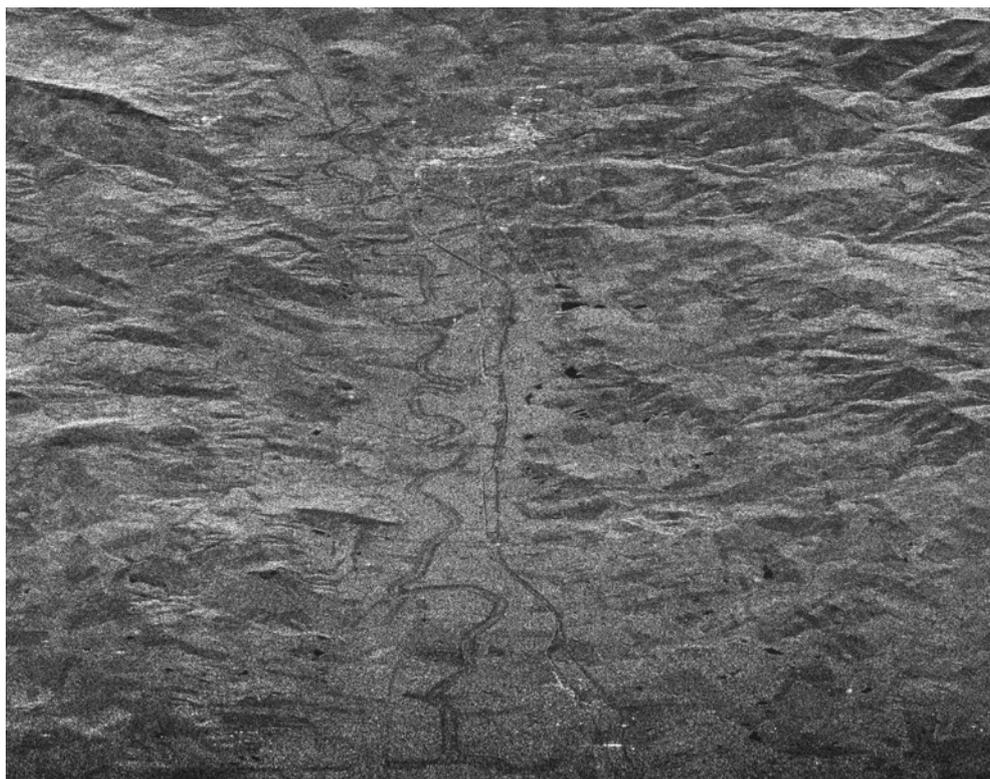


Figura 6.14 : fiume Dittaino e autostrada

In Figura 6.14 è visibile un'autostrada che parte dalla città di Catenanuova, affiancata dal fiume Dittaino. Si notano anche macchioline nere, che possono essere o campi irrigati o piccoli laghetti.

Nelle immagini seguenti sono rappresentati altri particolari focalizzati dal CiFus.

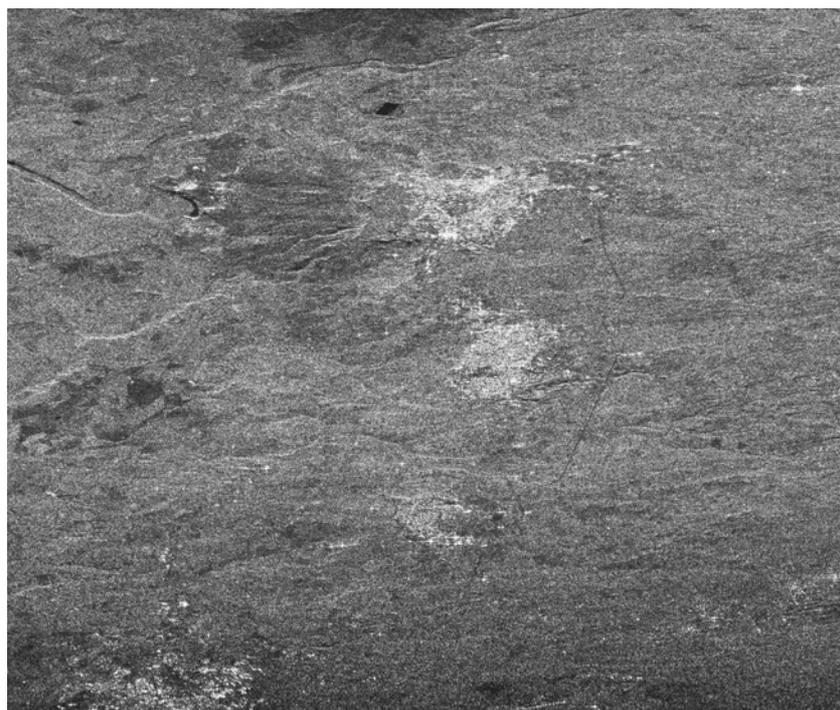


Figura 6.15 : città ai piedi dell'Etna



Figura 6.16 : focalizzazione di un lago

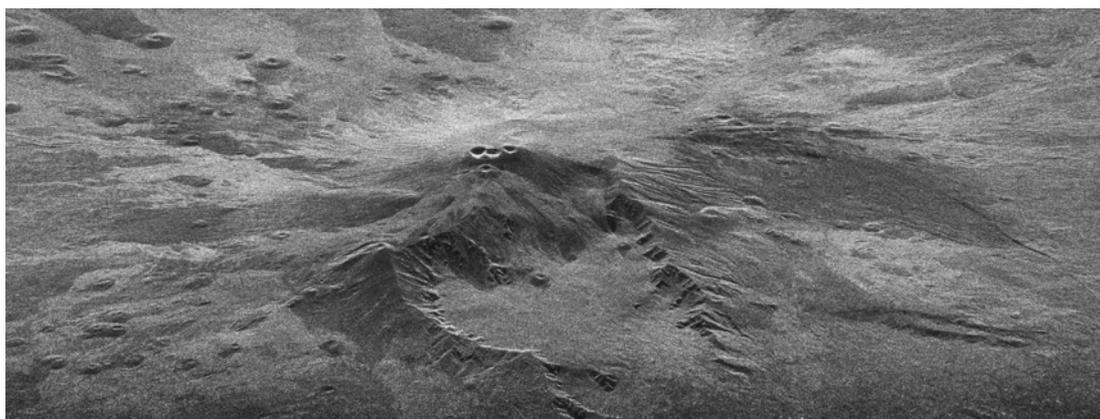


Figura 6.17 : Mt Etna

In quest'ultima figura è rappresentato il Monte Etna con le sue bocche.

6.3. Errori dovuti alla variazione di alcuni parametri

Abbiamo visto come l'adattamento della velocità nei parametri di focalizzazione ha portato ad un risultato ottimale. Sono da valutare quali sono gli errori in cui si incorre quando si immettono valori errati dei parametri di focalizzazione. In un certo senso, quindi, vogliamo valutare la robustezza dell'algoritmo di Chirp Scaling. I parametri che verranno considerati sono la *velocità* e il *range gate delay*.

6.3.1. *Variatione della velocità*

In questo paragrafo si vuole considerare gli effetti di una valutazione errata della velocità sulla focalizzazione dell'immagine.

Nell'immagine di è stata utilizzata una velocità quadrupla rispetto a quella reale, ed è chiaramente peggiorata la compressione in azimuth.

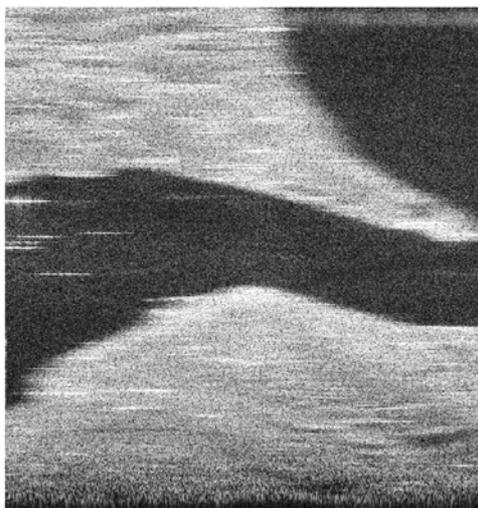


Figura 6.1 : focalizzazione con una velocità di 30000m/s

Infatti, il processore ha utilizzato un *Tempo di integrazione* dato dalla (1.14), e nel caso particolare $T_i^* = r_0 \lambda / V^* L$, che è un quarto di quello effettivo. Quindi, la compressione viene fatta con un filtro errato in quanto la Banda Doppler risulta quadruplicata rispetto a quella reale, compromettendo la perfetta focalizzazione (vedi (1.15) e (4.22)).

Vediamo utilizzando una velocità più piccola cosa succede.

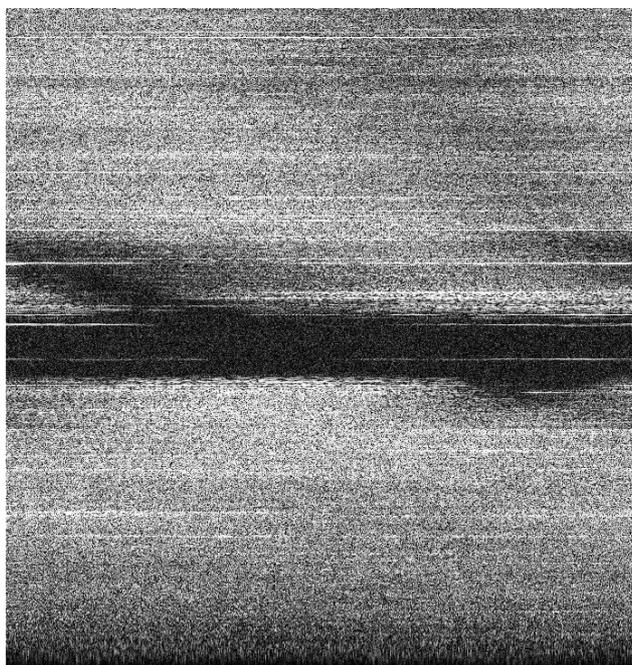


Figura 6.2 : focalizzazione con una velocità di 3000m/s

Con una velocità più bassa di quella effettiva si ha una completa perdita dell'informazione, come si può vedere dalla Figura 6.2.

Questo ci testimonia che il Chirp Scaling è più robusto a variazioni di velocità positive (cioè verso velocità maggiori) che negative. In pratica, il CSA tollera meglio un stima della velocità errata in eccesso rispetto ad una errata in difetto. Questo ci spiega anche perché gli errori dovuti alle ipotesi di flat earth e di traiettoria rettilinea, che prevedevano una velocità maggiore (di poco) di quella effettiva, non hanno comportato errori eccessivamente grandi nella focalizzazione (cap. 5).

6.3.2. *Variatione del range gate delay*

Il range gate delay è il tempo di arrivo del primo segnale dall'istante in cui l'antenna è pronta a riceverne e quindi, ci fornisce una stima del near range e tramite la PRF, della posizione di ogni punto dell'immagine.

Anche questo è un parametro che, se non fornito nel leader dei dati, va stimato, come la velocità, e quindi può essere oggetto di errore.

Vediamo come risponde il CSA ad una sua stima errata.

È stato provato il CiFus con un valore di *range gate delay* pari a 0.005, che è il doppio di quello effettivo.



Figura 6.1 : focalizzazione con un range gate delay di 0.005sec

La focalizzazione errata è dovuta al fatto che il processore "sbaglia" ad individuare la posizione dei punti a terra e considera un r_0 maggiore di quello reale, compromettendo il filtro in azimuth per la stessa ragione discussa nel paragrafo precedente. Inoltre, il valore di r_0 entra in altri passaggi del CSA, e non solo nella banda Doppler come per la velocità, cosa che ne rende ancora maggiore l'effetto dell'errore.

Vediamo cosa succede per una diminuzione del *range gate delay*.

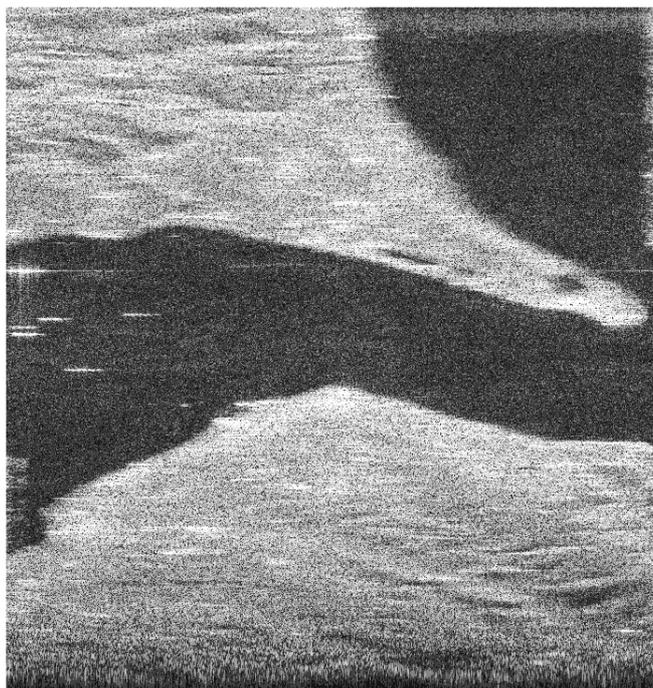


Figura 6.2 : focalizzazione con un range gate delay di 0.001sec

Come si può notare dalla Figura 6.2, l'algoritmo risponde bene ad un errore in difetto del range gate delay. Il valore utilizzato è la metà di quello reale, ma la situazione rispetto alla prova precedente è nettamente migliorata.

7. CONCLUSIONI

L'analisi delle immagini ha portato a riconoscere la bontà dell'algoritmo utilizzato e delle correzioni per dati da satellite apportate allo stesso, che hanno oltremodo migliorato la focalizzazione.

Come visto nel capitolo 5. per la focalizzazione di dati da satellite è necessario impostare un discorso sulle velocità in gioco in quanto la differente geometria causa la variazione di alcuni parametri del problema.

Sono stati affrontati due approcci al problema, entrambi efficaci, ma nella scelta della velocità poi realmente immessa nel focalizzatore ha influito in grande misura la maggiore generalità del secondo. Infatti, la similarità dei risultati è frutto di una serie di circostanze specifiche quali la quota del satellite o il piccolo angolo di azimuth del beam. L'approccio suggerito dal Raney è di formulazione più generale e tiene in considerazione la reale traiettoria della piattaforma e il reale tempo di integrazione.

La scelta del CSA come algoritmo di focalizzazione per il tipo di dati in possesso è avvalorata dai risultati ottenuti che testimoniano l'adattabilità dell'algoritmo a casi da satellite, sebbene esso nasca per dati da aereo.

In effetti, la presupposta linearità dell'andamento di una grandezza come il Doppler autorizza a studiare il fenomeno in un solo punto dell'intervallo di integrazione (il punto di closest approach) sebbene questo non sia esattamente giusto.

La comunque soddisfacente qualità delle immagini non "trattate" è scaturita sia dal fatto che, come visto negli ultimi due paragrafi, il CSA risponde bene agli errori sulla stima di alcuni parametri (tra i quali proprio la velocità che è stata oggetto delle dissertazioni nel capitolo 5), sia perché alcune condizioni operative della missione considerata (per esempio quota e banda del segnale) erano comunque favorevoli alla buona riuscita della focalizzazione.

In ogni modo, lo studio effettuato ha ottimizzato il CSA e lo ha reso operativo per ogni tipo di dati, alle diverse quote e a diverse bande del segnale.

L'adozione del CSA ha velocizzato la focalizzazione ed ha ottimizzato i risultati per orbite satellitari. Infatti, il completo adeguamento della fase del segnale ha neutralizzato il problema della Range Migration ed ha velocizzato il sistema di processing dei dati grazie alle operazioni effettuate nel dominio di Fourier.

Inoltre, lo studio accennato sugli errori di focalizzazione dovuti alla stima errata di alcuni parametri (velocità e range gate delay) ci ha fornito una base con cui affrontare eventuali problemi che potrebbero capitare in successive prove e nella successiva simulazione della missione COSMO-SkyMed.

La focalizzazione operata di due immagini in parte sovrapponibili lascia spazio ad una successiva analisi interferometrica per la creazione di un DEM (Digital Elevation Model) e quindi per l'ottenimento di informazioni più approfondite sulla zona in oggetto.

È stato mostrato come la scelta del CSA con le correzioni apportate secondo l'approccio di Raney porti ad una focalizzazione ottimale, come si può vedere dalle immagini allegate.

BIBLIOGRAFIA

- [I] Skolnik, "Introduction to Radars Systems".**
- [II] S. Ponte, "Sistemi Aerospaziali di Telerilevamento" III-43/III-49.**
- [III] M. Massironi, "Il telerilevamento satellitare - Sensori attivi ed Envisat"**
- [IV] G. Fornaro, F. Serafino, F. Soldovieri, "Focalizzazione SAR 3-D con configurazione multipassaggio", Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), Consiglio Nazionale delle Ricerche.**
- [V] J.C. Curlander and R.N. McDonough, "Synthetic Aperture Radar, Systems & Signal Processing", Wiley-IntersciencePub,1991.**
- [VI] Elachi, "Introduction to the physics and techniques of Remote Sensing"**
- [VII] John C. Curlander, Robert N. McDonough, "Synthetic aperture radar", Wiley Interscience, 1990 .**
- [VIII] G. Franceschetti, R. Lanari, "Synthetic aperture radar processing", CRC Press, 1999 .**
- [IX] R. Bamler, B. Schattler, "SAR Data Acquisition and Image formation" .**
- [X] R. K. Raney, H. Runge, R. Bamler, I. G. Cumming, F. H. Wong, "Precision SAR Processing Using Chirp Scaling", IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, Jul. 1994.**
- [XI] F. Caltagirone, G. Angino, A. Coletta, F. Impagnatiello, A. Gallon, "COSMO-SmyMed program: status and perspectives", Alenia Spazio S.p.A., ASI.**

[XII] Antonella Albanese, Leonardo Mazzini, Claudio Galeazzi, Edmondo Scorzafava, "COSMO-SkyMed constellation maintenance using POD and CON on-board functions", Alenia Spazio S.p.A., ASI U.O. Sistema COSMO-SkyMed.

[XIII] F. Impagnatiello, R. Bretoni, F. Caltagirone, "The SkyMed/COSMO system: SAR payload characteristics", Alenia Aerospazio Space Division Remote Sensing Engineering.

[XIV] G. R. Verdone, R. Viggiano, E. Lopinto, G. Millillo, L. Candela, N. Lombardi, V. Giannini, "Processing Algorithms for COSMO-SkyMed SAR Sensor", Telespazio S.p.A., ASI, Consorzio Innova, Digimat.

[XV] G. Salzillo, G. Alberti, A. Moccia, "Algoritmi per la produzione di immagini", CO.R.I.S.T.A.

[XVI] L. Citarella, G. Alberti, A. Moccia, "CIFUS, formato dati e prodotti", CO.R.I.S.T.A

[XVII] G. Alberti, R. Fusco, A. Moccia, "CIFUS, manuale d'uso e software di elaborazione", CO.R.I.S.T.A.

[XVIII] A. Moreira, R. Scheiber, "Doppler parameter estimation algorithms for SAR processing with the chirp scaling approach", Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94.

[XIX] J. Dan, "A New Frequency Domain Autofocus", Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1991. IGARSS '91.

[XX] R. Keith Raney, Fellow, IEEE, H. Runge, R. Bamler, G. Cumming, H. Wong, "Precision SAR processing using chirp scaling", IEEE transaction on geoscience and remote sensing.

[XXI] R. K. Raney, "Doppler Properties of Radars in Circular Orbits", Int. J. Remote Sensing.

[XXII] F. Li, D. N. Help, J. C. Curlander, C. Wu, "Doppler Parameters Estimation for Spaceborne Synthetic Aperture Radars", IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, Jan 1995.

[XXIII] F. Wong, I. G. Cumming, "A Combined SAR Doppler Centroid Estimation Scheme Based upon Signal Phase", IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, May 1996 .

[XXIV] S. N. Madsen, "Estimating the Doppler Centroid of SAR Data", IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, Mar 1989. [XXV] R. K. Raney, "Doppler properties of radar in circular orbits", Int. J. Remote Sensing, 1986.

[XXVI] R. K. Raney, "Considerations for SAR image quantification unique to orbital system", IEEE transaction on geoscience and remote sensing.

[XXVII] Ding Chibiao, Peng Hailiang, Wu Yirong, Jia Hongjiang, "Large beamwidth spaceborn SAR processing using chirp scaling", Institute of electronics, Chinese Academy of sciences.

[XXVIII] "SAC algorithm"

RINGRAZIAMENTI